

На правах рукописи

Шарафиев Зульфат Забирович

**ИНИЦИИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ОПОЛЗНЕЙ ПРИ
МНОГОКРАТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ**

Специальность 1.6.9 «Геофизика»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва
2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук (ИДГ РАН)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор

Кочарян Геворг Грантович

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор

Викторов Сергей Дмитриевич

Официальные оппоненты:

член-корреспондент Российской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор Российской академии наук, заместитель директора, заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института Физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

Собисевич Алексей Леонидович

доктор геолого-минералогических наук, главный эксперт ООО «Центр геодинамических исследований».

Стром Александр Леонидович

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН).

Защита состоится **«14» декабря 2023 г.** в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.1.059.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 38, к. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИДГ РАН и на сайте idg.chph.ras.ru/watch/sharafiev_dissertation

Автореферат разослан

«___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.059.01
доктор физико-математических наук

С.П. Соловьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Сейсмические колебания являются одним из важных триггеров нарушения устойчивости склонов, находящихся в состоянии, близком к предельному равновесию. При этом землетрясения достаточно часто выступают в качестве вероятной причины инициирования оползней и обвалов. В России подобные события регулярно происходят на склонах Северного Кавказа, Краснодарского края и некоторых других регионов.

Интенсивному сейсмическому воздействию подвергаются и искусственные склоны на горнодобывающих предприятиях – борта карьеров и отвалы пород. Так, на железорудных карьерах Курской Магнитной Аномалии (КМА) объем извлеченных вскрышных пород превышает 150 млн. м³, высота отвалов достигает 170 м, а углы откоса 33° для рыхлых пород и 38° для отвалов скальных пород. За последние 30 лет дважды, в результате нарушения устойчивости склонов, на отвалах Михайловского ГОКа сходили оползни объемом около 20 млн м³. Известны такие события, как оползни на внешнем отвале Норильского ГМК (объем 60 млн м³), оползень 01.04.2015 г. на внешнем отвале разреза Заречный Кемеровской области (объем сместившейся массы ~ 27,5 млн м³, экономический ущерб 1,2 млрд руб.), оползень 05.06.2019 г. на разрезе Кийзасский Кемеровской области (рекультивация земель обошлась в более чем 220 млн руб.), оползень 10.07.2021 г. на Солнцевском угольном разрезе Сахалинской области и т. д. Эффективное и безопасное складирование рыхлых пород вскрыши и некондиционных полезных ископаемых имеет важное значение для экономики производства и охраны окружающей среды. Безопасность складирования в значительной степени зависит от правильного выбора параметров склонов. Недооценка опасности приводит к возникновению аварий, разрушениям инфраструктуры, а иногда и к человеческим жертвам. С другой стороны, неоправданное снижение высоты и угла откосов приводит к существенному снижению экономической эффективности производства.

При оценке устойчивости склона широко применяется квазистатический подход, т.е. сейсмические силы рассматриваются постоянно действующими, что может приводить к неоправданному завышению прогнозируемых последствий сейсмического воздействия. При этом эффекты накопления деформаций при регулярном или периодическом воздействии сейсмических волн в литературе практически не рассмотрены. В этой связи оценка многократного сейсмического воздействия землетрясений и массовых взрывов, применяемых при разработке месторождений, на устойчивость склонов является актуальной проблемой.

Целью работы является установление закономерностей развития деформаций склонов при многократном воздействии сейсмических колебаний и разработка критериев их обрушения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- Аналитический обзор результатов исследований статической и динамической устойчивости склонов.
- Разработка методики проведения лабораторных экспериментов и создание установок для исследования инициирования разрушения склонов при динамическом воздействии.
- Проведение лабораторных экспериментов, направленных на установление закономерностей развития процесса деформирования и на определение критических значений параметров динамических воздействий на модельные склоны при однократном и многократном воздействии.
- Сбор и анализ опубликованных данных об обрушении склонов при воздействии сейсмических волн от землетрясений.
- Проведение измерений параметров сейсмических колебаний на различных расстояниях от массовых взрывов на карьерах КМА.
- Сопоставление эффекта воздействия на склоны сейсмических колебаний от различных источников.
- Разработка феноменологической модели процесса инициирования обрушения склона при многократном сейсмическом воздействии.

Научная новизна и теоретическая значимость результатов, полученных в диссертации, заключается в том, что в лабораторном эксперименте исследованы закономерности развития процесса деформирования модельных склонов при многократном воздействии и установлены соотношения между критическими значениями параметров динамических воздействий. Установлен эффект снижения коэффициента устойчивости склона при многократном воздействии сейсмических колебаний. Определены закономерности накопления необратимых деформаций при многократном импульсном воздействии и при воздействии вибраций.

Практической и теоретической значимостью обладают разработанная феноменологическая модель процесса инициирования схода оползня при многократном сейсмическом воздействии и сформулированные правила принятия решений при оценке возможности инициирования оползня. Результаты проведенных исследований способствуют более глубокому пониманию закономерностей развития оползневых процессов на склонах, сложенных осадочными породами. Полученные результаты могут быть использованы,

например, при оценках устойчивости откосов на отвалах вскрышных пород и устойчивости пород вскрыши в бортах карьеров при сейсмическом воздействии массовых взрывов на карьерах горнодобывающих предприятий.

Защищаемые положения:

1. Устойчивость склона к сейсмическому воздействию характеризуется критическими значениями максимального ускорения PGA_{min} и максимальной скорости смещения грунта PGV_{min} . Величина PGA определяет возможность возникновения необратимых деформаций, а скорость их накопления зависит от величины PGV . Если величина хотя бы одного из этих параметров ниже критического значения, то при однократном воздействии обрушения не происходит.
2. Как при вибрационном, так и при многократном импульсном воздействии критические параметры снижаются по сравнению с однократным воздействием. Степень снижения тем более значительна, чем меньше величина статического запаса устойчивости склона.
3. Необходимыми условиями возникновения динамического обрушения при крипе под действием вибраций являются накопление критической величины смещения сдвигаемой массы относительно склона и достижение определенной величины средней скорости крипа.
4. При одних и тех же величинах PGA сейсмические колебания от крупных землетрясений обладают тем более выраженным иницирующим эффектом по сравнению со взрывами, чем ниже статический запас устойчивости склона. При этом регулярное воздействие высокочастотных колебаний от массовых взрывов в карьерах может привести к постепенному накоплению необратимых деформаций.

Достоверность полученных результатов обеспечивается значительным объемом экспериментальных данных, полученных с использованием современных методик измерений и обработки данных, соответствием полученных результатов физическим представлениям, тщательным анализом опубликованных сведений.

Личный вклад автора

Все основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены соискателем в период работы в Институте динамики геосфер РАН им. М.А. Садовского и обучения в аспирантуре. Соискателем лично проведен аналитический обзор, поставлены и проведены лабораторные эксперименты, получены лабораторные и полевые экспериментальные данные, выполнены их обработка и интерпретация. Автор принимал участие в конструировании и изготовлении лабораторных стендов. Совместно с научным руководителем разработаны методика проведения лабораторных экспериментов и феноменологическая модель иницирования оползня.

Апробация работы

Основные результаты диссертационного исследования были доложены лично автором на 7 всероссийских и международных конференциях:

Конференция ИФЗ РАН Молодежная тектонофизическая школа-семинар (Москва, 2019), Всероссийская научная конференция МФТИ (Москва, 2019, 2020, 2021), Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 2022), конференция по горному и взрывному делу на АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева, (Железногорск, 2022), XVI сейсмологическая школа (Минск, 2022).

По теме диссертации автором опубликовано 13 научных работ, в том числе 7 статей в рецензируемых журналах (входящих в перечень ВАК), 6 статей в научных сборниках и трудах конференций.

Объем и структура работы: диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 126 страницах, включая 41 рисунков, 6 таблиц, 1 приложение и список литературы из 119 наименований.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н., проф. Г.Г. Кочаряну за формирование научных взглядов и за большую помощь в выполнении работы. Неоценим вклад к.ф.-м.н. В.К. Маркова в конструирование и изготовление экспериментальных установок. Автор признателен к.ф.-м.н. А.Н. Бесединой, С.Б. Кишкиной, В.И. Куликову за ценные советы и замечания, к.ф.-м.н. Д.В. Павлову за помощь при проведении лабораторных экспериментов, сотрудникам лаборатории Деформационных процессов в земной коре ИДГ РАН за поддержку и обсуждение результатов в ходе работы над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, изложены цель и задачи исследования, сформулированы основные защищаемые положения, отражена научная новизна, описаны практическая и теоретическая значимость работы.

Первая глава диссертации посвящена обзору основных методов и подходов к анализу устойчивости склонов.

Количественным показателем степени устойчивости является коэффициент (фактор) устойчивости, равный отношению суммы всех удерживающих R и сдвигающих T сил:

$$FS = \frac{\sum R}{\sum T} \quad (1)$$

Склон считается устойчивым, если его коэффициент устойчивости выше единицы ($FS > 1$). Величина коэффициента устойчивости склона, приблизительно равная единице ($FS \sim 1$), соответствует состоянию предельного равновесия. При величине коэффициента $FS < 1$ считается, что склон перешел в стадию разрушения.

При учете сейсмического воздействия в инженерных расчетах с использованием квазистатического приближения к системе сил векторно добавляется дополнительная сила за счет действия ускорения в сейсмической волне. При этом в квазистатических расчетах предполагается постоянная величина ускорения в течение всего времени воздействия. Критическим является ускорение a_c , при котором фактор устойчивости $FS = 1$. Так что критическое ускорение в сейсмической волне, субпараллельное наклону потенциального оползневого блока, является простой функцией статического фактора устойчивости и геометрии оползня:

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

При анализе возникновения склоновых явлений при землетрясениях обычно используют сведения о площади оползневого тела либо о предельных расстояниях от эпицентра землетрясения соответствующей магнитуды, при которых наблюдались оползни. Одним из первых исследователей, кто проводил подобные исследования оползневых явлений, был D. Keefer. Он предположил, что существуют предельные эпицентральные расстояния, за пределами которых оползни не распознаются. Расчетами параметров сейсмических волн и факторов местного действия в виде зависимостей основных параметров колебаний от магнитуды и эпицентрального расстояния и других факторов занималось большое количество исследователей (Ф.Ф. Аптикаев, В.Б. Заалишвили, А.Л. Собисевич, Н.Н. Михайлова, О.О. Эртелева, J. J. Bommer, D. M. Boore, M. Carro, K.-J. Chang, C-W. Chen, O.J. Deldago, S.D. Fotopoulou, A. Pugliese, C.E. Rodriguez, F. Sabetta, T. Wang и другие).

Для прогнозирования устойчивости склонов и бортов карьеров используют различные методики инженерных расчетов, основная задача которых состоит в определении оптимального угла наклона откоса при установленной высоте либо в определении высоты откоса при установленном угле наклона (И. А. Аленичев, О. Г. Бесимбаева, Э. Г. Газиев, А. М. Гальперин, Р. Галлагер, С. С. Голушкевич, О. М. Житинская, Р. И. Исмагилов, А. А. Козырев, С. А. Козырев, Н. Н. Маслов, М. А. Микулинский, П. Н. Панюков, Г. И. Покровский, И. И. Попов, В. И. Речицкий, В. В. Рыбин, В. В. Соколовский, М. Н. Троицкая, Г. Л. Фисенко, Т. Chen, J. R. Williams; и другие).

Воздействие мощных взрывов на горные склоны детально исследовалось В.В. Адушкиным с сотрудниками при проведении подземных ядерных испытаний.

Большое внимание при оценке устойчивости природных и техногенных склонов уделяется физическому и численному моделированию (Б. К. Александров, Б. Ю. Зуев, А. А. Павлович, С. В. Цирель, Д. В. Яковлев, G. Bartzke, P. A. Cundall, I. Goldhirsch, F. H. Lee, J. Locat, A. Lucas, R. Popescu, J. H. Prevost, A. N. Schofield, R. S. Steedman и многие другие).

Большой объем исследований каменных лавин выполнен А. Л. Стромом. Им впервые была создана база данных для крупных оползней в скальных массивах, которая включает более 1000 объектов, из которых для 600 определены количественные характеристики, такие как площадь, объем, высота обрушения, длина пробега и др.

Используя большой набор данных об оползнях, наблюдаемых на разных планетах, А. Lucas, A. Mangeney, J. P. Ampuero и др. продемонстрировали, что классически используемый коэффициент Хейма не равен эффективному трению, действующему в основании оползня, и поставили во главу угла зависимость трения от скорости и перемещения, т.е. скоростное разупрочнение поверхности скольжения, соответствующее эмпирическому закону трения Rate&State (J. Dieterich, A. Ruina).

В настоящее время большое количество исследователей уделяют пристальное внимание фрикционным характеристикам оползня (X. Bai, M. Chang, J. J. Dong, Wei Hu, T. Togo, C.-M. Yang; и другие).

Анализ опубликованных работ показал, что эффект многократности воздействия детально не изучался.

Вторая глава диссертации посвящена описанию постановки и проведения лабораторных экспериментов.

В соответствие с критериями геометрического подобия были подобраны величины угла внутреннего трения и сцепления модельного материала. Расчеты показали, что в лабораторных опытах целесообразно использовать материалы, удельный вес которых соответствует природным значениям ($\sim 20 \text{ кН/м}^3$), а сцепление на два порядка ниже, чем у

природного материала. Если для грунтов, слагающих, в большинстве случаев, наземные оползневые склоны, характерны значения сцепления ~ 20 кПа, то для лабораторных экспериментов следует использовать материалы с $C_m \sim 0,2$ кПа так, чтобы примерно соблюдалось условие:

$$\begin{cases} C_m = \frac{l_m \gamma_m}{l_n \gamma_n} C_n \\ [tg(\varphi)]_m = [tg(\varphi)]_n \end{cases} \quad (3)$$

Здесь C – сцепление, φ – угол трения, γ – удельный вес, l – линейный размер. Индексы n и m относятся, соответственно, к природным и лабораторным условиям.

Оценка прочностных свойств грунтов проводилась по консолидированно-недренированной схеме на установке прямого среза (УПС). Прочностные свойства контакта между блоком из консолидированного материала и поверхностью склона определялись на установке слайдер-модели (СЛД), где блок под действием приложенного сдвигового усилия скользит вдоль поверхности раздела.

Процесс разрушения склона при воздействии сейсмической волны удобно разделить на два этапа: 1 этап – образование в массиве локальных нарушений или “оживление” уже существующих (подвижки по границам слоев, раскрытие трещин); 2 этап – деформирование склона и формирование собственно оползня под действием объемных сил (силы инерции, гравитация). При воздействии сейсмической волны на пологий склон этап инициирования движения сползающей массы (оползневое тело) относительно основания склона соответствует фазе уменьшения массовой скорости смещения грунта (рисунок 1).

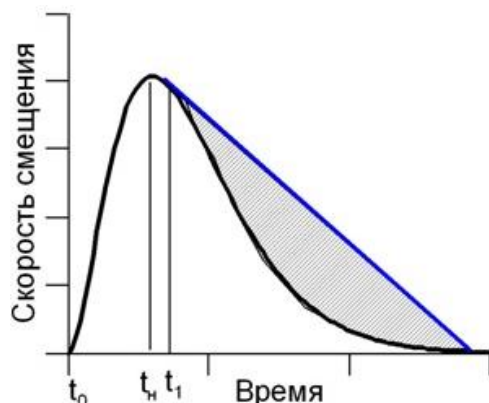


Рисунок 1 – Схема инициирования оползня под действием сейсмозрывной волны

На этапе увеличения скорости движения вплоть до максимальных значений в интервале времени (t_0-t_n) сползающая масса движется вместе с основным телом склона. В момент времени t_1 ускорение торможения принимает настолько большое значение, что его становится достаточно для преодоления сил трения и сцепления; это приводит к началу движения отделившейся массы относительно склона. В том случае, когда амплитуда смещения (заштрихованная область на рисунке 1) окажется достаточной для фрикционного

разупрочнения, происходит дальнейшее перемещение отделившейся массы оползневого тела под действием силы тяжести.

Для моделирования процесса инициирования (стадия торможения на рисунке 1) были сконструированы и изготовлены две лабораторные установки. Вертикальная ударная установка (ВУУ) для исследования субвертикального воздействия на склон и горизонтальная ударная установка (ГУУ) для изучения инициирования оползня субгоризонтальным динамическим воздействием. Схема установок представлена на рисунке 2. Принцип работы установок один и тот же. В вертикальной установке стальной бокс, содержащий модель, движется по направляющим стойкам, ускоряясь под действием силы тяжести. Падая, бокс ударялся о массивное металлическое основание. В горизонтальном варианте бокс разгонялся по направляющим и ударялся в мишень. При необходимости в обеих установках на мишень помещались демпферы из различных материалов, что позволило варьировать длительность соударения, изменяя, тем самым, параметры воздействия на модель. Параметры динамического воздействия на склон контролировались лазерным датчиком смещения ILD2220-10 и акселерометрами Bruel&Kjaer 4370, один из которых крепился на дне контейнера, а другой располагался в массиве, будучи закреплен на дюралевом диске диаметром 60 мм, что необходимо для снижения искажений записи из-за разности плотностей датчика и материала модели.

При опытах на вертикальной установке максимальная скорость движения грунта (PGV) определялась высотой падения контейнера, которая задавалась с помощью подъемного винта. Максимальное ускорение (PGA) определялось, кроме того, длительностью удара контейнера о мишень. В горизонтальной установке величина PGV варьировалась путем изменения давления в пневмоцилиндре. Требуемое значение PGA задавалось путем изменения длительности удара.

Диапазон изменения параметров воздействия в экспериментах составлял по PGV от 0,003 до 1,3 м/с, а по PGA – от 0,01 до более чем 170 g.

При исследовании деформирования склона при многократных воздействиях удары на обеих установках повторялись до тех пор, пока склон не будет разрушен, либо процесс деформирования не затухнет.

При исследовании вибрационного воздействия на боковую стенку ВУУ осуществлялось воздействие ударником, закрепленным на мини-вибростенде Bruel&Kjaer. Исследовался эффект потери устойчивости лежащего на склоне жесткого блока за счет накопления деформаций под действием низкоамплитудных сейсмических колебаний.

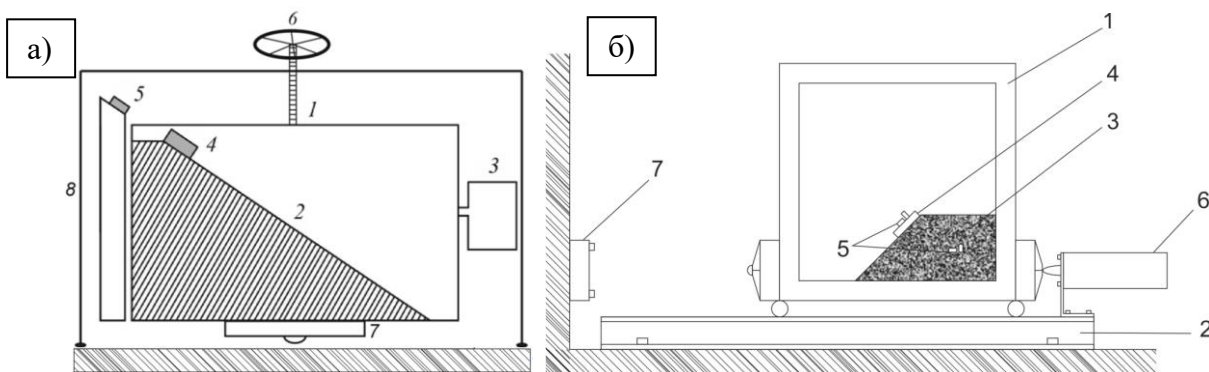


Рисунок 2 – Схема вертикальной (а) и горизонтальной (б) ударных установок
 а) 1 – контейнер; 2 – поверхность склона; 3 – ударник, закрепленный на вибростенде; 4 – блок; 5 – датчик смещения; 6 – винт, задающий высоту подъема контейнера; 7 – металлический диск; 8 – стойки.
 б) 1 – ящик с прозрачными боковыми стенками; 2 – швеллер; 3 – модель склона; 4 – блок на склоне (при проведении исследований инициирования скольжения жесткого блока); 5 – акселерометры внутри склона и на блоке; 6 – пневмоцилиндр; 7 – стальная мишень

Третья глава посвящена результатам лабораторного исследования механики инициирования обрушения склона динамическими воздействиями разных типов.

Использование лазерных датчиков перемещения и акселерометров позволило обнаруживать развитие относительного движения соскальзывающей массы оползневого тела даже в тех случаях, когда визуально деформация не проявляется. В случае, показанном на рисунке 3а, склон остался устойчивым, тогда как в опыте, показанном на рисунке 3б, произошло обрушение.

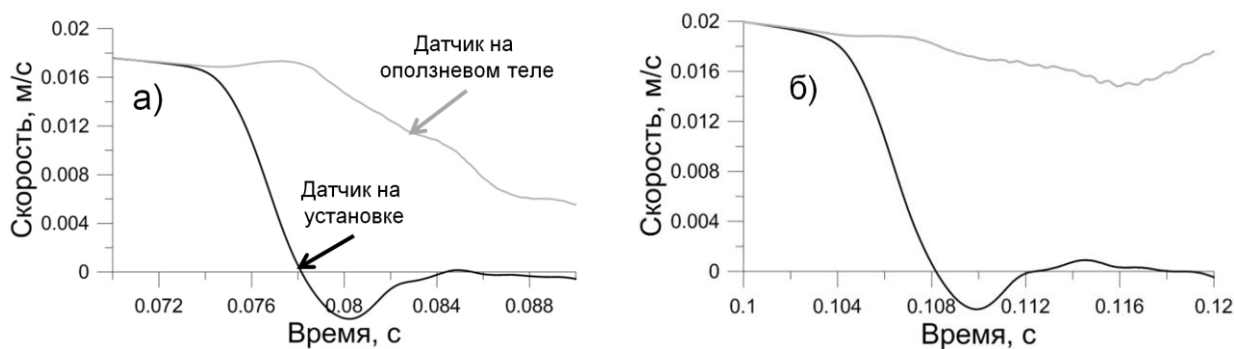


Рисунок 3 – Примеры записей ускорения (черная линия) и скорости (серая линия) движения грунта. (а) вертикальный датчик, вертикальный удар контейнера; (б) горизонтальный датчик, горизонтальный удар контейнера. Время на графиках отсчитывается от момента начала перемещения ВУУ и ГУУ

Пример разрушения склона в одном из экспериментов с субвертикальным воздействием приведен на рисунке 4.

В общей сложности было выполнено свыше 1000 экспериментов.

Обобщение результатов всех лабораторных экспериментов выполнялось в виде диаграмм максимальная массовая скорость – максимальное ускорение, на которые наносились параметры воздействия в каждом конкретном опыте.

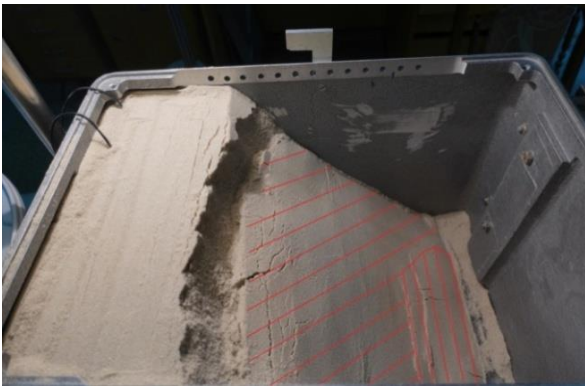


Рисунок 4 – Пример обрушения склона в одном из экспериментов на ВУУ

Пример диаграммы $PGV-PGA$ для серии экспериментов, проведенных на ВУУ, с вертикальным воздействием со склонами из кварцевого песка, увлажненного глицерином (0,25% по массе), с углом наклона 57° приведен на рисунке 5. Каждый значок черного цвета на диаграмме соответствует опыту, в котором произошло разрушение склона, а красного – эксперименту, в котором склон остался устойчивым. Крестами показаны ошибки измерения. Можно видеть, что их величина мала и не оказывает существенного влияния на получаемые результаты. В связи с этим на последующих графиках ошибки не приведены, чтобы не загромождать рисунки. Штриховые линии разделяют плоскость $PGV-PGA$ на области, в которых склон остается устойчивым при однократном импульсном воздействии, и область параметров, при которых происходит обрушение, т.е. соответствуют минимальным значениям пиковых ускорений в волне PGA_{min} и скорости смещения грунта PGV_{min} , ниже которых обрушения не происходит.

Крестами показаны ошибки измерения. Можно видеть, что их величина мала и не оказывает существенного влияния на получаемые результаты. В связи с этим на последующих графиках ошибки не приведены, чтобы не загромождать рисунки. Штриховые линии разделяют плоскость $PGV-PGA$ на области, в которых склон остается устойчивым при однократном импульсном воздействии, и область параметров, при которых происходит обрушение, т.е. соответствуют минимальным значениям пиковых ускорений в волне PGA_{min} и скорости смещения грунта PGV_{min} , ниже которых обрушения не происходит.

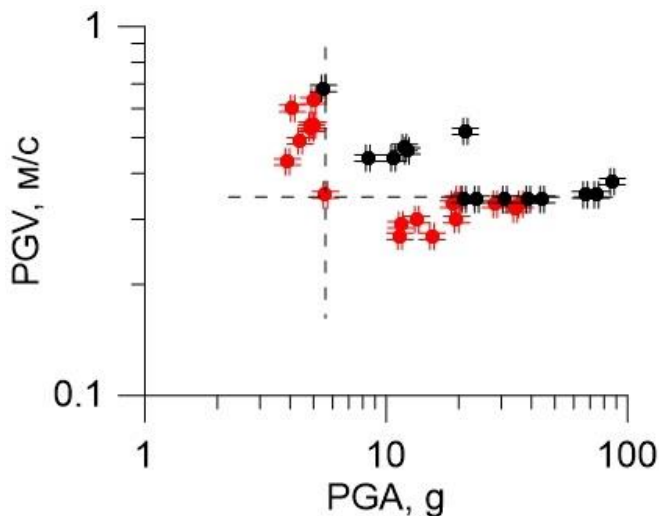


Рисунок 5 – Результаты экспериментов со склонами ($\alpha=57^\circ$) с вертикальным воздействием на склоны из кварцевого песка, увлажненного 0,25% глицерина. Пунктирные прямые соответствуют минимальным значениям скорости и ускорения, при которых были зарегистрированы оползни. ● — устойчивый склон, ● — разрушенный

Аналогичные диаграммы, обобщающие результаты некоторых серий опытов с однократным горизонтальным воздействием, приведены на рисунках 6, 7.

На рисунке 6, чтобы не перегружать рисунок, показана лишь часть экспериментальных данных. Для склонов $\alpha = 40^\circ$, $\alpha = 46^\circ$, $\alpha = 55^\circ$ показаны только те эксперименты, в которых склон был разрушен, а для $\alpha = 59^\circ$, напротив, представлены только те результаты, при которых разрушения не происходило. Линии соответствующего цвета разделяют устойчивые и неустойчивые области на диаграммах $PGV-PGA$.

На рисунке 7 показаны зависимости PGA_{min} и PGV_{min} при горизонтальном воздействии от коэффициента устойчивости склона FS .

Результаты экспериментов приведены в таблице 1, куда внесены также величины коэффициента статической устойчивости склона FS и критического ускорения a_c , рассчитанные по соотношениям (1) и (2).

Таблица 1- Критические параметры воздействия для опытов со склонами, изготовленными из кварцевого песка, увлажненного 0,25% глицерина, при вертикальном и горизонтальном ударе

Угол склона, α , град	FS	a_c , g	PGV_{min} , м/с	PGA_{min} , g	Количество опытов
Вертикальное воздействие					
49	1,29	0,22	0,49	10	106
52	1,2	0,16	0,45	7	49
54	1,15	0,12	0,38	6	37
57	1,08	0,07	0,33	5,3	32
59	1,03	0,03	0,26	3,8	32
Горизонтальное воздействие					
40	1,6	0,38	0,22	0,42	25
46	1,39	0,28	0,16	0,4	25
55	1,12	0,1	0,13	0,39	22
59	1,03	0,03	0,095	0,38	18

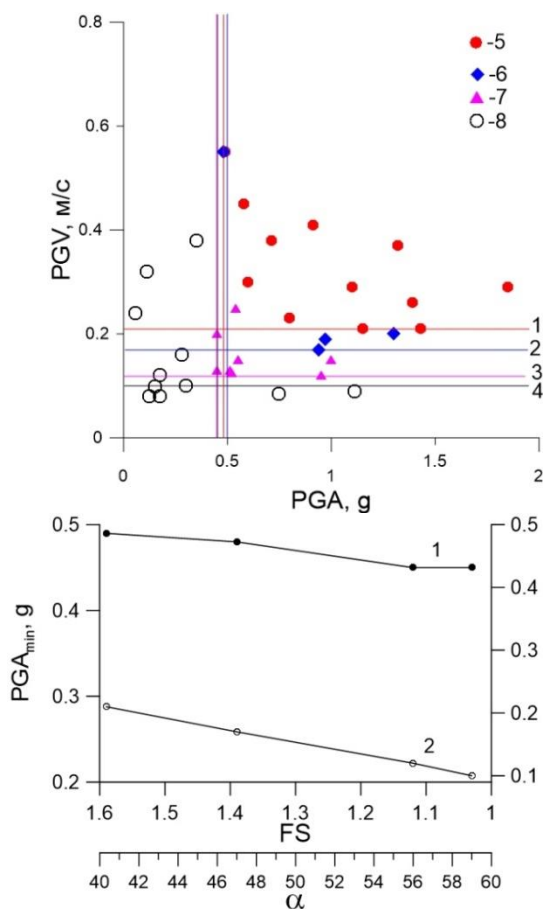


Рисунок 6 – Диаграмма PGA - PGV , обобщающая результаты экспериментов с горизонтальным воздействием. Залитые значки соответствуют опытам с разрушением, а пустые – опытам, в которых склон оставался целым. Линия 1, значок 5 — $\alpha=40^\circ$; 2, 6 — $\alpha=47^\circ$; 3, 7 — $\alpha=55^\circ$; 4, 8 — $\alpha=59^\circ$

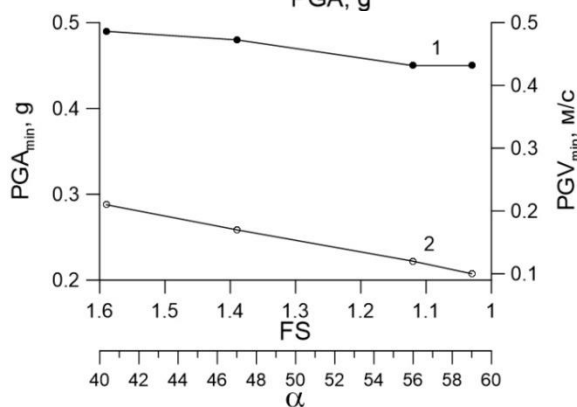


Рисунок 7 – Зависимость $PGA_{min}(1)$ и $PGV_{min}(2)$ при горизонтальном воздействии от коэффициента устойчивости склона. Для удобства на нижней оси абсцисс указаны соответствующие значения угла откоса

Из полученных данных можно заключить, что величина PGA_{min} слабо варьируется при изменении угла склона, а определяется, главным образом, прочностными свойствами материала. Если напряжения, создаваемые силами инерции, превосходят предел прочности дискретной среды (высокие значения PGA), то необратимая деформация массива происходит при любых значениях PGV . Величины минимальных значений PGA_{min} , при которых происходит разрушение склона, превышают величину критического ускорения a_c более чем на порядок. Если для крутых склонов с небольшим запасом устойчивости величина PGA_{min} значительно выше значения a_c , определенного по квазистатической схеме, то с ростом запаса устойчивости отношение PGA_{min}/a_c довольно быстро снижается. Для пологих склонов инициирование оползня в значительной степени определяется уже значением PGV . Это свидетельствует о необходимости корректировки квазистатического подхода при оценке сейсмической устойчивости склонов.

Полученные в экспериментах результаты доказывают первое защищаемое положение.

Некоторые результаты экспериментов с многократными импульсными воздействиями представлены на рисунке 8.

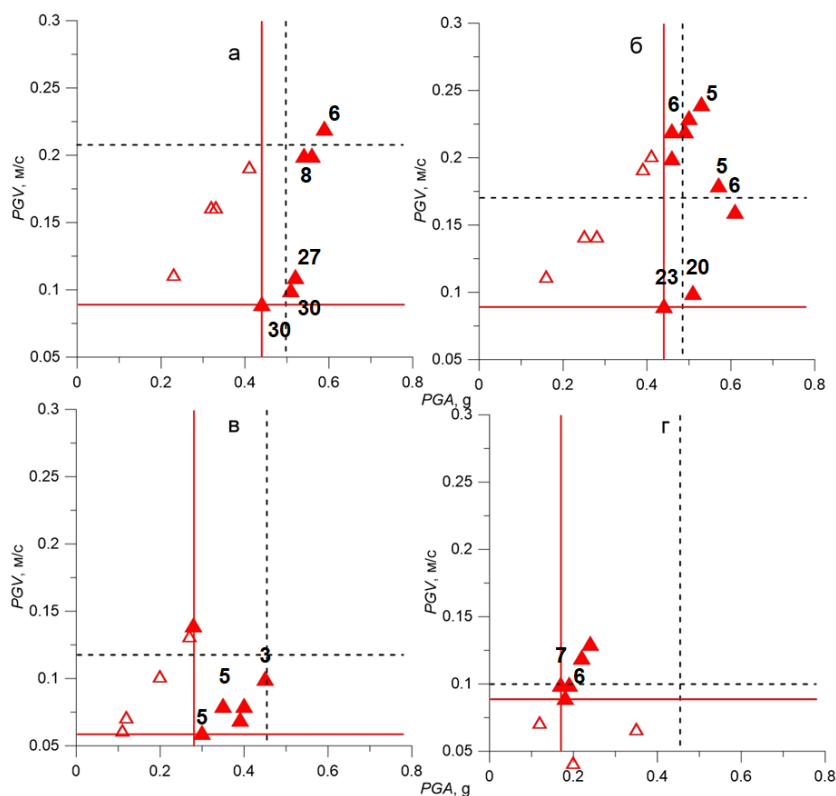


Рисунок 8 – Фрагменты диаграмм “ $PGA-PGV$ ” для многократных воздействий: \blacktriangle — склон разрушен после нескольких воздействий; \triangle — склон остался устойчивым после 30–40 ударов. Углы склонов: а — 40° ; б — 46° ; в — 55° ; г — 59° . Пунктирные линии — PGA_{min} и PGV_{min} для однократного воздействия; сплошные — PGA_{min} и PGV_{min} для многократного воздействия; числа — количество воздействий, при которых обрушился склон

Опыты с многократным воздействием показали, что критическое перемещение, главным образом, определяется свойствами грунта и геометрией склона, и очень слабо зависит от параметров воздействия. При многократном воздействии, к которому в некотором приближении можно отнести воздействие длинным цугом колебаний, критические параметры, при которых разрушается склон, гораздо ниже, чем при одиночном импульсе.

Этот эффект особенно характерен для крутых склонов с малыми коэффициентами устойчивости (рисунок 8в, г), для которых снижаются значения как критической скорости, так и критического ускорения. Если значение PGA_{min} превышено (в материале склона образовались повреждения), величина перемещения, при которой склон теряет устойчивость, может накапливаться в течение большого количества циклов нагружения.

В отдельной серии экспериментов исследовался эффект потери устойчивости лежащего на склоне жесткого блока за счет накопления деформаций под действием низкоамплитудных сейсмических колебаний. Схема установки приведена на рисунке 2а.

Вибрационное воздействие (значения $PGA \sim (0,04-0,2)g$; значения $PGV \sim (0,4-6)мм/с$) в экспериментах осуществлялось как на протяжении всего времени проведения опыта, так и пакетами по 30 с с перерывом в 10 минут. Частота вибраций составляла $f = 50$ Гц и $f = 80$ Гц, угол склона варьировался от 37° до 27° . При этом статический фактор устойчивости склона (1) увеличивался от $FS \approx 1,08$ до $FS = 1,5$

Примеры зависимостей перемещения и скорости смещения от времени при непрерывном вибрационном воздействии показаны на рисунке 9.

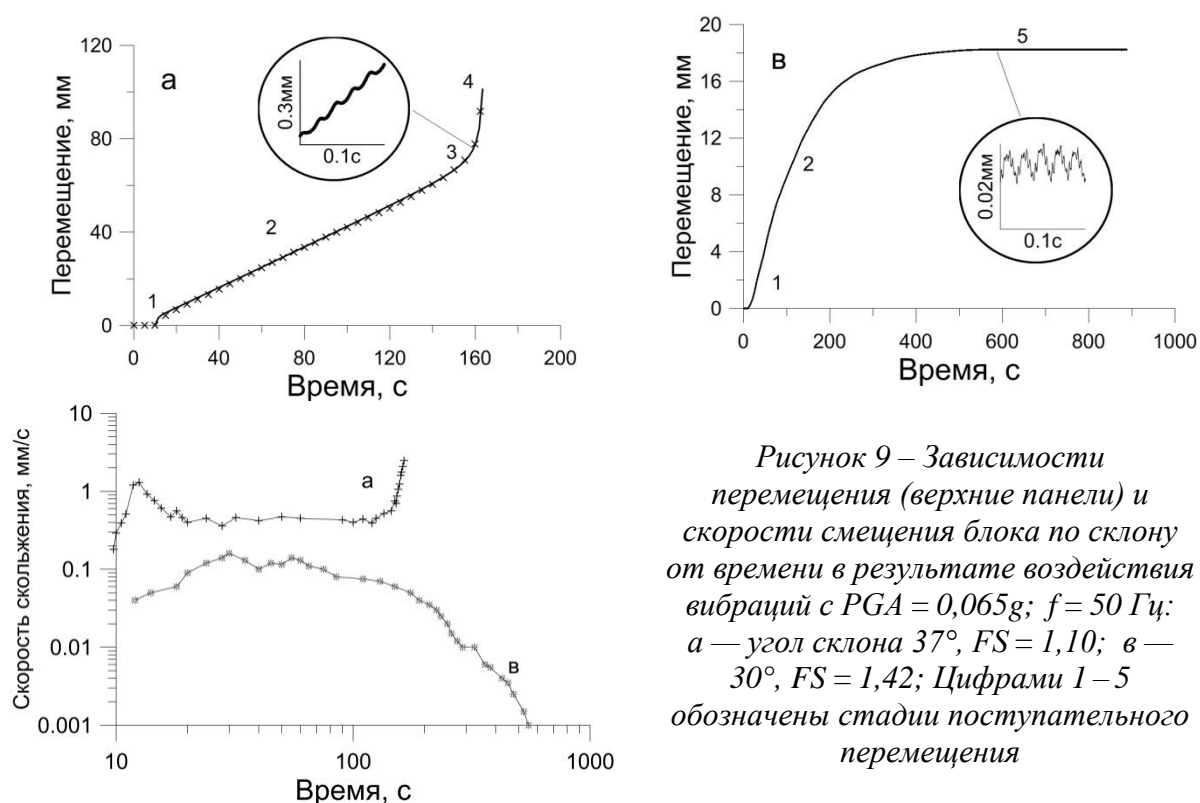


Рисунок 9 – Зависимости перемещения (верхние панели) и скорости смещения блока по склону от времени в результате воздействия вибраций с $PGA = 0,065g$; $f = 50$ Гц: а — угол склона 37° , $FS = 1,10$; в — 30° , $FS = 1,42$; Цифрами 1–5 обозначены стадии поступательного перемещения

Стадии поступательного перемещения типичны для процесса ползучести. Выделяются промежутки неустановившейся (стадия 1 на рисунке 9) и установившейся ползучести (стадия 2). Далее стадия 2 переходит либо в стадию ускоряющейся ползучести 3, развивающуюся в динамическую стадию обрушения 4, либо в фазу замедления и остановки крипа 5. Опыты с периодическим включением и выключением вибростенда показали, что

поступательное движение блока связано именно с вибрацией. После включения вибростенда блок в течение нескольких секунд разгоняется. Затем скорость скольжения становится постоянной, а после прекращения вибрации происходило торможение блока в течение десятых долей секунды. Это время определяется соотношением между силой трения и составляющей силой тяжести, направленной вдоль склона. Некоторые результаты, полученные в опытах с вибрационным воздействием, приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты экспериментов с вибрационным воздействием

<i>N</i> <i>опыта</i>	α , град	<i>FS</i>	Состояние	<i>PGA</i> , 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	0,04	82	0,4-0,5	1,5
16	27	1,56	стабилизация	0,065	0,21	0,33	<0,03	0,03
25	30	1,39	стабилизация	0,065	0,16	18	0,1	0,12
29	33	1,24	ускоряющееся скольжение,	0,065	0,1	95	0,1	0,4
101	35	1,15	обрушение	0,1	0,074	45	~0,7-0,8	1,5
102	35	1,15	обрушение	0,2	0,074	37,5	~0,7-0,8	1,49
105	32	1,29	обрушение	0,1	0,13	62,5	~0,75	1,61
106	30	1,39	обрушение	0,1	0,16	63	~0,8	1,46
Серия 2. Частота вибраций $f=80$ Гц								
201	33	1,24	обрушение	0,2	0,1	40	~0,45	1,4
202	35	1,15	обрушение	0,2	0,074	80	~0,3	-
203	35	1,15	обрушение	0,2	0,074	46	~0,55	1,35
204	37	1,08	обрушение	0,2	0,04	<10* *	~0,55	1,2

В таблице, 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.

Можно видеть, что в ряде экспериментов движение блока относительно склона наблюдалось и в тех опытах (№№ 16, 25, 29, 105, 106), в которых величина PGA была меньше, чем значение a_c . Это приводит к заключению, что возникновение скольжения под действием малых возмущений связано, в том числе, с нелинейностью реологической зависимости напряжение - перемещение для межблокового контакта. Следует отметить довольно большую величину перемещения блока относительно склона, после которой скольжение переходит в динамическую фазу. Полученные значения D_{max} в десятки миллиметров многократно превышают величину смещения, при котором происходит переход поверхности скольжения к остаточной величине сопротивления сдвигу (трению скольжения), также как и характерный размер перехода к остаточной величине трения в модели *Rate and State*. Это означает, что в критической величине смещения заложен иной

смысл, нежели переход от трения покоя к трению скольжения. Этот вопрос требует дополнительного исследования.

Кроме величины критического перемещения, опыты продемонстрировали существование некоторой величины средней скорости крипа V_{min} , ниже которой начинается «упрочнение» контакта, и блок постепенно останавливается. Для испытываемой поверхности V_{min} составила величину порядка $\sim 0,1$ мм/с. При такой скорости блок может скользить примерно с постоянной скоростью весьма длительное время. В некоторых опытах, например №25 и №29 в таблице 2, примерно одинаковые скорости скольжения и амплитуды перемещения регистрировались довольно длительное время (~ 110 с), после чего в одном случае началась стабилизация контакта и затухание скорости крипа, а в другом случае скольжение продолжалось с постоянной скоростью вплоть до $t \sim 800$ с, а 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.

Полученные результаты доказывают второе и третье защищаемые положения.

Четвертая глава посвящена разработке модели инициирования оползней сейсмическими волнами от различных источников.

В большинстве исследований, посвященных оценке возможности возникновения склоновых явлений при сейсмических событиях, содержатся сведения о предельных расстояниях от эпицентров землетрясений соответствующей магнитуды, при которых наблюдались оползни. В некоторых случаях оценивается число оползней или площади, ими занятые, в зависимости от размера землетрясения.

При работе над диссертацией на основе результатов, опубликованных в различных источниках, создана база данных, содержащая сведения о предельных эпицентральных расстояниях, на которых были зафиксированы оползни и магнитуде землетрясения (Приложение А диссертации). Там же приведены величины максимальных ускорений и скоростей смещения грунта, рассчитанные при помощи эмпирических зависимостей.

$$\log_{10}(PGA) = 0.299 + 0.299(M - 6) - 1.052\log_{10}R + 0.112\Gamma \quad (4)$$

$$\log_{10}(PGV) = -0.828 + 0.489M - \log_{10}R + 0.116 \quad (5)$$

где R — гипоцентрального расстояние, км; M — его магнитуда; Γ — параметр, зависящий от рыхлости породы (для рыхлых — 1, для крепких — 0).

Рассчитанные значения PGV и PGA в окрестности обрушившихся склонов показаны на рисунке 10 красными значками. Используя данные (Keefe, 2006), где приведена огибающая для максимальных эпицентральных расстояний от землетрясений с магнитудами от 4,5 до 7,0, с помощью соотношений (4) и (5) проведены расчеты минимальных

критических параметров колебаний, при которых зафиксированы обрушения, для землетрясений разных магнитуд. Результаты в виде черных значков представлены на рисунке 10. Видно, что результаты расчетов PGA и PGV в основном лежат выше минимальных значений, соответствующих огибающей Keefe. Можно отметить очевидную тенденцию роста критических параметров для землетрясений меньших магнитуд, что связано с увеличением частоты и более коротким цугом колебаний.

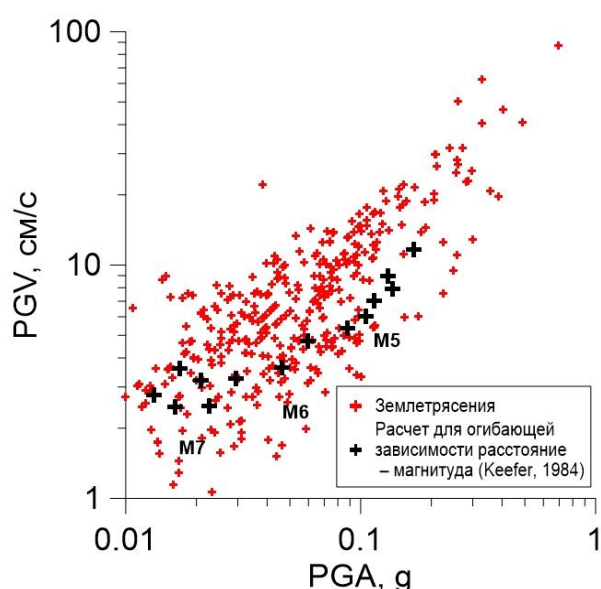


Рисунок 10 – Диаграмма PGA – PGV в окрестности обрушившихся склонов для землетрясений (красные значки) и минимальные критические параметры колебаний, при которых возникли оползни, для землетрясений магнитудами 4,5-7,0, рассчитанные по данным (Keefe, 2006)

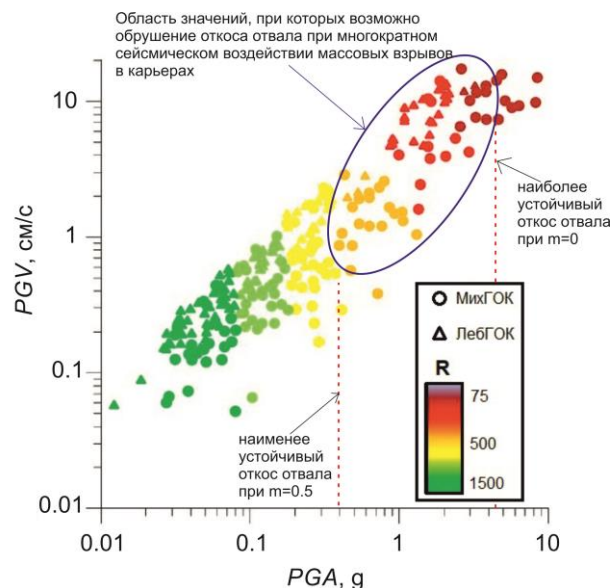


Рисунок 11 – Параметры сейсмозрывной волны при различных эпицентральных расстояниях R в метрах

На основе приведенных результатов можно заключить, что величина $PGA_{min} \sim 0,01g$ является нижним пределом максимальных ускорений в волне, которые вызывают появление нарушений в геоматериале реальных склонов. Из результатов лабораторных экспериментов ясно, что этот параметр не должен зависеть от магнитуды или периода события.

На устойчивость бортов карьеров существенное влияние оказывает систематическое производство массовых взрывов. Поэтому в рамках настоящей работы в период с 2020 по 2023 гг. были выполнены сейсмические наблюдения в карьерах Лебединского и Михайловского ГОКов. Измерения сейсмического действия массовых взрывов проводились при участии автора как стационарными, так и мобильными сейсмическими станциями, которые находились на расстоянии от 150 до 1500 м от ближайшего взрываемого блока. Методика проведения измерений детально описана в диссертации.

Полученные результаты измеренных параметров колебаний от массовых взрывов в карьерах Михайловского и Лебединского ГОКов представлены на рисунке 11. Можно с уверенностью полагать, что сейсмозрывное воздействие радикально не повлияет на откосы вблизи карьера. Однако многократность воздействия может снизить в соответствии с результатами лабораторных опытов значение критических параметров в 1,5–2,0 раза. Поскольку пиковое ускорение явно превышает критические значения, можно ожидать, что в материале склона будут постепенно накапливаться повреждения.

Для расчета смещений Ньюмарка по реальным сейсмограммам использовалась программа SLAMMER. Входными данными для анализа Ньюмарка являются величина критического горизонтального ускорения a_c и временная эпюра ускорения. Смещения жесткого блока оценивались путем двойного интегрирования участков эпюры ускорения, которые превышают a_c . Расчеты смещения Ньюмарка были проведены для 4 землетрясений разных магнитуд. Результаты расчетов показали, что величина смещений $D_N \cong 10\text{--}20$ см (обычно применяемая консервативная оценка критического смещения, необходимого для начала разрушения грунтовых откосов) достигается в тех случаях, когда PGA в 5–10 раз превышает величину a_c .

Чтобы исследовать влияние формы сигнала на величину D_N , были проведены расчеты для нескольких видов воздействия. Были рассмотрены эпюры от землетрясения Westmorland (1981) с магнитудой $M=5,9$ (рисунок 12а), массового взрыва в карьере Лебединского ГОКа, зарегистрированных на расстоянии 2,5 км от взрыва с суммарным весом зарядов 2361 т (рисунок 12б), и двух видов импульсного воздействия, описываемых импульсами Берлаге (рисунок 12в,г):

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

Расчеты (рисунок 13) показали, что 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 в 20–30 раз выше квазистатической величины. Этим доказывается четвертое защищаемое положение.

В рамках выполнения диссертационной работы была разработана феноменологическая модель инициирования оползней при многократном сейсмическом воздействии. В основе модели лежат: известные принципы определения квазистатической устойчивости склона; развитые в лабораторных экспериментах представления о закономерностях обрушения под действием динамических нагрузок; инструментальные измерения сейсмического эффекта массовых взрывов; результаты анализа большого объема

натурных данных; численные расчеты действия сейсмических колебаний на склоны. В кратком изложении основные положения феноменологической модели следующие:

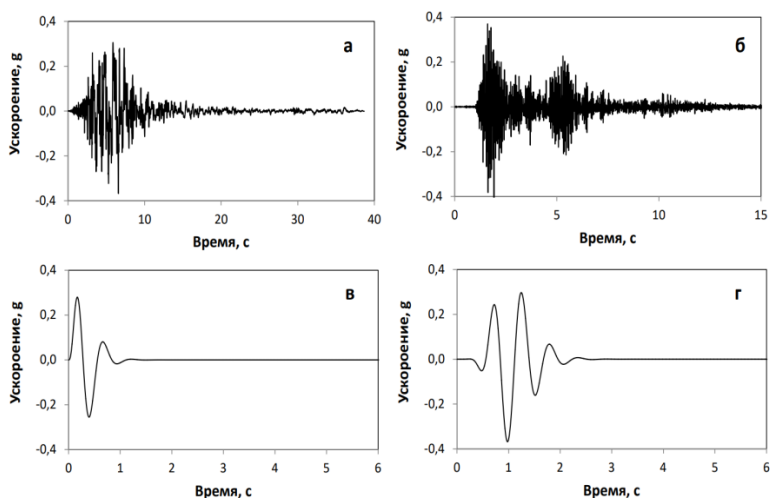


Рисунок 12 – акселерограммы, использованные для расчета смещений Ньюмарка.

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) $A=52,8$, $a=2$, $b=8$, $w=11,24$

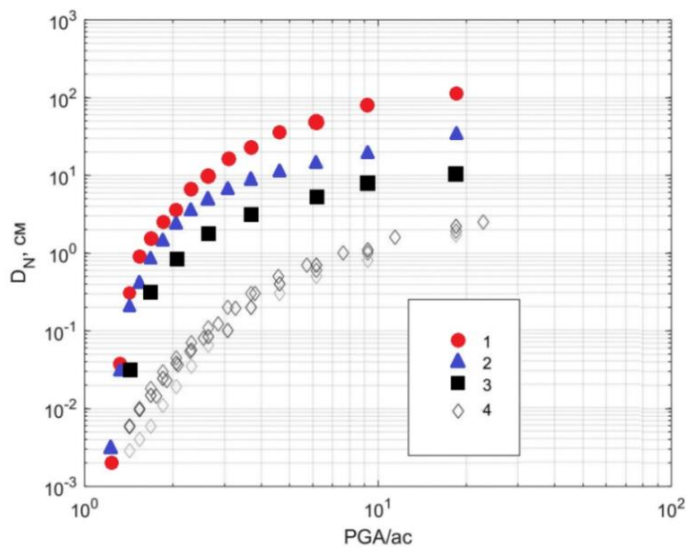


Рисунок 13 – Рассчитанные величины смещения Ньюмарка для разных типов сейсмических воздействий в зависимости от величины отношения PGA/a_c 1 – землетрясение Westmorland; 2 – импульс EX1; 3 – импульс EX2; 4 – массовые взрывы на карьере Лебединского ГОК (10.04.2019, 06.05.2020, 27.05.2020, 25.06.2020)

1. Приближение «сдвига целого блока» по границам существующих пластов, водоупорам или по вновь образованным структурным нарушениям, субпараллельным поверхности склона, во многих случаях соответствует результатам наблюдений.

2. Обводнение тела оползня может приводить к радикальному снижению запаса устойчивости из-за разупрочнения. Наиболее радикально в результате воздействия воды снижается коэффициент трения малопрочных геоматериалов – филлосиликатных и некоторых глиносодержащих пород. В кварцесодержащих породах эффект ослабления трения выражен слабо.

3. Устойчивость склона при длиннопериодном воздействии определяется как достигнутым уровнем напряжений (PGA), так и кинематикой движения нарушенной области (PGV). Существуют минимальные значения PGA_{min} и PGV_{min} . Если величина хотя бы одного из них ниже минимального значения, то обрушения не происходит независимо от величины второго параметра. Величина PGA_{min} не зависит от угла склона. Уровень ускорений в волне

$PGA > PGA_{min}$ приводит к возникновению остаточных деформаций. Если величины PGV недостаточно для инициирования обрушения, то необратимые деформации накапливаются.

6. Потеря устойчивости происходит при достижении уровня критической деформации среды вблизи поверхности. Этот уровень определяется геометрией склона и реологическими свойствами материала и не зависит от уровня и вида воздействия.

7. При многократном воздействии критические параметры заметно снижаются по сравнению с одиночным импульсом. Степень снижения критических параметров тем более значительна, чем меньше величина статического запаса устойчивости склона.

8. Необходимыми условиями возникновения динамического обрушения при крипе являются накопление критической величины смещения и достижение определенной величины средней скорости крипа.

Модель и полученные результаты позволили сформулировать правила принятия решений при оценке возможности инициирования оползня многократным сейсмическим воздействием, которые изложены в диссертации.

В заключительном разделе главы 4 проведена оценка устойчивости отвалов вскрышных пород карьеров КМА. Анализ динамической устойчивости показал, что для отвалов карьеров КМА существует область параметров сейсмозрывных волн (рисунок 11), при которых возможно обрушение откоса отвала в результате накопления повреждений при многократном воздействии массовых взрывов. Для наиболее устойчивых откосов при нулевой степени обводненности при многократном воздействии массовых взрывов опасным уровнем ускорений является величина $PGA \sim 2,8-4,2g$. С ростом обводненности критические значения могут уменьшиться до опасных величин $PGA \sim 0,4-0,6g$, $PGV_{min} \sim 0.23-2.4$ см/с.

Такие параметры регистрируются на эпицентральных расстояниях до 500-700 метров от взрываемого блока в карьере. На сегодняшний день фактическое расстояние от восточной части карьера до западной части отвала для Лебединского ГОКа около 1500 метров, для Стойленского ГОКа – около 1000 метров. Это значит, что первые признаки обрушения отвала можно обнаружить в том случае, когда восточный борт карьера, в ходе разработки месторождения, приблизится к западной части отвала не меньше, чем на 800–1000 метров для Лебединского ГОКа, и 300–500 метров для Стойленского ГОКа.

Таким образом, сейсмическое воздействие массовых взрывов радикально не влияет на устойчивость откосов отвалов вскрышных пород месторождений КМА. Однако в случае нарушения режима дренажа, и как следствие, обводнения отвала накопление необратимых деформаций при многократном воздействии массовых взрывов может привести к потере устойчивости откоса. Учитывая потенциальные риски обрушения, целесообразно осуществлять деформационный мониторинг склонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе детально исследованы закономерности развития деформаций склонов при многократном воздействии сейсмических колебаний. Основные полученные результаты можно сформулировать следующим образом:

- Установлено, что в результате многократного воздействия сейсмических колебаний коэффициент устойчивости склона снижается.
- Анализ натуральных данных показывает, что величина $PGA_{min} \sim 0,01g$ является нижним пределом максимальных ускорений в волне, которые вызывают появление нарушений в геоматериале склонов, сложенных осадочными породами.
- Впервые в лабораторном эксперименте детально изучено влияние разных характеристик сейсмических колебаний (PGA , PGV , длительность) на развитие необратимых деформаций в материале склонов, запас устойчивости которых изменяется в широких пределах. Исследован вклад ускорения и скорости смещения грунта в эффект снижения устойчивости при многократном воздействии сейсмических колебаний.
- Показано, что необходимыми условиями возникновения динамического обрушения при крипе являются превышение некоторого критического значения смещения оползневой массы относительно склона и достижение определенной величины средней скорости крипа.
- Предложенная феноменологическая модель явления и разработанные правила принятия решений при оценке опасности инициирования оползня могут быть полезны для прогноза устойчивости склонов при многократном воздействии сейсмических волн от взрывов и землетрясений.
- Применение разработанного подхода для оценки устойчивости отвалов вскрышных пород месторождений КМА к сейсмическому воздействию массовых взрывов позволило продемонстрировать целесообразность осуществления мониторинга состояния склонов, по крайней мере, в случае хотя бы частичного обводнения.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Кочарян Г. Г., **Шарафиев З. З.**, Кишкина С. Б., Чен Ц. Эффект снижения трения в основании гравитационного оползня под действием сейсмических колебаний // ФТПРПИ. – 2022. – № 2. – С. 3-14. – DOI 10.15372/FTPRPI20220201
2. Besedina A. N., **Pavlov D. V.**, **Sharafiev Z. Z.** Triggering Landslides with Seismic Vibrations // Springer Geology. – 2022. – P. 327-334. – DOI 10.1007/978-3-030-76328-2_34

3. Куликов, В. И., **Шарафиев З. З.** Сейсмическое действие массовых взрывов при подземной разработке Коробковского железорудного месторождения на застройку и население г. Губкин // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2022. – Т. 49, № 4. – С. 79-90. – DOI 10.21455/VIS2022.4-5.
4. Куликов, В. И., **Шарафиев З. З.** Сейсмозрывное воздействие подземных горных работ на населенную над шахтную застройку города Губкин // Взрывное дело. – 2022. – № 134-91. – С. 120-136.
5. Кочарян, Г. Г., Кишкина С. Б., **Шарафиев З. З.** Лабораторное исследование устойчивости горных склонов при динамических воздействиях // ФТПРПИ. – 2021. – № 6. – С. 95-109. – DOI 10.15372/FTPRPI20210609
6. Кочарян Г. Г., Беседина А. Н., Кишкина С. Б., Павлов Д. В., **Шарафиев З. З.**, Каменев П. А. Инициирование обрушения склона сейсмическими колебаниями от разных источников // Физика Земли. – 2021. – № 5. – С. 41-54. – DOI 10.31857/S0002333721050112
7. Беседина, А. Н., Павлов Д. В., **Шарафиев З. З.** Инициирование оползня сейсмическими колебаниями // Процессы в геосферах. – 2021. – № 1(27). – С. 990-995.

Публикации в других научных изданиях

1. **Шарафиев З. З.**, Остапчук А. А., Марков В. К. Изучение прочностных свойств грунтов в зависимости от гранулометрического состава на установке прямого среза // Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы шестой молодежной тектонофизической школы-семинара. – М.: ИФЗ РАН, 2019. – С.263 -264.
2. Кишкина С. Б., Кочарян Г. Г., Павлов Д. В., **Шарафиев З. З.** Лабораторное исследование устойчивости склона при импульсном динамическом воздействии // Динамические процессы в геосферах. – 2020. – № 12. – С. 62-70.
3. Павлов Д. В., **Шарафиев З. З.** Методика лабораторного исследования устойчивости склона при импульсном динамическом воздействии// Динамические процессы в геосферах. – 2020. – № 12. – С. 53-62.
4. Кочарян Г. Г., **Шарафиев З. З.** О критериях устойчивости склона при вибрационном воздействии // Динамические процессы в геосферах. – 2021. – № 13. – С. 43-50.
5. **Шарафиев З. З.** Лабораторное исследование устойчивости склона // Труды 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ 23–29 ноября 2020 года. Аэрокосмические технологии. — Москва: МФТИ, 2020. –С.254-256.
6. **Шарафиев З. З.** Исследование устойчивости модельных склонов // Исследование устойчивости модельных склонов // XVI Международная сейсмологическая школа, Минск, 12–16 сентября 2022 г. С. 105.