

ИНИЦИИРОВАНИЕ ОБРУШЕНИЯ СКЛОНА СЕЙСМИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ ОТ РАЗНЫХ ИСТОЧНИКОВ

© 2021 г. Г. Г. Кочарян¹, А. Н. Беседина¹, С. Б. Кишкина¹*, Д. В. Павлов¹,
З. З. Шарафиев¹, П. А. Каменев²

¹Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия

*E-mail: Svetlank@gmail.com

Поступила в редакцию 12.03.2021 г.

После доработки 28.03.2021 г.

Принята к публикации 01.04.2021 г.

В статье приведены результаты лабораторных исследований критериев обрушения склонов под воздействием импульсных динамических нагрузок в диапазоне максимальных скоростей смещения грунта (PGV) от 0.003 до 1.3 м/с и ускорений (PGA) – от 0.01 до более чем 170g. Установлены критические значения параметров динамических воздействий на модельные склоны. Значение минимального пикового ускорения, при котором наблюдалось образование оползня, значительно превышает величину критического ускорения, рассчитанную на основе квазистатического подхода. В то же время, при близких коэффициентах статической устойчивости, критические параметры для подводных и надводных склонов сопоставимы, несмотря на то, что характер движения грунта после инициирования в опытах под водой сильно отличается от наземных склонов. Показано, что существуют минимальные величины PGA и PGV , при которых наблюдаются необратимые деформации склона. Если ускорение ниже минимального значения PGA_{min} , то значимых необратимых деформаций не наблюдается при любых значениях PGV . Если величина массовой скорости ниже PGV_{min} , то при $PGA > PGA_{min}$ наблюдаются необратимые деформации, так что при повторном воздействии склон может быть разрушен. С использованием приближения Ньюмарка выполнены расчеты устойчивости склонов при различных видах воздействия – землетрясениях разных магнитуд, массовых карьерных взрывах, подземных взрывах большой мощности.

Ключевые слова: склоновые процессы, оползни, обрушение склонов, сейсмические колебания, землетрясения, взрывы.

DOI: 10.31857/S0002333721050112

ВВЕДЕНИЕ

Явления обрушения склонов давно привлекают интерес исследователей как геомеханический процесс. Известно множество случаев перемещения больших масс горных пород с объемами в десятки и даже сотни км³. Например, объем самого большого известного подводного оползня *Agulhas Slide* по опубликованным данным оценивается в 20 тыс. км³ [Dingle, 1977].

Определяющую роль в склоновых явлениях играют силы тяжести, инерции и сопротивления сдвигу. Устойчивость склона определяется его геометрией, свойствами слагающих пород, обводненностью, накопленным уровнем поврежденности. При этом, как и во всякой метастабильной системе, обрушение склона, находящегося в состоянии, близком к предельному равновесию, часто бывает инициировано внешним воздействием. Так, например, по данным работы [Hance, 2003],

более чем в 40% случаев инициирование крупных подводных оползней приписывается воздействию сейсмических колебаний от землетрясений. Хотя на суше основным триггером склоновых явлений являются, по-видимому, осадки (например, [Wilson, Keefer, 1985]), однако и землетрясения достаточно часто выступают инициаторами оползней, особенно в горной местности [Wilson, Keefer, 1985; Захаров, 2009]. Внедрение новых методов разработки месторождений полезных ископаемых глубокими карьерами предусматривает высокую крутизну бортов и делает актуальной проблему сейсмического воздействия массовых взрывов, применяемых при разработке, на устойчивость склонов [Мельников и др., 2009]. При этом мощность взрывов на современных карьерах достигает сотен, а иногда и тысяч тонн ВВ.

Абсолютное большинство исследований, посвященных оценке возможности возникновения склоновых явлений при сейсмических событиях,

анализируют сведения о предельных расстояниях от эпицентра землетрясения соответствующей магнитуды, при которых наблюдались оползни [Keefer et al., 2006]. В некоторых случаях оценивается число оползней или площади, ими занятые, в зависимости от размера землетрясения. Количество таких работ увеличилось, когда стали доступны спутниковые снимки, позволяющие сравнить состояние поверхности до и после землетрясения. Однозначно связать эти данные с характеристиками воздействия довольно сложно из-за того, что результаты измерений параметров движения грунта в окрестности склона, как правило, отсутствуют. Использование обобщенных зависимостей осложняется тем, что во многих случаях не указывается тип магнитуды землетрясения, а также большим разбросом в расчетах по эмпирическим зависимостям (особенно в величинах максимальных ускорений – PGA) [Эртелева, 2015], полученным для разных территорий. Кроме того, данные о характеристиках склонов известны только в отдельных случаях, так что связать параметры воздействия и физические характеристики склона часто бывает невозможно.

В широко применяемых инженерных подходах при оценке сейсмической устойчивости склонов к системе сил, действующих на склон, добавляются инерционные силы, возникающие в массиве при прохождении сейсмической волны; причем действие этих сил учитывается квазистатически, путем векторного добавления величины PGA к ускорению силы тяжести. Такой подход не учитывает, во-первых, продолжительности действия сейсмической нагрузки, а во-вторых, того, что действие сейсмической волны может создать начальный сдвиг в критической области и/или изменить характеристики поверхности скольжения, например, благодаря фрикционному разупрочнению при сдвиге [Dieterich, 1979]. Эти эффекты в определенной мере учитываются широко применяемым подходом Ньюмарка [Newmark, 1965], согласно которому тело оползня рассматривается в виде жесткого блока на наклонном основании. Ньюмарк предположил, что оползень не будет инициирован до тех пор, пока не наберется некоторая критическая величина перемещения D_N потенциально неустойчивой массы относительно основания. При этом перемещения, которые до некоторой стадии могут быть дискретными, происходят, когда ускорение, вызванное сейсмическим воздействием, превышает величину критического ускорения a_c , рассчитанную исходя из условия статического равновесия. По сути, метод Ньюмарка является способом оценки остаточных смещений в массиве после воздействия сейсмической волны. За прошедшие десятилетия метод испытал множество модификаций, в которых учитывалось наличие трех компонент ускорения в волне, зависимость сдвига-

вой прочности от накопленной деформации и т.д., что, впрочем, не привело к качественно новым результатам. Некоторым усовершенствованием является метод Эйриса [Arias, 1970], который при интегрировании учитывает действие как положительных, так и отрицательных ускорений.

Наибольшую проблему представляет неопределенность величины критического смещения D_N . Исследования, проведенные в работах [Arnold, 2006; Wilson, 1983], показали, что следует считать величину $D_N = 10$ см консервативной оценкой критического смещения для “когерентных” оползней (движение одним блоком), необходимого для начала разрушения. Эта величина неплохо согласуется и с результатами численных расчетов обрушения склонов методом дискретных элементов [Arnold, 2006]. (Для камнепадов и лавин предлагается величина $D_N = 2$ см).

Так что в общем случае можно полагать, что, если анализ Ньюмарка предсказывает смещение всего в несколько миллиметров, склон можно считать стабильным. Если же прогнозируемое смещение Ньюмарка составляет первые десятки сантиметров, вполне вероятен крупномасштабный оползень из-за значительной потери прочности и развития динамической стадии.

В настоящей работе выполнено лабораторное исследование механики инициирования склона динамическим импульсом для определения критических параметров воздействия. Кроме того, проведены расчеты величины остаточного смещения Ньюмарка для разных типов сейсмического воздействия – землетрясения, взрыва сосредоточенного заряда и массового взрыва на горнодобывающем предприятии.

МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНЫХ ОПЫТОВ

При воздействии сейсмической волны, этап инициирования движения сползающей массы относительно основания склона соответствует фазе уменьшения массовой скорости смещения грунта (рис. 1). На участке нарастания скорости до максимума (в интервале времени t_0-t_n) материал будущего оползня движется вместе с основным телом склона. В момент времени t_1 , когда ускорение торможения становится достаточно большим, чтобы преодолеть силы сцепления и силу трения, начинается движение отделившийся массы относительно склона. Причем, в зависимости от геометрии склона и угла выхода волны, первоначальное движение может быть как вниз по склону, так и вверх. В случае, если амплитуда смещения оказывается достаточной для фрикционного разупрочнения, происходит дальнейшее движение отделившегося материала под действием силы тяжести.

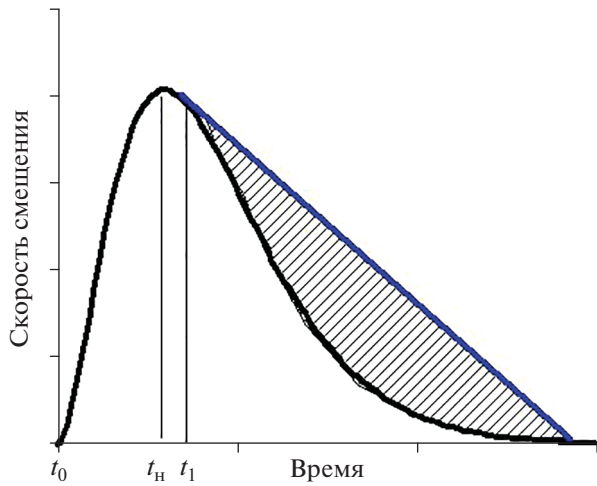


Рис. 1. Схема инициирования оползня при воздействии динамического импульса.

Имея в виду, что механика инициирования оползня коротким импульсом без труда может быть распространена и на длинный цуг колебаний, была разработана методика проведения лабораторных опытов и созданы установки для исследования инициирования неустойчивости

склонов при субвертикальном и субгоризонтальном динамическом воздействии.

Вид установки для субгоризонтального воздействия показан на рис. 2. Установка представляет собой герметичный бокс $60 \times 60 \times 40$ см (1), в котором расположена модель склона (3). Дно и торцевые стенки бокса – стальные; боковые стенки и крышка – из толстого оргстекла. Конструкция позволяет проводить опыты с контейнером, заполненным водой. Бокс на стальных катках установлен на рельсы (2), расположенные перпендикулярно к бетонной стене, на которой прикреплена стальная мишень (7). С обратной стороны к рельсам жестко прикреплен пневмоцилиндр (6), шток которого упирается в ящик. Во время эксперимента ящик разгонялся по направляющим и ударялся (4) в мишень. Максимальная скорость разгона составляла свыше 1 м/с при давлении в рабочей камере пневмоцилиндра 8 атм. Использование различных прокладок позволяло варьировать длительность удара в широких пределах.

Помимо акселерометров (5), картина разрушения фиксировалась с помощью кино- и фотосъемки (рис. 2б, 2в). В большинстве случаев при инициировании оползня наблюдалось сползание материала по всей ширине склона. Эксперименты, при которых наблюдались лишь локальные

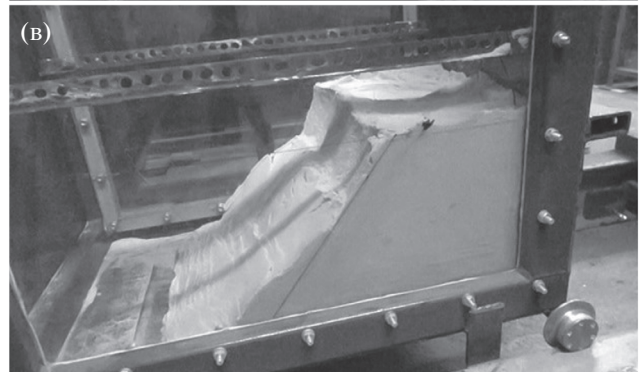
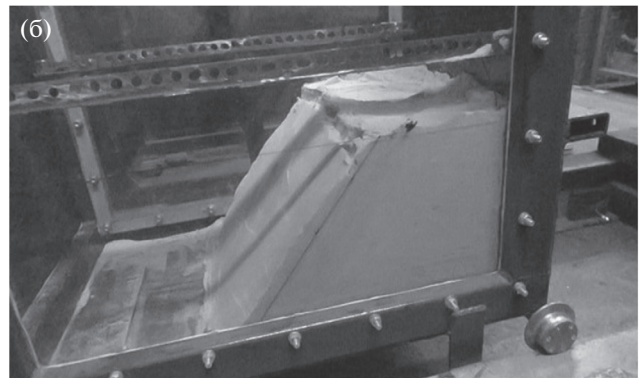
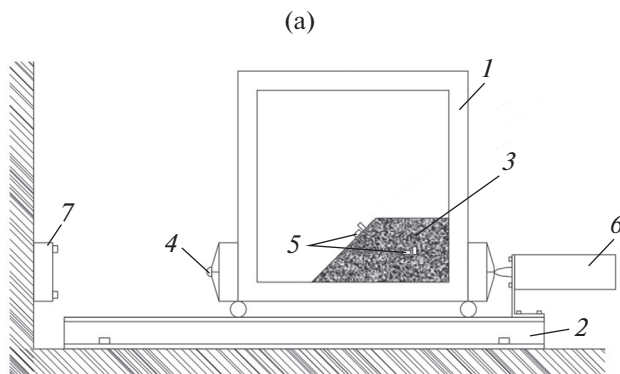


Рис. 2. Схема установки для горизонтального воздействия (а) и кадры обрушения склона (б), (в); 1 – бокс; 2 – рельсы; 3 – модель склона; 4 – ударник; 5 – акселерометры; 6 – пневмоцилиндр; 7 – стальная мишень. Время на кадрах отсчитывается с момента удара.

Таблица 1. Прочностные свойства используемых грунтов

Геоматериал	Плотность, кг/м ³	Сцепление, <i>C</i> , кПа	Угол трения, град
Кварцевый песок, увлажненный 0.25% глицерина, по массе	1.63×10^3	0.9 ± 0.2	32 ± 2
Кварцевый песок с добавлением 5% сухой глины	$1.76 \times 10^3 - 1.83 \times 10^3$	1.0 ± 0.2	36 ± 1
Кварцевый песок, обводненный	1.6×10^3	0.8 ± 0.2	31 ± 2

осыпания грунта, трактовались как сохранение устойчивости склона. На прочных склонах с большим значением фактора устойчивости иногда формировались трещины, субпараллельные кромке склона, но оползень при этом не образовывался. Отделившиеся части склона обрушались, как правило, в результате одного или нескольких повторных воздействий. При плавных воздействиях с низким значением *PGA*, недостаточным для разрушения, образовывались небольшие трещины на горизонтальной поверхности или на поверхности склона.

Установка для субвертикального воздействия была устроена аналогично, с той разницей, что контейнер свободно падал с заданной высоты по направляющим, ударяясь о массивную стальную мишень.

Диапазон изменения параметров воздействия в экспериментах составлял для максимальной массовой скорости (*PGV*) от 0.003 до 1.3 м/с, а для максимального ускорения (*PGA*) от 0.01 до более 170g.

Параметры динамического воздействия на склон и движения материала контролировались акселерометрами *Buel&Kjaer 4370*, которые устанавливались на контейнере, в глубине склона и на его поверхности. Поскольку плотность датчиков существенно выше, чем плотность модельного материала, то к донышку акселерометра прикреплялась специальная площадка, которая препятствовала движению корпуса датчика относительно грунта. Специально проведенная серия экспериментов позволила определить оптимальный диаметр площадки 6 см, не приводящий к существенным искажениям акселерограмм.

Такая постановка экспериментов позволяла исследовать закономерности деформирования и разрушения сухих и обводненных склонов при действии импульсной нагрузки.

Значимыми для оползневых процессов геометрическими параметрами склона являются его угол и толщина оползня (слоя или скользящего блока). Угол склона в лабораторном эксперименте легко приблизить к тем значениям, которые наблюдаются в природе. Но толщина скользящего блока/слоя будет примерно на два порядка отличаться от природного аналога. То-

гда, исходя из принципов подобия, в лабораторных опытах следует использовать материалы, удельный вес которых соответствует природным значениям (~ 20 кН/м³), а величина сцепления на два порядка ниже, чем у природного материала. Если для грунтов, которые в большинстве случаев формируют наземные оползневые склоны, характерны значения сцепления ~ 20 кПа, то для лабораторных экспериментов следует использовать материалы с $C_m \sim 0.2$ кПа, чтобы строго соблюдалось условие подобия.

$$\begin{cases} C_m = \frac{l_m \gamma_m C_n}{l_n \gamma_n} \\ |(\text{tg}(\phi))_m| = |(\text{tg}(\phi))_n| \end{cases} \quad (1)$$

Здесь: *C* – сцепление; ϕ – угол трения; γ – удельный вес; *l* – линейный размер. Индексы *n* и *m* относятся, соответственно, к природному объекту и модели.

Укладка грунта в контейнер производилась по стандартной методике так, чтобы обеспечить примерно одну и ту же плотность материала в серии опытов. Для формирования склона в качестве основной фракции был выбран кварцевый песок Люберецкого карьера со средним размером зерна ~ 300 мкм. Использование песка позволяет легко изготовить модель желаемой геометрии, а использование различных добавок позволяет менять прочностные свойства материала. В настоящей статье обсуждается деформирование и разрушение склонов, изготовленных из двух типов материалов. Их свойства приведены в табл. 1.

Угол трения и сцепление материала определялись в опытах на установке прямого среза УПС в соответствии с ГОСТ 12248-2010*.

Чтобы выбрать необходимую в эксперименте геометрию модели, предварительно проводились расчеты коэффициента статической устойчивости склона *FS* – отношения суммы сил, удерживающих слой на склоне, к сумме сдвигающих сил. Для простейшей модели бесконечного склона (рис. 3), когда плоская поверхность скольжения параллельна откосу, *FS* может быть выражен как [Ingles et al., 2006]:

* ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.

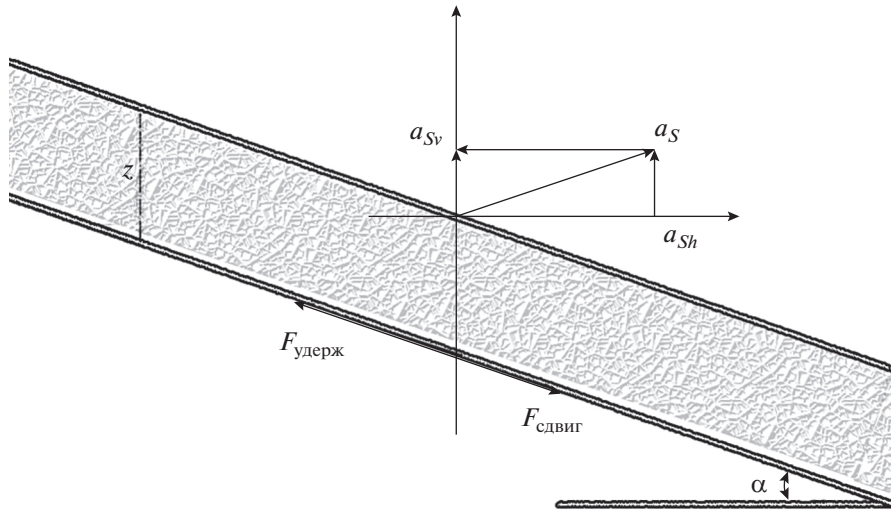


Рис. 3. Модель бесконечного склона с постоянным уклоном.

$$FS = \frac{C}{\gamma z \cos \alpha \sin \alpha} + \frac{\text{tg}\phi}{\text{tg}\alpha}, \quad (2)$$

где α – угол склона; z – вертикальный размер скользящего блока.

Когда устанавливается баланс удерживающих и сдвигающих сил, т.е. когда $FS = 1$, склон становится неустойчивым. Если $FS > 1$, слой находится в устойчивом состоянии; если $FS < 1$ – в неустойчивом состоянии.

В квазистатическом приближении воздействие сейсмической волны обычно учитывается наложением инерциальных сил, определяемых максимальным значением ускорения a_s в сейсмической волне. Рассматривая баланс сил при воздействии сейсмической волны (см. рис. 3), несложно показать, что в общем случае, когда сейсмическое ускорение не параллельно склону (квазистатическое приближение; горизонтальная и вертикальная компоненты ускорения, соответственно a_{Sh} и a_{Sv}), зависимость для расчета фактора устойчивости склона будет выглядеть как [Ingles et al., 2006]:

$$FS = \frac{C + \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma'} a_{Sv} - \frac{\gamma}{\gamma'} a_{Sh} \text{tg}\alpha\right) \gamma z \cos^2 \alpha \text{tg}\phi}{\left(1 - \frac{\gamma}{\gamma'} a_{Sv} + \frac{\gamma}{\gamma'} a_{Sh} \text{tg}\alpha\right) \gamma z \sin \alpha \cos \alpha}, \quad (3)$$

где γ – удельный вес грунта; γ' – вес взвешенного в воде грунта. Для необводненного склона $\frac{\gamma}{\gamma'} = 1$.

В этом выражении и далее величины ускорений нормированы на ускорение силы тяжести.

Деформации пласта, направленные вдоль склона, возникают в моменты, когда ускорение

соскальзывающего блока/слоя массы W , вызванное сейсмическими колебаниями, превышает критическую величину ускорения a_c , при которой выполняется соотношение $FS = 1$, т.е. увеличение ускорения силы тяжести g на a_c делает склон статически неустойчивым.

Примеры результатов расчета FS для некоторых материалов показаны на рис. 4а. Видно, что для склона из песка, увлажненного глицерином, величина предельного угла составляет 59° , а в экспериментах с обводненным слоем из песка предельный угол всего 20° . Обычно испытывались модели склонов с углами, близкими к предельным.

Критическое ускорение в сейсмической волне, субпараллельное наклону потенциального оползневого блока, в квазистатическом приближении является простой функцией статического фактора устойчивости и геометрии склона и выражается как [Newmark, 1965; Wilson, 1983]:

$$a_c = (FS - 1) \sin \alpha. \quad (4)$$

Расчеты по соотношению (3) для отдельного воздействия вертикального a_{Sv} и горизонтального a_{Sh} ускорения приведены на рис. 4б. Видно, что величина критического ускорения при горизонтальном воздействии значительно ниже, причем при воздействии на пологие склоны разница становится особенно значительной.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Использование акселерометров позволяет проследить развитие относительного движения соскальзывающей массы даже в тех случаях, когда визуально деформация не видна.

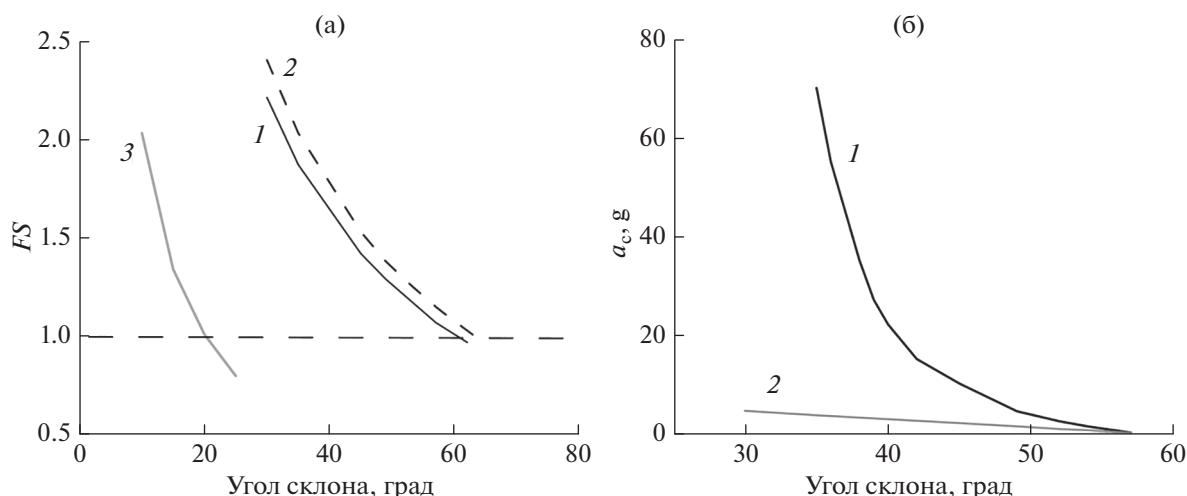


Рис. 4. Результаты расчета коэффициента устойчивости (а) и величины критического ускорения (б) для склонов, изготовленных из разных материалов. (а): 1 – песок + 0.25% глицерина, 2 – сухой песок + 5% глины, 3 – подводный склон из кварцевого песка; (б) – значение критического ускорения a_c при вертикальном a_{SV} (1) и горизонтальном a_{Sh} (2) воздействии на склон из песка, увлажненного глицерином (0.25%).

На рис. 5 приведены примеры ускорения и скорости смещения грунта, зарегистрированных в потенциально обрушаемой части модели и внутри тела склона при вертикальном и горизонтальном ударе контейнера. На рис. 6 показаны примеры записей скорости движения грунта го-

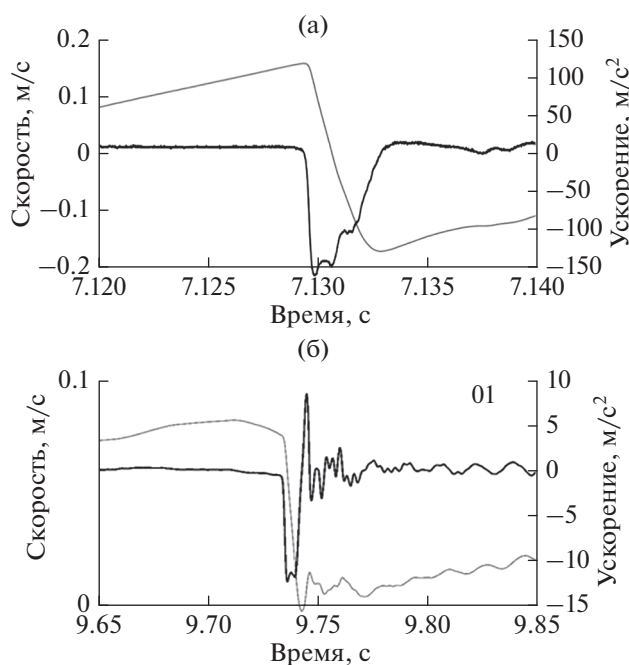


Рис. 5. Примеры записей ускорения (черная линия) и скорости (серая линия) движения грунта: (а) – вертикальный датчик; вертикальный удар контейнера; (б) – горизонтальный датчик; горизонтальный удар контейнера.

ризонтовой модели. В случаях, показанных на рис. 6а и 6б, склон остался устойчивым, тогда как в опытах, показанных на рис. 6в и 6г, произошло обрушение. На рис. 6в отчетливо видно, как оползневой слой практически сразу начинает двигаться относительно склона и не снижает скорость, что приводит, в конечном итоге, к возникновению обрушения. Интересно, что в опытах, показанных на рис. 6б и 6г, параметры воздействия (PGV и PGA) были близки, однако в одном случае неустойчивость развилась, а в другом процесс скольжения быстро затух. Это свидетельствует о пороговом характере процесса инициирования оползня динамическим импульсом. При этом поведение системы в окрестности порога может быть в достаточной мере случайным.

Обобщение результатов экспериментов проводилось на диаграммах максимальная массовая скорость (PGV) – максимальное ускорение (PGA), на которые наносились параметры воздействия в конкретном опыте.

В виде такой диаграммы на рис. 7 приведены данные серии опытов с вертикальным воздействием на склоны, выполненные из кварцевого песка, увлажненного глицерином (0.25% по массе). Для примера приведены данные для склонов с углами наклона $\alpha = 49^\circ$ и $\alpha = 59^\circ$. Каждый залитый значок на диаграмме соответствует эксперименту, в котором произошло инициирование оползня, а пустой – опыту, в котором склон остался устойчивым. Если наблюдалось только локальное обрушение или медленное сползание небольшого объема материала, то считалось, что склон остался стабильным. Наклонной прямой показана условная линия, разделяющая области на диа-

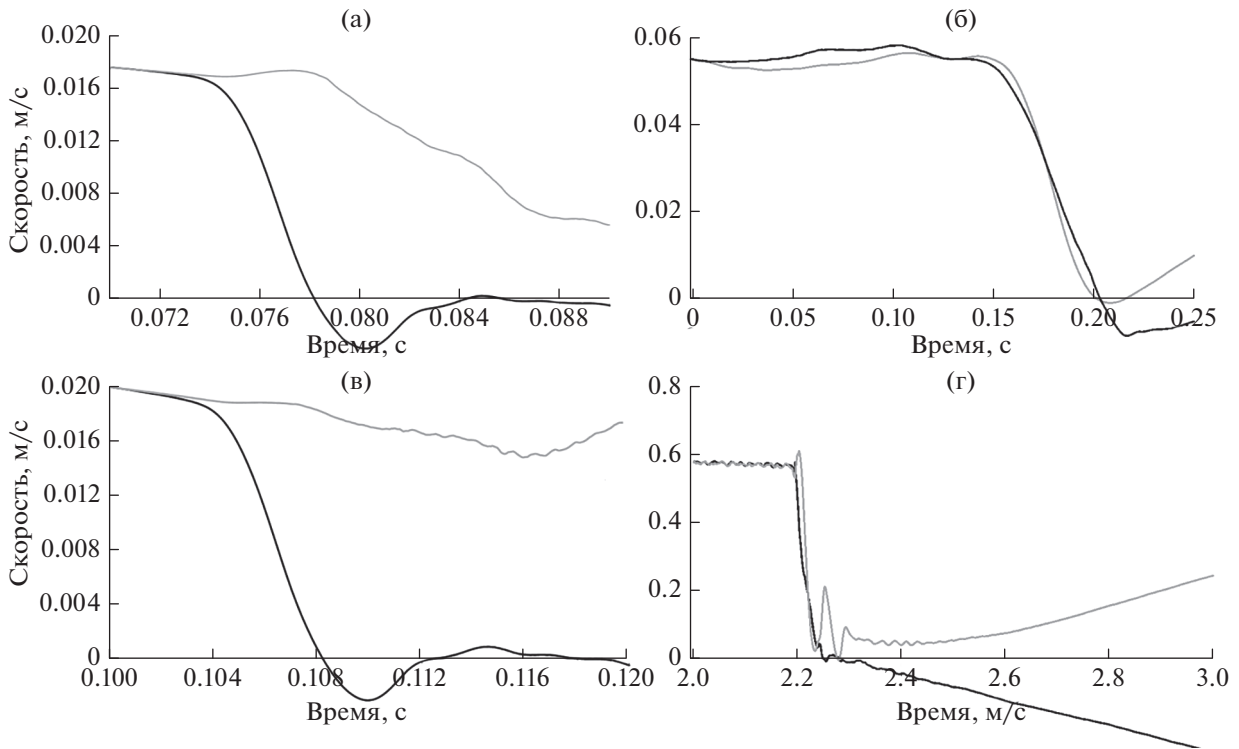


Рис. 6. Примеры записей скорости движения грунта на склонах, сохранивших стабильность (а), (б) и разрушившихся (в), (г) при субгоризонтальных ударах. Акселерометры расположены параллельно поверхности склона внутри (черные линии) и на поверхности (серые линии) модели.

грамме, соответствующие устойчивым склонам и склонам, на которых сформировался оползень. Подчеркнем, что это не линия, соответствующая какой-либо регрессии, а условная граница, разделяющая области на диаграмме, проведенная в известной мере произвольно. Уравнения этих линий приведены в табл. 2, куда сведены результаты различных опытов с воздействиями на склоны из кварцевого песка, увлажненного глицерином. Кроме этого, в таблице приведены рассчитанные по соотношению (2) величины коэффициента статической устойчивости склона FS и рассчитанного по соотношению (4) критического ускорения a_c , при котором склон в квазистатической схеме должен становиться неустойчивым.

По данным, представленным на плоскости $PGV-PGA$ (рис. 7), можно приблизительно оценить минимальные асимптотические значения по ускорению PGA_{min} (вертикальный пунктир) и по скорости PGV_{min} (горизонтальный пунктир), ниже которых разрушения склона при однократном воздействии не происходит.

Аналогичные результаты были получены для склонов, изготовленных из смеси песка и глины. Кроме того, для сравнения были проведены тестовые серии экспериментов с подводными склонами, хотя тема устойчивости последних выходит за пределы данной статьи.

Зависимости критических параметров от фактора устойчивости склона для разных серий экспериментов показаны на рис. 8. Параметр K – коэффициент в уравнении линии, разделяющей “устойчивую и неустойчивую” области на диаграмме $PGV-PGA$, характеризует общий уровень воздействия на склон. Как видно из приведенных данных, параметры динамического воздействия на массив, необходимые для инициирования оползня, быстро растут с увеличением запаса устойчивости склона.

Минимально необходимый для инициирования уровень субвертикальных ускорений, как и ожидалось в соответствии с расчетными данными (рис. 4б), на порядок выше, чем при субгоризонтальном воздействии. Заметно выше для субвертикального удара и значения параметра K . Величины PGV_{min} показали довольно близкие значения для обоих случаев.

Анализ результатов серий с многократным воздействием на одну и ту же модель показывает, что если величина PGA при ударе превышает величину PGA_{min} для данного склона, но величины PGV недостаточно для инициирования оползня, то повторные воздействия приводят к нарастающей остаточной деформации и постепенному формированию обрушения. Количество воздействий определяется величиной PGV при ударе:

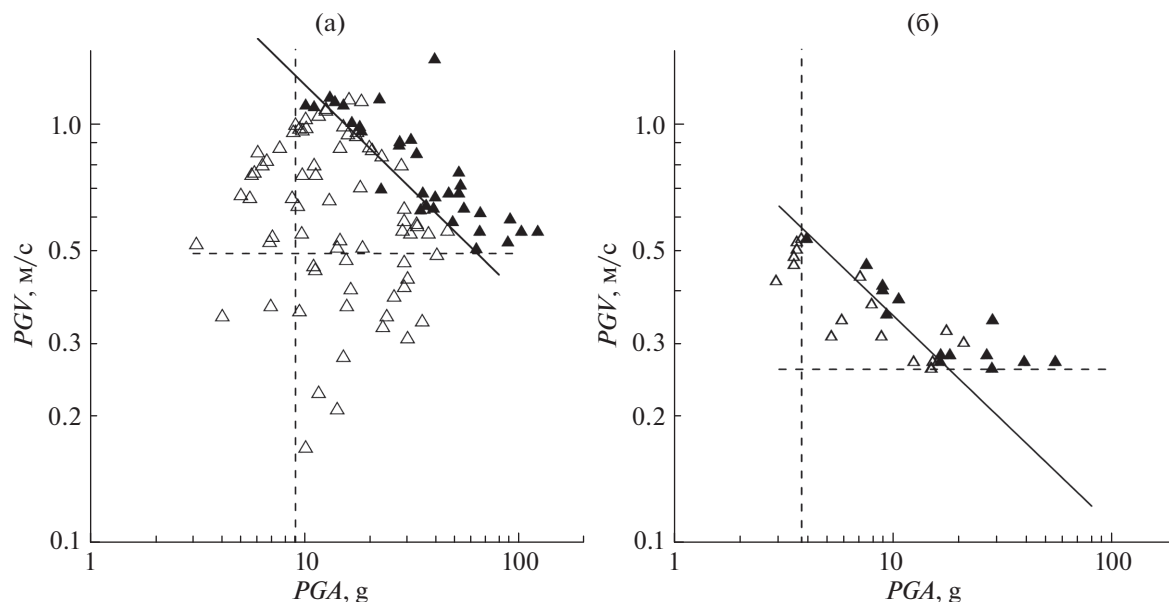


Рис. 7. Результаты опытов со склонами из кварцевого песка с 0.25% глицерина. Пунктирные прямые соответствуют минимальным значениям скорости и ускорения, при которых были зарегистрированы оползни. Пустые значки – склон остался устойчивым; закрашенные – произошел срыв: (а) – $\alpha = 49^\circ$; (б) – 59° . Наклонной прямой показана условная линия, разделяющая области на диаграмме, соответствующие устойчивым склонам и склонам, на которых сформировался оползень.

чем больше значение PGV , тем быстрее набирается предельная деформация. Примеры подобных зависимостей приведены на рис. 9.

Если величина PGA при ударе меньше величины PGA_{\min} , то остаточные смещения оказываются малы, несмотря на величину PGV , а эффект накопления деформации склона даже в результате многократных воздействий оказывается незначительным и носит затухающий характер.

Тестовые эксперименты с подводными склонами (залитые значки на рис. 8) показали, что наличие воды, как и следовало ожидать в соответствии с результатами расчета на рис. 4а, резко снижает запас устойчивости склона. Главным образом это происходит из-за действия архимедовой выталкивающей силы. В то же время, для случая склонов, построенных из однородного материала, при близких коэффициентах FS кри-

Таблица 2. Критические параметры воздействия для опытов со склонами, изготовленными из кварцевого песка, увлажненного 0.25% глицерина

Угол, α , град	Уравнение разделяющей линии	FS	a_c, g	$PGV_{\min}, m/c$	PGA_{\min}, g	Количество опытов
Вертикальное воздействие						
49	$PGV = 3.9PGA^{-0.5}$	1.29	0.61	0.49	9	106
52	$PGV = 2.47PGA^{-0.5}$	1.2	0.39	0.45	7	49
54	$PGV = 1.9PGA^{-0.5}$	1,15	0.26	0.38	5	37
57	$PGV = 1.48PGA^{-0.5}$	1.08	0.12	0.34	4.5	32
59	$PGV = 1.1PGA^{-0.5}$	1.03	0.05	0.26	3.8	32
40, под водой	$PGV = 0.55PGA^{-0.5}$	1.06	0.25	0.2	2.3	17
Горизонтальное воздействие						
50	$PGV = 0.16PGA^{-0.5}$	1.26	0.17	0.35	0.3	18
60	$PGV = 0.095PGA^{-0.5}$	1.01	0.09	0.11	0.2	18

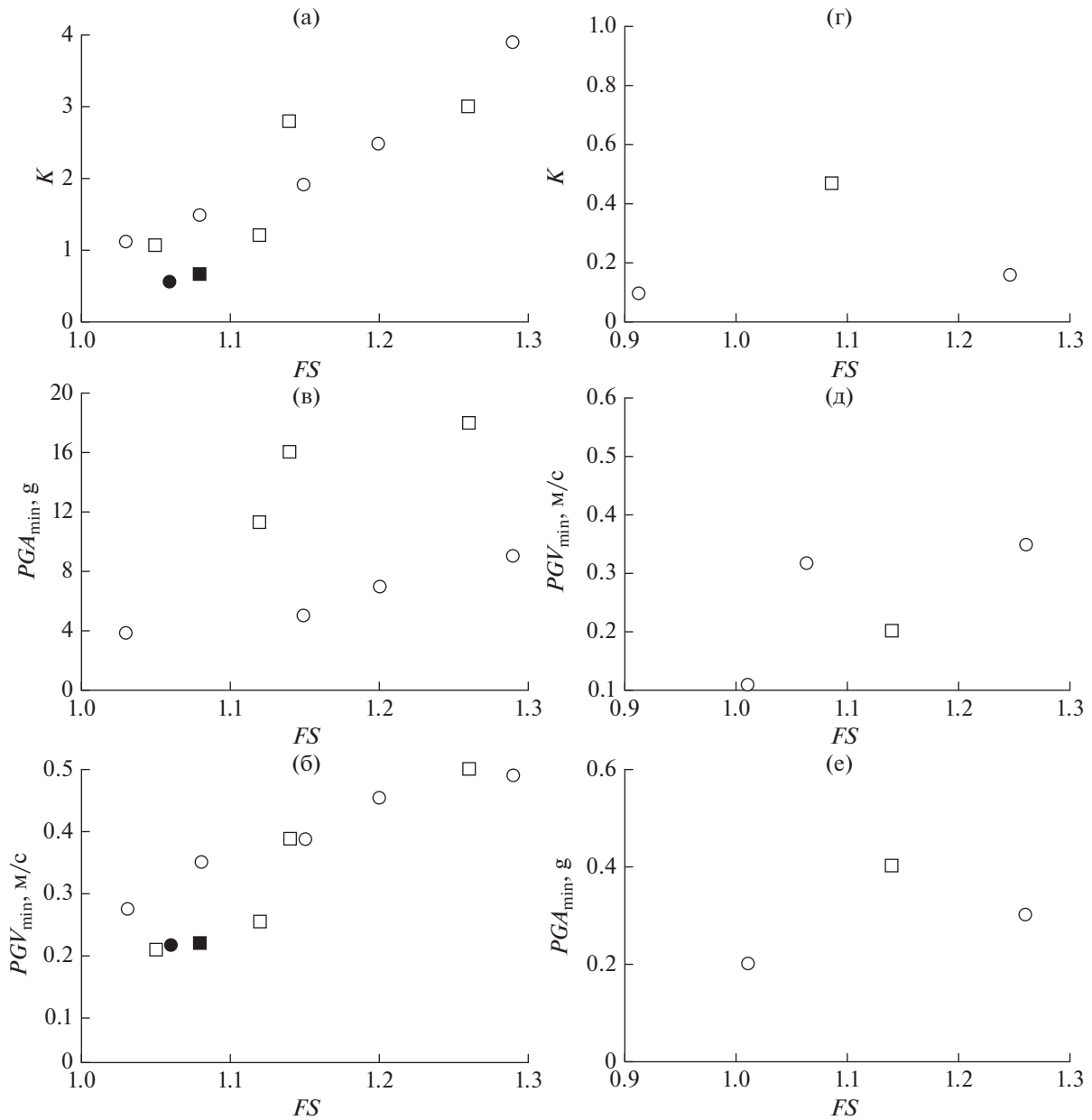


Рис. 8. Зависимости критических параметров импульсного воздействия на лабораторные склоны от величины статического фактора устойчивости FS : (а), (б), (в) – субвертикальное воздействие; (г), (д), (е) – субгоризонтальное воздействие; круги – склон из кварцевого песка, увлажненного 0.25% глицерина; квадраты – склон из кварцевого песка с добавлением + 5% глины; незалитые значки – опыты с сухими склонами; залитые значки – опыты с подводными склонами.

тические параметры для подводных и сухих склонов сопоставимы, несмотря на то, что характер деформирования в этих двух случаях оказывается существенно разным. При воздействии на подводные склоны инициирование часто сопровождалось задержкой во времени в несколько секунд, либо начало движения было довольно медленным, но затем материал постепенно разгонялся. Эффективная толщина сдвинутого материала при подводных событиях меньше, чем толщина оползней в опытах с сухими склонами.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В рамках настоящей работы основное внимание уделялось начальной стадии относительного смещения участков склона при воздействии сейсмических колебаний. Оползание грунта происходит при совокупном действии статической (сила тяжести) и динамической (в нашем случае импульсные воздействия) нагрузок. Очевидным критическим параметром является величина PGA воздействующей сейсмической нагрузки, которая

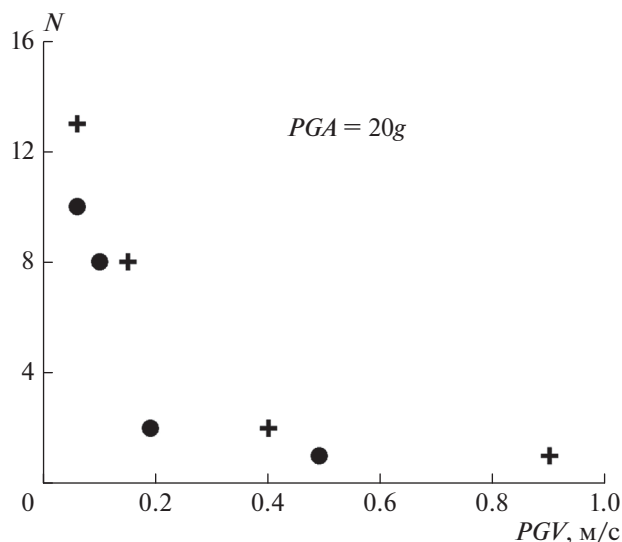


Рис. 9. Количество ударов, необходимых для разрушения склона при субвертикальном воздействии на модель в зависимости от величины PGV при величине $PGA = 20g$. Склон из кварцевого песка, увлажненного 0.25% глицерина; кресты – угол склона $\alpha = 49^\circ$; круги – $\alpha = 54^\circ$.

определяет динамическую силу инерции, нарушающую равновесие склона. При слишком малых ускорениях напряжения, создаваемые силами инерции, оказываются недостаточными для нарушения сплошности материала. Как показывают результаты численного моделирования, проведенного, например, в работе [Arnold, 2006], по мере увеличения ускорения динамического воздействия поврежденность материала увеличивается; причем при достижении некоторого предела по ускорению поврежденность возрастает многократно. Однако устойчивость области массива при длиннопериодном динамическом воздействии определяется не только достигнутым уровнем напряжений, но и кинематикой движения нарушенной области. Так как динамические воздействия довольно кратковременны, нарушение статического равновесия является необходимым, но не достаточным условием возникновения неустойчивости склона и образования оползней. Ускорения, связанные с сейсмическими колебаниями, действуют в течение непродолжительного времени, и деформация склона, вызванная ими, может оказаться недостаточной для образования лавины. Важность этого эффекта была, в частности, продемонстрирована в лабораторных опытах, описанных выше.

Хотя величина PGV при сохранении уровня ускорений и прочности слабо влияет на уровень разрушения, этот параметр определяет величину деформации, которая может быть достигнута. При достаточно высоких значениях PGV наблю-

дается значительная деформация массива в сторону свободной поверхности. Если напряжения, создаваемые силами инерции, превосходят предел прочности дискретной среды, то необратимая деформация массива происходит при любых значениях PGV . Если скорость мала, то необратимые деформации накапливаются. Потеря устойчивости происходит при достижении уровня критической деформации среды вблизи поверхности. Этот уровень определяется геометрией склона и реологическими свойствами материала. Как видно из результатов экспериментов (табл. 2, рис. 7), при изменении угла склона в пределах 10° от критического значения, величины PGV_{\min} и PGA_{\min} изменяются примерно вдвое. Возможность достижения критического уровня деформации после потери прочности определяется запасом кинетической энергии, обеспечивающим взаимное перемещение отдельных областей массива.

Эксперименты предсказуемо показали, что величины минимальных значений PGA_{\min} , при которых происходит разрушение склона, существенно превышают величину критического ускорения a_c , рассчитанную в квазистатическом приближении. Особенно велика разница оказалась для субвертикального воздействия, где PGA_{\min} превышает расчетное значение a_c более чем на порядок.

В этой связи понятно, что устойчивость склона к воздействиям разного типа – землетрясениям разной магнитуды, мощным подземным взрывам сосредоточенного заряда, массовым карьерным взрывам на горнодобывающем предприятии – может оказаться существенно разной.

Для того, чтобы количественно оценить влияние типа воздействия на устойчивость склона, были рассчитаны смещения Ньюмарка D_N для разных воздействий. Как отмечалось выше, этот параметр рассчитывается путем двойного интегрирования зависимости ускорений от времени, $a(t)$, с учетом того, что проскальзывание происходит при превышении заданной из квазистатической модели, величины ускорения a_c [Newmark, 1965].

Для расчета смещений Ньюмарка использовалась программа SLAMMER [SLAMMER, 2013]. Входными данными для анализа являлись величина критического горизонтального ускорения a_c (4) и временная эпюра ускорения. Нами были рассчитаны смещения Ньюмарка для 4 землетрясений с магнитудами M 6.0, 6.6, 7.1 и 7.6. Из базы данных USGS для каждого землетрясения отбирались эпюры с $PGA > 0.2g$. Процедура расчета была следующей: для фиксированной величины PGA с зарегистрированной волновой формой проводились расчеты для склонов с различным коэффициентом статической устойчивости FS . Коэффициент варьировался так, чтобы отноше-

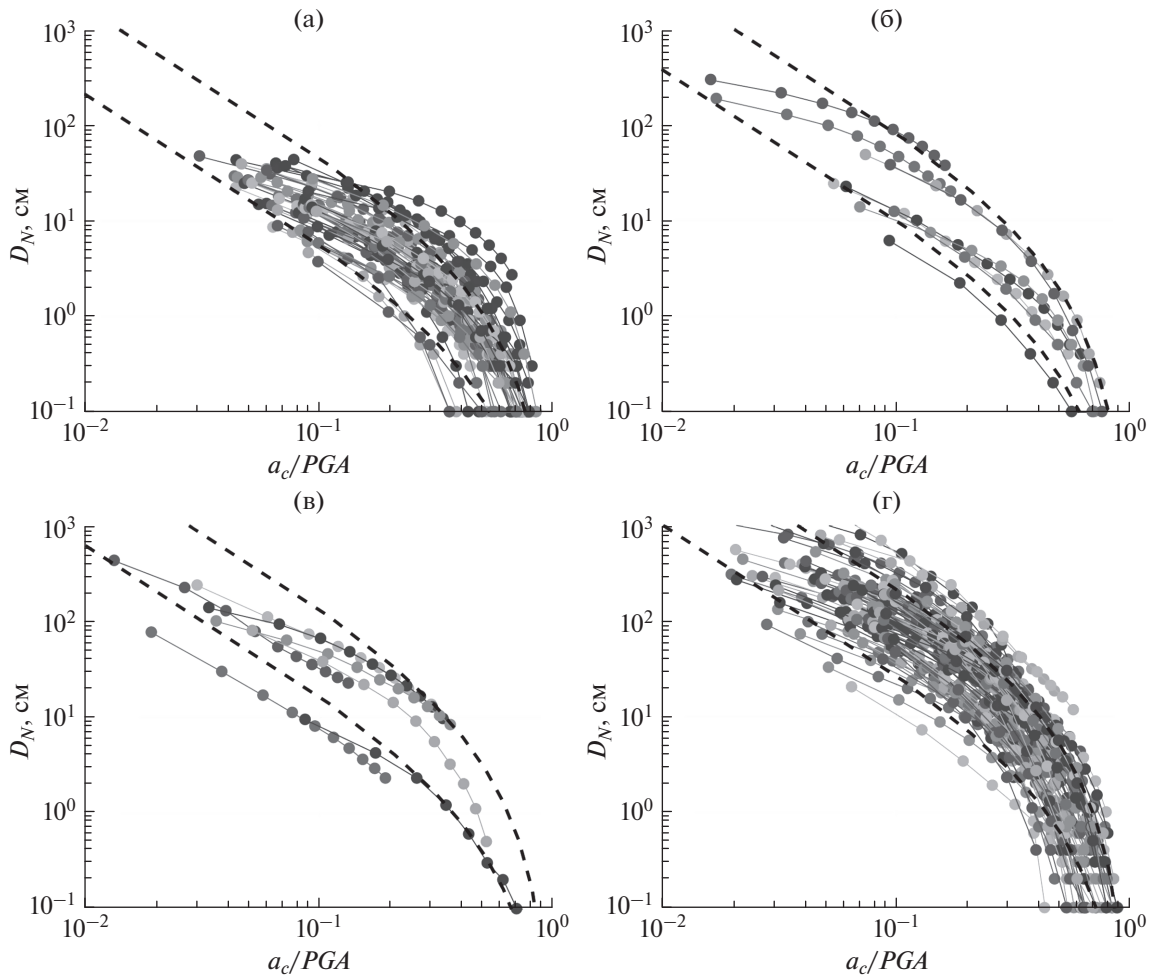


Рис. 10. Зависимость смещения по Ньюмарку от величины отношения a_c/PGA для землетрясений Whittier Narrows 1987 г. с $M_w = 6.0$; San Fernando 1971 г. с $M_w = 6.6$; Cape Mendocino 1992 г. с $M_w = 7.1$; ChiChi 1999 г. с $M_w = 7.6$. Пунктиром отмечена зависимость (5).

ние a_c/PGA изменялось в достаточно широких пределах.

Результаты расчетов показаны на рис. 10. Можно видеть, что величина смещений $D_N \cong 10-20$ см, которая обычно принимается в качестве консервативной оценки устойчивости [Wilson, 1983], достигается в тех случаях, когда PGA в 5–10 раз превышает величину a_c . Следует отметить также тенденцию роста величины D_N для землетрясений с большими магнитудами, что связано с более длинным цугом колебаний.

Каждая линия на рисунке соответствует одной записи, зарегистрированной на какой-либо станции из каталога [SLAMMER, 2013]. В выборку вошли все станции из каталога, для которых измеренное значение максимального ускорения составляло $PGA > 0.2g$.

Для оценки величины смещения Ньюмарка при событиях в диапазоне магнитуд $5.3 \leq M \leq 7.6$ в работе [Jibson, 2007] предложена зависимость:

$$\lg D_N = -2.71 + \lg \left[\left(1 - \frac{a_c}{a_{\max}} \right)^{2.335} \left(\frac{a_c}{a_{\max}} \right)^{-1.478} \right] + 0.424M \pm 0.454, \quad (5)$$

полученная на основе обобщения большого количества данных и показанная на рис. 9 пунктирными линиями. Здесь: M – моментная магнитуда; D_N измеряется в сантиметрах; a_c и $a_{\max} = PGA$ измеряются в единицах g .

Для оценки влияния формы сигнала (типа источника) на величину D_N были проведены расчеты для землетрясения $M 5.9$ (рис. 11а), карьерных массовых взрывов (рис. 11б) и для импульсов Берлага (рис. 11в, 11г):

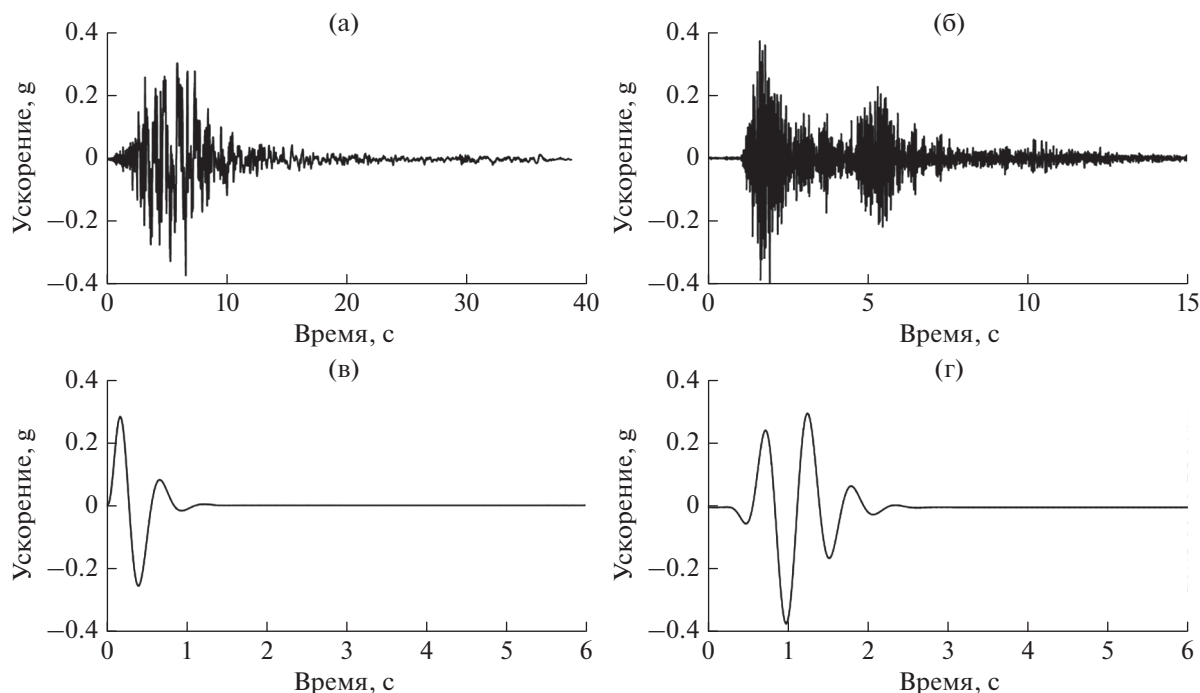


Рис. 11. Вид акселерограмм, использованных для расчета смещений Ньюмарка: (а) – землетрясение *Westmorland*; $PGA = 0.37g$, $T = 0.558$, $PGV = 48$ см/с; (б) – карьерный взрыв на Лебединском ГОК; $PGA = 0.37g$; (в) – импульс *EX1*; $PGA = 0.37g$, $T = 0.558$, $PGV = 33$ см/с; (г) – импульс *EX2*; $PGA = 0.37g$, $T = 0.558$, $PGV = 40$ см/с. Параметры импульсов: (*EX1*) $A = 1100$, $a = 8$, $b = 8$, $w = 11.24$; (*EX2*) $A = 52.8$, $a = 2$, $b = 8$, $w = 11.24$.

$$u(t) = At^a \exp(-bt) \sin \omega t. \quad (6)$$

Эти импульсы качественно соответствуют эпюрам ускорений в ближней зоне подземного взрыва сосредоточенного заряда. Сейсмограмма, показанная на рис. 11б, была зарегистрирована на расстоянии 2.5 км от взрыва с суммарным весом зарядов 2361 т, проведенного 04.10.2019 г. на карьере Лебединского ГОК (Белгородская обл.). Параметры всех сигналов, выбранных для сравнения, масштабировались таким образом, чтобы величина максимального ускорения во всех случаях была одинакова и составляла величину $PGA = 0.37g$.

Результаты расчета смещения Ньюмарка для склонов с различными значениями статического коэффициента устойчивости приведены на рис. 12. Видно, что если при малых значениях отношения PGA/a_c (относительно устойчивые склоны) величины смещения Ньюмарка близки для первых трех вариантов расчета, то критические величины смещения $D_N \sim 10$ см достигаются уже на склонах с существенно отличающимися квазистатическими факторами устойчивости FS (критическими ускорениями); или, если говорить об одном и том же склоне, при существенно разных ускорениях. Для землетрясения величина смещения 10 см достигается при $(PGA/a_c)_{крит} \sim 2.5$; для импульса *EX1* $(PGA/a_c)_{крит} \sim 4.5$, а для импульса

EX2 уже $(PGA/a_c)_{крит} \sim 19$. Для массовых взрывов эта величина действующего ускорения должна оказаться на два порядка выше квазистатической величины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные эксперименты и расчеты, направленные на исследование эффекта инициирования оползней динамическими импульсами, продемонстрировали, что величина пикового ускорения в волне, при котором инициируется оползень, зависит как от параметров склона, так и от вида воздействия – формы импульса, угла выхода волны, величины максимальной массовой скорости. Минимальные значения PGA , как правило, значительно превышают величину критического ускорения, рассчитанную на основе квазистатического подхода.

Максимальным инициирующим эффектом обладают сейсмические колебания от крупных землетрясений. Заметно слабее эффект воздействия взрыва сосредоточенного заряда большой мощности. Это связано, прежде всего, с тем, что цуг волн в ближней зоне взрыва довольно короткий по сравнению с сильным землетрясением. Кроме того, следует подчеркнуть, что эффект усиления амплитуды колебаний на склоне, который наблюдается при землетрясениях [Сейсми-

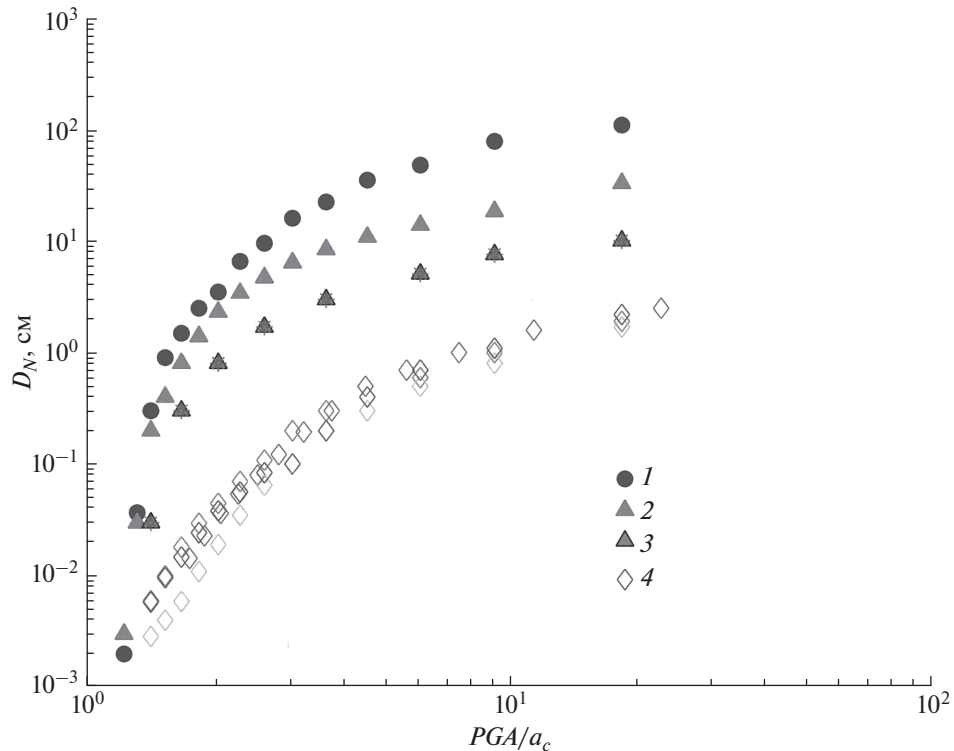


Рис. 12. Рассчитанные величины смещения Ньюмарка для разных типов сейсмических воздействий в зависимости от величины отношения PGA/a_c : 1 – землетрясение *Westmorland*; 2 – импульс *EX1*; 3 – импульс *EX2*; 4 – массовые взрывы на карьере Лебединского ГОК (10.04.2019; 06.05.2020; 27.05.2020; 25.06.2020).

ческое..., 1977], при взрыве будет заметно слабее из-за более широкого спектра сейсмозрывных волн [Эртелева, 2015]. Различия в критических значениях величины PGA при воздействии на склон колебаний от землетрясений и мощных подземных взрывов может достигать порядка величины. Еще менее эффективным оказывается воздействие от взрывов в карьерах. При этом следует иметь в виду, что регулярное воздействие высокочастотных колебаний может привести к накоплению необратимых деформаций.

Эксперименты показали, что существуют минимальные величины PGA и PGV , при которых наблюдаются необратимые деформации склона. Если ускорение ниже минимального значения PGA_{min} , то эффект накопления деформации склона даже в результате многократных воздействий оказывается незначительным и носит затухающий характер. Если величина массовой скорости ниже PGV_{min} , то при $PGA > PGA_{min}$ наблюдаются необратимые деформации, так что склон может быть разрушен при повторных воздействиях.

Наличие воды резко снижает запас устойчивости склона. Характер движения грунта после инициирования в опытах под водой сильно отличается от сухих склонов. Во многих случаях инициирование сопровождается задержкой во времени, ли-

бо начало движения оказывается довольно медленным, но затем материал постепенно разгоняется. Эффективная толщина сдвинутого материала при подводных событиях оказывается меньше, чем толщина оползней в опытах с сухими склонами. Несмотря на эти различия, судя по результатам тестовых экспериментов, при близких коэффициентах FS критические параметры для подводных и надводных склонов сопоставимы.

Вопрос динамической устойчивости подводных склонов требует дополнительного рассмотрения и должен быть предметом отдельной публикации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Разработка концепции экспериментов проводилась в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № АААА-А17-117112350020-9). Создание установки и проведение экспериментов выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-05-00378).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Захаров В.С., Симонов Д.А., Контев А.И. Компьютерное моделирование сейсмогенных оползневых смещений. Электронное научное издание "ГЕОразрез". 2009. № 1–3.

- Мельников Н.Н., Козырев А.А., Лукичев С.В.* Новая концепция разработки месторождений глубокими карьерами // Горный журн. 2009. № 11. С. 7–11.
- Сейсмическое микрорайонирование / Под. ред. С.В. Медведева. АН СССР: Наука. 1977. 248 с.
- Эртелева О.О.* Спектры реакции в скоростях: оценки параметров и формы // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42. № 4. С. 5–14.
- Arias A.* A Measure of Earthquake Intensity. Seismic Design for Nuclear Power Plants / R.J. Hansen (Ed.). Cambridge, Massachusetts: MIT Press. 1970. P. 438–483.
- Arnold L.D.* Seismically-Induced Rock-Slope Failure: Numerical Investigations using the Bonded Particle Model: PhD dissertation. University of Washington. USA. 2016.
- Dieterich J.H.* Modeling of Rock Friction: 1. Experimental results and constitutive equations // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 2161–2168.
- Dingle R.V.* The anatomy of a large submarine slump on a sheared continental margin (SE Africa) // J. Geol. Soc. 1977. V. 134(3). P. 293.
<https://doi.org/10.1144/gsjgs.134.3.0293>
- Hance J.J.* Development of a database and assessment of seafloor slope stability based on published literature: PhD dissertation. University of Texas. USA. 2003.
- Ingles J., Darrozes J.* Effects of the vertical component of ground shaking on earthquake-induced landslide displacements using generalized Newmark analysis. C. Soula // Eng. Geol. 2006. V. 86. P. 134–147.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.02.018>
- Jibson R.W.* Regression models for estimating coseismic landslide displacement / Ed. R.W. Jibson // Eng. Geol. 2007. V. 91(2–4). P. 209–218.
- Keefe D.K., Wartman J., Navarro C. Ochoa et al.* Landslides caused by the M 7.6 Tecomán, Mexico earthquake of January 21, 2003 // Eng. Geol. 2006. V. 86(2–3). P. 183–197.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.02.017>
- Newmark N.M.* Effects of Earthquakes on Dams and Embankments // Géotechnique. 1965. V. 15. № 2. P. 139–160.
- Jibson R.W., Rathje E.M., Jibson M.W., Lee Y.W.* SLAMMER: Seismic Landslide Movement Modeled using Earthquake Records // U.S. Geological Survey Techniques and Methods. 2013. № 12(B1).
- Wilson R.C., Keefe D.K.* Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote Lake, California, earthquake // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1983. V. 73. P. 863–877.

Slope Failure Initiation by Seismic Loading from Different Sources

G. G. Kocharyan^a, A. N. Besedina^a, S. B. Kishkina^{a, *}, D. V. Pavlov^a,
Z. Z. Sharafiev^a, and P. A. Kamenev^b

^aSadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia

^bInstitute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022 Russia

*e-mail: Svetlank@gmail.com

The results of laboratory studies on the criteria of slope failure initiated by pulsed dynamic loading in the range of peak ground velocities (PGV) from 0.003 to 1.3 m/s and peak ground accelerations (PGA) from 0.01 to above 170g are presented. The critical values of the parameters of dynamic loads on the model slopes are established. The landslide formation is observed starting from a minimum PGA value that is significantly higher than the critical acceleration calculated based on quasi static approach. At the same time, with close static stability factors, critical parameters for underwater and above-water slopes are comparable despite the fact that the character of movement of ground material after initiation in the experiments under water strongly differs from that on the above-water slopes. It is shown that there are minimal PGA and PGV values at which irreversible slope deformations are observed. When the acceleration is below the minimum PGA_{\min} , then significant irreversible deformations are not observed at any PGV . When the mass velocity is below PGV_{\min} , than at $PGA > PGA_{\min}$, irreversible deformations take place, and a repeated impact may cause a slope to fail. Using the Newmark approximation, slope stability is calculated for various impact types: earthquakes of different magnitudes, mass quarry explosions, and high-yield underground explosions.

Keywords: slope processes, landslides, slope failure, seismic shaking, earthquakes, explosions