

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского
Российской академии наук

Шарафиев Зульфат Забирович

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

Специальность 1.6.9 «Геофизика»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физ.-мат. наук, профессор Г.Г. Кочарян

Научный консультант:
доктор техн. наук, профессор С.Д. Викторов

Москва – 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
ГЛАВА 1. МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	11
1.1. Инженерные методы расчета фактора устойчивости.....	11
1.2. Метод Ньюмарка.....	17
1.3. Некоторые результаты наблюдений устойчивости склонов к воздействию колебаний от землетрясений.....	20
1.4. Сведения о воздействии на склон сейсмических колебаний от взрывов	23
1.4.1. Обрушения при мощных подземных взрывах	23
1.4.2. Устойчивость бортов карьера при воздействии массовых взрывов	25
1.5. Физическое и численное моделирование.....	28
1.6. Исследование фрикционных свойств геоматериалов.....	30
1.7. Многократные динамические воздействия на склон	33
Выводы к Главе 1.....	34
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ.....	36
2.1. Обоснование методики проведения лабораторных экспериментов.	36
2.2. Исследование свойств грунта	38
2.3. Методика проведения экспериментов на вертикальной и горизонтальной ударных установках	40
2.4. Эксперименты с вибрационным воздействием	48
Выводы к Главе 2.....	48
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ В ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИНИЦИИРОВАНИЯ ОБРУШЕНИЯ СКЛОНА ДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ	50
3.1. Иницирование оползней на склонах импульсным воздействием	50
3.2. Иницирование оползней многократным импульсным воздействием	60
3.3. Эффект накопления деформаций в основании оползня под действием слабых вибраций	65

Выводы к Главе 3.....	75
ГЛАВА 4. МОДЕЛЬ ИНИЦИИРОВАНИЯ ОПОЛЗНЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	76
4.1. Оценка параметров сейсмических колебаний от землетрясений при обрушении склонов	76
4.2. Параметры сейсмозрывных волн на бортах карьеров горнодобывающих предприятий при производстве массовых взрывов.	78
4.3. Обсуждение и интерпретация данных наблюдений	82
4.4. Феноменологическая модель процесса инициирования обрушения склона при многократном сейсмическом воздействии	89
4.5. Оценка устойчивости отвалов вскрышных пород для месторождений КМА	96
Выводы к Главе 4.....	102
Заключение.....	103
Список литературы.....	105
Приложение № А.....	118

ВВЕДЕНИЕ

Работа направлена на изучение закономерностей инициирования и развития оползней на природных и искусственных склонах, подверженных сейсмическому воздействию землетрясений или взрывов. Хотя факторы, определяющие запас устойчивости склона, хорошо известны (геометрия склона, механические свойства слагающих пород, обводненность, накопленный уровень повреждений и т.д.), момент начала безостановочного скольжения зачастую определяется случайными факторами, к числу которых относится и воздействие сейсмических волн.

Актуальность работы

Сейсмические колебания являются одним из важных триггеров нарушения устойчивости склонов, находящихся в состоянии близком к предельному равновесию. В свою очередь оползни и обвалы склонов являются одними из наиболее распространенных проявлений разрушительного действия землетрясений. Даже в регионах с умеренной сейсмичностью землетрясения достаточно часто выступают в качестве вероятной причины инициирования оползней и обвалов. Известны случаи возникновения оползней при интенсивности колебаний в 3-5 баллов по шкале MSK-64 (Яковлев и др., 2012). В России подобные события регулярно происходят на склонах Северного Кавказа, Краснодарского края и на склонах некоторых других регионов.

Интенсивному сейсмическому воздействию подвергаются и искусственные склоны на горнодобывающих предприятиях – борта карьеров и отвалы пород. Объемы отвалов достигают гигантских величин. 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 (Храмцов и др., 2018).

Широко 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.

В основных и отраслевых нормативных документах рекомендовано использование квазистатического подхода, т. е. рассмотрение сейсмических сил как постоянно действующих, что чаще всего приводит к неоправданной переоценке последствий сейсмического воздействия. Эффекты накопления необратимых деформаций склона при регулярном воздействии сейсмических колебаний в литературе практически не рассмотрены. Все это делает актуальным исследование многократного сейсмического воздействия землетрясений и массовых взрывов, применяемых при разработке месторождений, на устойчивость склонов.

Степень разработанности проблемы детально рассмотрена в первом разделе диссертации. Здесь лишь отметим, что хотя проблеме статической и динамической устойчивости склонов посвящено множество работ, механика явления до конца не ясна. Оползни, подчас, происходят совершенно неожиданно при солидном запасе устойчивости, иногда через некоторое время после динамического воздействия. В основе многих численных и аналитических

методов оценки устойчивости лежит подход Ньюмарка, согласно которому предполагается, что для инициирования оползня необходима некоторая деформация толщи склона, превышающая критическую величину. Деформации по Ньюмарку возникают лишь в те отрезки времени, когда ускорение в сейсмической волне превышает величину, рассчитанную исходя из условий статического равновесия. Такой подход реализован в целом ряде известных программных продуктов (например, SLAMMER, (Jibson et al, 2013)). Однако анализ результатов наблюдений показывает, что для достижения значимых необратимых деформаций величина ускорения в сейсмической волне должна значительно превышать квазистатический предел. Анализ публикаций показывает, что дополнительного исследования требуют соотношения между влиянием различных характеристик сейсмических колебаний на устойчивость оползнеопасных склонов, а вопрос влияния многократности воздействия на устойчивость склонов детально не исследовался.

Целью диссертации 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 субвертикальном и субгоризонтальном 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 сейсмическом 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 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 сейсмическом воздействии и при воздействии вибраций.

Теоретической и практической значимостью обладают разработанная феноменологическая модель процесса инициирования схода оползня при многократном сейсмическом воздействии и сформулированные правила принятия решений при оценке опасности схода 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 КМА и других горнодобывающих предприятиях.

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 с помощью использования комплекса современных методов обработки данных, соответствием полученных результатов физическим представлениям, тщательным анализом имеющихся опубликованных сведений.

Личный вклад автора

Все основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены соискателем в период работы в Институте динамики геосфер им. М. А. Садовского РАН и обучения в аспирантуре института. Соискателем лично выполнен 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 инициирования 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 14 научных работ, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах (входящих в перечень ВАК), 8 в научных сборниках и трудах конференций.

Исследования проводились в рамках работ по Государственному заданию ИДГ РАН, проектов Российского фонда фундаментальных исследований №№ 19-05-00378 и 20-55-53031.

Полученные результаты были использованы при выполнении ИДГ РАН НИР «Афалина» в 2019-20 г.г.

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.

Благодарности

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.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ. ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

Склоновые явления давно привлекают интерес исследователей как геомеханический процесс. В настоящее время известно множество случаев перемещения больших масс горных пород с объемами в десятки и сотни км³. Крупную проблему представляет нарушение устойчивости склонов в горах и предгорьях, а также на карьерах и в отвалах горнодобывающих предприятий. Хотя на устойчивость склонов наибольшее влияние оказывают подземные и поверхностные воды (для отвалов горных пород ~49,8% случаев (Ильин и др., 1985)) сейсмические колебания, как отмечалось выше, являются важным фактором, инициирующим нарушение устойчивости склонов, находящихся в состоянии близком к предельному равновесию. Так, например, по данным (Hanse, 2003) для подводных оползней более чем в 40% случаях инициирование оползней приписывается воздействию сейсмических колебаний от землетрясений. Хотя достоверность этих данных не слишком велика (из 225 оползней только в 32 случаях событие схода оползня связано с определенным землетрясением, в остальных же 193 случаях эта связь остается лишь предположением по косвенным признакам), ясно, что вклад сейсмического воздействия довольно велик. Самый большой подводный оползень, известный по опубликованным данным, оценивается по объему в 20 тыс. км³ (Dingle, 1977). При этом предполагается, что он также был инициирован землетрясением.

1.1. Инженерные методы расчета фактора устойчивости

При оценке статической устойчивости склона используют методы, основанные на анализе условий предельного равновесия. При этом количественным показателем степени устойчивости является коэффициент (фактор) устойчивости, равный отношению суммы всех удерживающих R и сдвигающих T сил:

$$FS = \frac{\sum R}{\sum T} \quad (1.1)$$

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.

Таким образом, при описании движения гравитационного оползня важнейшую роль играет правильный учет сил сопротивления сдвигу, действующих в области локализации деформаций.

Во многих инженерных руководствах коэффициенты устойчивости оползня методом предельного равновесия рассчитываются не только из условий равновесия сил, но и из условий равновесия моментов сил. В этом случае склон разбивается на вертикальные отсеки, для каждого из которых рассчитываются условия равновесия. На рисунке 1.1 представлена поясняющая расчетная схема метода общего предельного равновесия. Ниже приведена формула (1.2) для расчета коэффициента устойчивости из условия равновесия моментов сил (ОДМ 218.2.006-2010, 2010):

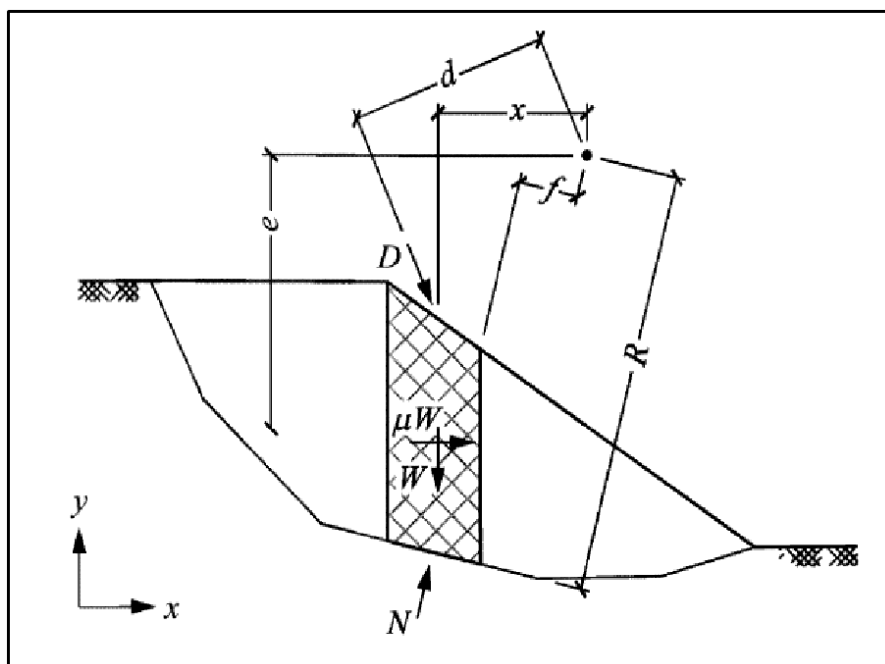


Рисунок 1.1 – Схема расчета фактора устойчивости

$$FS_m = \frac{\sum_{i=1}^n [c_i l_i + (N_i - u_i l_i) \operatorname{tg} \varphi_i] R_i}{\sum_{i=1}^n N_i f_i + \sum_{i=1}^n W_i x_i + \mu_h \sum_{i=1}^n W_i x_i + \sum_{i=1}^n W_i e_i + \sum_{i=1}^n D_i d_i} \quad (1.2)$$

где i – номер рассматриваемого отсека; R – плечо силы сопротивления грунта сдвигу; n – общее количество отсеков; u – величина порового давления; φ – угол внутреннего трения грунта в основании отсека; c – удельное сцепление в грунте в основании отсека, l – длина основания отсека; μ – коэффициент сейсмичности (отношение максимального горизонтального ускорения в сейсмической волне к ускорению силы тяжести); W – вес грунта в отсеке; N – нормальная реакция в основании отсека; D – результирующая сила внешней нагрузки; f – плечо силы нормальной реакции в основании отсека N ; x – плечо силы тяжести отсека W ; e – плечо горизонтальной составляющей сейсмической нагрузки; d – плечо результирующей внешней нагрузки D , м.

При оценке динамической устойчивости возникает проблема выявления динамики движения после первичного отрыва, когда разгон и торможение движущейся грунтовой массы определяются силами сцепления и трения на поверхности скольжения в условиях высоких скоростей деформации материала.

Геометрия линии отрыва в настоящее время определяется либо аналитически (Голушкевич, 1948), либо путем численного моделирования динамических задач методом конечных элементов и различными методами дискретных элементов (Галлагер, 1984; Williams et al., 1985 и др.).

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. Все методы расчетов условно можно разделить на несколько групп.

В работах первой группы решаются задачи, связанные с построением контура откоса, находящегося в предельно устойчивом состоянии. Согласно (Соколовский, 1960) касательные напряжения по линии поверхности скольжения

определяют формы откосов, при которых сохраняется состояние их предельного равновесия (численные методы). В работах С. С. Голушкевича представлены графические методы расчетов устойчивости склонов (Голушкевич, 1957).

Во второй группе методы основаны на сохранении равенства угла наклона касательной к углу сопротивления сдвига (Троицкая, 1951; Маслов, 1955). Недостатком такого подхода является невозможность определения формы поверхности скольжения.

В работах третьей группы различными методами строится поверхность скольжения, вдоль которой удовлетворяется условие предельного равновесия. Наибольшее распространение на практике получил метод Г. Л. Фисенко, в котором поверхность скольжения рассматривается как сочетание отрезков окружностей и прямых (Фисенко, 1965).

В следующую, четвертую группу относят методы расчета устойчивости склонов, которые учитывают прочностные характеристики на поверхности скольжения, вдоль которой удовлетворяется условие предельного равновесия. Данная группа методов отличается от предыдущих различными схемами расчетов, в которых конфигурация области скольжения напрямую зависит от пространственной ориентации поверхностей ослабления в откосе, условий разрушения пород, величины и направления действующих сил в реальных условиях, физико-механических свойств горных пород. Можно отметить методы Г.Л. Фисенко (Фисенко, 1956), И.И. Попова (Попов, 1987), П.Н. Панюкова (Панюков, 1978), В.И. Речицкого (Газиев, Речицкий, 1985) и др..

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:

$$F_{seism} = \frac{aW}{g} = \mu W \quad (1.3)$$

где W – вес грунта в рассматриваемом элементе, g - ускорение силы тяжести; a – горизонтальная составляющая ускорения в сейсмической волне, μ - коэффициент сейсмичности.

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:

$$a_c = (FS - 1) \sin \alpha \quad (1.4)$$

Здесь и далее ускорение выражается в единицах g , а α – угол наклона поверхности скольжения с горизонтом.

Наблюдения показывают, что определенная таким образом величина a_c обычно оказывается сильно переоцененной, так что в расчетах при учете инерциальных сил иногда вводят поправочный коэффициент $\sim 0,1 - 0,5$ к максимальному значению горизонтального ускорения в сейсмической волне (ОДМ 218.2.006-2010, 2010). С другой стороны, квазистатический подход не учитывает того, что действие сейсмической волны может создать начальный сдвиг в критической области и/или изменить характеристики поверхности скольжения, например, благодаря фрикционному разупрочнению при сдвиге (Кочарян, 2016).

Эти эффекты в определенной мере учитываются широко применяемым, особенно за рубежом, подходом Ньюмарка (Newmark, 1965), который будет рассмотрен в следующем разделе.

Простейшей, но довольно эффективной схемой, используемой для оценки динамической устойчивости склона, является исследование условий равновесия блока или части бесконечного слоя постоянной толщины на наклонном основании (рисунок 1.2). Несмотря на простоту постановки, этот подход позволяет не только

проанализировать статическую устойчивость оползней такого типа, но и построить модель динамики развития процесса скольжения.

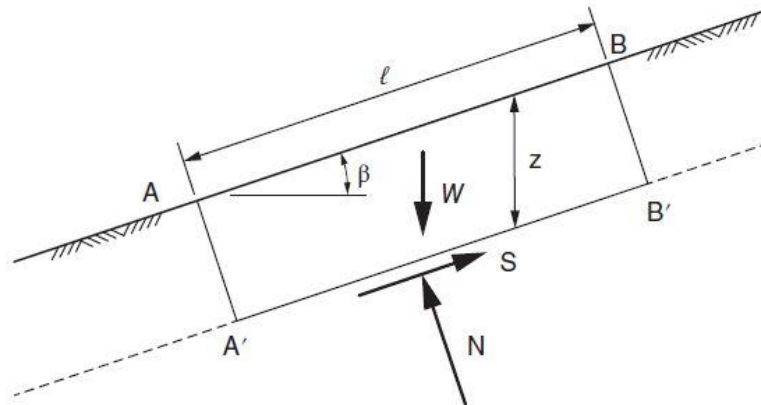


Рисунок 1.2 – Схема равновесия слоя постоянной толщины, лежащего на склоне (Ingles et al, 2006)

Рассмотрение элементарного баланса сил позволяет найти предельные условия равновесия при заданных характеристиках контакта слоя и подстилающего склона. Сдвиговые τ и нормальные σ напряжения на границе слоя можно записать как:

$$\tau = \gamma \cdot z \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \quad (1.5)$$

$$\sigma = \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \alpha \quad (1.6)$$

где γ – удельный вес грунта плотностью ρ , α - угол наклона основания.

Для простейшей прочностной модели фактор устойчивости FS записывается в виде:

$$FS = \frac{c + \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \beta \cdot \operatorname{tg} \phi}{\gamma \cdot z \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha} \quad (1.7)$$

Для обводненных грунтов величины сцепления и угла внутреннего трения заменяются их эффективными значениями, а литостатическое давление $\gamma \cdot z$ в уравнениях (1.5) и (1.6) уменьшается на величину порового давления воды u в основании слоя:

$$FS = \frac{c' + (\gamma \cdot z - u) \cdot \cos^2 \alpha \cdot \operatorname{tg} \phi'}{\gamma \cdot z \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha} \quad (1.8)$$

В соответствии с квазистатическим подходом при оценке сейсмической устойчивости склонов в знаменатели уравнений (1.7) и (1.8) добавляются инерционные члены, определяемые максимальным горизонтальным ускорением в сейсмической волне.

Таким образом, рассчитываемые коэффициенты динамического запаса устойчивости являются функцией угла склона, фрикционных характеристик контакта и максимального ускорения в сейсмической волне.

Созданы, также, расчетные модели, предполагающие компьютерное моделирование с учетом слоистого строения массива с заданием индивидуальных свойств грунта в каждом слое (Fredlund, Krahn, 1977; Krahn et al, 1971).

1.2. Метод Ньюмарка

Помимо критических ускорений, дающих прямую оценку динамической силы, нарушающей равновесие склона, для эмпирической оценки параметров устойчивости используются такие параметры, как величина критической массовой скорости в цуге сейсмических колебаний и смещение в сейсмической волне. Примером поиска характеристик сейсмических колебаний, могущих служить входным параметром для оценки устойчивости, являются методы Н. Ньюмарка (Newmark, 1965) и А. Эйриса (Arias, Hansen, 1970).

Согласно подходу Ньюмарка тело оползня рассматривается в виде жесткого блока на наклонном основании. В самом деле, во многих случаях, особенно у крупных оползней, область локализации перемещения довольно узкая, так что тело оползня движется как единое целое, а деформацией породы внутри сползающей массы можно пренебречь. Кроме того, закономерности обрушения в значительной степени определяются наличием литологических границ, естественных поверхностей скольжения и неоднородностей, сформированных на стадии статического предразрушения массива. Поэтому приближение «сдвига целого блока» по границам существующих пластов или по вновь образованным

структурным нарушениям, субпараллельным поверхности склона, представляется вполне оправданным. Метод Ньюмарка в общем виде можно представить как способ оценки "сверху" остаточных смещений в основании оползня после воздействия сейсмической волны. Согласно предположению Ньюмарка оползень не будет инициирован до тех пор, пока не наберется некоторая критическая величина перемещения D_N потенциально неустойчивой массы относительно основания. В базовом варианте движение тела оползня представляется как движение блока по наклонной поверхности или вращение недеформируемого тела оползня по поверхности скольжения. Формально метод сводится к двойному интегрированию зависимости ускорения в сейсмической волне от времени $a(t)$, с учетом того, что проскальзывание происходит лишь в моменты превышения некоторой заданной критической величины ускорения a_c (рисунок 1.3).

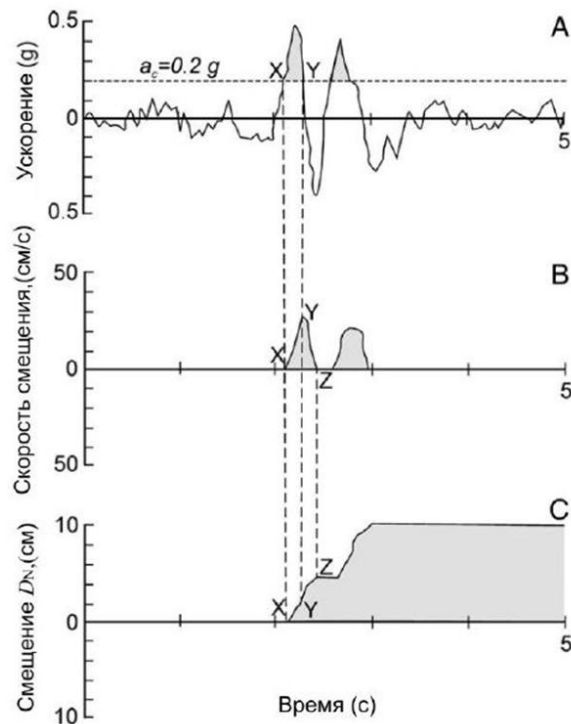


Рисунок 1.3 – Иллюстрация метода Ньюмарка для определения накопленного (кумулятивного) косейсмического смещения оползневого блока (по (Wilson et al, 1983)):

А – зависимость ускорения от времени с критическим ускорением (штриховая линия) 0,2 g. В – скорость оползня в зависимости от времени. С – смещение оползня в зависимости от времени

В простейшем варианте модели Ньюмарка рассматривается только горизонтальная составляющая ускорения в сейсмической волне, имея в виду, что при малых углах она примерно соответствует составляющей, субпараллельной склону.

Наибольшую проблему представляет неопределенность величины критического смещения D_N . Для «когерентных» оползней (движение одним блоком) значение $D_N=10$ см, по мнению авторов (Wilson et al, 1983; Keffer, 1984), является той величиной, при которой грунтовый откос может потерять устойчивость. Эта величина неплохо согласуется и с результатами численных расчетов обрушения склонов методом дискретных элементов (Arnold, 2016). Для различных коллювиальных отложений в (Wilson, Keefer, 1983; Keffer, 1984) предложено значение $D_N=2$ см..

За время, прошедшее с момента публикации работы (Newmark, 1965), десятки авторов пытались улучшить модель проскальзывающего блока, учесть наличие всех трех компонент ускорения в сейсмической волне, учесть зависимость сдвиговой прочности от накопленной сдвиговой деформации для некоторых грунтов. Большие усилия были потрачены на создание методик региональных прогнозов величин смещения Ньюмарка по сейсмическим записям с учетом локального усиления ускорения в сейсмическом цуге за счет местных мягких пород на скальном основании и усиления колебаний за счет горного рельефа. Еще одно направление публикаций посвящено предсказаниям региональных параметров сейсмических волн и факторов местного действия в виде зависимостей этих параметров от магнитуды и расстояния до гипоцентра землетрясения (Аптикаев, Эртелева, 2012; Заалишвили, 2000; Михайлова, 1988; Собичевич и др., 2014 ; Voore et al, 1993; Sabetta, Pugliese, 1996; Carro et al, 2003; Эртелева, 2015).

Для расчета смещений Ньюмарка по реальным сейсмограммам можно использовать программу SLAMMER (Jibson et al, 2013). Входными данными для анализа являются временная эпюра ускорения и величина критического ускорения a_c . Метод оценивает смещение, интегрируя участки волновой формы

ускорения, на которых превышено значение a_c , затем снова интегрирует эту часть сигнала, чтобы получить кумулятивное смещение жесткого блока.

Модификация подхода Ньюмарка - метод Эйриса, основанный на оценке критического параметра интенсивности сейсмического воздействия (I_A), по формуле:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} a(t)^2 dt \quad (1.9)$$

где $a(t)$ – зависимость ускорения от времени. Время интегрирования ограничивается величиной T_d , когда ускорения падают ниже некоторого заданного предела. Параметр I_A имеет размерность скорости (м/с). Особенностью метода является учет как положительных, так и отрицательных ускорений. При упрощенной трактовке записи ускорения величина I_A может быть рассчитана как сумма квадратов максимальных ускорений в выбранном временном окне.

В работе (Jibson et al, 1993) предложена корреляционная зависимость между D_N и I_a для широкого диапазона a_c , с помощью которой, задавая прочностные свойства грунта и угол склона, можно оценить величину критического ускорения и далее, используя региональные корреляционные соотношения оценить смещение Ньюмарка.

Подход Ньюмарка и его модификации оказались удобным инструментом для оценки устойчивости склонов к динамическому воздействию и широко используются в мировой практике. В России этот метод менее распространен, хотя также используется, например (Захаров и др., 2009; Яковлев и др., 2012).

1.3. Некоторые результаты наблюдений устойчивости склонов к воздействию колебаний от землетрясений

Как отмечалось выше, существенную проблему представляет неопределенность величины критического смещения D_N .

Сведения о параметрах колебаний, инициирующих оползни, довольно скудны и отрывочны. Для земляных откосов неоднократно строились

корреляционные зависимости между параметрами сейсмических колебаний и остаточными смещениями в теле плотины – см, например (Das et al., 2007), где рассмотрено множество случаев, когда были измерены остаточные смещения оползней и оценены или измерены максимальные ускорения в волне. Среднее остаточное смещение D измерялось вдоль вектора движения оползня. Для построения корреляции использовалось отношение максимального горизонтального ускорения a_{max} к величине a_c максимально допустимого ускорения, рассчитанного по квазистатическому методу. На рисунке 1.4 показана корреляция $D - a_c/a_{max}$ (Das et al., 2007).

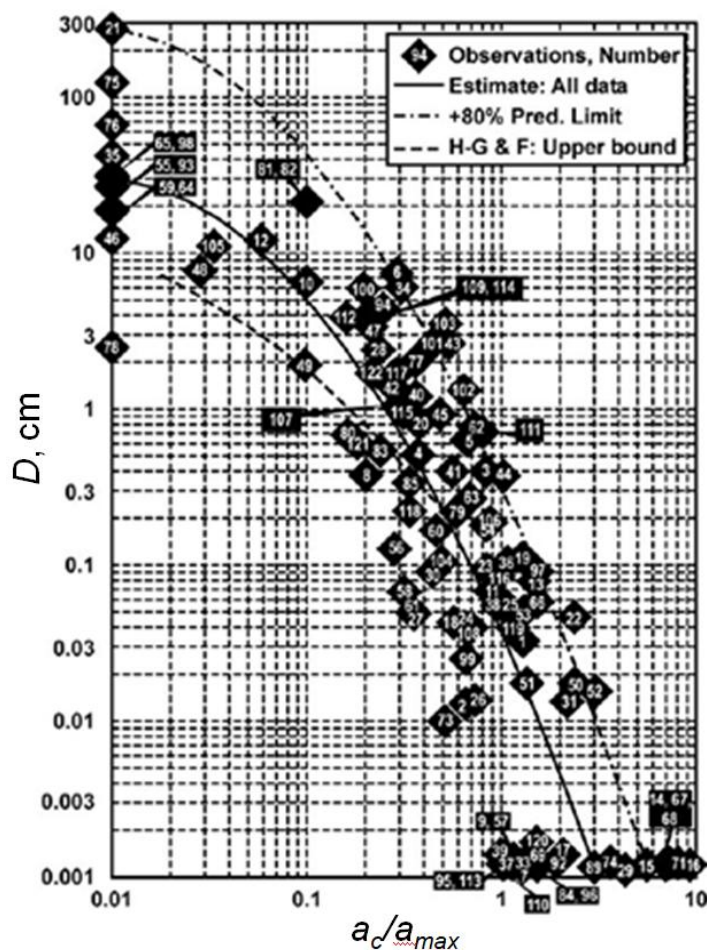


Рисунок 1.4 – Корреляция между остаточными смещениями и относительным горизонтальным ускорением. Цифры у точек обозначают номер строки в таблице, приведенной в (Das et al., 2007)

Как следует из рисунка 1.4, для достижения значительного остаточного перемещения величина ускорения в сейсмической волне должна превышать квазистатический предел в 10-100 раз.

При оценке склоновых процессов при сейсмических событиях большинство исследователей анализируют сведения о предельных расстояниях от эпицентров землетрясений соответствующей магнитуды, при которых наблюдались оползни. Базовая работа, с которой сравнивают почти все последующие результаты – (Keefe, 1984). Одна из таких зависимостей (Keefe et al, 2006) показана на рисунке 1.5.

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 параметрами воздействия довольно сложно по нескольким причинам.

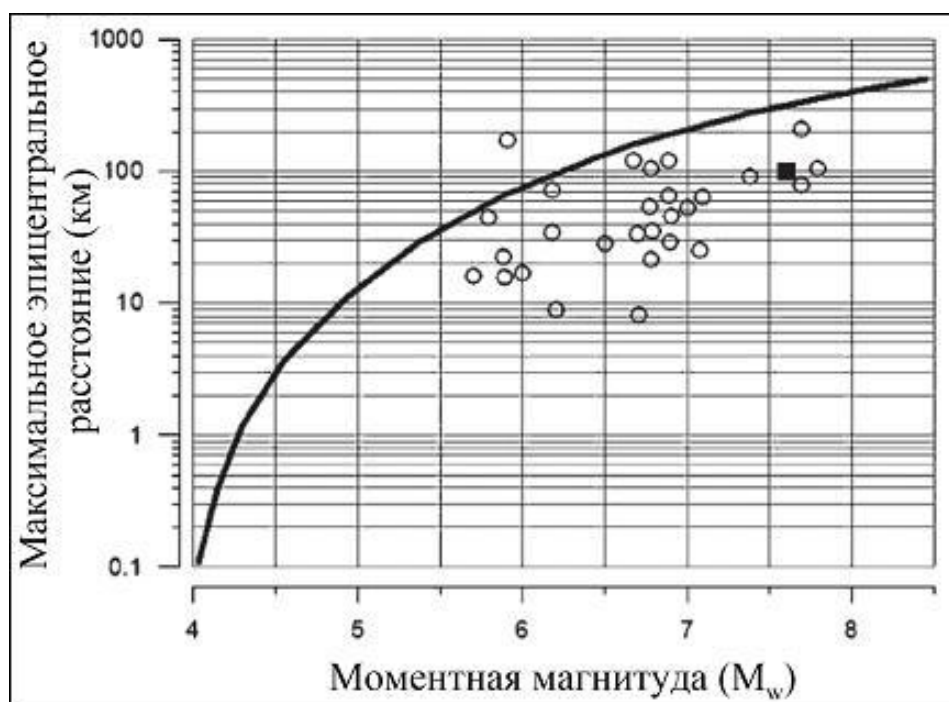


Рисунок 1.5 – Максимальные эпицентральные расстояния, при которых наблюдались склоновые явления при землетрясениях разных магнитуд.

Сплошная линия – огибающая для разных рядов данных

Во-первых, на устойчивость склона влияют большое количество факторов – угол склона, угол трения, сцепление, обводненность, толщина слоя и т.д. Эти данные известны далеко не всегда.

Во-вторых, измерения параметров движения грунта в окрестности склона, в большинстве случаев, не проводились. Использование усредненных 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), полученным для разных территорий.

Оценки, полученные при помощи расчетов по эмпирическим зависимостям, величин PGV и PGA и данных о предельных расстояниях, на которых образуются оползни при землетрясении заданной магнитуды, показывают, что предельные значения PGA , при которых были инициированы склоновые явления, составляют величину около $(0,1-0,3)g$. Соответствующие значения максимальной массовой скорости составляют величину в сантиметры – первые десятки см/с (Fotopoulou, Pitalakis, 2017; Wang et al., 2018, Forte et al., 2021 и многие другие публикации).

Большой объем инструментальных измерений, проведенный сейсмологами, например (Медведев и др., 1977), показал, что на склонах наблюдается заметное увеличение амплитуды колебаний по сравнению с выходами скальных пород. Характер изменения может зависеть от частоты колебаний, направления их прихода, крутизны и высоты склона, однако в среднем было отмечено, что увеличение сейсмической интенсивности на вершинах склонов по отношению к основанию составляет около 1 – 2 баллов. Что соответствует отношению пиковых амплитуд ускорений на поверхности к соответствующим значениям на коренной породе от 2 до 4 раз (Эртелева, 2020).

1.4. Сведения о воздействии на склон сейсмических колебаний от взрывов

1.4.1. Обрушения при мощных подземных взрывах

Воздействие мощных взрывов на горные склоны детально исследовалось при проведении подземных ядерных испытаний. В основном эти данные касаются взрывов на Новоземельском полигоне. Эти процессы детально изучены в работах В. В. Адушкина (Adushkin, 2006; Адушкин, Спивак, 2007 и др.).

Наиболее распространенные случаи обрушения относятся к процессу развития интенсивного камнепада в виде движения вниз по склону отдельных

камней, каменных глыб или части поверхностного слоя, обычно на отдельных наиболее крутых участках склона. Объемы камнепада относительно невелики. В сравнительно редких, но наиболее важных случаях обрушение под действием подземного взрыва сопровождается образованием крупных оползней объемом на уровне миллионов кубических метров. При движении оползней значительного объема образуются каменные лавины, отличающиеся высокой подвижностью. Такие каменные лавины распространяются на большое расстояние от основания склона, растекаются в ширину.

В целом ряде штольных взрывов были зарегистрированы процессы обрушения горных склонов и образования каменных лавин объемом от десятков и тысяч вплоть до нескольких миллионов кубометров горной породы.

Аналогичные процессы обрушения горных склонов происходили и на Семипалатинском полигоне.

Детальный анализ данных, полученных при взрывах, показывает, что существенное значение для возникновения обрушения имеет не только интенсивность воздействия волны сжатия, но и особенности строения горного массива и, в первую очередь, крутизна склонов. В результате проведенного анализа материалов инструментальной регистрации параметров волны сжатия (массовой скорости и величины ускорений) на склонах крутизной 30-50 градусов, были установлены критические условия обрушения склонов, справедливые только в случае проведения крупномасштабных подземных взрывов. При этом диапазон изменения величины массовой скорости на склоне составлял от 8 м/с до 25 м/с, диапазон ускорений от 10 до 30g (Adushkin, 2006).

В.В. Адушкиным было предложено эмпирическое соотношение между величиной массовой скорости $V_{кр}$, при превышении которой происходило обрушение склона, и крутизной склона, характеризующейся углом наклона α , в виде:

$$V_{кр} = \frac{5,2}{tg(\alpha - 25^\circ)}, \quad (1.10)$$

где $\alpha > 25$.

При построении зависимости (1.10) величина угла наклона поверхности склона 25° была принята в качестве предельной в отношении обрушения разрушенной породы со склона и возникновения каменной лавины. Такая величина предельного угла склона соответствовала углу естественного откоса разрушенного материала.

Эмпирическая зависимость (1.10) построена для подземных взрывов в прочном скальном массиве и отражает то обстоятельство, что в тех случаях, когда склон сложен прочными породами, необходимо очень интенсивное воздействие для того, чтобы образовать достаточно большой объем разрушенного материала, который может сформировать лавину с высокой подвижностью (низким значением эффективного коэффициента трения), способную разогнаться до большой скорости. До настоящего времени предполагалось, что для суши характерное значение объема дальнотрассовой лавины составляет не менее 10^6 м³, хотя недавние исследования демонстрируют эффекты снижения трения и в оползнях существенно меньшего размера (Lucas et al, 2014).

1.4.2. Устойчивость бортов карьера при воздействии массовых взрывов

При анализе влияния взрывов на устойчивость бортов карьеров рассматривают как изменение физико-механических свойств горных пород под действием массовых взрывов (Малюшицкий, 1957; Тюпин, 2017), так и влияние инерционных сил на условия равновесия грунтовых и скальных откосов.

В ряде работ для оценки устойчивости борта карьера используют те прочностные характеристики, которые имеют породы, испытавшие воздействие взрыва (Попов, 1949). В качестве рекомендаций предлагается с приближением фронта работ к предельным контурам изменять технологию работ таким образом, чтобы размеры зон ослабления пород в результате взрыва не снижали бы эффективной прочности породы в откосе. Наблюдения на ряде карьеров показали,

что признаки сдвижений от повторяющихся массовых взрывов отмечаются на расстоянии от 40 до 60 м от взрывааемых блоков (Попов, 1949).

Ослабление прочности пород зачастую происходит вдоль «поверхности вероятного обрушения» на определенном ее участке, расположенном вблизи места взрыва. Размеры такого участка зависят от величины заряда ВВ и коэффициента запаса устойчивости борта в статических условиях (Микулинский и др., 1963).

Согласно известной схеме Г. И. Покровского наиболее опасное направление действия сейсмических сил не горизонтальное, а наклонное – вниз в сторону откоса (Покровский, 1954). Согласно этой схеме поверхности скольжения в трещиноватых породах прямолинейны, и контакты между слоями направлены в сторону откоса.

Из современных исследований динамической устойчивости бортов карьеров КМА можно выделить несколько работ. В работе (Ярг и др., 2018) описывается методика исследования устойчивости бортов карьера КМА, которая состоит из нескольких этапов:

Для расчета устойчивости бортов авторы использовали метод предельного равновесия и численные расчеты методом конечных элементов с учетом состава и свойств горных пород конкретного участка карьера.

В результате расчетов для рабочих уступов нижняя граница FS принята за 1,2; для временно нерабочих уступов – $FS=1,5$; для нерабочих уступов – $FS=2$;

В (Бесимбаева и др., 2018) оценка устойчивости выполняется с помощью специальной программы с учетом неоднородности прибортового массива, прочностных характеристик горных пород, проектных значений углов наклона уступов и т.д. Расчеты устойчивости по выделенным разрезам показали, что при максимальной разработке карьера «Кентобе» коэффициенты устойчивости колеблются от 0,77 до 1,07, т.е. борт карьера может оказаться неустойчивым.

В работе (Исмагилов и др., 2020) авторы провели расчеты устойчивости бортов карьера Михайловского ГОКа методами предельного равновесия и методом конечных элементов с учетом вариации физико-механических свойств

глинистых отложений. По полученным результатам были выявлены основные особенности деформирования откосов, зоны сдвижения, участки концентрации напряжений и возможный механизм разрушения.

Для оценки устойчивости бортов и отвалов карьера в последнее время часто используются измерения при помощи интерферометрических радаров (Исмагилов и др., 2020) и беспилотных летательных аппаратов (Исмагилов и др., 2020). Это позволяет получать данные о смещении участков поверхности путем сравнения данных, собранных в разное время, и осуществлять прогнозы опасных ситуаций (Бингем-Каньон, США; железорудное месторождение Тамандуа, Бразилия и др.) (Michelini et al, 2014). В 2019 г. впервые введен в эксплуатацию для тестирования георадар IBIS-FM на карьере Михайловского ГОКа.

На гидроотвалах Лебединского ГОКа, на хвостохранилище и гидроотвале Михайловского ГОКа активно использовался метод дистанционного контроля, основанный на использовании системы датчиков - пьезодинамометров, заложенных по возможным поверхностям скольжения (Гальперин и др., 2007). Полученные данные используются при расчетах коэффициентов устойчивости для вариантов, соответствующих различным положениям депрессионной кривой и степеням уплотнения слоев глинистых пород, которые принимают выше или ниже установленных при первоначальных замерах.

В работе (Рыбин, 2014) оценка устойчивости борта карьера Ковдорского ГОКа выполнялась по секторам с учетом инженерно-геологических особенностей строения массива горных пород. Расчет устойчивости проводился для участков массива горных пород, которые со стороны карьера ограничены выработанным пространством, со стороны породного массива – выделенными структурными неоднородностями. Результаты исследования устойчивости бортов позволили повысить проектную глубину основного карьера.

Оценка сейсмического действия массовых взрывов на бортах карьера рудника «Железный» проводилась в работе (Козырев и др., 2017). Результаты работы позволили определить эмпирические зависимости скоростей смещения и ускорения смещения породных уступов от приведенного расстояния, что, в свою

очередь, позволило определить степень нарушенности массива и радиус сейсмоопасной зоны.

Современные методы оценки динамической устойчивости бортов и отвалов карьеров позволяют дать наиболее четкое понимание механизмов оползней и причин их возникновения. Комбинированное использование инженерно-геологических изысканий, лабораторных экспериментов с образцами, численного метода конечных элементов, метода предельного равновесия позволило выявить разломную зону, которая создала условия для инфильтрации дождевых осадков (Тао Chen et al., 2023). Повышение уровня грунтовых вод на 5 метров привело к уменьшению FS до критических значений, что и стало одной из основных причин возникновения крупномасштабного оползня на угольном разрезе Манглай (Китай).

1.5. Физическое и численное моделирование

Экспериментальное изучение устойчивости сухих и водонасыщенных склонов под действием сейсмических волн было предметом многих крупных проектов. К таковым можно отнести программы VELACS (Popescu, Prevost, 1995), COSTA (Locat et al, 2001) и другие. Масштаб объектов таков, что его можно моделировать в лабораторных условиях при помощи специальных установок, например, при наличии геомеханических центрифуг.

В работе (Александров, 1961) проведены лабораторные эксперименты по изучению длительных вибраций на изменение физико-механических свойств песков и глин карьеров КМА. Установлено, что под действием длительной (30-минутной) вибрации с ускорением от 0 до 500 см/с^2 сопротивление пород сдвигу монотонно уменьшается. С уменьшением времени сотрясений до 5 минут влияние их становится практически незаметным.

Центробежное моделирование является важной методикой для исследования геомеханических процессов. Так, например, проводились масштабные исследования устойчивости склонов при землетрясениях на геотехнической центрифуге в Кембридже (радиус ~ 4 м, ускорение порядка $130 g$)

(Lee, Schofield, 1988). Некоторые результаты центробежного моделирования с возможностью имитации сейсмических волн приведены в обзоре (Steedman, 1991).

Результаты физического моделирования на моделях из эквивалентных материалов (Яковлев и др., 2012) показали, что при оценке сейсмического воздействия на устойчивость бортов карьера нужно учитывать не только интенсивность колебаний, но и их продолжительность (говоря о землетрясениях, магнитуду событий). Это означает, что при проведении расчетов в основу должны быть положены не только карты интенсивности колебаний, но и структурные карты расположения очагов землетрясений.

Численное моделирование зачастую включает численный расчет устойчивости блоков и их движения по упрощенным схемам с предписанными геометрией движения и законами трения. Реже встречаются работы, где законы динамического трения являются следствием моделируемых первичных процессов. Еще реже встречаются численные модели, в которых на основе фундаментальных положений моделируются и геометрия отрыва тела лавины, и параметры динамического трения.

Одним из наиболее распространённых способов моделирования является метод дискретных частиц, например, (Cundall, 1971; Cundall, 1982). Эта модель несжимаемых частиц с системой взаимодействия между соседними частицами с успехом применяется для квазистатических задач о разрушении массивов горных пород. Поскольку частицы в модели могут перемещаться на любые расстояния, модель дискретных частиц легко приспособливается к описанию движения лавин гранулированного материала. Технически описание сил между двумя взаимодействующими частицами реализуется через модели, связывающие нормальные и сдвиговые силы на контакте со степенью перекрытия контуров частиц. Это позволяет описать нормальные и поперечные силы на контакте и довольно правдоподобно описать трение между частицами.

Опубликовано, также, значительное число работ по численному моделированию динамики водонасыщенных массивов гранулированных

материалов. Например, трехмерное моделирование движения водонасыщенной массы гранулированного материала позволяет увидеть межзерновое течение насыщающей жидкости и оценить влияние формы частиц на их движение (Bartzke et al, 2016).

Большое внимание уделялось моделированию эффектов динамического взаимодействия дискретных частиц в теле лавины, например, (Goldhirsch, 2008). Согласно работе (Lucas et al, 2014) численное моделирование движения лавин по склону удачно воспроизводит широкий набор данных о дальнопобежных лавинах, если предположить, что трение в основании тела лавины μ уменьшается с ростом скорости U относительно основания по закону:

$$\mu(U) = \frac{\mu_0 - \mu_w}{(1 + \|U\|/U_w)} + \mu_w \quad (1.11)$$

где $\mu_0=0,84$, $\mu_w=0,11$ и $U_w=4$ м/с.

1.6. Исследование фрикционных свойств оползней

Хорошо известно, что существуют лавины, обладающие необыкновенной подвижностью. Дальность их пробега существенно превышает элементарные оценки, сделанные на основе перехода потенциальной энергии оползня в кинетическую с учетом характерных для горных пород величин трения.

Первое научное описание "дальнопобежной" каменной лавины было сделано А. Геймом, описавшим Эльмский оползень 1881 г. (Heim et al, 1932).

Он отметил, что перед остановкой лавина двигалась по склону с углом наклона около 17° , что намного меньше, чем угол трения. Специфика этих явлений, которые обычно характерны для каменных лавин объемом свыше 10^6 м³, состоит в том, что если в статическом состоянии разрушенная горная порода достаточно хорошо описывается законом предельного равновесия Кулона с углом внутреннего трения $\varphi \sim 25^\circ \div 45^\circ$, то для описания движения дальнопобежной лавины приходится предположить снижение φ до $5^\circ \div 10^\circ$ и менее, что не соответствует статическому углу внутреннего трения ни одного из известных природных материалов. В простейшем случае под эффективным коэффициентом

трения принято понимать отношение максимального перепада высот отложений породы H до и после события к пройденному лавиной горизонтальному расстоянию L . Хорошо известно, что эффективный коэффициент трения снижается с ростом объема лавины (Sheidegger, 1973; Strom et al., 2019; Ming Zhang, 2022 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. (Стром, 2022., Strom et al., 2019 и др.).

Используя большой набор данных об оползнях, наблюдаемых на разных планетах, авторы (Lukas et al., 2014) 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 (Dieterich, 1979; Ruina, 1983). Это наводит на мысль, что при определенных условиях эффект скоростного разупрочнения может иметь место и в оползнях относительно небольшого объема.

Эффект снижения коэффициента трения при возрастании скорости скольжения подробно исследован в лабораторных экспериментах последних трех десятилетий, направленных на изучение физики очага землетрясения. Данные множества исследований обобщены, например, в работе (Wibberley et al, 2008) и приведены на рисунке 1.6. Снижение коэффициента трения, начиная со скоростей скольжения ~ 10 см/с, объясняется различными причинами для разных пород и разных экспериментальных условий. Среди них: локализация нагрева на площади «действительного» контакта, макроскопический подъем температуры и присущий эффект скоростного разупрочнения, термальное разложение минералов, связанное с этим эффектом увеличение порового давления и генерация слабого материала, и т.д.

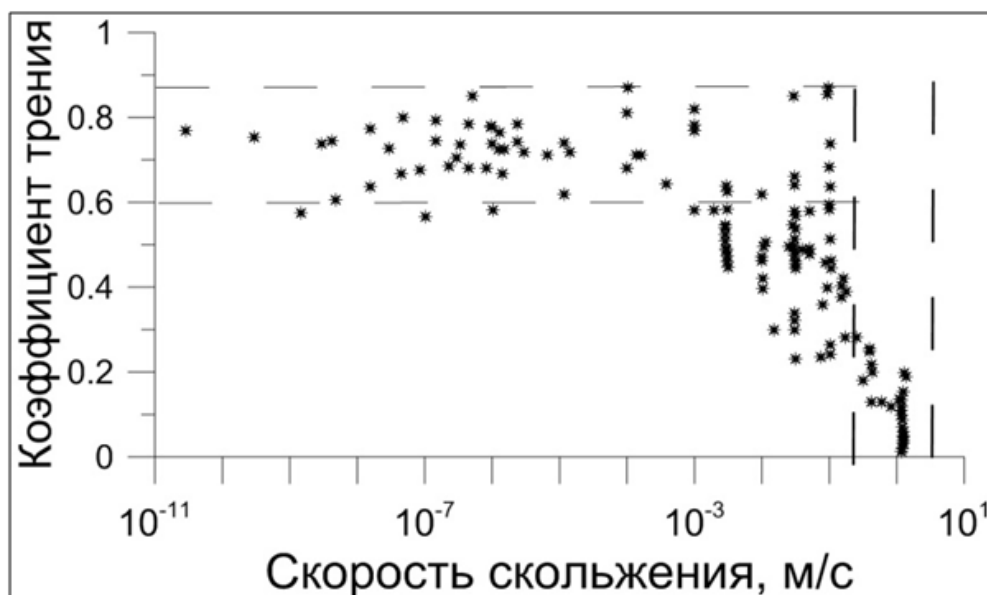


Рисунок 1.6 – Динамические коэффициенты трения различных горных пород, определенные при разных скоростях скольжения

Значки – экспериментальные данные разных авторов, заимствованные в (Wibberley et al, 2008). Горизонтальный пунктир – типичные значения статического коэффициента трения. Вертикальный пунктир – диапазон скоростей скольжения при динамических подвижках.

В настоящее время большое количество исследователей уделяют пристальное внимание фрикционным характеристикам оползня. Авторы работы (Bai et al, 2018) считают, что именно увеличение скорости скольжения оползня является наиболее значимой причиной уменьшения трения.

Лабораторные исследования фрикционных свойств обычно проводят на высокоскоростных ротационных установках, где определяют фрикционные свойства образцов, отобранных вблизи оползневого тела при различных нормальных напряжениях и скоростях скольжения, начиная от очень низких (десятки сантиметров в год) и заканчивая довольно высокими скоростями (до 10 метров в секунду) (Togo et al, 2012).

В экспериментах различных групп исследователей с разными породами отмечена важная роль воды (Che-Ming Yang et al, 2014), установлены некоторые особенности поведения среды при значительных скоростях скольжения, включая наличие областей разупрочнения, которые могут быть связаны с нарастанием

давления жидкости и последующей миграцией жидкости из области скольжения (Chien-chih Chen et al, 2011). В целом ряде работ (Chien-chih Chen et al, 2011; Dong et al., 2012) отмечено, что коэффициент трения около 0,2 является разумной оценкой трения при высокоскоростном скольжении оползневого материала.

Исследовались процессы возможного минерального преобразования материала оползневого тела в области скольжения. В работе (Wei Hu et al, 2018) в лабораторных условиях определена толщина зоны, затронутой нагревом, и измерена температура, достигнутая на поверхности скольжения оползня ($794\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$), выявлены свидетельства термического разложения материалов, включая тальк и доломит, на глубине примерно $\approx 6,5$ мм ниже поверхности скольжения.

В работе (Dong et al., 2012) продемонстрировано, что использование закона трения, зависящего от скорости и перемещения (Rate & State Friction Law, (Dieterich, 1979)), позволяет успешно описать кинематику оползневого тела при сейсмическом воздействии с использованием простой жесткой блочной модели.

1.7. Многократные динамические воздействия на склон

Совершенно ясно, что большинство склонов неоднократно подвергаются воздействиям сейсмических волн от землетрясений или взрывов. При этом, в случае обрушения или деформации склона, параметры воздействия, естественно, берутся по последнему событию, с которым ассоциируется обрушение.

Крупные лавины в свою очередь порождают довольно интенсивную сейсмическую волну (Moore et al., 2017).

В качестве примеров вероятного эффекта накопления деформаций при сейсмическом воздействии можно привести "парные" лавины. Например, двойной сход лавины в стенке карьера по добыче медной руды Бингам Каньон (Bingham Canyon Mine) в 30 км от города Солт Лейк Сити (Юта, США). Этот карьер считается одним из крупнейших в мире (диаметр около 4 км, глубина около 1 км). Ночью 10 апреля 2013 г. произошел двойной (с интервалом в 1,5 часа) оползень одной из стенок карьера общим объёмом около $(50-70) \times 10^6 \text{ м}^3$ (Hibert et al., 2014).

В окрестности было зарегистрировано еще 11 индуцированных обрушений объёмом от 10^4 до 10^5 м³ (Moore et al., 2017).

Аналогичный эффект наблюдался при сходе лавины Маунт Мегер (Mount Meager) 6 августа 2010 г. Через ~10 минут после схода основной лавины (50×10^6 м³) зафиксирован сход второй лавины, примерно на порядок меньшей по объёму (Allstadt, 2013).

Несмотря на вероятный эффект накопления деформаций, влияние многократности воздействия практически не изучалось.

Выводы к главе 1

- Выполненный обзор состояния вопроса показывает, что существенное значение для возникновения обрушения склона имеют интенсивность и длительность динамического воздействия, особенности строения горного массива и характеристики грунта.
- При воздействии сейсмических колебаний в качестве критически важных параметров, как правило, рассматриваются максимальное горизонтальное ускорение в сейсмической волне PGA , длительность сейсмического воздействия. При воздействии колебаний от удаленных землетрясений на наземные склоны типичным является значение критического ускорения около $0.3g$. Согласно подходу Ньюмарка важнейшую роль играет величина накопленного перемещения оползневой массы по склону D_N , которая для разных условий может изменяться в широком диапазоне. Для достижения значительных остаточных смещений величина ускорения в сейсмической волне должна превышать квазистатический предел в 10–100 раз. Дополнительного исследования требуют соотношения между влиянием различных характеристик сейсмических колебаний (PGA , PGV , длительность, магнитуда землетрясения и т.д.) на устойчивость оползнеопасных склонов.
- Сейсмическое воздействие лавин на окружающую местность может вызывать сход вторичных (сейсмически индуцированных) оползней

поблизости. Крупномасштабные обрушения могут происходить в несколько этапов, порождая соизмеримые по объему лавины. Повторные обрушения могут наблюдаться через различные интервалы времени.

- Вопрос влияния многократности воздействия на устойчивость склонов детально не исследовался.
- Одной из основных задач настоящей работы является детальное исследование в лабораторных экспериментах закономерностей инициирования оползня многократным воздействием.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ

2.1. Обоснование методики проведения лабораторных экспериментов

При землетрясении наибольшая интенсивность воздействия на горные склоны достигается в группе поверхностных или поперечных волн. При этом основная компонента движения направлена субгоризонтально (рисунок 2.1а). При взрывах, в зависимости от расстояния до взрыва и геологического строения массива, могут реализоваться варианты, показанные на рисунках 2.1б и 2.1в. В первом случае (рисунок 2.1б) воздействие происходит в результате падения прямой продольной волны. При этом основная компонента будет направлена субгоризонтально. Во втором случае (рисунок 2.1в), в результате преломления падающей волны на границе с более податливым слоем, основное воздействие будет направлено субвертикально.

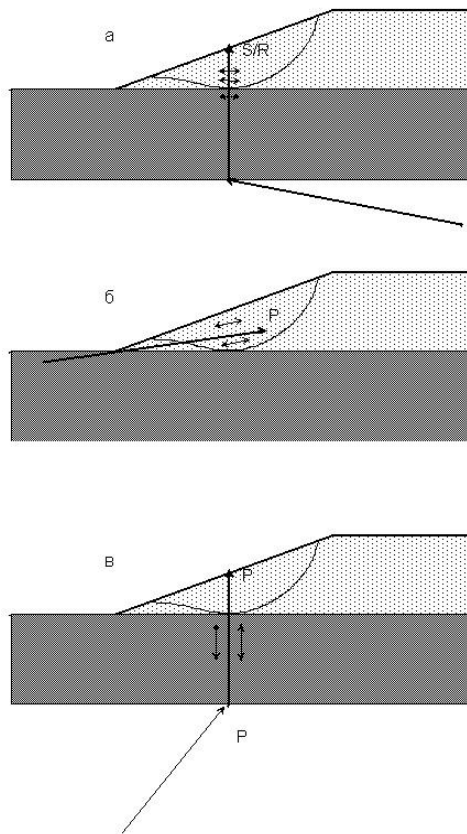


Рисунок 2.1 – Схема выхода сейсмической волны на склон при землетрясении (а) и подземном взрыве (б, в)

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 (оползневого тела) относительно основания склона соответствует фазе уменьшения массовой скорости смещения грунта (рисунок 2.2). На этапе увеличения скорости движения вплоть до максимальных значений в интервале времени (t_0-t_H) 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, что, соответственно, приводит к началу движения отделившейся массы относительно склона. При этом, первоначальное движение, в зависимости от угла выхода сейсмической волны и геометрии склона, может быть как вниз, так и вверх по склону. В том случае, когда амплитуда смещения (заштрихованная область на рисунке 2.2) окажется достаточной для фрикционного разупрочнения, происходит дальнейшее перемещение отделившейся массы оползневого тела под действием силы тяжести.

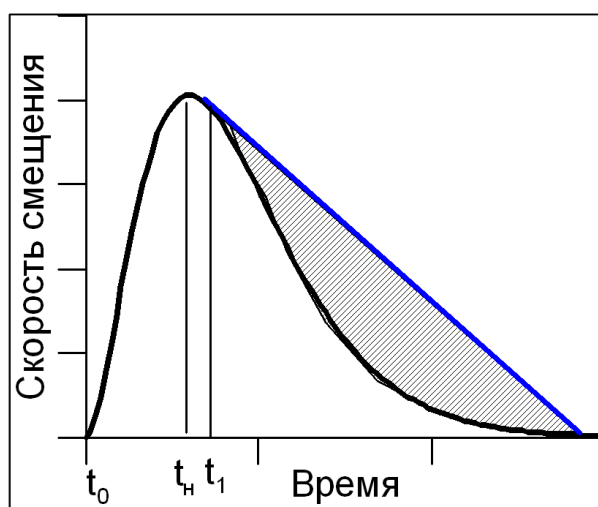


Рисунок 2.2 – Схема инициирования оползня под действием сейсмозрывной волны

С учетом того, что механика инициирования оползня коротким импульсом без труда может быть распространена и на длинный цуг колебаний, была разработана методика проведения лабораторных экспериментов по однократному и многократному динамическому воздействию на склон и созданы установки ударного типа для исследования устойчивости склонов при субгоризонтальном и субвертикальном динамическом воздействии. Идея установок ударного типа восходит к построенной в ИДГ РАН по предложению В.Н. Родионова установке для исследования процесса динамического разрушения горных выработок (Кочарян и др., 1991; Кочарян, Спивак, 2003).

2.2. Исследование свойств грунта

Оценка прочностных свойств проводилась по консолидированно-недренированной схеме на установке прямого среза (УПС). Сдвиговая прочность грунта τ_{max} определялась из условия разрушения Кулона-Мора. При обработке результатов испытаний с использованием условий прочности Кулона применяется линейная зависимость между касательным напряжением и нормальным напряжением.

На каждой ступени нагружения образец выдерживали по 5 мин. При переходе на следующую ступень нагрузка увеличивалась на 0,1 МПа. Максимальная нагрузка, при которой проводилось уплотнение, равнялась 0,3 МПа. Нагружение подвижной обоймы осуществлялось при постоянном нормальном вертикальном давлении под действием возрастающего сдвигающего усилия до тех пор, пока не происходила потеря устойчивости ($\tau > \tau_{max}$). В результате одного опыта определялся предел прочности τ_{max} , соответствующий определенному значению нормального напряжения. По всей совокупности экспериментальных точек $\{\tau_{max}(i), \sigma_N(i)\}$ определялись значения и вариации коэффициента внутреннего трения $(\mu + \Delta\mu)$ (угла внутреннего трения $\varphi_{тр}$) и сцепления $(C + \Delta C)$ испытуемого материала согласно соотношениям (2.1, 2.2, 2.3).

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n (\langle \sigma_N \cdot \tau_{\max} \rangle - \langle \sigma_N \rangle \cdot \langle \tau_{\max} \rangle)}{\langle \sigma_N^2 \rangle - \langle \sigma_N \rangle^2} \quad (2.1)$$

$$\mu \pm \Delta\mu = \left(\arctg(\mu) \pm \frac{1}{1+b^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{\langle \tau_{\max}^2 \rangle - \langle \tau_{\max} \rangle^2}{\langle \sigma_N^2 \rangle - \langle \sigma_N \rangle^2}} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (2.2)$$

$$C \pm \Delta C = \langle \tau_{\max} \rangle - \mu \cdot \langle \tau_{\max} \rangle \pm \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{\langle \tau_{\max}^2 \rangle - \langle \tau_{\max} \rangle^2}{\langle \sigma_N^2 \rangle - \langle \sigma_N \rangle^2} - \mu^2} \cdot \sqrt{\langle \sigma_N^2 \rangle - \langle \sigma_N \rangle^2} \quad (2.3)$$

Во всех экспериментах были использованы специально подготовленные образцы из гранулированного материала. В качестве компонент модельной среды использовались фракции кварцевого песка, глины, которые позволили изготовить образцы с широким диапазоном прочностных и реологических характеристик. Прочностные свойства грунтов представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Прочностные свойства используемых грунтов

№, п/п	Материал	Плотность, г/см ³	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения
1	Кварцевый песок	1,63	0,7±0,2	32±2
2	Песок + 0,25 % глицерина	1,63	0,9±0,2	32±2
3	Песок + 5 % глины	1,83	1,0±0,2	36±1

Определение свойств контакта блока и поверхности склона

Прочностные свойства контакта между блоком из консолидированного материала и поверхностью склона определялись при условиях прямого сдвига. Эксперименты проводились на установке слайдер-модели (СЛД), где блок под действием приложенного сдвигового усилия скользит вдоль поверхности раздела.

Испытуемый блок в форме куба требуемого состава, размером 8x8x8 см³, располагался на неподвижном основании. Поверхности блока и основания имели естественную шероховатость, определяемую размером частиц, из которых блоки были изготовлены.

В ходе испытаний постоянное нормальное усилие на верхней границе подвижного блока создавалось с помощью наборов грузов. Нормальная нагрузка прикладывалась через специальное приспособление, которое исключало появление сдвиговых усилий на верхней грани подвижного блока. Величина σ_N варьировалась в пределах от 1 до 120 кПа. Сдвиговое усилие прикладывалось к верхнему подвижному блоку через жесткий трос с помощью электрического привода, который позволял смещать свободный конец троса с постоянной скоростью. Создаваемое сдвиговое усилие фиксировалось датчиком силы CFT/5kN (HBM, Германия) с точностью 1 Н. Относительное смещение блоков регистрировалось лазерным датчиком перемещения (ILD2220-10, Micro-Epsilon, Германия) с частотой кодирования 20 кГц и точностью 0,1 мкм.

В ходе одного эксперимента фиксировались две пары значений (σ_N, τ_{\max}) и ($\sigma_N, \tau_{\text{res}}$), где первой паре соответствует пиковая прочность, второй – остаточная прочность. По всей совокупности экспериментальных точек $\{\sigma_N(i), \tau_{\max}(i)\}$ и $\{\sigma_N(i), \tau_{\text{res}}(i)\}$ согласно соотношениям (2.1) - 2.3) определялись значения и вариации коэффициента внутреннего трения ($\mu \pm \Delta\mu$) и сцепления ($C \pm \Delta C$) межблокового контакта (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Прочностные свойства контакта блока и поверхности склона

Материал поверхности склона/блока	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения
Блок и склон – Песок + 5% цемента	0,1±0,1	34±2

2.3. Методика проведения экспериментов на вертикальной и горизонтальной ударных установках

Для определения характера деформирования и обрушения склонов, выявления параметров, влияющих на их устойчивость, были проведены эксперименты на моделях из слабосвязного материала, позволяющие исследовать кинематику процесса инициирования и схода оползня.

При проведении лабораторных экспериментов неизбежно возникает вопрос о выполнении критериев подобия. Как известно, чтобы процесс в модели был подобен процессу в природе, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись условия геометрического, кинематического и динамического подобия.

Геометрическое подобие обеспечивается в том случае, когда все линейные размеры модели l_{im} пропорционально уменьшены по отношению к соответствующим размерам l_{in} натурального объекта $C_l = \frac{l_{in}}{l_{im}}$. Здесь и далее величины с индексами n и m относятся, соответственно, к природному объекту и к модели. Кинематическое подобие требует, чтобы сходные частицы, двигаясь по геометрически подобным траекториям, проходили геометрически подобные пути в промежутки времени, отличающиеся постоянным множителем $\frac{t_n^i}{t_m^i} = C_t$, где t_n и t_m – промежутки времени в природе и модели. Если множитель подобия C_l уже задан геометрическим подобием, то при соотношении плотностей $C_\rho = \frac{\rho_n}{\rho_m}$, скоростях движения частиц v_m и v_n , действующих силах p_m и p_n должно выполняться уравнение связей между множителями подобия (Седов, 1976):

$$\frac{p_n}{\rho_n l_n^2 v_n^2} = \frac{p_m}{\rho_m l_m^2 v_m^2} = idem \quad (2.4)$$

В этом случае динамические процессы в модели подобны соответствующим процессам в природе. В первом приближении, при рассмотрении сил, действующих на склон, можно ограничиться силами тяжести, инерции и трения. Заменяя в (2.4) значения квадратов скоростей через ускорения и длины $\frac{p_n}{\rho_n l_n^3 a_n} =$

$\frac{p_m}{\rho_m l_m^3 a_m} = idem$ и обозначая $\frac{p}{l^2} = N$, получаем:

$$\frac{N_n}{\rho_n a_n l_n} = \frac{N_m}{\rho_m a_m l_m} = idem \quad (2.5)$$

где N – прочностные или упругие характеристики материала.

При рассмотрении статической устойчивости склона $a_n = a_m = g$ (мы не рассматриваем вариант использования метода центробежного моделирования), т.е. произведение $\gamma = \rho \cdot a$ – удельный вес материала. Соответственно, получаем условие динамического подобия:

$$N_m = \frac{l_m \gamma_m}{l_n \gamma_n} N_n \quad (2.6)$$

Значимыми для оползневых процессов геометрическими параметрами склона являются его угол и толщина оползня (слоя или скользящего блока). Угол склона в лабораторном эксперименте можно приблизить к тем значениям, которые наблюдаются в природе. Но толщина скользящего блока/слоя будет примерно на два-три порядка отличаться от природного аналога. Тогда, выбирая в качестве определяющих характеристик коэффициент сцепления C и угол внутреннего трения φ , в соответствии с (2.6):

$$\begin{cases} C_m = \frac{l_m \gamma_m}{l_n \gamma_n} C_n \\ [tg(\varphi)]_m = [tg(\varphi)]_n \end{cases} \quad (2.7)$$

Таким образом, в лабораторных опытах следует использовать материалы, удельный вес которых соответствует природным значениям ($\sim 20 \text{ кН/м}^3$), а величина сцепления на два-три порядка ниже, чем у природного материала. Если для грунтов и выветрелых пород, которые в большинстве случаев формируют оползневые склоны, характерны значения сцепления первые десятки – сотни кПа, то для лабораторных экспериментов следует использовать материалы с $C_m \sim 0.2 - 2 \text{ кПа}$.

В качестве основной фракции модельного материала был выбран кварцевый песок Люберецкого карьера. Этот материал имеет довольно узкий гранулометрический состав (средний диаметр гранул около 300 мкм), увлажненный глицерином. Этот выбор был обусловлен простотой и технологичностью проведения экспериментов. Влажный песок обладает низкой прочностью и малой скоростью распространения упругих волн, что позволило

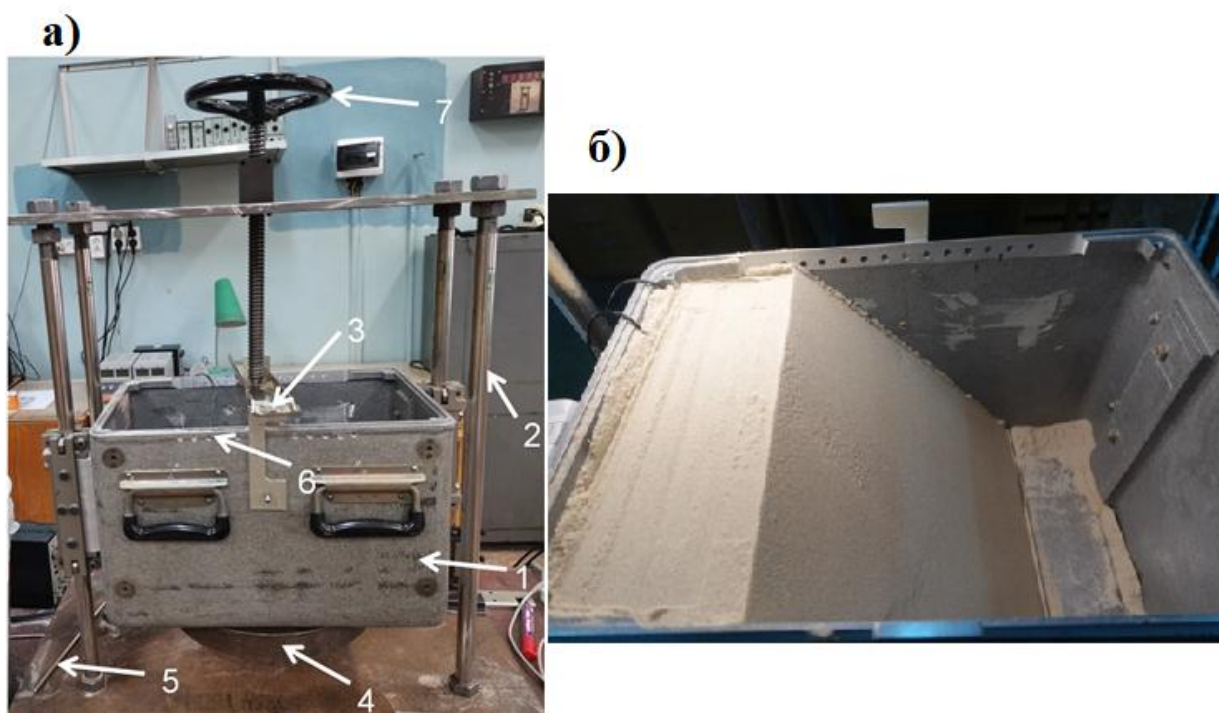
провести исследования при относительно малых интенсивностях воздействия и упростить конструкцию установки. В силу малой прочности песка на растяжение амплитуды волн, отраженных от свободной поверхности и стен, невелики и не оказывают заметного влияния на процесс деформирования и обрушения. Механические свойства этого материала неоднократно исследовались, например, (Адушкин, Орленко, 1971). Добавление глины или цемента позволяло варьировать прочностные свойства модельного материала в довольно широком диапазоне.

Динамическая нагрузка создавалась путем соударения объема, содержащего модель, о преграду.

Лабораторные исследования при субвертикальном динамическом воздействии на модельный склон проводились на вертикальной ударной установке (ВУУ), внешний вид которой показан на рисунке 2.3. В ходе эксперимента стальной бокс (1), содержащий модель, движется по направляющим стойкам (2), ускоряясь под действием силы тяжести. Специальная конструкция узлов скольжения, выполненная на основе подшипников качения, обеспечивает минимальное трение, так что скорость соударения практически соответствует скорости свободного падения. Падая, бокс ударялся о массивное металлическое основание. Для создания условий плоской волны к нижней стенке контейнера прикреплен стальной диск диаметром 250 мм с ударником в виде полусферы диаметром 25 мм (4). В случае необходимости, между ударником и основанием помещался демпфер. Использование в качестве демпфера различных прокладок-материалов (латунный диск, резиновая прокладка, свинец, слой фторопласта и т.д.) позволяет варьировать длительность соударения, изменяя, тем самым, параметры воздействия на модель. Параметры динамического воздействия на склон контролировались акселерометрами Bruel&Kjaer 4370, один из которых крепился на дне контейнера, а другой, располагался в массиве. На рисунке 2.4 приведены примеры эпюр ускорения при ударах по прокладкам из различного материала. Поскольку плотность акселерометра существенно выше, чем плотность грунта, то с целью предотвращения искажений в регистрируемом

сигнале к доньшку акселерометра прикреплялся металлический диск. Оптимальный диаметр диска, не приводящий к существенным искажениям сигнала, определялся в специальных сериях экспериментов и по результатам опытов составляет – 6 см.

В измерительный канал входили усилители заряда Bruel&Kjaer 2651. Сигналы регистрировались модулем АЦП Е-14-440 (L-Card, Россия) с частотой дискретизации 100 кГц.



*Рисунок 2.3 – Фото вертикальной ударной установки (ВУУ). а) схема внешней части ВУУ. б) модель оползня внутри контейнера ВУУ.
1 – контейнер, 2 – стойки, 3 – затвор, 4 – металлический диск 5 – спица, 6 – отверстия, в которые вставляется спица для изменения угла склона, 7 – винт, задающий высоту подъема контейнера*

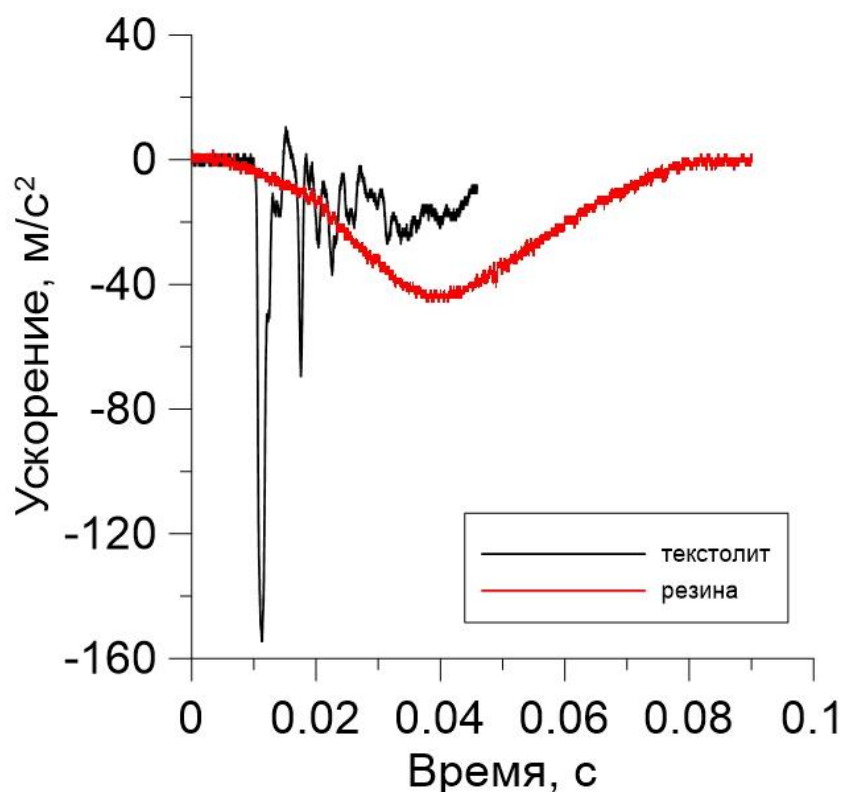


Рисунок 2.4 – Пример ускорений, зарегистрированных вертикальным датчиком в склоне при ударе контейнера о преграду. Черная линия – при ударе о текстолит, красная линия – о резиновую прокладку

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 (рисунок 1.2 из раздела 1.1), когда плоская поверхность скольжения параллельна откосу, FS рассчитывался по соотношениям (1.7).

При построении склона с заданными параметрами модельный материал засыпался послойно порциями по 2 кг. После засыпки слой выравнивался и уплотнялся в течение 2 минут для создания определенной плотности. После уплотнения засыпался новый слой грунта. Операции повторялись до достижения заданных параметров склона: угла откоса, плотности и высоты склона.

В ходе экспериментов выполнялась фотофиксация разрушения склона. Максимальная скорость движения грунта (PGV) определялась высотой падения контейнера, которая задавалась с помощью подъемного винта (7). Максимальное ускорение (PGA) определялось длительностью удара контейнера о мишень.

Динамическое воздействие на склон с преобладающей горизонтальной компонентой проводилось на горизонтальной ударной установке (ГУУ), представленной на рисунке 2.5. ГУУ представляет собой герметичный бокс с боковыми стенками 60х60 см, выполненными из толстого оргстекла. Это позволяет проводить эксперименты с подводными склонами. Ширина бокса – 40 см. Дно и торцевые стенки – стальные. Бокс на стальных катках установлен на направляющие, выполненные из двух одинаковых кусков швеллера, которые жестко соединены между собой. Направляющие расположены перпендикулярно бетонной стене, к которой тремя анкерными болтами прикручена круглая стальная мишень. С обратной стороны к направляющим жестко прикреплен пневмоцилиндр CP96SB100-320CJ, шток которого упирается в ящик. Во время эксперимента ящик разгонялся по направляющим и ударялся в мишень. При необходимости на мишень (7) устанавливались прокладки из различных материалов. Параметры динамического воздействия на склон и движение материала, как и на ВУУ, контролировались акселерометрами Bruel&Kjaer 4370. В измерительный канал входили усилители заряда Bruel&Kjaer 2651. Сигналы регистрировались модулем АЦП Е-14-440 (L-Card, Россия) с частотой дискретизации 100 кГц.

Испытываемая модель склона изготавливалась непосредственно на дне контейнера. Угол склона задавался специальной пластиной из оргстекла, которая внизу и вверху крепилась к раме ящика. При построении склона грунт, как и в экспериментах на ВУУ, засыпался послойно порциями по 2 кг. Каждый слой выравнивался и уплотнялся вплоть до достижения необходимых параметров.

Максимальная скорость движения контейнера в экспериментах варьировалась путем изменения давления в пневмоцилиндре. Ускорение варьировалось с помощью изменения длительности удара.

Диапазон изменения параметров воздействия в экспериментах на ГУУ и ВУУ составлял по максимальной массовой скорости (PGV): от 0,003 м/с до 1,3 м/с, а по максимальному ускорению (PGA) – от 0,01g до более чем 170g.

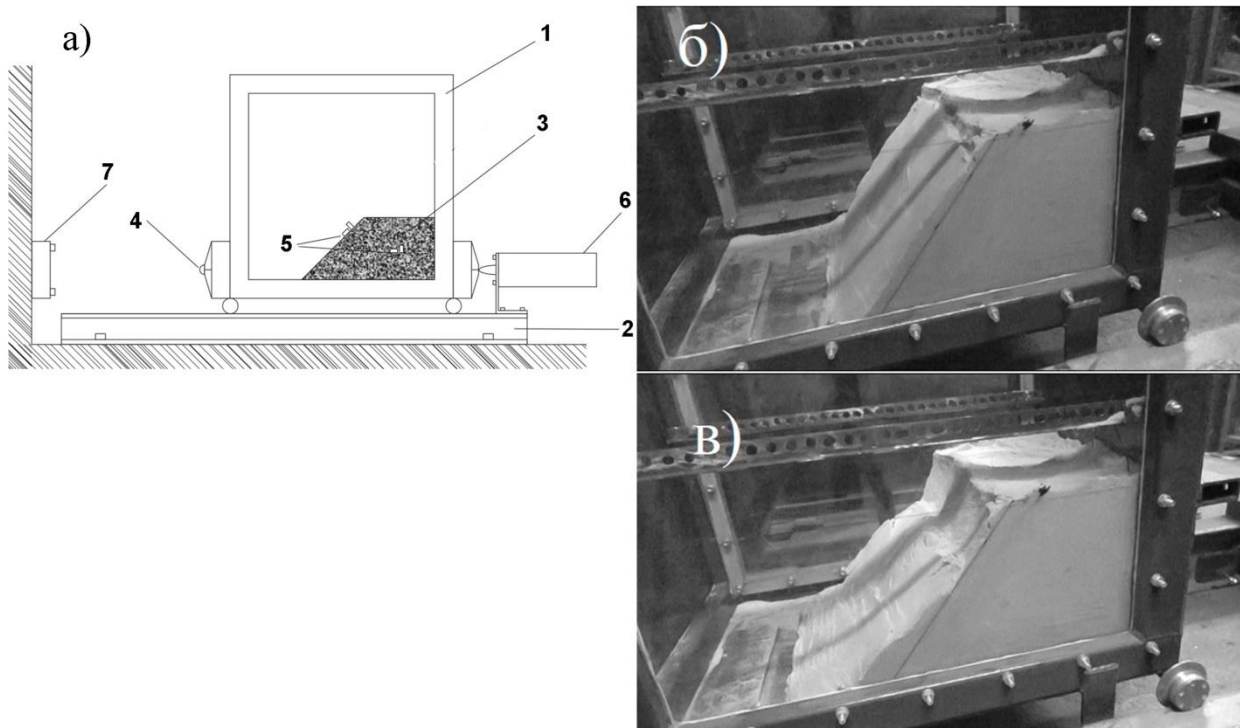


Рисунок 2.5 – Схема горизонтальной ударной установки (ГУУ) (а) и визуальная картина динамики разрушения склона, где б – $t=2,19$ с – момент удара о мишень; в – $t=2,56$ с.

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; б – пневмоцилиндр; 7 – стальная мишень

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.

Для моделирования процесса инициирования неустойчивости консолидированного объема проводились эксперименты с массивным блоком, лежащим на наклонной плоскости (схема Ньюмарка). В этих сериях опытов блок размером 12x8x2 см, изготовленный из песчано-цементной смеси, располагался на склоне из песка, слегка увлажненного глицерином. Поверхность склона уплотнялась так, что «зарывание» закругленной передней кромки блока в песок было исключено. Средняя плотность материала склона во всех экспериментах составляла около 1,8 г/см³.

2.4. Эксперименты с вибрационным воздействием

Кроме опытов с ударным воздействием на модель, проводились эксперименты с вибрационным воздействием на блок, лежащий на поверхности. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.6.

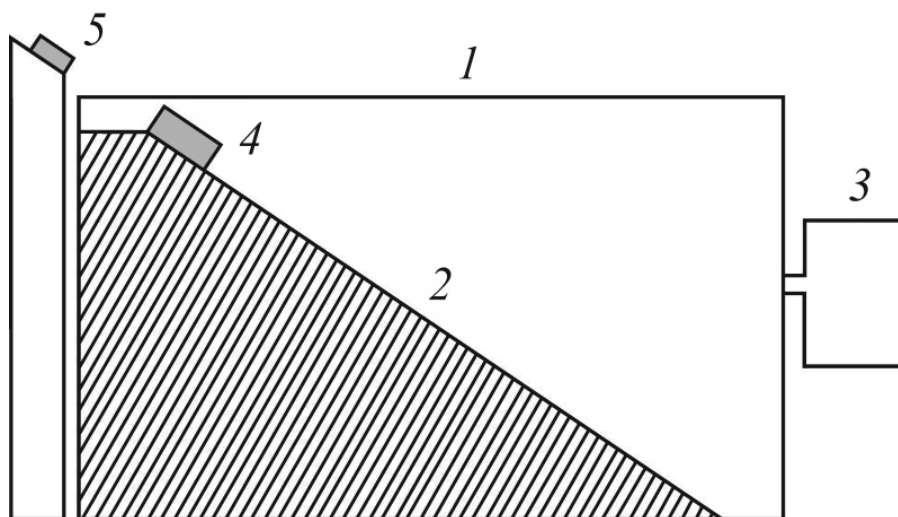


Рисунок 2.6 – Схема экспериментальной установки: 1 — контейнер; 2 — поверхность склона;

3 — ударник, закрепленный на вибростенде; 4 — блок; 5 — датчик смещения

В этих сериях экспериментов тяжелый контейнер располагался на неподвижном, массивном, твердом основании, а на его боковую стенку осуществлялось воздействие ударником, закрепленным на мини-вибростенде Buel&Kjaer. Контроль параметров воздействия осуществлялся горизонтальными и вертикальными акселерометрами Buel&Kjaer 4370, которые располагались на поверхности блока и в модели склона на высоте 10 см от дна контейнера.

Смещение блока контролировалось лазерным датчиком смещения ILD2220-10 (Micro-Epsilon, Германия) в диапазоне частот 0 – 5 кГц с точностью 0,1 мкм, который был «развязан» с экспериментальной установкой так, что вибрации не оказывали воздействия на измерительную систему.

Выводы к главе 2

Созданы установки для исследования инициирования оползневых процессов при субвертикальном и субгоризонтальном динамическом воздействии.

Разработана методика проведения лабораторных экспериментов по однократному и многократному динамическому воздействию на склон.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ В ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИНИЦИИРОВАНИЯ ОБРУШЕНИЯ СКЛОНА ДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

В настоящем разделе приводятся результаты лабораторного исследования механики инициирования обрушения склона динамическими воздействиями разных типов. Целью экспериментов являлось установление критических параметров воздействия, соотношений между ними и определение вклада различных характеристик сейсмической волны в процесс инициирования обрушения.

3.1. Иницирование оползней на склонах импульсным воздействием

Чтобы выбрать необходимую в эксперименте геометрию модели, по соотношению (1.7) предварительно проводились расчеты коэффициента статической устойчивости склона FS . В соответствии с подходом, изложенным в разделе 1.1, в квазистатическом приближении воздействие сейсмической волны обычно учитывается наложением инерциальных сил, определяемых максимальным значением ускорения в сейсмической волне. Рассматривая баланс сил при воздействии сейсмической волны (см. рисунок 1.2), несложно показать, что в общем случае, когда сейсмическое ускорение не параллельно склону (горизонтальная и вертикальная компоненты ускорения, соответственно A_{Sh} и A_{Sv}), зависимость для расчета фактора устойчивости необводненного склона будет выглядеть как (Ingles et al, 2006):

$$FS = \frac{C + (1 - A_{Sv} - A_{Sh} \cdot \operatorname{tg} \alpha) \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi}{(1 - A_{Sv} + \frac{A_{Sh}}{\operatorname{tg} \alpha}) \gamma \cdot z \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha} \quad (3.1)$$

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 $FS=1$.

Примеры результатов расчета FS для некоторых материалов показаны на рисунке 3.1а. Видно, что склон из смеси песка с 2% цемента имеет предельный угол выше 70° , тогда как для склона из песка, увлажненного глицерином, эта величина составляет уже 59° . В экспериментах, в которых тело оползня моделировалось блоком, лежащим на поверхности сухого склона, предельное значение угла склона составляло менее 30° . Обычно испытывались модели склонов с углами, близкими к предельным.

В соответствии с выражением (1.4) критическое ускорение в сейсмической волне, субпараллельное наклону потенциального тела оползня, в квазистатическом приближении является простой функцией статического фактора устойчивости и геометрии склона.

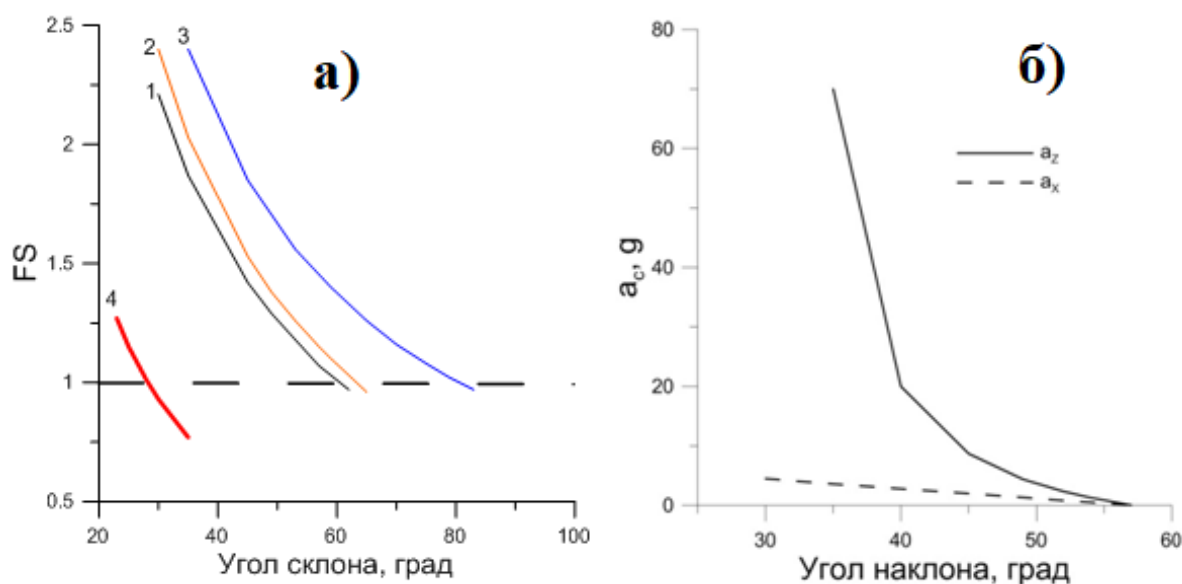


Рисунок 3.1 – Результаты расчета коэффициента устойчивости (а) и величины критического ускорения (б) для склонов, изготовленных из разных материалов.

а. 1 – песок +0,25% глицерина, 2 – сухой песок +5% глины, 3 – сухой песок+2% цемента, 4 – песчано-цементный блок на песчано-цементной поверхности.

б. Значение критического ускорения a_c при вертикальном (сплошная линия) и горизонтальном (пунктирная линия) воздействии на склон из песка, увлажненного глицерином (0.25%)

Расчеты по соотношению (3.1) для раздельного воздействия вертикального a_z и горизонтального a_x ускорения приведены на рисунке 3.1б. Видно, что величина критического ускорения при горизонтальном воздействии значительно ниже; причем при воздействии на пологие склоны разница становится особенно значительной.

Использование лазерных датчиков перемещения и акселерометров позволяло обнаружить развитие относительного движения соскальзывающей массы оползневого тела даже в тех случаях, когда визуально деформация не проявляется.

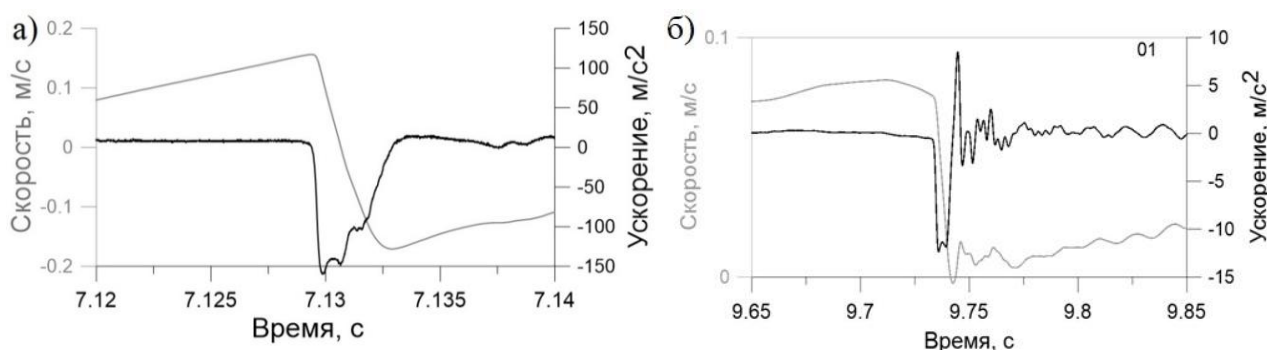


Рисунок 3.2 – Примеры записей ускорения (черная линия) и скорости (серая линия) движения грунта. (а) вертикальный датчик; вертикальный удар контейнера; (б) горизонтальный датчик; горизонтальный удар контейнера; Время на графиках отсчитывается с момента начала перемещения контейнера

На рисунке 3.2 приведены примеры ускорения и скорости смещения грунта, зарегистрированных в потенциально обрушаемой части модели и внутри тела склона для вертикального и горизонтального удара контейнера. На рисунке 3.2а видно, что зарегистрированные ускорения вертикальным датчиком при вертикальном ударе на начальном участке соответствуют величине ускорения свободного падения. При горизонтальном воздействии перед соударением с преградой ускорение близко к нулю, что указывает на плавное передвижение контейнера ГУУ по швеллеру.

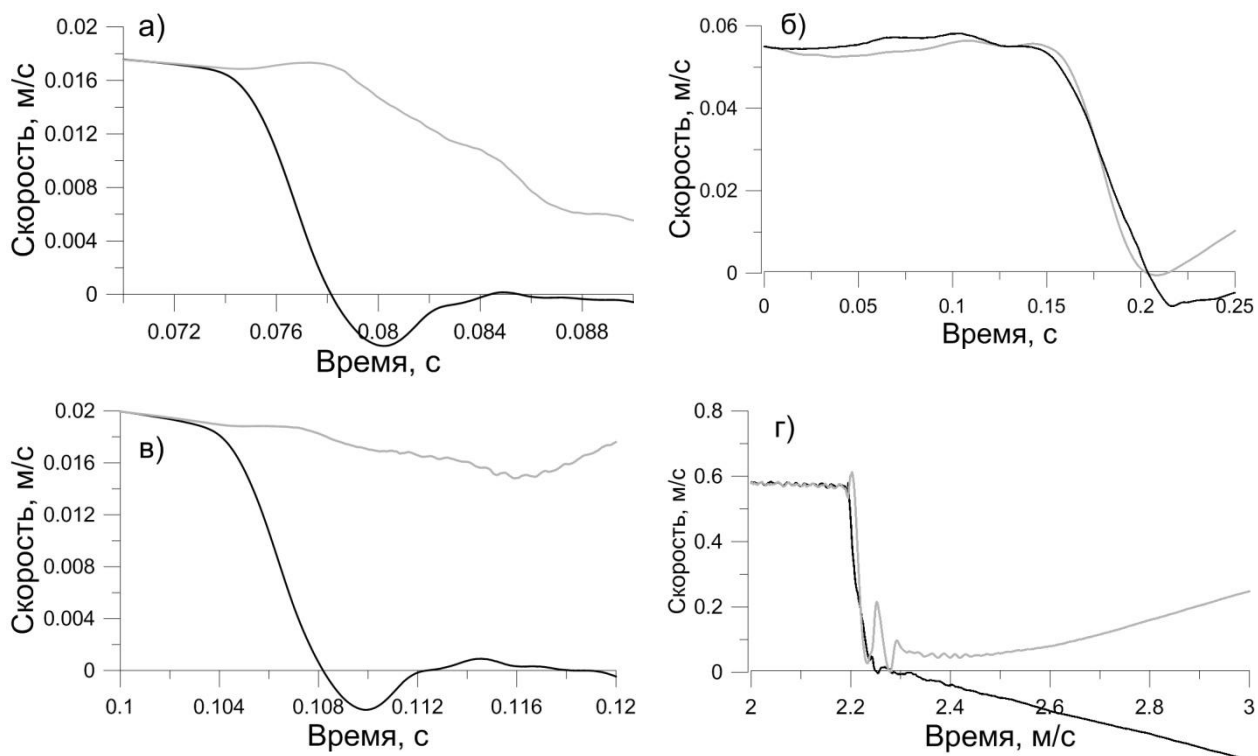


Рисунок 3.3 – Примеры записей скорости движения грунта на склонах, сохранивших стабильность (а, б) и разрушившихся (в, г) при субгоризонтальных ударах. Акселерометры расположены параллельно поверхности склона внутри (черные линии) и на поверхности (серые линии) модели. Время на графиках отсчитывается с момента начала перемещения контейнера

На рисунке 3.3 показаны примеры записей скорости движения грунта в горизонтальной модели. В случаях, показанных на рисунках 3.3а и 3.3б, склон остался устойчивым, тогда как в опытах, показанных на рисунках 3.3в и 3.3г, произошло обрушение. На рисунке 3.3в отчетливо видно, как оползневой слой практически сразу начинает двигаться относительно склона и почти не снижая скорости, что приводит, в конечном итоге, к возникновению обрушения. Интересно, что в опытах, показанных на рисунках 3.3а и 3.3в, 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.

В экспериментах при разных воздействиях наблюдались различные типы разрушения склона (рисунок 3.4). В большинстве случаев, которые трактовались как инициирование оползня, наблюдалось сползание материала по всей ширине склона (рисунок 3.4б). В некоторых экспериментах наблюдались лишь локальные осыпания (рисунок 3.4в). В таких случаях считалось, что склон сохранил устойчивость. На прочных склонах с большим значением фактора устойчивости иногда формировались трещины, субпараллельные кромке склона, но оползень при этом не образовывался (рисунок 3.4г). Отделившиеся части склона обрушались, как правило, в результате одного или нескольких повторных воздействий. Из всех выявленных в лабораторных опытах типов разрушения склона наибольший интерес в контексте данного исследования представляет случай, соответствующий рисунку 3.4б, так как такой характер разрушения наиболее приближен к оползневым процессам на природных склонах, сложенных осадочными породами с низкой прочностью, и на искусственных объектах типа терриконов, отвалов вскрышных пород, дамб и т.д. Такой тип разрушения наиболее часто наблюдался на лабораторных склонах, изготовленных из кварцевого песка, слегка увлажненного глицерином. Именно поэтому большая часть опытов, включая исследования с многократным воздействием, проводилась с этим материалом.

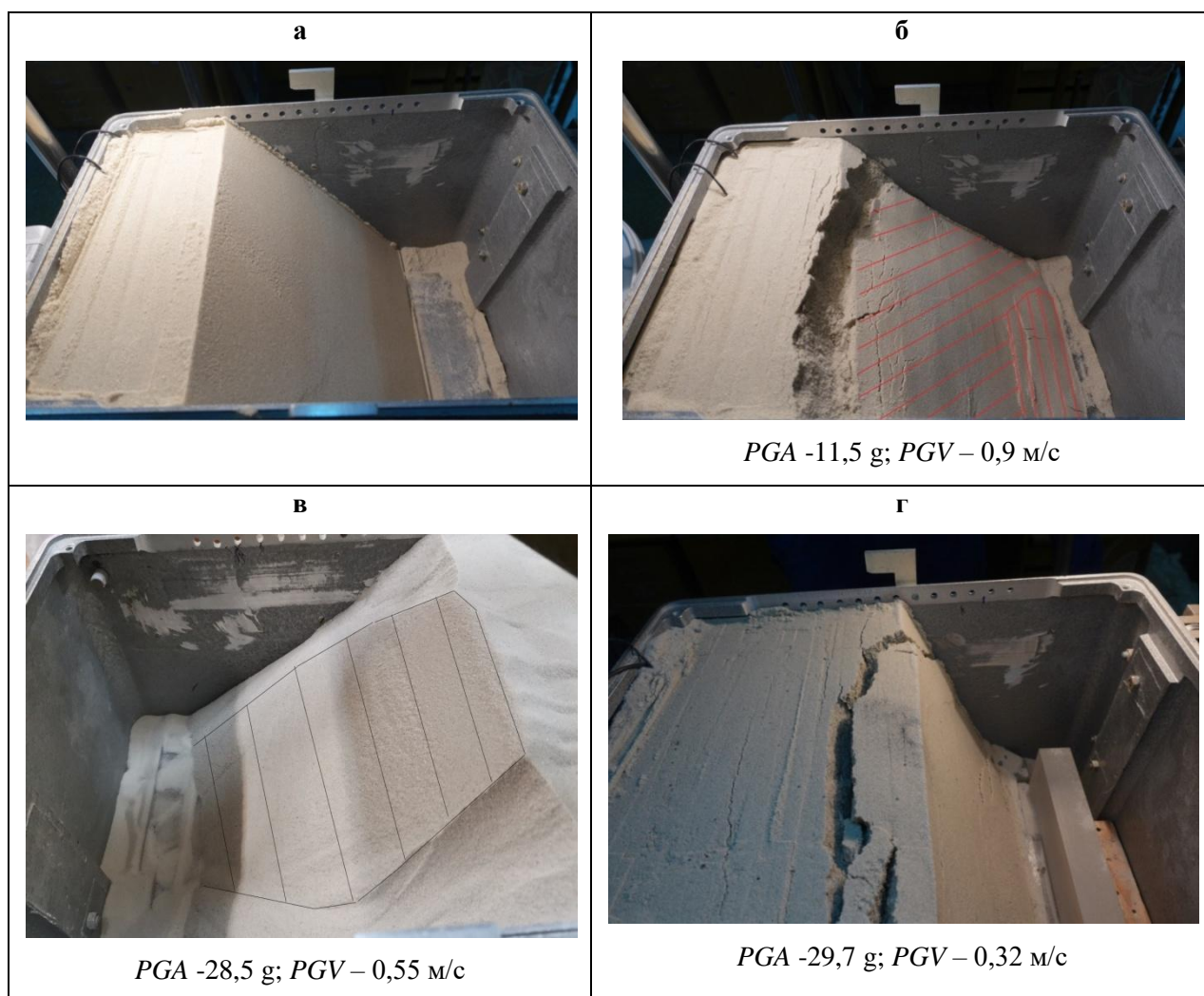


Рисунок 3.4 – Различные типы разрушения склона при вертикальном воздействии

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

Пример диаграммы $PGV-PGA$ для серии экспериментов с вертикальным воздействием со склонами из кварцевого песка, увлажненного глицерином (0,25% по массе), с углом наклона 57° приведен на рисунке 3.5. Каждый залитый значок на диаграмме соответствует опыту, в котором произошло разрушение склона, а пустой – эксперименту, в котором склон остался устойчивым. На рисунке 3.5 вертикальная и горизонтальная штриховые линии отделяют область значений, при которых произошло обрушение склона, от области значений, при которых склон оказался устойчивым. Результаты экспериментов для всех углов наклона

приведены в таблице 3.1, куда также внесены рассчитанные по соотношению (1.7) величины статической устойчивости склона FS и рассчитанные по соотношению (1.4) величины критического ускорения a_c , при котором склон в квазистатической схеме должен становиться неустойчивым.

Таблица 3.1 Критические параметры воздействия для опытов со склонами, изготовленными из кварцевого песка, увлажненного 0,25% глицерина при вертикальном и горизонтальном ударе

Угол, 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

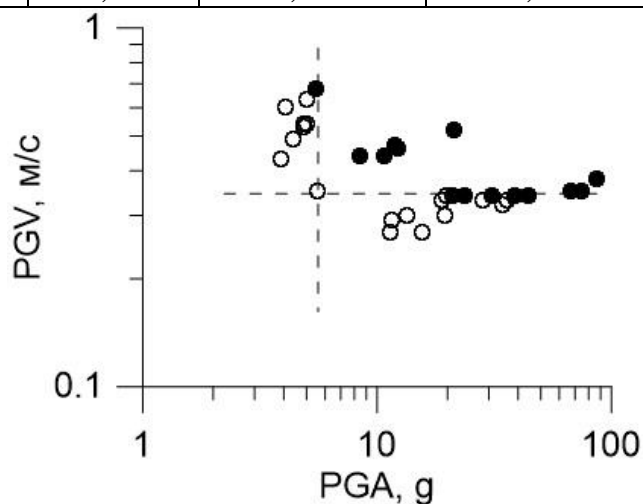


Рисунок 3.5 – Результаты экспериментов со склонами ($\alpha=57^\circ$) с вертикальным воздействием на склоны из кварцевого песка, увлажненного 0,25% глицерина. Пунктирные прямые соответствуют минимальным значениям скорости и ускорения, при которых были зарегистрированы оползни. \circ — устойчивый склон, \bullet — разрушенный

Результаты экспериментов по горизонтальному воздействию на склон, проведенных на ГУУ, представлены на рисунках 3.6-3.8 и в таблице 3.1. В качестве примера на рисунке 3.6 приведены результаты опытов для склона с углом наклона 55° . Заводская погрешность измерений акселерометров Buel&Kjaer 4370 составляет 2%. Модуль АЦП Е-14-440 при входных напряжениях 2,5 В и 10 В увеличивает погрешность измерений на 0,01-0,04%. Учитывая небольшие отклонения при измерении ускорений акселерометрами Buel&Kjaer 4370, при построении последующих диаграмм ошибки измерений указываться не будут.

На рисунке 3.7 каждая линия отделяет область плоскости $PGV-PGA$, в которой наблюдается разрушение соответствующего склона (выше линии). В точках, лежащих ниже линии, склон при однократном импульсном воздействии остается устойчивым. Чтобы не перегружать рисунок, значками на графике 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 $\alpha = 59^\circ$, наоборот, представлены только те результаты, при которых разрушения не происходило.

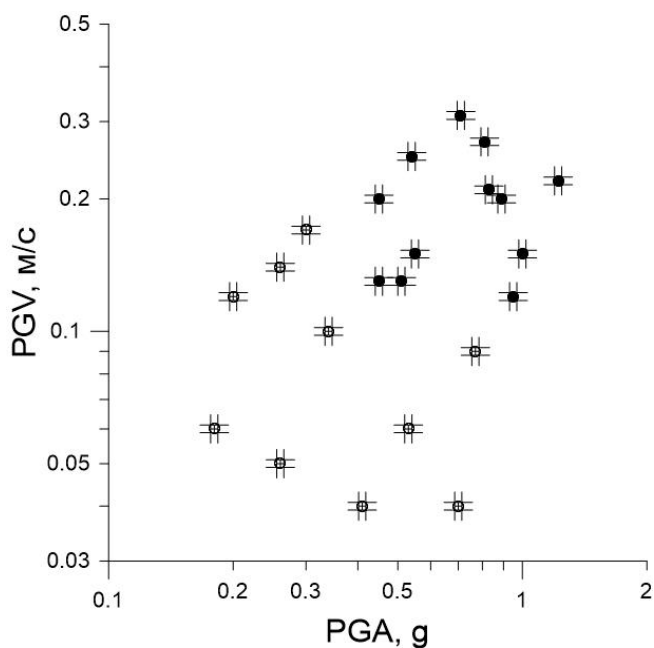


Рисунок 3.6 – Результаты экспериментов со склонами ($\alpha=55^\circ$) из смеси кварцевого песка и глицерина: \circ — устойчивый склон, \bullet — разрушенный; заводская погрешность измерений - $\pm 2\%$

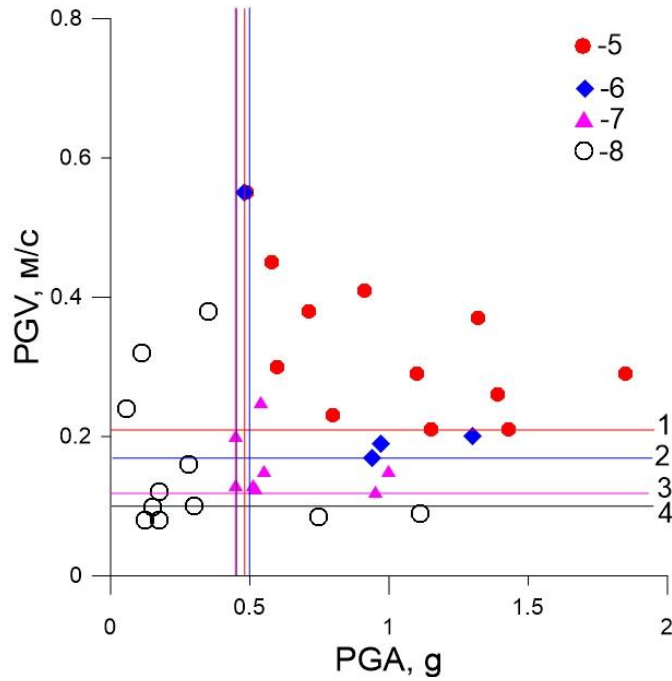


Рисунок 3.7 – Диаграмма PGA - PGV , обобщающая результаты экспериментов с горизонтальным воздействием. Залитые значки соответствуют опытам с разрушением, а пустые – опытам, в которых склон оставался целым.

Линия 1, значок 5 — $\alpha=40^{\circ}$; 2, 6 — $\alpha=47^{\circ}$; 3, 7 — $\alpha=55^{\circ}$; 4, 8 — $\alpha=59^{\circ}$

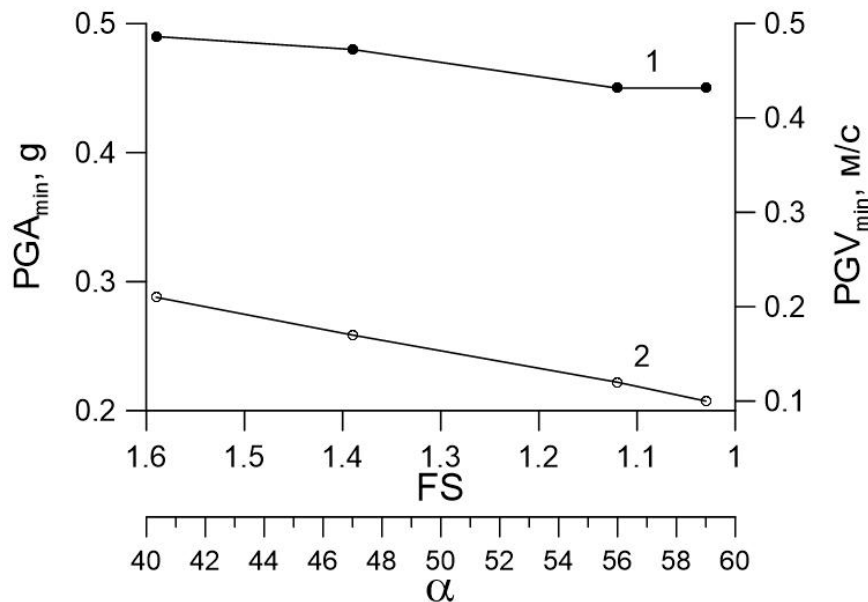


Рисунок 3.8 – Зависимость $PGA_{min}(1)$ и $PGV_{min}(2)$ при горизонтальном воздействии от коэффициента устойчивости склона. Для удобства на нижней оси абсцисс указаны соответствующие значения угла откоса

На рисунке 3.8 показаны зависимости PGA_{min} и PGV_{min} при горизонтальном воздействии от коэффициента устойчивости склона FS , который рассчитывался по соотношению (1.7). Видно, что значения PGA_{min} близки для склонов с разными

углами. В том случае, когда максимальное ускорение в динамическом импульсе ниже, чем PGA_{min} , склон остается устойчивым даже при высоких скоростях смещения грунта. В то же время однократное воздействие импульсом с $PGA > PGA_{min}$, но низким значением $PGV < PGV_{min}$, не приводит к разрушению склона. Высокий уровень ускорений в сейсмической волне приводит к локальным разрушениям грунта и возникновению остаточных деформаций, которые, накапливаясь, при многократных воздействиях могут привести к инициированию склоновых процессов.

Таким образом, если напряжения, создаваемые силами инерции, превосходят предел прочности дискретной среды (высокие значения PGA), то необратимая деформация массива происходит при любых значениях PGV . При достаточно высоких значениях PGV визуально и инструментально регистрируется значительная деформация массива в сторону свободной поверхности. Потеря устойчивости происходит при достижении уровня критической деформации среды вблизи поверхности. Как видно из результатов экспериментов (таблица 3.1), при изменении угла склона в пределах 10° от критического значения величины PGV_{min} и PGA_{min} при вертикальном воздействии на склон изменяются примерно вдвое. Возможность достижения критического уровня деформации после потери прочности определяется запасом кинетической энергии, обеспечивающим взаимное перемещение отдельных областей массива.

Результаты экспериментов показали, что величины минимальных значений PGA_{min} , при которых происходит разрушение склона, существенно превышают величину критического ускорения a_c более чем на порядок. Для крутых склонов с небольшим запасом устойчивости значение PGA_{min} существенно выше значений a_c , определяемых по квазистатической схеме. 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. Поправочный коэффициент к максимальному значению горизонтального ускорения в сейсмической волне, который обычно вводится в расчетах при учете инерциальных сил (ОДМ..., 2010), должен зависеть от угла склона.

3.2. Инициирование оползней многократным импульсным воздействием

Как отмечалось выше, в большинстве случаев природные склоны, откосы карьеров, отвалов и другие сооружения неоднократно подвергаются воздействиям сейсмических волн от землетрясений или взрывов. При этом эффект многократного динамического воздействия на склон до сих пор детально не исследовался.

Лабораторные эксперименты с многократным импульсным воздействием проводились на склонах, изготовленных из песка, увлажненного глицерином.

Многократное воздействие при $PGA > PGA_{min}$ вызывает постепенное накопление деформаций, что в конечном итоге может привести к разрушению склона. Для визуализации картины деформирования склона при многократных воздействиях горизонтальная часть модельного склона размечалась реперными линиями из порошка черной глины. Расстояние между реперами составляло 4 см. После каждого динамического импульсного воздействия проводилось измерение величины смещения каждой из реперных линий, что позволило получить представление о деформации модельного склона.

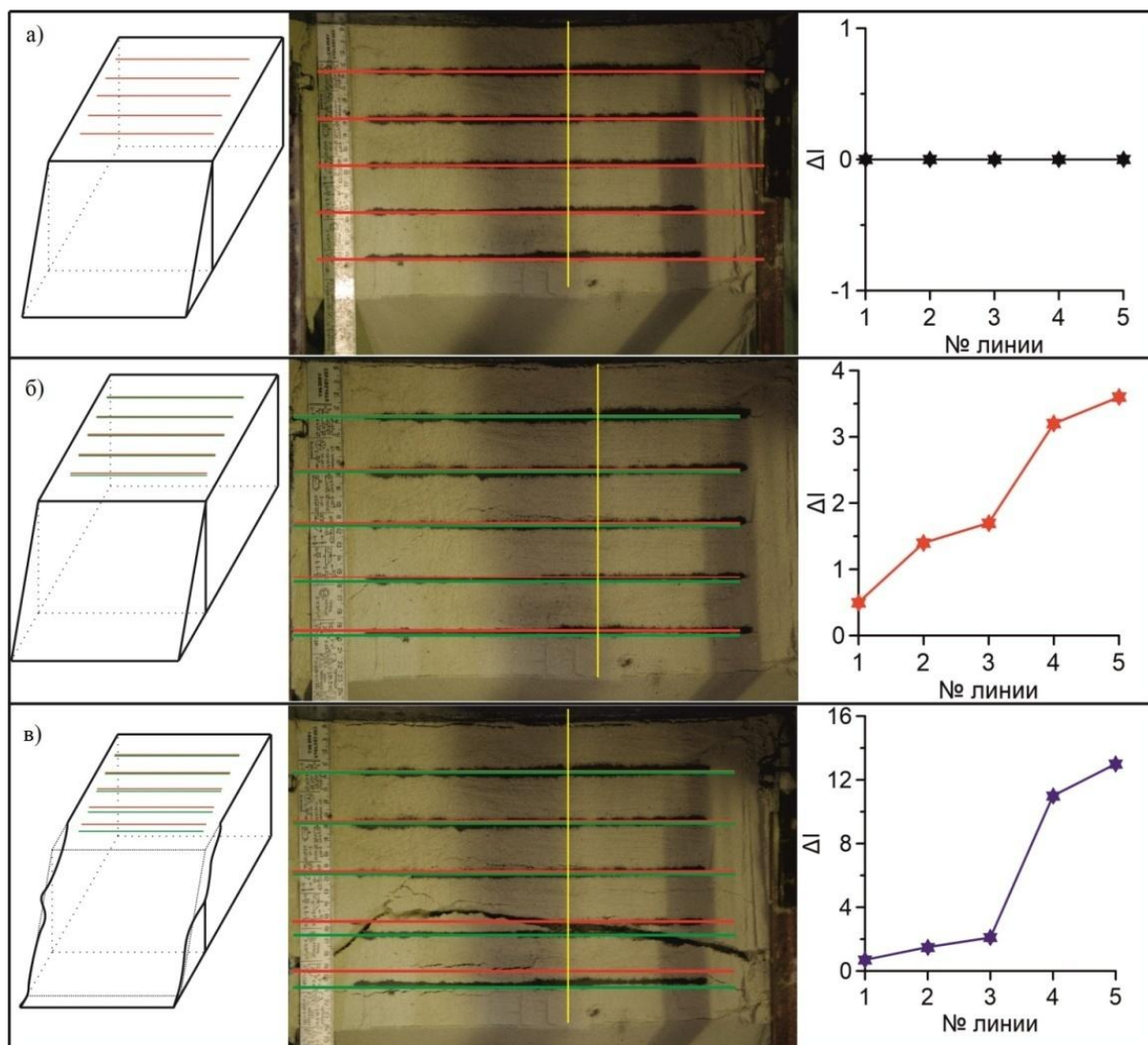


Рисунок 3.9 – Фотофиксация смещения реперных линий в мм при многократных воздействиях после 6 (а), 7 (б) и 8 ударов (в)

На рисунках 3.9-3.10 в качестве примера приведены смещения реперных линий на горизонтальной поверхности склона с углом 52° при 6, 7 и 8 ударах с измеренными параметрами динамического импульса $PGA = 0.4g$, $PGV = 0.2$ м/с. На рисунке 3.9 красными линиями на полученных фотоснимках показано начальное положение реперных линий, зелеными – измененное положение реперных линий после каждого динамического воздействия на склон. Крайние левые рисунки – схема накопления деформации модельного склона. Крайние правые рисунки – зависимости смещения реперов в мм после 6, 7 и 8 удара от номера линий, где линия № 5 – репер, наиболее близко расположенный к наклонной поверхности склона.



Рисунок 3.10 – Смещение реперной линии на разных расстояниях от кромки склона при многократных воздействиях после 6 (1), 7 (2) и 8 ударов (3)

На рисунке 3.10 показаны средние значения деформации склона. В этой серии экспериментов вплоть до шестого динамического воздействия величины смещения каждой реперной линии не превышают точность измерений (~ 1 мм). В результате седьмого удара формируется область локализации деформации — будущая поверхность скольжения, которая выходит на свободную поверхность на расстоянии 80–100 мм от края. При следующем, восьмом, воздействии склон теряет устойчивость и разрушается, образовав при этом оползень.

Диаграммы $PGA-PGV$ для многократных воздействий приведены на рисунке 3.11. Можно заметить, что при многократном воздействии для разрушения склона требуются заметно более низкие параметры, чем при одиночном ударе. Сопоставление диаграмм на рисунках 3.7 и 3.11 показывает, что для пологих склонов (рисунок 3.11а и 3.11б) величина PGA_{min} оказывается примерно одинаковой для многократных и одиночных воздействий. Для крутых склонов с низким запасом устойчивости (рисунок 3.12в и 3.12г) значение PGA , при котором склон не разрушается даже при большом числе ударов, оказывается заметно ниже, чем величина PGA_{min} для одиночного удара. Для всех склонов при

многократном воздействии отмечено резкое снижение величины максимальной скорости смещения грунта, требуемой для обрушения склона при тех же значениях ускорений. Если уровень ускорений в импульсе достаточен для возникновения локальных разрушений материала, то в модели возникают остаточные деформации; тем большие, чем больше величина PGV . В конце концов склон теряет устойчивость и формируется оползень. По всей вероятности, в этих экспериментах не был достигнут нижний предел PGV , ограничивающий эффект накопления в случае $PGA > PGA_{min}$, что связано с техническими возможностями установки.

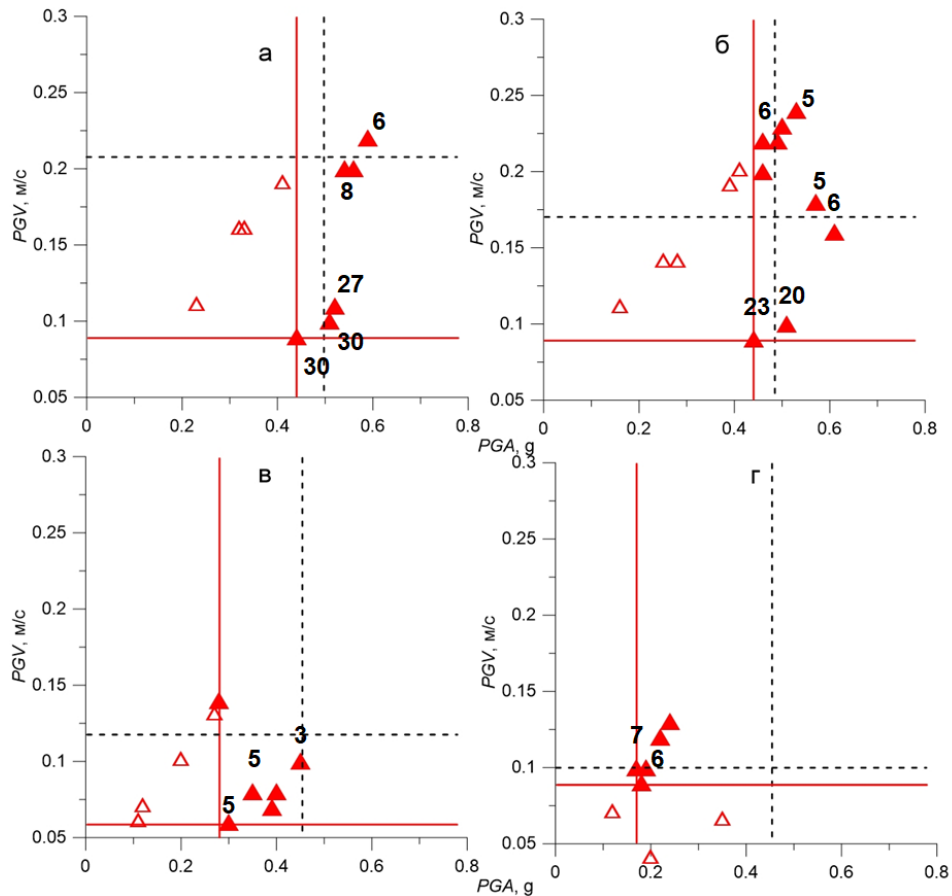


Рисунок 3.11 – Фрагменты диаграмм “ $PGA-PGV$ ” для многократных воздействий на склоны из кварцевого песка: ▲ — склон разрушен после нескольких воздействий; △ — склон остался устойчивым после 30–40 ударов. Углы склонов: а — 40° ; б — 46° ; в — 55° ; г — 59° . Пунктирные линии — границы, разделяющие области устойчивости и неустойчивости при однократном воздействии (см. рисунок 3.7); сплошные — PGA_{min} и PGV_{min} для многократного воздействия; числа – количество воздействий, при которых обрушился склон

Уменьшение значений PGV приводит к более медленному накоплению деформации. На рисунке 3.12а приведены результаты измерений для склона с углом 46° . Если при $PGV \sim 0,15 - 0,20$ м/с склон разрушается после 4-6 воздействий, то при снижении PGV до 0,1 м/с для возникновения оползня требуется 22 воздействия. При повышении запаса устойчивости FS склон остается устойчивым при больших кумулятивных деформациях, а для образования оползня требуется все увеличивающееся количество повторных воздействий (рисунок 3.12б).

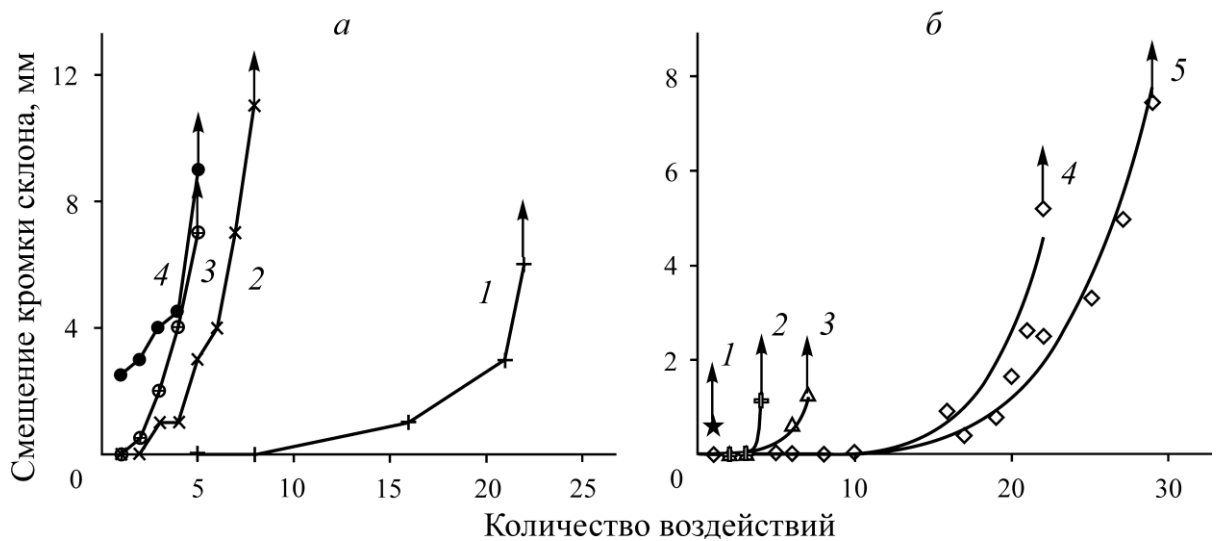


Рисунок 3.12 – Смещение кромки склона при многократных воздействиях. Стрелками отмечена стадия обрушения:

а — деформация и разрушение склона с углом 46° при разных амплитудах многократных воздействий: 1 — $PGA = 0,45g$; $PGV = 0,10$ м/с; 2 — $PGA = 0,41g$; $PGV = 0,17$ м/с; 3 — $PGA = 0,55g$; $PGV = 0,15$ м/с; 4 — $PGA = 0,05g$; $PGV = 0,22$ м/с;

б — деформация и разрушение склонов с различными углами при многократных воздействиях импульсами с одними и теми же параметрами $PGA = 0,40 - 0,45g$; $PGV = 0,08 - 0,10$ м/с: 1 — 59° , 2 — 55° , 3 — 52° , 4 — 46° , 5 — 40°

Важным параметром при оценке динамической устойчивости склона также является и максимальная скорость смещения грунта PGV в сейсмической волне. Критическое значение скорости смещения, в отличие от ускорения, существенно возрастает по мере снижения угла склона.

Опыты с многократным воздействием показывают, 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. Особенно этот эффект характерен для крутых склонов с малыми коэффициентами устойчивости (рисунок 3.11*в, г*), для которых снижаются критические скорости и ускорения. Если значение PGA_{min} превышено (материал склона получил повреждение), критическое перемещение, после которого происходит обрушение склона, может накапливаться в течение большого количества циклов.

3.3. Эффект накопления деформаций в основании оползня под действием слабых вибраций

В предыдущем разделе были исследованы закономерности разрушения склона многократным импульсным воздействием. Было показано, что при достаточной величине динамического ускорения в склоне возникают остаточные деформации, которые, накапливаясь, могут перевести склон в неустойчивое состояние.

Эффект накопления слабых возмущений хорошо известен в геомеханике. Длительное низкоамплитудное циклическое воздействие на образцы горной породы приводит к существенному снижению их прочностных свойств за счет возникновения микропластических деформаций и других неупругих эффектов (Садовский и др., 1981, Бобряков и др., 2016, Машинский, 2014). При постоянном вибрационном воздействии, за счет перманентного накопления малых остаточных деформаций заметно изменяются и макроскопические характеристики контактов между блоками (Кочарян, 2016) или области локализации скольжения.

В данном разделе исследован эффект потери устойчивости лежащего на склоне жесткого блока за счет накопления деформаций под действием

низкоамплитудных сейсмических колебаний. Методика и схема установки приведены в разделе 2.4 (рисунок 2.6).

В первой серии экспериментов вибрационное воздействие осуществлялось на протяжении всего времени проведения опыта вплоть до достижения предела прочности на контакте между блоком и поверхностью склона. Частота вибраций $f=50$ Гц, угол склона варьировался от 37° до 27° . При этом фактор устойчивости увеличивался от $FS=1,08$ (блок близок к состоянию предельного равновесия) до $FS=1,56$ (весьма устойчивое состояние). Максимальное значение горизонтальной компоненты ускорения на уровне расположения акселерометров PGA_x изменялось в диапазоне $(0,065 - 0,2)g$, вертикальной компоненты ускорения PGA_z — $(0,04 - 0,12)g$. Соответствующие значения для скорости смещения грунта PGV_x — $2 - 6$ мм/с, PGV_z — $0,4 - 1,2$ мм/с. После включения вибростенда блок начинал перемещаться относительно склона. Фрагмент записи смещения блока по склону показан на рисунке 3.13. Можно выделить две составляющие движения — колебательная с частотой и амплитудой, которые соответствуют параметрам волны, воздействующей на основание, и поступательная, которая, как правило, направлена вниз по склону, хотя иногда регистрируются локальные смещения и в обратном направлении.

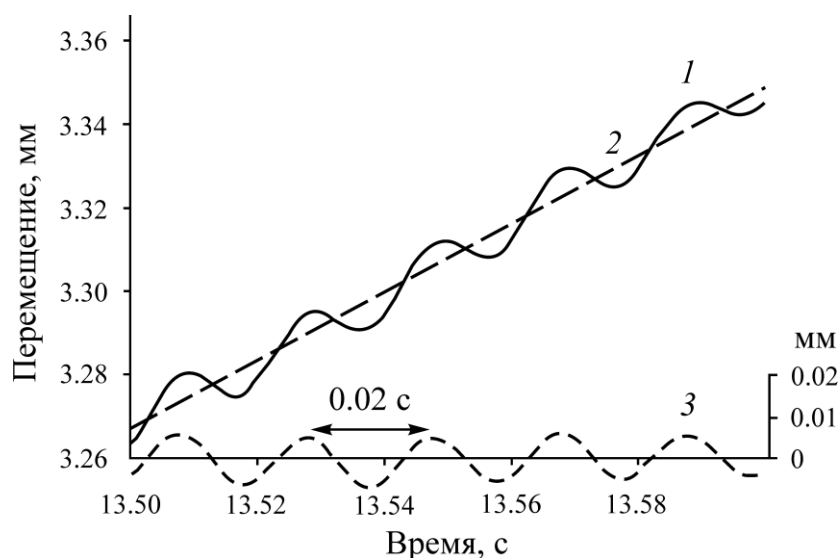


Рисунок 3.13 – Фрагмент записи смещения блока по склону $\alpha=37^\circ$ при воздействии вибрации $PGA = 0,065g; f = 50$ Гц:

1 — запись датчика смещений; 2 — составляющая поступательного движения блока по склону; 3 — колебательное движение блока

На рисунке 3.14 приведены примеры зарегистрированных зависимостей перемещения блока вдоль склона от времени для разных углов наклона. Параметры воздействия во всех экспериментах были одни и те же. Стадии поступательного перемещения, которые видны на зависимости перемещения от времени $D(t)$, типичны для любого процесса ползучести. Выделяются промежутки неустановившейся ползучести (стадия 1 на рисунке 3.14) и установившейся (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. Начало стадии динамического скольжения безошибочно определялось по резкому увеличению величины $a=d^2D/dt^2$. На рисунке 3.15 приведены графики для скорости смещения блока, которые соответствуют графикам на рисунке 3.14.

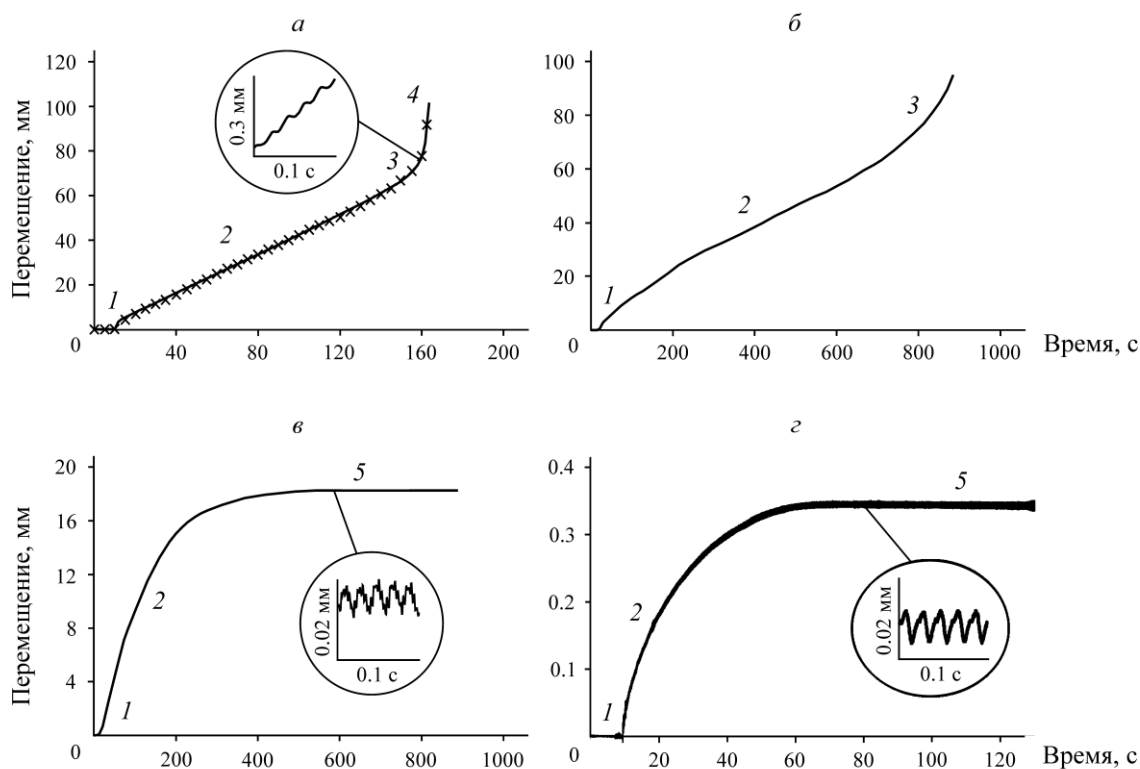


Рисунок 3.14 – Зависимости перемещения блока по склону от времени в результате воздействия вибраций с $PGA = 0,065g$; $f = 50$ Гц:

a — угол склона 37° , $FS = 1,10$, сплошная линия — соотношение (3.4); *б* — 33° ,

$FS = 1,27$; *в* — 30° , $FS = 1,42$; *г* — 27° , $FS = 1,60$. Крестики —

экспериментальные данные, 1–5 — стадии поступательного перемещения.

Для читаемости рисунка показаны лишь отдельные точки. Запись выполнялась с частотой опроса 400 Гц

Динамическое обрушение склона в этой серии произошло только в опыте с $\alpha=37^\circ$ (рисунок 3.14а), когда перемещение блока по склону превысило 80 мм. В опыте, где $\alpha=33^\circ$, динамической стадии обрушения не зафиксировано, однако скольжение перешло в состояние ускоряющейся ползучести 3, а перемещение достигло 100 мм. На этой стадии опыт остановили, поскольку достигнут верхний предел измерений лазерного датчика. Можно предположить, что при дальнейшем воздействии блок, скорее всего, сорвался бы. В остальных двух опытах этой серии (рисунок 3.14в, г) после достижения средней скорости поступательного скольжения $\sim 0,10$ мм/с ($\alpha=30^\circ$) и $\sim 0,03$ мм/с ($\alpha=27^\circ$) блок замедлялся и постепенно останавливался. Дальнейшее вибрационное воздействие не приводило к значимому накоплению перемещений. Во второй серии экспериментов воздействие осуществлялось периодически. После 30 с вибрации вибростенд выключался на 10 мин, затем цикл возобновлялся, что позволило исследовать фазы разгона блока под действием колебаний и его торможения при выключении вибростенда. Изменение параметров движения блока в ходе одного из экспериментов показано на рисунке 3.16.

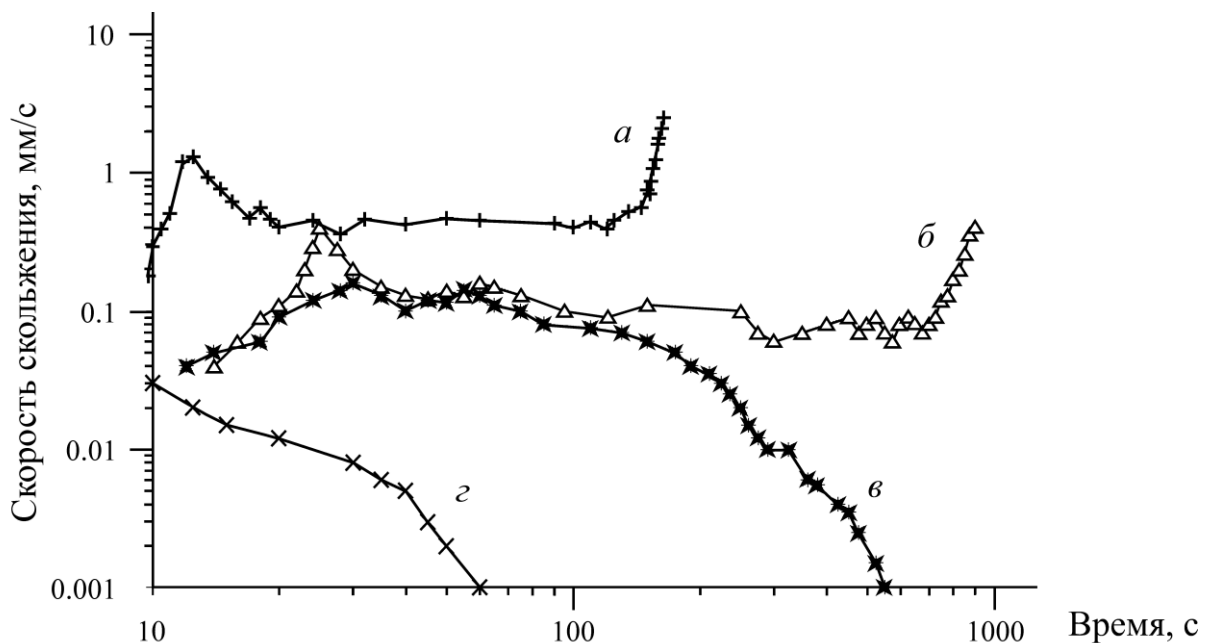


Рисунок 3.15 – Изменение скорости скольжения блока по склону во времени:
 а — $\alpha=37^\circ$; б — $\alpha=33^\circ$; в — $\alpha=30^\circ$; г — $\alpha=27^\circ$. Буквы а–г соответствуют
 рисунку 3.14

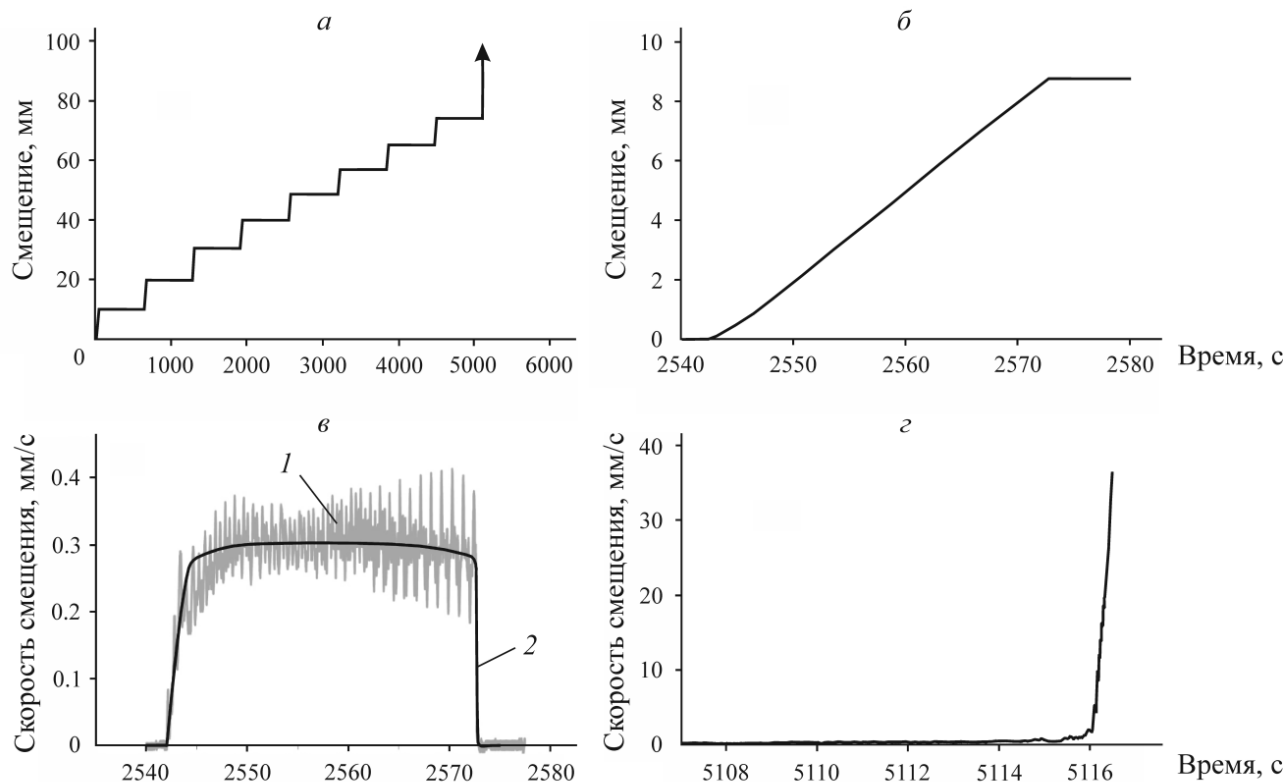


Рисунок 3.16 – Изменение параметров движения блока в ходе эксперимента: а — полная запись; б–г — фрагменты; 1 — исходная запись; 2 — результат сглаживания. Угол склона $\alpha=35^{\circ}$ частота вибрации $f=80$ Гц, $PGA_x=0,2g$. На рис. б-г смещение отсчитывается от начала фрагмента

На рисунках 3.16а, б приведены зависимости $D(t)$ для всего опыта и одного из циклов. Видно, что вплоть до 8 цикла блок после выключения вибростенда останавливается, а в ходе 9-го цикла вибровоздействия блок теряет устойчивость (отмечено стрелкой). На рисунке 3.16в показана зависимость скорости смещения блока относительно склона $u(t) = dD(t)/dt$, где линия 1 — исходная запись, на которой наблюдается помеха, вызванная дрожанием крепления лазерного датчика. На записи довольно точно выделяются моменты включения и выключения вибростенда. Сглаженная запись показана линией 2. После включения вибростенда блок в течение нескольких секунд разгоняется. Затем скорость скольжения становится постоянной и достигает $\sim 0,3$ мм/с. На разных циклах вибрационного воздействия скорость скольжения в эксперименте варьировала в диапазоне от 0,3 мм/с до 0,7 мм/с. После прекращения вибрации происходило практически моментальное торможение блока. При этом для всех

ступеней время торможения блока было приблизительно одинаковое ($\sim 0,2$ с). Данное значение определяется соотношением между силой трения и составляющей силой тяжести, которая направлена вдоль склона.

На рисунке 3.16г приведено значение $u(t) = dD(t)/dt$ для заключительного этапа эксперимента. Через $\sim 11,5$ с после начала девятого цикла вибровоздействия блок теряет устойчивость и, ускоряясь, сползает со склона.

Аналогичные результаты были получены и в экспериментах с другими углами склона. Параметры опытов приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 Параметры опытов

N	α , град	FS	Состояние	PGA , g	a_c , g	D_{max} , мм	V_{st} , мм/с	V_{max} , мм/с
Серия 1. Частота вибраций $f=50$ Гц								
11	37	1,08	обрушение	0,065	0,04	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	$\sim 0,7-0,8$	1,5
102	35	1,15	обрушение	0,2	0,074	37,5	$\sim 0,7-0,8$	1,49
105	32	1,29	обрушение	0,1	0,13	62,5	$\sim 0,75$	1,61
106	30	1,39	обрушение	0,1	0,16	63	$\sim 0,8$	1,46
Серия 2. Частота вибраций $f=80$ Гц								
201	33	1,24	обрушение	0,2	0,1	40	$\sim 0,45$	1,4
202	35	1,15	обрушение	0,2	0,074	80	$\sim 0,3$	-
203	35	1,15	обрушение	0,2	0,074	46	$\sim 0,55$	1,35
204	37	1,08	обрушение	0,2	0,04	<10 **	$\sim 0,55$	1,2
205	38	1,03	обрушение	0,2	-	<10	$\sim 0,75$	1,4

В таблице: N – номер опыта, α – угол склона, FS – фактор устойчивости, PGA – максимальные ускорения в волне, a_c – критическая величина ускорения по квазистатической схеме, D_{max} – максимальное перемещение блока относительно склона, либо перемещение перед динамическим срывом; V_{st} – скорость скольжения блока на стадии установившейся ползучести; V_{max} – максимальная скорость скольжения блока относительно склона, либо скорость скольжения перед динамическим срывом.

В проведенных экспериментах однозначной причиной возникновения неустойчивости являлись низкоамплитудные вибрации. В ряде опытов (№№ 11, 101, 102, Серия 2) максимальная амплитуда ускорения PGA превышала расчетную величину a_c . Напомним, что согласно квазистатическому подходу, смещение оползня относительно склона происходит лишь в те моменты времени, когда максимальное ускорение в волне превышает критическую величину.

Однако в экспериментах и относительное движение блока, и даже обрушение наблюдались и в тех опытах, в которых это условие не выполнялось (№№ 16, 25, 29, 105, 106). Это приводит к заключению, что возникновение скольжения под действием малых возмущений связано с нелинейностью реологической зависимости напряжение - перемещение для межблокового контакта. Вопрос подробно рассмотрен в работах (Кочарян, 2016, Садовский и др., 1981, Бобряков и др., 2016).

Из результатов, полученных в описанной серии экспериментов, 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* (Кочарян, 2016). Это означает, что в критической величине смещения заложен иной смысл, нежели переход от трения покоя к трению скольжения. Этот вопрос требует дополнительного исследования.

Опыты продемонстрировали существование некоторой величины средней скорости крипа V_{min} , ниже которой начинается «упрочнение» контакта, и блок постепенно останавливается. Судя по результатам, показанным на рисунке 3.15, для испытываемой поверхности V_{min} составляет величину порядка $\sim 0,1$ мм/с. При такой скорости блок может скользить примерно с постоянной скоростью весьма длительное время (опыт 29, рисунок 3.14б). Сопоставление кривых б (оп.29) и в (оп.25) на рисунке 3.15 демонстрирует одинаковые скорости скольжения и

амплитуды перемещения вплоть до момента времени $t \sim 110$ с., после чего в одном случае началась стабилизация контакта и затухание скорости крипа, а в другом случае скольжение продолжалось с постоянной скоростью в течение длительного времени и затем перешло в фазу ускоряющегося крипа. Это свидетельствует о влиянии таких факторов, как небольшие вариации угла склона, локальные неоднородности контакта в тех случаях, когда оползень находится в метастабильном состоянии.

Таким образом, для перехода к динамическому ускоряющемуся скольжению необходимо обеспечить как достаточную величину перемещения, так и необходимую скорость скольжения. Если величина достигнутого перемещения заметно варьируется, то величина скорости скольжения, после которой начинается стадия динамического срыва, довольно стабильна и составляет величину $\sim 1,5$ мм/с (опыты 11, 101-106). В то же время в опыте 29 при самой большой величине перемещения во всех экспериментах скорости скольжения оказалось недостаточно для динамического срыва.

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

В целом процесс зарождения и эволюции оползня типичен для процессов, описываемых уравнениями теории ползучести. Используя так называемый метод разделения компонент деформаций ползучести, полное смещение грунта относительно основания можно представить в виде суммы трех слагаемых (Самарин, 1979):

$$D(t) = \phi(t) + \kappa(t) + w(t) \quad (3.2)$$

где $\phi(t)$ – деформация неустановившейся ползучести, $\kappa(t)$ – деформация установившейся ползучести, $w(t)$ – деформация ускоренной ползучести.

Хотя вклад слагаемого $\phi(t)$ чаще всего малозначителен, он играет существенную роль, например, с точки зрения мониторинга склоновых явлений. Параметры этой псевдовязкой стадии существенно зависят от масштаба явления. Снижение эффективной вязкости с ростом скорости деформации отмечается для разных геологических объектов от образцов до континентов (Христофоров, 2010). В работах (Ци и др., 2006, Qi et al, 2017) демонстрируется, что при высоких скоростях деформации эффективная вязкость обратно пропорциональна скорости деформации, и этот эффект связывается с наличием в геосреде неоднородностей разных иерархических уровней.

На второй стадии установившейся ползучести скорость деформации практически неизменна, т.е. амплитуда смещения пропорциональна времени. Длительность второй стадии зависит от уровня приложенных напряжений. Так, например, в опыте №29 при значении $FS=1,24$ (рисунок 3.14б) длительность стадии установившейся ползучести в несколько раз выше, чем в опыте №11 ($FS=1,08$, рисунок 3.14а). В механике грунтов эту стадию связывают с пластическим течением грунта (Месчян, 1985). В нашем случае правильнее говорить об установлении равновесия между силой сопротивления сдвигу (сухим трением) и составляющей силы тяжести. Это равновесие формируется в результате снижения эффективного коэффициента трения при воздействии вибраций. То, что это именно так, легко убедиться из данных, приведенных на рисунке 3.16б. После выключения вибратора блок останавливается. При этом наклон заднего фронта ступеньки оказывается одним и тем же для всех циклов, поскольку определяется величиной «квазистатического коэффициента трения». Авторы работы (Кочарян и др., 2004) отмечают, что микроподвижки при динамических воздействиях из-за нелинейности зависимости жесткости межблокового контакта от накопленной деформации приводят к изменению силы сопротивления сдвигу и, как следствие, к возникновению медленного движения.

Тут необходимо подчеркнуть, что сила трения возникает лишь при скольжении тела и «мобилизуется» до величины, достаточной для установления равновесия. Причем, при малых перемещениях эта величина может быть меньше кулоновской прочности. Так тело, помещенное на наклонную плоскость и лежащее на ней неподвижно, требует для своего равновесия включения сил трения. Однако, сила трения возникает только в движении, а значит тело на наклонной плоскости должно, хотя и медленно, но ползти. Динамика этого равновесия рассмотрена в статье (Садовский и др., 1995).

Особенный интерес представляет третий этап эволюции оползня – стадия ускоряющегося движения и динамический срыв. Согласно (Работнов, 1991) аналогичный участок ускоряющейся ползучести предлагается описывать функцией:

$$D(t) = \frac{C}{(t_* - t)^k} + b \quad (3.3)$$

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

В экспериментах зависимости смещения блока под действием вибраций хорошо описываются соотношениями типа (3.4). Так, например, для эксперимента №11 (рисунок 3.14а) аппроксимация результатов измерений показана на рисунке сплошной линией, которая описывается уравнением:

$$D = 3 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{(t-10)}{1}\right)\right) + 0.43 \cdot (t-10) + \frac{50}{165-t} \quad (3.4)$$

где время t измеряется в секундах, а амплитуда смещения в мм.

При описании ускоряющейся ползучести в механике материалов применяется кинетическая теория ползучести, развитая Л. М. Качановым и Ю. Н. Работновым (Работнов, 1991, Качанов, 1960). Вводимый в этих случаях параметр поврежденности определяется в ходе специальных исследований структуры материала.

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

Выводы к главе 3

1. При динамическом воздействии на склон существуют минимальные пиковые параметры ускорений в волне PGA_{min} и скорости смещения грунта PGV_{min} , ниже которых обрушения не происходит. Значения PGA_{min} превышают величину критического ускорения, рассчитанную на основе квазистатического подхода.

2. Для всех склонов при многократном воздействии отмечено резкое снижение максимальной скорости смещения грунта, требуемой для обрушения склона при тех же ускорениях. По мере снижения PGV накопление деформации при многократном воздействии происходит все медленнее. При высоких коэффициентах устойчивости FS склон остается устойчивым даже при больших кумулятивных деформациях.

3. По результатам проведенных лабораторных экспериментов показано, что при длительном воздействии низкоамплитудными вибрациями необходимыми условиями возникновения динамического обрушения являются превышение некоторого критического значения смещения относительно склона и достижение определенной средней скорости крипа, которая в модельных экспериментах составила $\sim 1,5$ мм/с. Критическое смещение оказывается существенно больше, чем характерный размер, при котором происходит переход поверхности скольжения к остаточному сопротивлению сдвигу.

ГЛАВА 4. МОДЕЛЬ ИНИЦИИРОВАНИЯ ОПОЛЗНЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ

4.1. Оценка параметров сейсмических колебаний от землетрясений при обрушении склонов

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 (Keefer, 1984). Основываясь на данных о 40 землетрясениях по всему миру, он предположил, что существуют предельные расстояния, за пределами которых оползни не выявляются (рисунок 1.5). Данные, собранные другими авторами (Fotopoulou et al., 2017, Wang et al., 2018, Forte et al., 2021 и многие другие публикации), подтверждают полученные в (Keefer, 1984) зависимости, а также дополняют их. Данные, которые удалось найти в литературе, собраны в таблице в Приложении А и показаны на рисунке 4.1 значками в виде зависимости предельного эпицентрального расстояния, на котором были зафиксированы оползни, от магнитуды землетрясения.

В этой же таблице в Приложении А приведены величины максимальных ускорений и скоростей смещения грунта, рассчитанные при помощи эмпирических зависимостей (Boore et al, 1993; Sabetta, Pugliese, 1996; Carro et al, 2003):

$$\log_{10}(PGA) = 0.299 + 0.299(M - 6) - 1.052 \log_{10} R + 0.112\Gamma \quad (4.1)$$

$$\log_{10}(PGV) = -0.828 + 0.489M - \log_{10} R + 0.116 \quad (4.2)$$

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

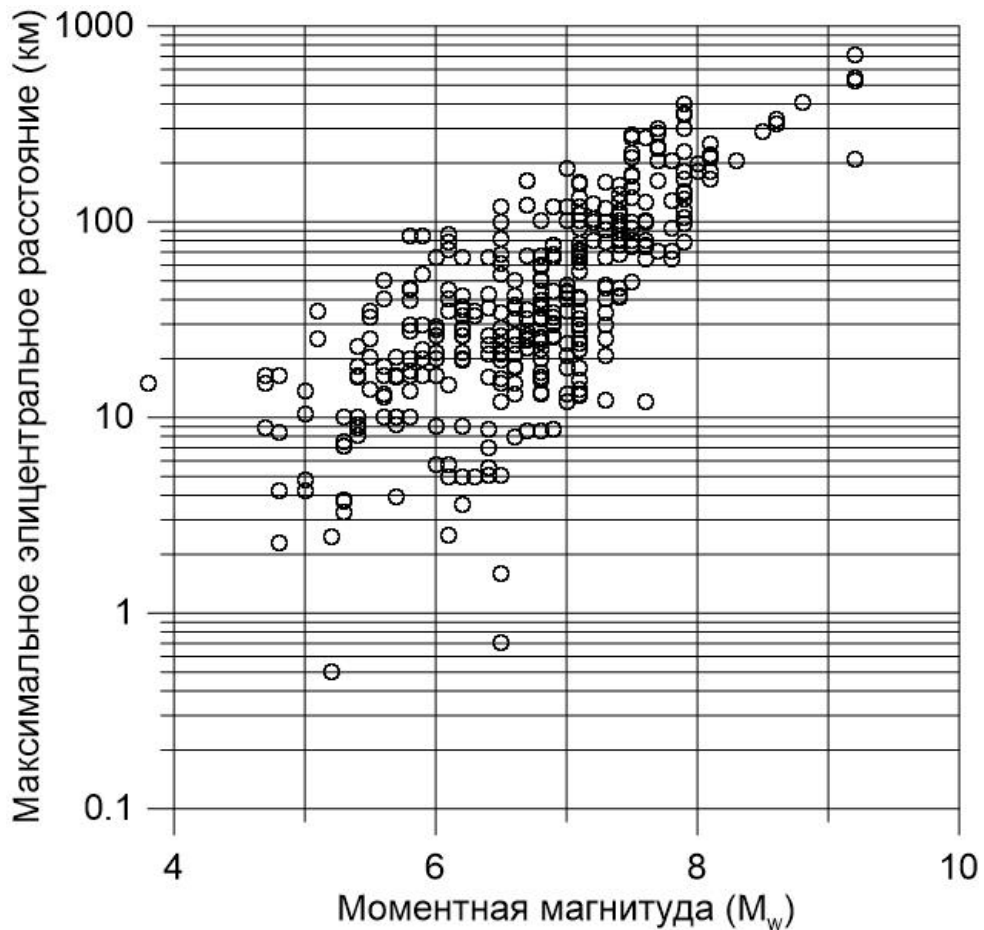


Рисунок 4.1 – Максимальные эпицентральные расстояния, на которых наблюдались склоновые явления при землетрясениях разных магнитуд (Fotopoulou et al., 2017, Wang et al., 2018, Forte et al., 2021 и многие другие публикации). Данные приведены в Приложении А

Рассчитанные значения PGV и PGA в окрестности обрушившихся склонов (таблица Приложения А) показаны на рисунке 4.2 красными значками. Используя огибающую линию для разных рядов данных (рисунок 1.5), с помощью соотношений 4.1 и 4.2 проведены расчеты минимальных критических параметров колебаний, при которых зафиксированы обрушения, для землетрясений магнитудами 4,5–7,0. Результаты в виде черных значков представлены на рисунке 4.2. Видно, что результаты расчетов PGA и PGV в основном лежат выше минимальных значений, соответствующих огибающей (Keefner, 1984). Можно отметить очевидную тенденцию роста критических параметров для землетрясений меньших магнитуд, что связано с увеличением частоты и более коротким цугом колебаний.

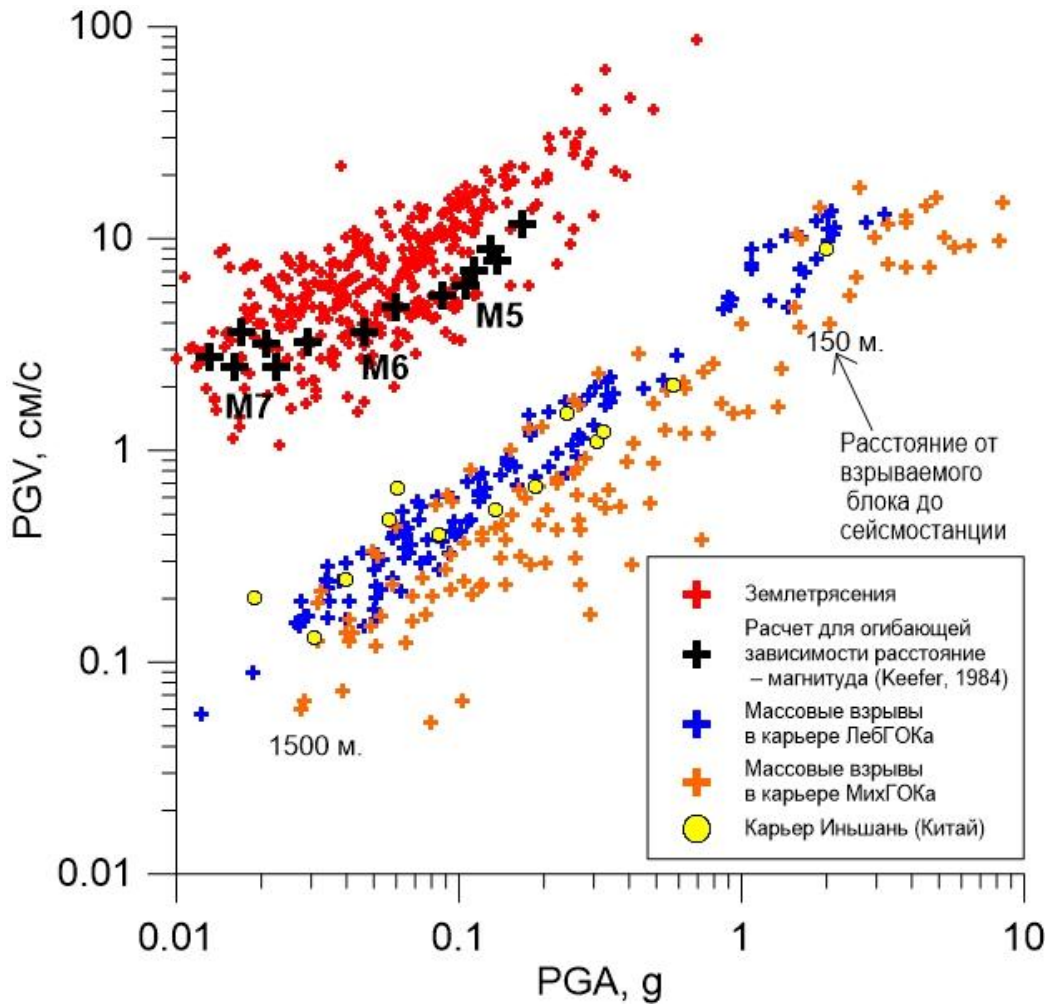


Рисунок 4.2 – Зависимость $PGA - PGV$ для разных источников событий

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.

4.2. Параметры сейсмозрывных волн на бортах карьеров горнодобывающих предприятий при производстве массовых взрывов

На устойчивость бортов карьеров существенное влияние оказывает систематическое производство массовых взрывов. При этом разрушение может происходить на отдельных локальных участках борта карьера, что связано с превышением допустимого предела параметра колебаний на данном участке борта. В пределах всего карьера скорость смещения может варьироваться в

достаточно широких пределах как из-за вариации расстояния до взрыва, так и строения массива горных пород.

Специалистами ИДГ РАН последние несколько десятилетий проводятся исследования сейсмического воздействия массовых взрывов на охраняемые объекты, в том числе на борта карьеров и на отвалы породы.

Проведение измерений позволяет определить параметры динамического нагружения участка карьера при прохождении сейсмических волн.

В рамках настоящей работы 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.

Горный массив карьера Лебединского ГОКа сложен железистыми кварцитами с крепостью до 18-20 по шкале Протодяконова, а также меловыми отложениями с крепостью 2. Суммарная мощность массовых взрывов может достигать более 2000 тонн ВВ. Расположение сеймостанций в карьере показано на рисунке 4.3. Одна из мобильных станций располагалась на путепроводах на борту карьера. В качестве сейсмоприемника использовался трехкомпонентный акселерометр А1638, который перед массовым взрывом закреплялся на горизонтальной площадке бетонной опоры.

Акселерометр А1638 является трехкомпонентным сейсмоприемником пьезоэлектрического типа. Когда он устанавливается на горизонтальную поверхность, то регистрирует вертикальные, радиальные и тангенциальные колебания (ускорения). Напряжение на выходе акселерометра пропорционально ускорению. Сейсмоприемник работает в полосе частот от 0,2 Гц до 400 Гц. Коэффициент преобразования акселерометра около 1 В/м/с. Три аналоговых сигнала с акселерометра поступают на вход четырнадцати разрядного АЦП типа Е-440 фирмы L-Card и записываются на винчестер компьютера. Оцифровка сигналов ведется АЦП с частотой 1 кГц на канал. При обработке акселерограммы путем численного интегрирования преобразуются в велосигramмы, и по трем

компонентам вычисляется величина вектора скорости и величина вектора ускорений. А далее по ним определяются максимальные скорости колебаний и максимальные ускорения.



*Рисунок 4.3 – Карта карьера Лебединского ГОКа.
Желтыми значками показано расположение сеймостанций*

Горный массив карьера Михайловского ГОКа сложен железистыми кварцитами с крепостью около 16-24 по шкале Протоdjяконова, а также меловыми отложениями с крепостью 2-5. Суммарная мощность массовых взрывов может достигать более 3000 тонн ВВ. В карьере Михайловского ГОКа одна из мобильных станций была расположена на бетонной опоре конвейера, которая показана на рисунке 4.4. На переднем плане виден акселерометр А1638. Рядом с ним в металлическом чемодане размещены АЦП и ноутбук.



Рисунок 4.4 – Место размещения мобильной сейсмической станции в карьере Михайловского ГОКа

Полученные результаты измеренных параметров колебаний от массовых взрывов в карьерах Михайловского (оранжевые значки) и Лебединского (синие значки) ГОКов представлены на рисунке 4.2. Желтыми значками представлены параметры колебаний от массовых взрывов, зарегистрированные в карьере Иньшань (Китай) (Hui Cao et al, 2023), которые находятся в хорошем соответствии с результатами измерений на Лебединском ГОКе.

Сейсмическая магнитуда (M_L) массовых взрывов на Курской магнитной аномалии не превышает величины 2,8–3,0 (Авдеева и др., 2022). В соответствии с данными рисунка 4.2 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.

4.3. Обсуждение и интерпретация данных наблюдений

В подавляющем большинстве исследований в качестве параметров, контролирующих процесс инициирования оползня, используются несколько характеристик: максимальное горизонтальное ускорение в сейсмической волне PGA , максимальная массовая скорость PGV_{max} , учитывающая длительность действия ускорения, и смещение Ньюмарка D_N .

Результаты лабораторных экспериментов показали, что конкретные величины параметров PGA и D_N зависят от множества факторов. В первую очередь от геометрии склона, его структуры и от свойств грунта. Критическое значение максимальной скорости смещения грунта PGV в сейсмической волне зависит от коэффициента статической устойчивости. С ростом величины коэффициента устойчивости увеличивается максимальная скорость смещения грунта, необходимая для разрушения склона.

В работах (Wilson, Keefer, 1983; Jibson, Keefer, 1993) показано, что величина смещения $D_N=10$ см является консервативной оценкой критического смещения, необходимого для начала разрушения. Если анализ Ньюмарка предсказывает смещение всего в несколько миллиметров, склон можно считать стабильным. С другой стороны, если смещение, прогнозируемое анализом Ньюмарка, составляет несколько десятков сантиметров, вполне вероятен крупномасштабный оползень из-за значительной потери прочности.

На рисунке 4.5 сопоставлены величины смещения Ньюмарка с данными численного моделирования методом дискретных частиц процесса разрушения склона под действием сейсмических нагрузок от землетрясения *Loma-Prieta*, 1989 г. $M_w=6,9$ при различных амплитудах воздействия (Arnold, 2016). Склон с углом 80° был сложен прочной скальной породой. В расчетах использованы реальные

волновые формы, зарегистрированные при землетрясении. Судя по результатам расчета, смещения Ньюмарка около 10 см соответствуют значительным разрушениям.

Критическое смещение может широко варьироваться в зависимости от механизма разрушения склона (скольжение блока, камнепад и пр.), геометрии склона, литологического состава пород и предшествующей истории движения склона.

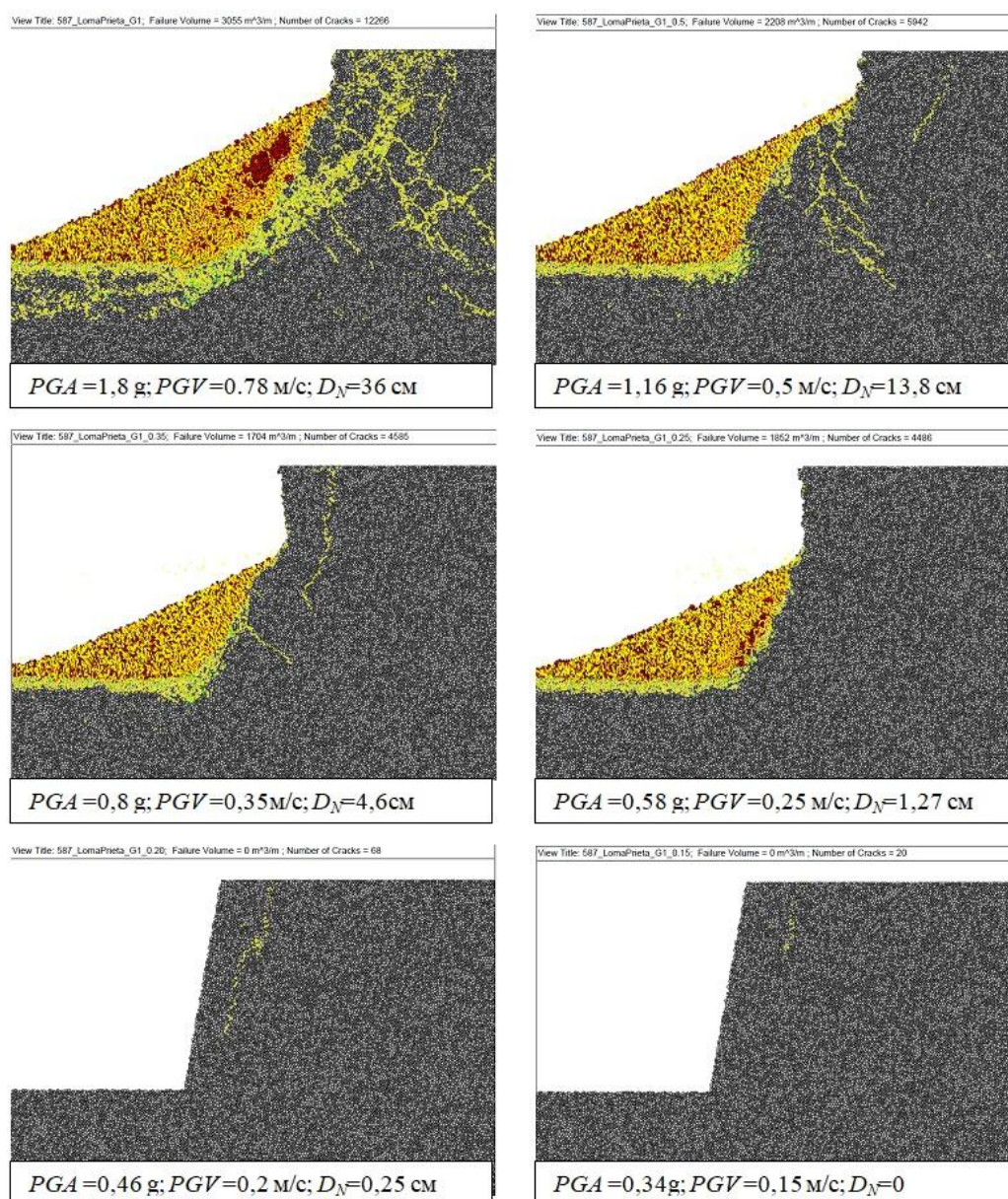


Рисунок 4.5 – Результаты численного моделирования разрушения склона сейсмическим воздействием от землетрясения Loma – Prieta (Arnold, 2016).

Под каждым рисунком приведены значения PGA, PGV и рассчитанное смещение Ньюмарка D_N

В настоящей работе для расчета смещений Ньюмарка по реальным сейсмограммам использовалась программа SLAMMER (Jibson et al, 2013). 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 (см. главу 1).

Были рассчитаны смещения Ньюмарка для 4-х землетрясений разных магнитуд: *Whittier Narrows* 1987 г. ($M_w=6,0$); *San Fernando* 1971 г. ($M_w=6,6$); *Cape Mendocino* 1992 г. ($M_w=7,1$); *Chi Chi* 1999 г. ($M_w=7,6$). В выборку вошли все станции из каталога, для которых $PGA > 0,2g$. Для каждой станции рассчитывались смещения по модели Ньюмарка для 10 значений критического ускорения a_c от 0,02 до 0,2 g с шагом 0,02 g

Результаты расчетов показаны на рисунке 4.6. Каждая линия на рисунке соответствует одной записи, зарегистрированной на станции из каталога программы SLAMMER (Jibson et al, 2013).

Как видно из результатов расчета, величина смещений $D_N \cong 10-20$ см достигается в тех случаях, когда PGA в 5–10 раз превышает величину a_c .

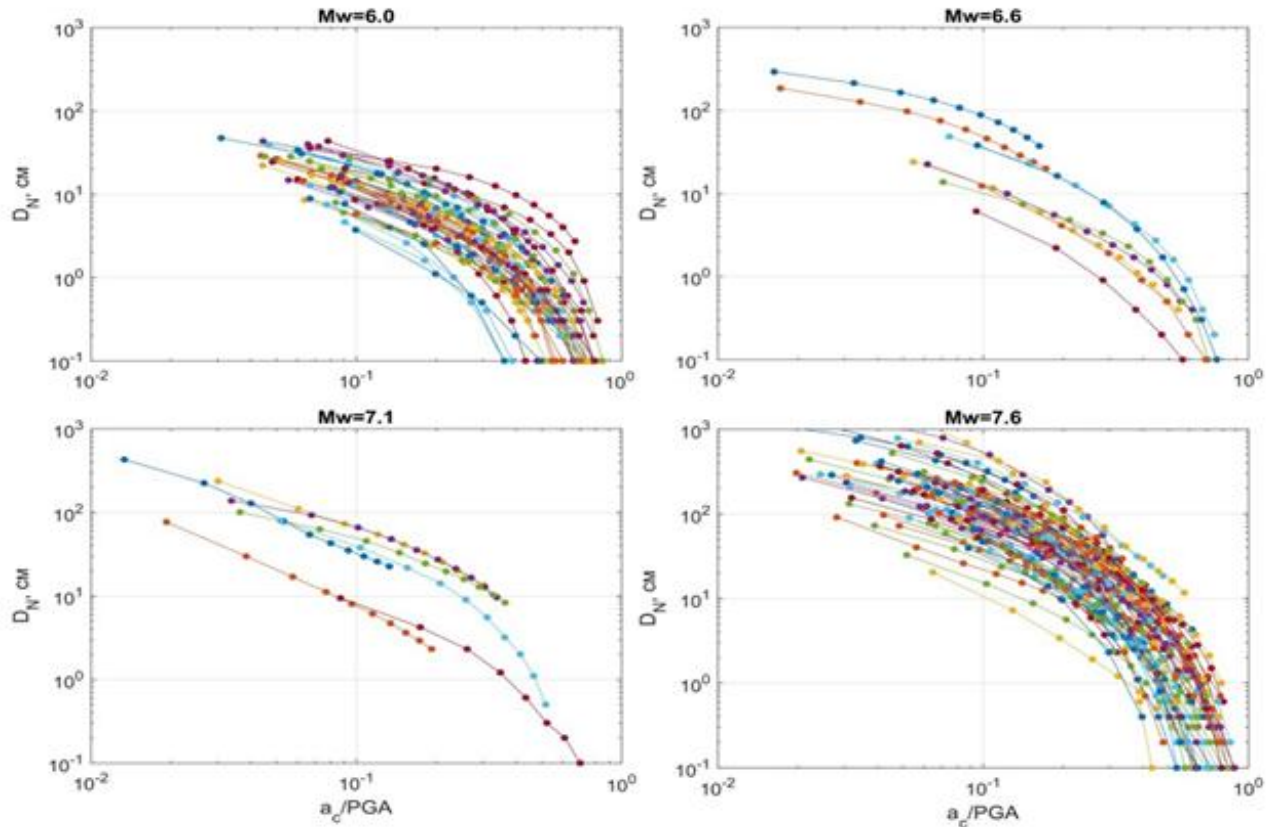


Рисунок 4.6 – Зависимость смещения по Ньюмарку от величины отношения a_c/PGA для землетрясений Whittier Narrows 1987 г. с $M_w=6,0$; San Fernando 1971 г. с $M_w=6,6$; Cape Mendocino 1992 г. с $M_w=7,1$; Chi Chi 1999 г. с $M_w=7,6$

Результаты тех же расчетов в терминах пиковой скорости смещения грунта приведены на рисунке 4.7. Критически опасная величина смещений $D_N \approx 10-20$ см достигается при $PGV \sim 10-40$ см/с для землетрясения $M_w=6$ и при $PGV \sim 20-70$ см/с для землетрясения $M_w=7,6$.

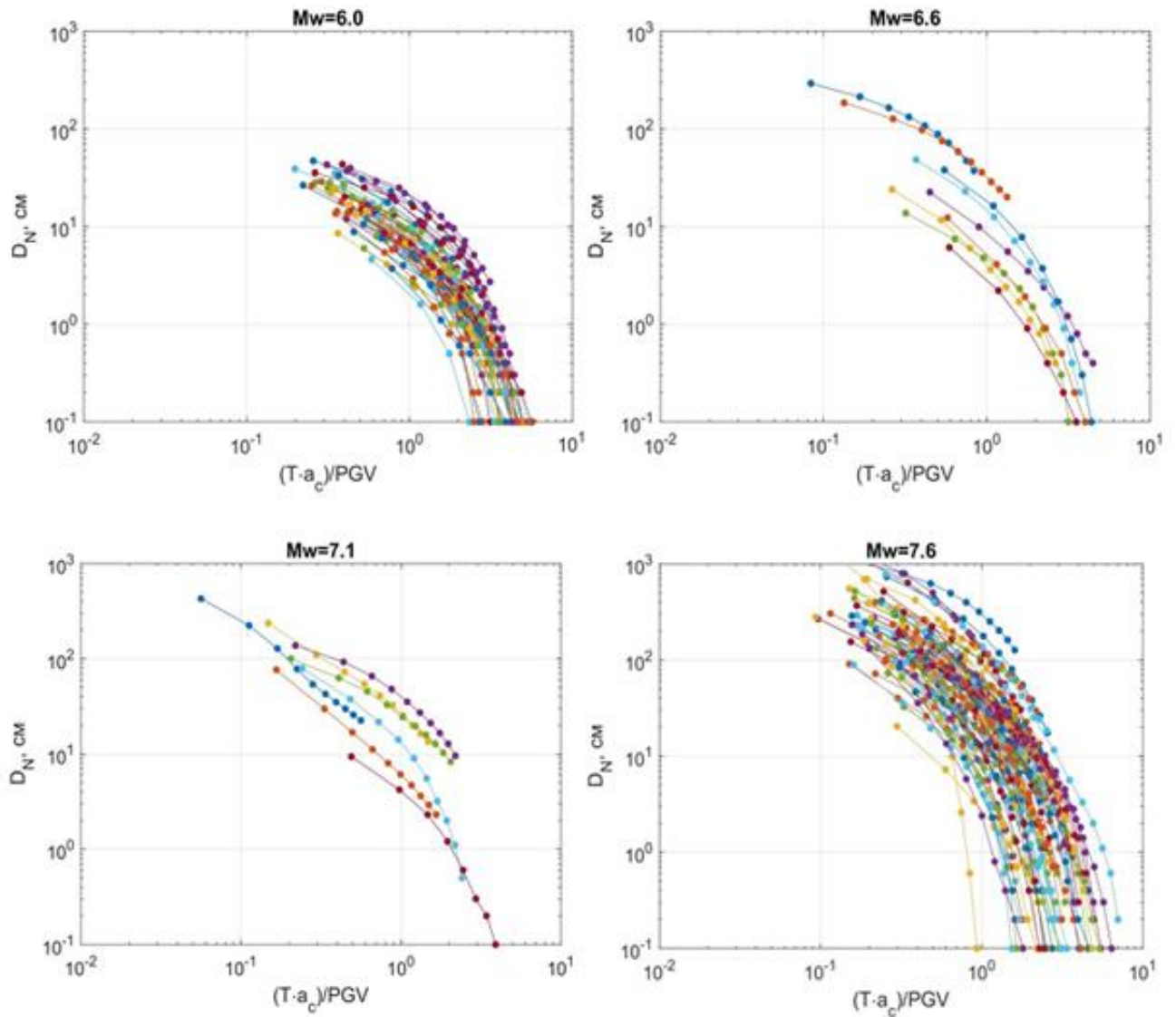


Рисунок 4.7 – Зависимость смещения по Ньюмарку от приведенной безразмерной скорости для землетрясений Whittier Narrows 1987 г. с $M_w=6,0$; San Fernando 1971 г. с $M_w=6,6$; Cape Mendocino 1992 г. с $M_w=7,1$; Chi Chi 1999 г. с $M_w=7,6$. T – средний период записи землетрясений из каталога программы SLAMMER

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 4.8а), массового взрыва в карьере Лебединского ГОКа, зарегистрированных на расстоянии 2,5 км от взрыва с суммарным весом зарядов 2361 т (рисунок 4.8б), и двух видов импульсного воздействия, описываемых импульсами Берлаге (рисунок 4.8в,г):

$$u(t) = At^a \exp(-bt) \sin(\omega t) \quad (4.3)$$

Импульсы Берлаге качественно соответствуют эпюрам ускорений в ближней зоне подземного взрыва сосредоточенного заряда. Параметры всех четырех сигналов, выбранных для сравнения, масштабировались таким образом, чтобы величина максимального ускорения во всех случаях была одинакова и составляла величину $PGA=0,37g$.

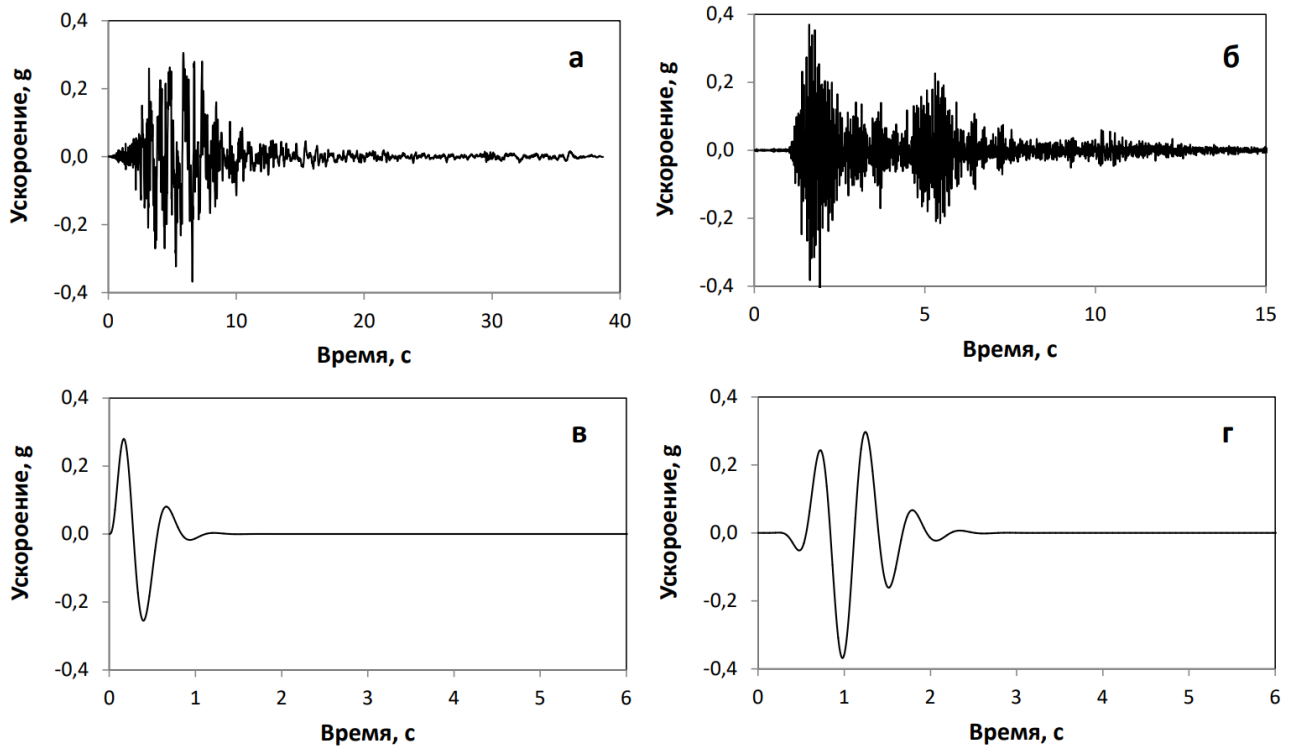


Рисунок 4.8 – Вид акселерограмм, использованных для расчета смещений Ньюмарка.

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

Результаты расчета смещения Ньюмарка для разных типов сейсмических воздействий представлены на рисунке 4.9. 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 в 20-30 раз выше квазистатической величины.

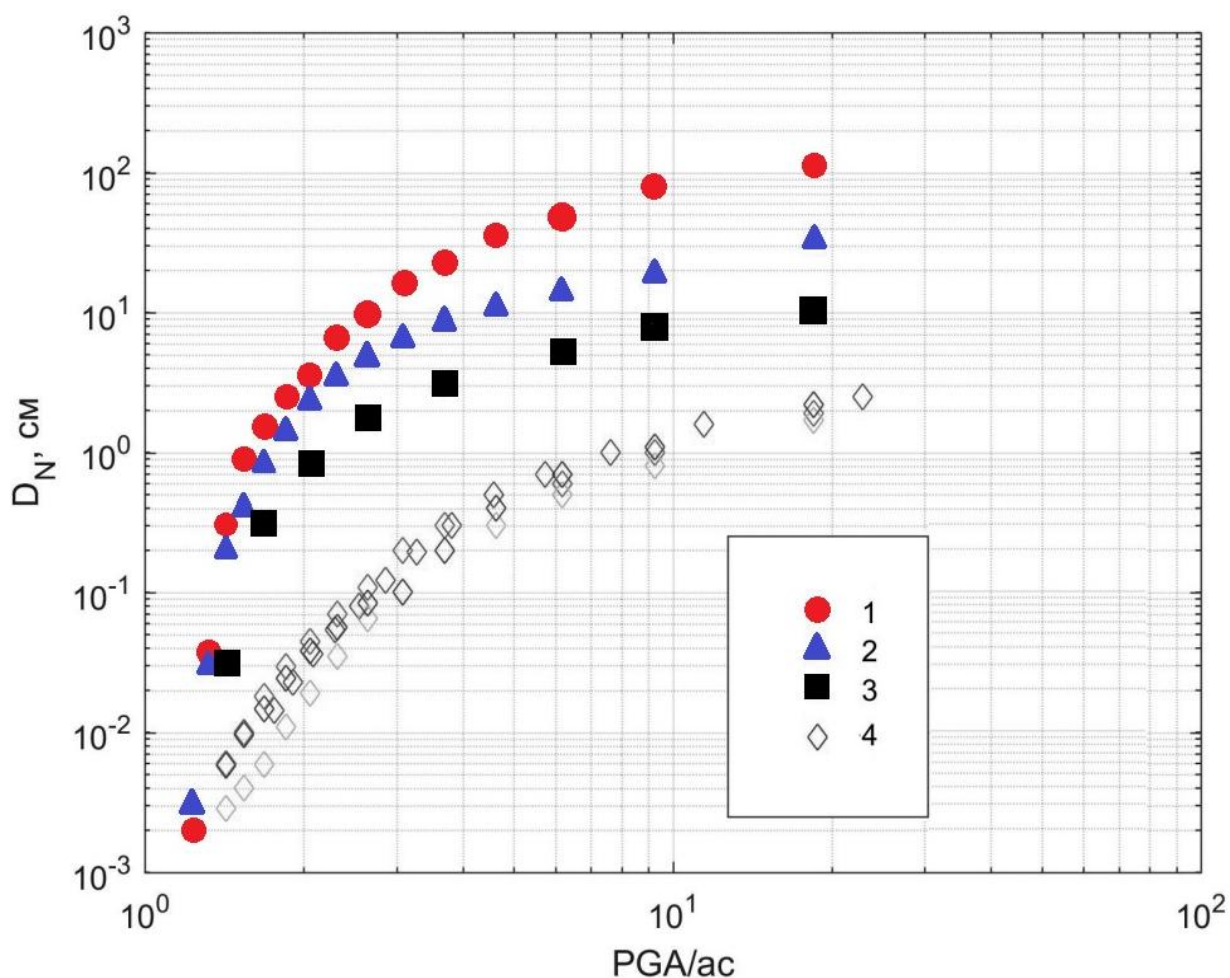


Рисунок 4.9 – Рассчитанные величины смещения Ньюмарка для разных типов сейсмических воздействий в зависимости от величины отношения PGA/a_c : 1 – землетрясение Westmorland; 2 – импульс EX1; 3 – импульс EX2; 4 – массовые взрывы на карьере Лебединского ГОКа (10.04.2019, 06.05.2020, 27.05.2020, 25.06.2020)

4.4. Феноменологическая модель процесса инициирования обрушения склона при многократном сейсмическом воздействии

Выполненные исследования позволяют построить модель, охватывающую набор наблюдаемых явлений. При этом, хотя некоторые взаимосвязи и причины происходящих процессов остаются до конца нераскрытыми, предлагаемая модель может быть, на наш взгляд, пригодной для прогнозирования устойчивости склонов. Такая модель является феноменологической.

В основе разработанной модели процесса инициирования схода оползня при многократном сейсмическом воздействии лежат известные принципы определения квазистатической устойчивости склона, дополненные представлениями, основанными на результатах проведенных лабораторных экспериментов, инструментальных измерений сейсмического эффекта массовых взрывов и анализа большого объема натуральных данных, включая численные расчеты действия сейсмических колебаний на склоны.

Подробно предлагаемую модель удобно изложить в виде ряда положений:

1. Смещение грунта происходит при совокупном действии статической (сила тяжести) и динамической (сейсмические колебания от землетрясений, взрывов, работы машин и механизмов) нагрузок. Запас устойчивости характеризуется широко используемым коэффициентом устойчивости FS , определяемым соотношением (1.1). Величина коэффициента устойчивости склона (откоса), приблизительно равная единице ($FS \sim 1$), соответствует состоянию предельного равновесия, наблюдающемуся в момент начала оползневого смещения. При учете сейсмического воздействия в квазистатическом приближении вводится критическое ускорение a_c (1.4), при котором фактор устойчивости FS становится равным 1.

2. Поверхность скольжения, которая в идеализированных моделях представляется в виде кривой второго порядка, в действительности определяется наличием литологических границ, водоупоров, а также нарушений сплошности, сформированных на стадии статического предразрушения. Основные типы

предразрушения показаны на рисунке 4.10. Характер предразрушения и/или наличие естественных поверхностей скольжения определяет тип деформирования склона и при динамическом воздействии - обрушение (обвал), оползень, опрокидывание отдельных участков склона в окрестности гребня. Поскольку на динамику процесса обрушения, в том числе при многократном сейсмическом воздействии, существенное влияние оказывает процесс «предразрушения» склона, приближение «сдвига целого блока» по границам существующих пластов, водоупорам или по вновь образованным структурным нарушениям, субпараллельным поверхности склона, представляется вполне естественным. Такая упрощенная схема соответствует результатам наблюдений.

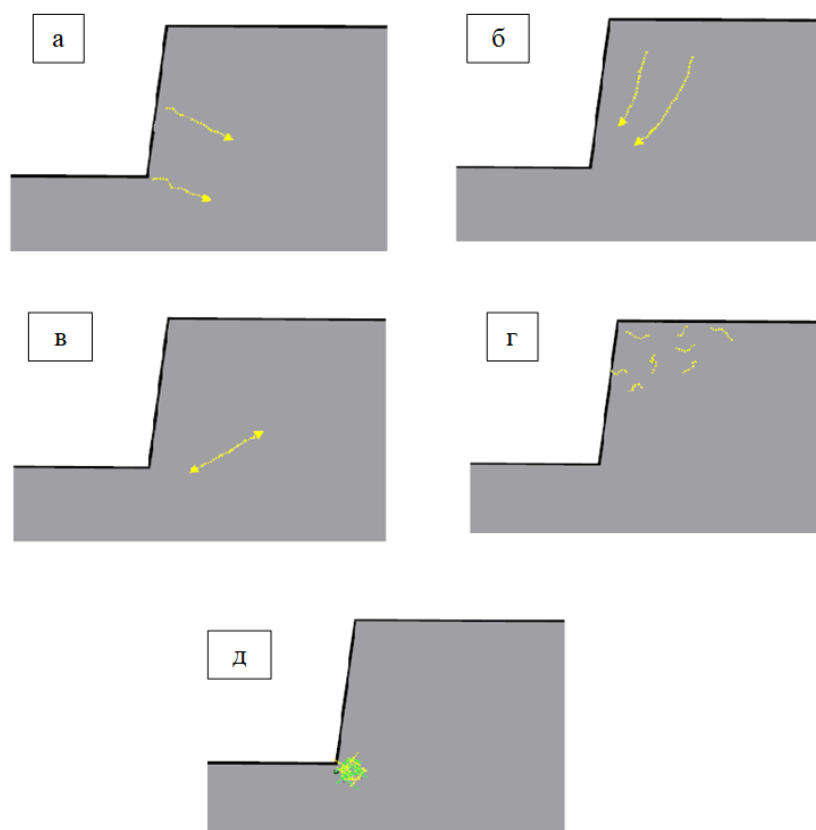


Рисунок 4.10 – Основные типы предразрушения склона

а, б, в – локализованное разрушение; г, д – распределенное разрушение. Желтые пунктирные стрелки – трещины растяжения и направление распространения, зеленые пунктирные линии – сдвиговые трещины.

а – трещины растяжения, начинающиеся на (или вблизи) поверхности, как правило, в основании склона; б – трещины растяжения, субпараллельные поверхности склона; в – глубокие трещины растяжения в стороне от склона; г – распределенное рассеянное разрушение материала при растяжении и сдвиге на гребне склона; д – раздавливание породы в основании склона

3. Одним из важнейших триггеров неустойчивости склона является вода: сильные осадки, нарушение дренажной системы отвалов и др., могут приводить к обводнению тела оползня и радикальному снижению запаса устойчивости. Критическое ускорение, параллельное поверхности склона, при котором возникает необратимая деформация геоматериала, определяется выражением:

$$a_c = \frac{\frac{C}{\gamma \cdot z \cdot \cos^2 \alpha} + (1 - m \frac{\gamma_w}{\gamma}) \operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \alpha}{1 + \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (4.4)$$

где α – угол поверхности скольжения с горизонтом, m – коэффициент обводнения (отношение глубины водного горизонта к глубине поверхности скольжения); γ_w – удельный вес воды; φ – эффективный угол внутреннего трения, C – эффективное сцепление, γ – удельный вес породы; z – толщина скользящего слоя (блока).

Выражение для более общего случая, когда сейсмическое ускорение не параллельно склону, можно найти, например, в работе (Inglis et al., 2006). При этом следует иметь в виду, что, как показано в проведенных лабораторных экспериментах (глава 3), при одних и тех же параметрах эффект вертикального воздействия на склон существенно слабее, чем эффект горизонтального воздействия.

4. Важным эффектом, который необходимо учитывать, является разупрочнение (снижение величины эффективного коэффициента трения $\operatorname{tg} \varphi$) при обводнении (Кочарян и др., 2023; Boulton et al, 2017; Бернштейн, 1987 и др. публикации). Наиболее радикально в результате воздействия воды снижается коэффициент трения малопрочных геоматериалов - филлосиликатных и некоторых глиносодержащих пород. В кварцесодержащих породах эффект ослабления трения выражен слабо. Некоторые сведения о коэффициентах трения пород в сухом и водонасыщенном состоянии, заимствованные в (Кочарян и др., 2023), приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Значения коэффициентов трения и фрикционных параметров, определенных для некоторых геоматериалов

Материал	Коэффициент трения μ_0 , сухой	Коэффициент трения μ_w , водонасыщенный
Биотит, Биотитовый сланец	0,46	0,35
Брусит	0,46	0,3
Гранит, доломит, известняк	0,63-0,72	0,6-0,7
Габро		0,58-0,68
Гиббсит	0,74	0,5
Каолинит	0,65-0,85	0,5
Кварц	0,53	
Лизардит	0,8	0,18-0,4
Монтморлонит	0,41	0,03
Монтморлонит 50% +Кварц 50%	0,35- 0,57	0,21
Мусковит	0,28	0,2
Сапонит		0,1-0,17
Смектит	0,25-0,31	0,1-0,15 (пиковый) 0,03-0,09 (остаточный)
Тальк	0,22-0,35	0,12-0,2
Хлорит	0,68	0,3-0,48
Хлорит+иллит	0,5	0,17

5. Из результатов лабораторных экспериментов и анализа данных природных наблюдений следует, что устойчивость склона при длиннопериодном динамическом воздействии определяется не только уровнем напряжений, достигнутым при совокупном действии силы тяжести и силы инерции (величиной

пиковых ускорений в сейсмической волне - PGA), но и кинематикой движения нарушенной области (величиной максимальной скорости смещения грунта – 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. Нарушение статического равновесия является необходимым, но не достаточным условием возникновения неустойчивости склона и образования оползней. Величины минимальных значений PGA_{min} , при которых происходит разрушение склона, существенно превышают величину критического ускорения a_c , рассчитанную в квазистатическом приближении. Величина PGA_{min} практически не зависит от угла склона и определяется лишь прочностными характеристиками материала. Высокий уровень ускорений в волне $PGA > PGA_{min}$ приводит к локальным разрушениям материала и возникновению остаточных деформаций. Величина PGV при сохранении уровня ускорений и прочности грунта слабо влияет на уровень разрушения, но определяет величину деформации, которая может быть достигнута. Возможность достижения критического уровня деформации после потери прочности определяется запасом кинетической энергии, обеспечивающим взаимное перемещение отдельных областей массива. Если напряжения, создаваемые силами инерции, превосходят предел прочности дискретной среды ($PGA > PGA_{min}$), то необратимая деформация массива происходит при любых значениях PGV . Если величины PGV недостаточно для инициирования обрушения, то необратимые деформации накапливаются. Потеря устойчивости происходит при достижении уровня критической деформации среды вблизи поверхности. Этот уровень определяется геометрией склона и реологическими свойствами материала. Он не зависит от уровня и вида воздействия.

6. При многократном воздействии, к которому в некотором приближении можно отнести и воздействие длинным цугом колебаний, например при крупном землетрясении, критические параметры заметно снижаются по сравнению с одиночным импульсом. Резкое снижение величины PGV_{min} наблюдается для всех склонов, тогда как PGA_{min} резко снижается для склонов с малым запасом

устойчивости и слабо изменяется для склонов с большими значениями FS . Если ускорение ниже минимального значения PGA_{min} , то эффект накопления деформации склона 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 многократных воздействиях.

7. Отдельным видом многократных воздействий являются длительные вибрации или сейсмические импульсы, регулярно повторяющиеся через малые промежутки времени. При таких воздействиях накопление критической величины деформации может наблюдаться в течение определенного времени, которое зависит от средней скорости крипа под воздействием вибраций. Необходимыми условиями возникновения динамического обрушения являются превышение некоторой критической величины смещения относительно склона и достижение определенной средней скорости крипа. Если скорость смещения оползня ниже некоторой критической величины, то процесс постепенно затухает, что связано с восстановлением эффективной прочности материала в зоне скольжения при малых скоростях деформации. При очень большом количестве циклов воздействия может иметь место дополнительный эффект накопления микродеформаций, связанных с нелинейностью реологических зависимостей многих геоматериалов. Такие микродеформации могут иметь место и при ускорениях, меньших критической величины.

Модель и результаты, описанные в разделах 3 и 4.1, позволяют сформулировать правила принятия решений при оценке возможности инициирования оползня сейсмическим воздействием, в том числе многократным.

- (i) По результатам геодезических измерений определяется геометрия (средний угол склона $-\alpha_0$, максимальный угол локального участка) интересующего участка - α_{max} .
- (ii) По данным геолого-геофизических обследований строится литологический разрез склона, определяются потенциальные поверхности скольжения, а также уровень обводненности.

- (iii) По сведениям о материальном составе склона определяются (экспериментально или по опубликованным данным) эффективные значения сцепления C и угла трения φ по потенциальным поверхностям скольжения в сухом и водонасыщенном состоянии.
- (iv) На основе определенных параметров рассчитывается статический коэффициент устойчивости склона FS и величина критического ускорения a_c . В большинстве случаев можно ограничиться рассмотрением лишь горизонтальной компоненты колебаний.
- (v) В том случае, когда сведения по п.п. (i) –(iii) отсутствуют, следует принять значение $FS \sim 1,05 - 1,5$.
- (vi) При оценке опасности инициирования оползня сейсмическими колебаниями от землетрясения критическим условием будет являться достижение в сейсмической волне величины $PGA_{EQ} \sim 5-10a_c$. Оценку ожидаемой величины PGA следует произвести по корреляционным зависимостям для землетрясений соответствующей магнитуды для данной местности, а при отсутствии таковых – по среднемировым зависимостям. При оценке устойчивости склона к множественному воздействию, например, воздействие сейсмических колебаний от главного толчка и сильнейших афтершоков, величину критического ускорения следует снизить вдвое. Землетрясения больших магнитуд следует рассматривать как множественное воздействие.
- (vii) При оценке опасности инициирования оползня сейсмическими колебаниями от взрыва сосредоточенного заряда, в качестве отправной точки следует использовать величину критического ускорения a_c для землетрясения (см. п. 4). В качестве значения критического ускорения от взрыва A_{c_expl} следует принять величину

$$A_{c_expl} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot PGA_{EQ} \quad (4.5)$$

Здесь $k_1=2,5 \div 5$ - коэффициент, учитывающий ограниченную длину цуга объемных волн при взрыве. Коэффициент $k_2=1,5 \div 2$ – коэффициент, учитывающий

более слабое усиление амплитуды сейсмозрывных волн на склоне по сравнению с колебаниями от землетрясения.

Коэффициент k_3 учитывает возможные варианты падения продольной волны взрыва на склон. Если известно, что геологическое строение массива и предполагаемое расположение гипоцентра взрыва таковы, что ожидается субвертикальный выход продольной волны, то следует использовать значение $k_3=5\div 10$. Если ожидается пологий выход P -волны, либо подобные сведения отсутствуют, то принимается $k_3=1$.

Критическим условием будет являться достижение в сейсмозрывной волне величины $PGA \sim 5\div 10 A_{c_expl}$.

Оценку ожидаемой величины PGA следует произвести по эмпирическим зависимостям для взрывов, либо по результатам численных расчетов по апробированным программам.

(viii) При оценке опасности инициирования оползня сейсмическим воздействием от массовых взрывов следует рассматривать лишь возможный эффект накопления повреждений из-за достаточно высоких значений PGA в сейсмозрывных волнах и длинного цуга колебаний. Здесь требуется экспертная оценка опасности на основе результатов деформационных или геодезических наблюдений, а также контроль обводненности склона.

4.5. Оценка устойчивости отвалов вскрышных пород для месторождений КМА

Вскрыша — пустая порода, покрывающая залежи полезного ископаемого, имеет прочностные характеристики намного более низкие, чем кварциты КМА. В этой связи верхний участок борта карьеров, сложенный мягкими породами, является наименее устойчивой его частью. В процессе разработки карьеров извлекаемая вскрышная порода удаляется и складывается в отвалы. На железорудных карьерах КМА объем извлеченных вскрышных пород превышает 150 млн м³ (Храмцов и др., 2018). 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. В данном разделе на основе феноменологической модели, изложенной в разделе 4.4, выполнена оценка устойчивости бортов карьеров и отвалов вскрышных пород для месторождений КМА.

Диапазон геометрических параметров отвалов на ГОКах довольно широк. Предельные высоты отвалов изменяются от 45 м (ОАО «Стойленский ГОК, Отвал окисленных кварцитов) до 172 м (ОАО «Лебединский ГОК» Отвал №2, рыхлые породы). Высота отдельных ярусов лежит в диапазоне от 15 м до 49 м. Углы откосов ярусов и отвалов изменяются от 5° до 38° (Храмцов и др., 2018). Для рыхлых пород высота ярусов отвалов составляет 15—20 м, а угол наклона откоса до 33°. Особенность железорудных месторождений КМА позволяет формировать техногенные массивы отвалов из практически однородной по характеристикам массы геоматериала.

В менее прочных породах рыхлой вскрыши происходит около 75% нарушений устойчивости откосов (Храмцов и др., 2018). Нарушения устойчивости откосов отвалов приводят к возникновению крупных оползней. За последние 30 лет дважды, в результате нарушения устойчивости склона, на отвалах Михайловского ГОКа сходили оползни объемом около 20 млн. м³ (Храмцов и др., 2018).

Для оценки устойчивости вскрышной толщи отвала можно воспользоваться значениями физико-механических свойств вскрышных пород месторождений КМА, приведенных в (Житинская, 2018). Средние характеристики пород отвалов рыхлой вскрыши приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 Основные физико-механические параметры пород отвалов рыхлой вскрыши

Тип породы	α , °	φ , °	C , кПа	γ , кН/м ³	Водонасыщенность породы (m)	Источник
Суглинки с прослоями мела, песка	16-36	19-36	50-80	18,3	0-1	(Житинская, 2018)

Необратимые деформации в толще склона будут возникать в том случае, когда ускорение, вызванное сейсмической волной, будет больше значения a_c , которое рассчитывалось по соотношению (4.3). Однако, в соответствии с результатами расчетов, приведенными на рисунке 4.9, при воздействии сейсмических колебаний от массового взрыва в карьере, потенциально опасным является уровень ускорений свыше, по крайней мере, $20-30a_c$. Многократность воздействия может привести к снижению опасного уровня ускорений до уровня $\sim 10-15 a_c$.

Глубина залегания поверхности скольжения может варьироваться в довольно широких пределах из-за локальных условий и степени обводненности. Для демонстрации влияния толщины сползающего слоя на рисунке 4.11 приведены расчеты параметра FS и a_c для нескольких величин z . Основные прочностные характеристики грунта и угол откоса отвала, использованные в расчетах, приведены в подписи к рисунку.

Из рисунка 4.11 видно, что наблюдается тенденция уменьшения уровня устойчивости отвала при увеличении толщины сползающего слоя. Если предположить, что поверхность скольжения будет находиться между недавно возведенным ярусом отвала (наименее прочными рыхлыми породами) и более уплотненными рыхлыми породами, то в таком случае, при максимальной высоте яруса 20 м, z будет принимать значение от 16,2 до 19,2 м. Это приблизительно соответствует расчету FS и a_c для $z=20$ метров. При $z=10$ м откос отвала остается статически и динамически устойчивым при любой степени обводненности. При $z=50$ м. откос отвала может перейти в неустойчивое состояние при небольшой вариации степени обводненности. Поэтому при дальнейшем анализе устойчивости откоса отвала z будет принимать значение от 16,2 до 19,2 м.

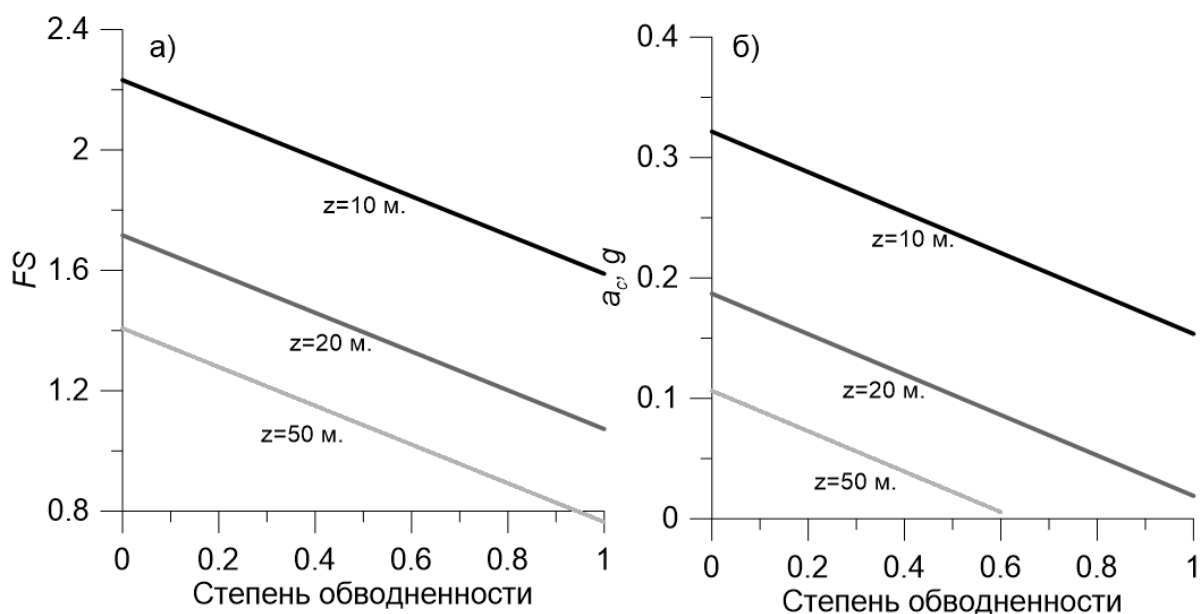


Рисунок 4.11– Зависимость фактора устойчивости FS (а) и величины критического ускорения a_c (б) от степени обводненности грунта для нескольких значений толщины оползня z . ($\alpha=16^\circ$, $\varphi=19^\circ$, $C=50$ кПа)

На рисунке 4.12 приведены результаты расчетов параметров FS и a_c для наиболее устойчивого и наименее устойчивого из возможных вариантов параметров (таблица 4.2) в зависимости от степени обводненности. Величина коэффициента статической устойчивости FS , рассчитанная по соотношению (1.8), в зависимости от степени обводненности изменяется в диапазоне от 0,82 до 2,05 при нормативном значении 1,20. При степени обводненности $m \approx 0,29$ и при более высоких значениях в зависимости от прочностных свойств грунта и угла наклона откоса FS становится меньше 1,20, что может привести к потере статической устойчивости вскрышной толщи отвала.

Анализ динамической устойчивости показал, что для наиболее устойчивых откосов при нулевой степени обводненности a_c принимает значение до 0,28g. Соответственно, в этом случае при многократном воздействии массовых взрывов опасным уровнем ускорений ($\sim 10-15a_c$) являются величины 2,8-4,2g, что не допускается при соблюдении нормативов проведения массовых взрывов. Для наименее устойчивого варианта сухого откоса эта величина снижается до 1,6-2,4g. С ростом обводненности критические параметры могут уменьшиться до опасных величин. Так, при степени обводненности $m=0.5$ для наименее устойчивых участков отвалов опасная величина PGA составляет $\sim 0,4-0,6g$.

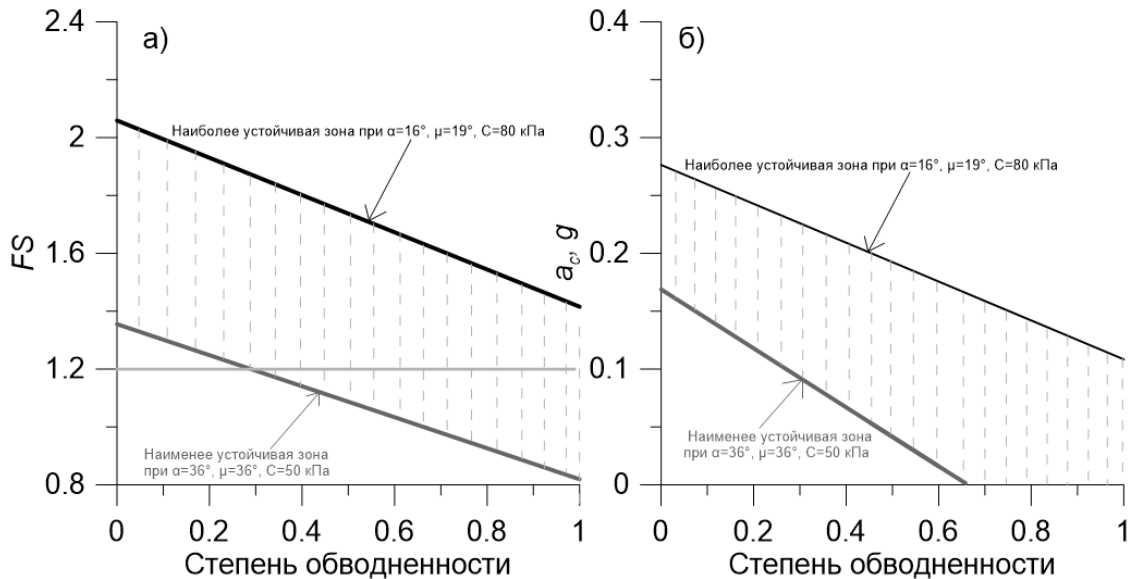


Рисунок 4.12 – Расчет FS (а) и a_c (б) для разной степени обводненности для вскрышных пород отвала

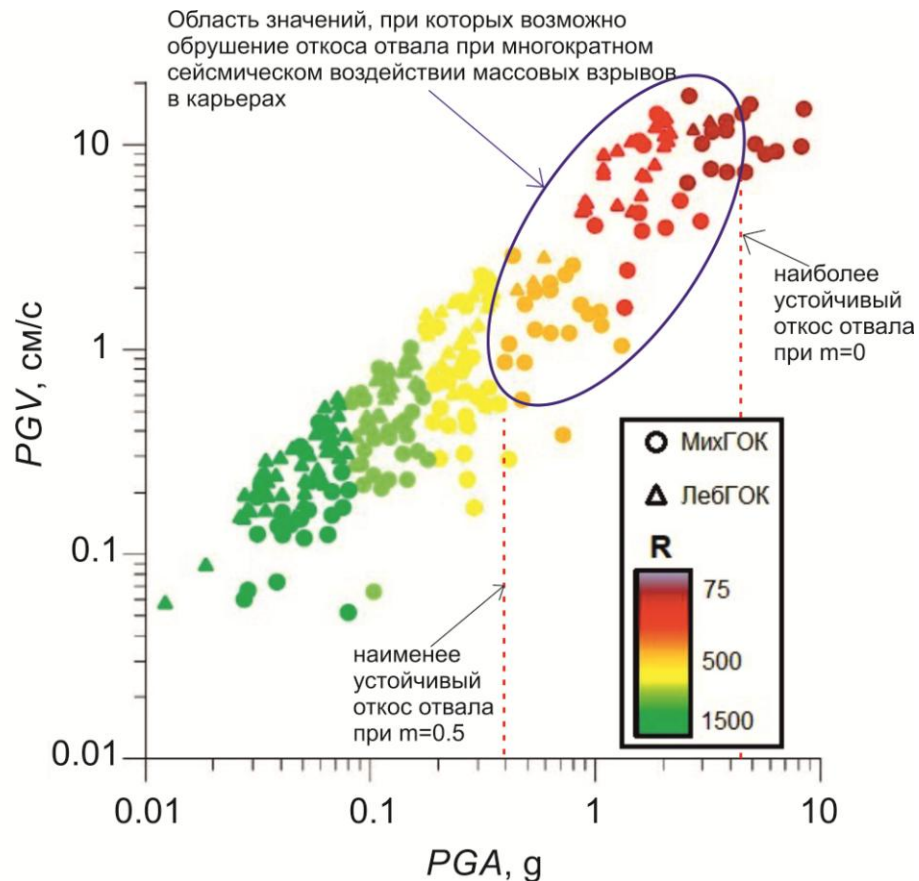


Рисунок 4.13 – Параметры сейсмозрывной волны при различных эпицентральных расстояниях R в метрах

На рисунке 4.13 представлены зарегистрированные максимальные скорости и ускорения в сейсмозрывных волнах на различных эпицентральных расстояниях от массовых взрывов в карьерах Михайловского и Лебединского ГОКов, выделены граничные значения наиболее устойчивого (при $m=0$) и

наименее устойчивого откоса отвала (при $m=0.5$) из всех возможных вариантов. Мониторинг массовых взрывов показывает, что параметры сейсмозрывных волн для этих двух ГОКов близки, поэтому анализ устойчивости отвалов можно распространить на все карьеры КМА, в том числе и на карьер Стойленского ГОКа.

Параметры воздействия массовых взрывов ($PGV_{min} \approx 0,4g$ и $PGV_{min} \approx 0,23-2,4$ см/с), необходимые для потери динамической устойчивости наименее устойчивого варианта откоса отвала ($m=0.5$), достигаются на эпицентральной дистанции до 500-700 метров от взрываемого блока в карьере. Однако фактическое расстояние от восточной части карьера до западной части отвала для карьера Лебединского ГОКа около 1500 метров, для Стойленского ГОКа – около 1000 метров. Это значит, что первые признаки обрушения отвала, в случае отсутствия аварийных ситуаций, 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. По мере приближения к области значений с более устойчивой зоной вероятность обрушения откоса отвала, в связи с уменьшением необходимым расстоянием между взрываемыми блоками в карьере и отвалом, становится крайне малой.

В реальном диапазоне параметров при многократном воздействии и, в настоящее время, расстояний между взрываемыми блоками в карьере и отвала (около 1000-1500 метров) регулярное воздействие массовых взрывов в карьере не приводит к негативным последствиям в вскрышных толщах отвала. Однако постепенное накопление деформации при многократном воздействии может привести к потере динамической устойчивости. К тому же, подъем уровня грунтовых вод, нарушение работы дренажной системы могут ускорить процесс подготовки разрушения. Учитывая потенциальные риски обрушения, необходим постоянный контроль за состоянием устойчивости рыхлых пород отвала.

Выводы к главе 4

1. При землетрясениях величина $PGA_{min} \sim 0,01g$ является нижним пределом максимальных ускорений в волне, которые вызывают появление нарушений в геоматериале склонов, сложенных осадочными породами. Этот параметр не зависит от магнитуды события.

2. Максимальным инициирующим эффектом обладают сейсмические колебания от крупных землетрясений. Заметно слабее эффект воздействия взрыва сосредоточенного заряда большой мощности. При оценке опасности инициирования оползня сейсмическим воздействием от массовых взрывов следует рассматривать лишь возможный эффект накопления повреждений из-за достаточно высоких значений PGA в сейсмозрывных волнах и длинного цуга колебаний.

3. В предложенной феноменологической модели рассмотрен комплекс наблюдаемых эффектов, что может оказаться полезным для прогнозирования устойчивости склонов при многократном воздействии сейсмических волн от взрывов и землетрясений.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертация обобщает результаты цикла экспериментальных и теоретических исследований, направленных на установление закономерностей развития деформаций склонов при многократном воздействии сейсмических колебаний. Результатом является предложенная феноменологическая модель явления и разработанные правила принятия решений при оценке опасности инициирования оползня.

Основные выводы сформулированы в конце каждой главы диссертации. В заключение отметим результаты, отражающие научную новизну и практическую значимость работы:

Установлено, что в результате многократного воздействия сейсмических колебаний коэффициент устойчивости склона снижается.

Анализ натуральных данных, собранных в различных источниках, 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авдеева, Л. И. Сведения о наиболее крупных промышленных взрывах / Л. И. Авдеева, Л. И. Александрова, Е. И. Алешина [и др.] // Землетрясения России в 2020 году : Ежегодник. – Обнинск: Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба Российской академии наук". – 2022. – С. 183-194.

Адушкин, В. В. Подземные взрывы / В. В. Адушкин, А. А. Спивак –М.: Наука, 2007. – 579 с.

Адушкин, В. В. Прочностные характеристики разуплотнения песчаного грунта при сдвиге / В. В. Адушкин, Т. А. Орленко // Механика твердого тела. — 1971. — № 2. — С. 167–171.

Александров, Б. К. Оценка физико-механических свойств горных пород для расчетов устойчивости откосов в карьерах (на примере месторождений КМА) / Б.К. Александров // Научные сообщения, ИГД, т.12.Госгортехиздат. – 1961

Аптикаев, Ф. Ф. Методы прогноза параметров сейсмического движения грунта включая построение локального спектра и синтетической акселерограммы / Ф. Ф. Аптикаев, О. О. Эртелева // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2012. - № 2. - С. 15 - 19.

Бернштейн, В. А. Механогидролитические процессы и прочность твёрдых тел / В. А. Бернштейн. — Л., Наука, 1987. — 320 с.

Бесимбаева О. Г. Оценка и прогноз устойчивости бортов карьера "Кентобе" / О.Г. Бесимбаева, Е. Н. Хмырова, Ф. К. Низаметдинов, Е. А. Олейникова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 6. – С. 120-126.

Бобряков, А. П. Об эволюции напряженного состояния сыпучей среды при многократных динамических воздействиях / А. П. Бобряков, П. В. Косых, А. Ф. Ревуженко // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2016. — Т. 3. — № 1. — С. 18–22.

Газиев, Э. Г. Вероятностная оценка надежности скальных массивов / Э. Г. Газиев, В. И. Речицкий. – М.: Стройиздат, 1985. –105 с.

Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер. – М.: Мир, 1984. – 432 с.

Гальперин, А. М. Оценка устойчивости откосных сооружений отвально-хвостового хозяйства ОАО Стойленский ГОК / А. М. Гальперин, А. В. Крючков, В. В. Семенов // ГИАБ. – 2007. – № 9. – С. 135-142.

Голушкевич, С. С. Плоская задача теории предельного равновесия / С. С. Голушкевич. – М.: Гостехиздат, 1948. – 148 с.

Голушкевич, С. С. Статика предельных состояний грунтовых масс / С. С. Голушкевич. – М.: Гостехиздат, 1957. – 288 с.

Житинская, О. М. Влияние компонентов инженерно-геологических условий на устойчивость бортов железорудных карьеров при длительной их разработке / О. М. Житинская // диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. – Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе». – 2018.

Заалишвили, В. Б. Физические основы сейсмического микрорайонирования / В. Б. Заалишвили. - М.: ОИФЗ РАН, 2000. - 367 с.

Захаров, В. С. Компьютерное моделирование сейсмогенных оползневых смещений / В. С. Захаров, Д. А. Симонов, А. В. Коптев // Электронное научное издание ГЕОразрез. – 2009. – Vol. 1. – No. 3. – С. 1-24.

Ильин, А. И. Управление долговременной устойчивостью откосов на карьерах / А. И. Ильин, А. М. Гальперин, В. И. Стрельцов. — М.: Недра, 1985. — 248 с.

Исмагилов, Р. И. Внедрение беспилотных летательных аппаратов для оперативного решения научно-производственных задач в условиях Михайловского ГОКа им. А.В. Варичева / Р. И. Исмагилов, А. Г. Захаров, Б. П. Бадтиев [и др.] // Горная промышленность. – 2020. – № 3. – С. 26-30.

Исмагилов, Р. И. Внедрение мониторинга безопасности на участке строительства крутонаклонного конвейерного комплекса на южном карьере Михайловского ГОКа/ Р. И. Исмагилов, А. В. Козуб, Б. П. Бадтиев, А. А. Павлович // Горная промышленность. –2020. – № 1. – С. 120-126.

Исмагилов, Р. И. Использование (опыт тестирования) георадара на участке строительства крутонаклонного конвейерного комплекса на южном карьере Михайловского ГОКа им. А.В. Варичева / Р. И. Исмагилов, А. Г. Захаров, Б. П. Бадтиев [и др.] // Горная промышленность. – 2020. – № 3. – С. 84-90.

Качанов, Л. М. Теория ползучести / Л. М. Качанов. — М.: Физматгиз, 1960. — 456 с.

Козырев, С. А. Сейсмическое действие массовых взрывов на бортах карьера рудника "Железный" / С. А. Козырев, И. А. Аленичев, Е. А. Усачев, А. В. Соколов / Труды ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН/ . – 2017. – № 14. – С. 288-291.

Кочарян, Г. Г. Геомеханика разломов / Г.Г. Кочарян. – М.: ГЕОС, 2016. – 424 с.

Кочарян, Г. Г. Динамика деформирования блочных массивов горных пород / Г. Г. Кочарян, А. А. Спивак. — М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003. — 423 с.

Кочарян, Г. Г. Инициирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями / Г. Г. Кочарян, В. Н. Костюченко, Д. В. Павлов // Физ. мезомеханика. — 2004. — Т. 7. — № 1. — С. 5–22.

Кочарян, Г. Г. Модельные исследования процесса обрушения выработки в трещиноватом горном массиве при динамическом воздействии / Г. Г. Кочарян, А. М. Кулюкин, В. Н. Родионов, А. Е. Федоров // ФТПРПИ. — 1991. — № 4. — С. 16-25.

Кочарян, Г. Г. Трение как фактор, определяющий излучательную эффективность подвижек по разломам и возможность их инициирования. Состояние вопроса / Г. Г. Кочарян, А. Н. Беседина, Г. А. Гридин, К. Г. Морозова, А. А. Остапчук // Физика Земли. – 2023. – № 3. – С. 3-32.

Малюшицкий, Ю. Н. Условия устойчивости бортов карьеров / Ю. Н. Малюшицкий. – Изд. АН УССР, 1957. – 269 с.

Маслов, Н. Н. Условия устойчивости откосов и склонов в гидротехническом строительстве / Н. Н. Маслов. – М: Госэнергоиздат., 1955. –53 с.

Машинский, Э. И. Проявления динамической микропластичности при распространении продольной волны в горной породе / Э. И. Машинский // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 31–40.

Медведев, С. В. Сейсмическое микрорайонирование / С. В. Медведев, А. И. Захарова, Н. В. Шебалин и др.. – Под ред. д-ра техн. наук С. В. Медведева . – АН СССР, Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта, Междувед. совет по сейсмологии и сейсмостойкому стр-ву. - Москва: Наука, 1977. - 248 с.

Месчан, С. Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов / С. Р. Месчан. — М.: Недра, 1985. — 342 с.

Микулинский, М. А. Оценка действия взрывных работ на устойчивость бортов карьеров / М. А. Микулинский, А. В. Сисин, Г. В. Кузнецов, П. С. Миронов // Горный журнал. — №3. — 1963.

Михайлова, Н. Н. Количественные характеристики сейсмических колебаний на территории г. Алма-Аты / Н. Н. Михайлова // Сильные движения при землетрясениях [Текст] : научное издание. - Душанбе: Дониш, 1988. - С. 237 - 349.

ОДМ 218.2.006-2010 Рекомендации по расчету устойчивости оползнеопасных склонов (откосов) и определению оползневых давлений на инженерные сооружения автомобильных дорог. – 2010.

Панюков, П. Н. Инженерная геология. 2-е издание, переработанное и дополненное / П. Н. Панюков. – М., «Недра», 1978. – 296 с.

Покровский, Г. И. Взрыв и его действие / Г. И. Покровский. – М: Воениздат, 1954. –56 с.

Попов, И. И. Устойчивость породных отвалов / И. И. Попов, П. С. Шпаков, Г. Г. Поклад . – Алма-Ата: Наука, 1987. – 224 с.

Попов, С. И. Определение устойчивости бортов карьера / С. И. Попов // Горный журнал. – 1949. – № 11.

Работнов, Ю. Н. Проблемы механики деформируемого твердого тела: избранные труды / Ю. Н. Работнов. — М.: Наука, 1991. — 196 с.

Рогожин, Е. А. Эндогенные опасности Большого Кавказа / Е. А. Рогожин, А. Н. Овсяченко, А. И. Лутиков, А. Л. Собичевич. — М.: ИФЗ РАН, 2014. — 256 с.

Рыбин, В. В. Методика расчета и результаты оценки устойчивости борта карьера Ковдорского ГОКа по секторам с учетом инженерно-геологических особенностей строения массива горных пород / В. В. Рыбин // Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли - формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов: сборник статей по итогам Всероссийской научно-технической конференции с участием иностранных специалистов, Апатиты, 13–15 октября 2014 года / Горный институт Кольского научного центра РАН. Том 1. – Апатиты: ООО «Реноме», 2014. – С. 104-112.

Садовский, М. А. Влияние механических микроколебаний на характер пластических деформаций материалов / М. А. Садовский, К. М. Мирзоев, С. Х. Негматуллаев, И. Г. Саломов // Физика земли. — 1981. — № 5. — С. 32–42.

Садовский, М. А. Критерии подобия и дезинтеграции медленно деформируемых твердых тел / М. А. Садовский, В. Н. Родионов, И. А. Сизов // ДАН. — 1995. — Т. 341. — № 5. — С. 686–688.

Самарин, Ю. П. Уравнения состояния материалов со сложными реологическими свойствами / Ю. П. Самарин. — Куйбышев: КГУ, 1979. — 84 с.

Седов, Л. И. Механика сплошной среды. Т. 1 / Л. И. Седов. — М.: Наука, 1976. — 492 с.

Соколовский, В. В. Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский. – М.: Физматгиз, 1960. – 243 с.

Соколовский, В. В. Статика сыпучей среды. Изд. 3-е перераб. и доп / В. В. Соколовский. – М.: Физ.-мат. лит, 1960. – 242 с.

Стром, А. Л. Каменные лавины Центральной Азии: особенности строения, закономерности формирования и катастрофические последствия / А. Л. Стром // диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук, Центр геодинамических исследований. – 2022.

Троицкая, М. Н. Новый способ расчета устойчивости откосов и склонов / М.Н. Троицкая. – М: Дориздат, 1951. – 24 с.

Тюпин, В. Н. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах: монография / В. Н. Тюпин. – Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 2017. – 192 с.

Фисенко, Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов / Г. Л. Фисенко. – М: Недра, 1965. – 378 с.

Фисенко, Г. Л. Устойчивость бортов угольных разрезов / Г. Л. Фисенко. – М: Углетехиздат, 1956. – 230 с.

Храмцов, Б. А. Управление устойчивостью отвалов рыхлой вскрыши железорудных карьеров КМА / Б. А. Храмцов, М. В. Бакарас, А. С. Кравченко, М. А. Корнейчук // ГИАБ. – 2018. – № 2. – С.66–72.

Христофоров, Б. Д. Исследование реологических характеристик твердых тел в широком диапазоне времен деформирования / Б. Д. Христофоров // Физ. мезомеханика. — 2010. — Т. 13. — № 3. — С. 111–115.

Ци, Ч. Ч. Структурная иерархия и механические свойства горных пород. Ч. I. Структурная иерархия и вязкость / Ч. Ч. Ци, М. Ван, Ц. Цянь, Ц. Чень // Физ. мезомеханика. — 2006. — Т. 9. — № 6. — С. 29–39.

Эртелева, О. О. Спектры реакции в скоростях: оценки параметров и формы / О. О. Эртелева // Вопросы инженерной сейсмологии. — 2015. — 42, 4. — С. 5–14.

Эртелева О. О. Параметры сейсмических колебаний в эпицентральных областях землетрясений / О. О. Эртелева // диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН. – 2020.

Яковлев, Д. В. Влияние землетрясений на устойчивость бортов карьеров / Д. В. Яковлев, С. В. Цирель, Б. Ю. Зуев, А. А. Павлович // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 4. – С. 3-19.

Ярг, Л. А. Оценка факторов, определяющих оптимизацию углов заложения откосов при длительной эксплуатации карьера (на примере Стойленского железорудного месторождения КМА) / Л. А. Ярг, И. К. Фоменко, О. М. Житинская // Горный журнал. – 2018. – № 11. – С. 76-81

Adushkin, V. V. Landslides from Massive Rock Slope Failure / V. V. Adushkin // Landslides from Massive Rock Slope Failure. NATO Science Series IV: Earth and Environmental Sciences, ed S. G. Evans, G. S. Mugnozza, A. Strom, & R. L. Hermanns. –2006. – P. 267-284.

Allstadt, K. Extracting source characteristics and dynamics of the August 2010 Mount Meager landslide from broadband seismograms / K. Allstadt // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. – 2013. – vol. 118, №.3. – P. 1472-1490.

Arias, A. A Measure of Earthquake Intensity / A. Arias, R. J. Hansen // Seismic Design for Nuclear Power Plants, MIT Press, Cambridge, Massachusetts 1970. – P. 438-483.

Arnold, L. Seismically-Induced Rock-Slope Failure: Numerical Investigations using the Bonded Particle Model / L. Arnold // PhD dissertation. University of Washington. – 2016.

Bai, X. Dynamic process of the massive Xinmo landslide, Sichuan (China), from joint seismic signal and morphodynamic analysis / X. Bai, J. Jian, S. He, W Liu // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2018. – 78(5). – P. 3269–3279.

Bartzke, G. Flow above and within granular media composed of spherical and non-spherical particles – using a 3D numerical model / G. Bartzke, J. Kuhlmann, K. Huhn // Continental Shelf Research. – 2016. – Vol. 117. – P. 67-80.

Bommer, J. J. Earthquake-induced landslides in Central America / J. J. Bommer, C. E. Rodriguez // Engineering Geology. – 2002. – 63. – P. 189–220.

Boore, D. M. Estimation of response spectra and peak accelerations from western North America earthquakes: an interim report / D. M. Boore, W. B. Joyner, D. E. Fumal. — Open-File-Report 93- 509. — US Geological Survey, Reston, VA., 1993. — 72 p.

Boulton, C. High-velocity frictional properties of Alpine fault rocks: Mechanical data, microstructural analysis, and implications for rupture propagation / C. Boulton, L. Yao, D. R. Faulkner, J. Townend, V. G. Toy, R. Sutherland, S. Ma, T. Shimamoto // Journal of Structural Geology. — 2017. — V. 97. — P. 71–92.

Cao, H. Multi-Factor Analysis on the Stability of High Slopes in Open-Pit Mines / H. Cao, G. Ma, P. Liu, X. Qin, C. Wu, J. Lu // *Appl. Sci.* — 2023. — 13. — 5940.

Carro, M. The application of predictive modeling techniques to landslides induced by earthquakes: the case study of the 26 September 1997 Umbria–Marche earthquake (Italy) / M. Carro, M. De Amicis, L. Luzi, S. Marzorati // *Engineering Geology.* — 2003. — 69. — P. 139–159

Chang, K. J. Post-seismic surface processes in the Jiufengershan landslide area, 1999 Chi-Chi earthquake epicentral zone, Taiwan / K.-J. Chang, A. Taboada, Y.-C. Chan, S. Dominguez // *Engineering Geology.* — 2006. — 86. — P. 102–117.

Chen, T. Landslide mechanism and stability of an open-pit slope: The Manglai open-pit coal mine / T. Chen, J. Shu, L. Han, G. Tovele and B. Li // *Front. Earth Sci.* 10:1038499.

Chen C.-W. Effects of active fault types on earthquake-induced deep-seated landslides: A study of historical cases in Japan / C.-W. Chen, T. Iida, R. Yamada // *Geomorphology.* — 2017. — 295. — P. 680–689.

Chien-chih, C. Reconstruction of the Kinematics of Landslide and Debris Flow Through Numerical Modeling Supported by Multidisciplinary Data: The 2009 Siaolin, Taiwan Landslide / C. Chien-chih, D. Jia-Jyun, K. Chih-Yu, H Ruey-Der, L. Ming-Hsu, L. Chyi-Tyi // *Sediment Transport - Flow and Morphological Processes .* – 2011. – P. 249-260

Cundall, P. A. A Computer Model for Progressive Simulating Large-Scale Movements in Blocky Rock Systems / P. A. Cundall // *Proc. Symp. Int. Soc. Rock Mech., Nancy.* – 1971. – Vol. 1. – P. 11-18.

Cundall, P. A. Adaptive density-scaling for time explicit calculations / P. A. Cundall // *Proc. 4th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics.- Edmonton.* – 1982. – V. 1. – P. 23-27.

Das, D. Correlations for earthquake-related deformation of embankments / D. Das, R. Singh, D. Roy // *Proc. 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering.* – Tsessaloniki, Greece. – 2007. – Abstract No. 1-12. – P. 1233

Delgado, J. On far field occurrence of seismically induced landslides / J. Delgado, J. Garrido, C. López-Casado, S. Martino, J. A. Peláez // *Engineering Geology*. – 2011. – 123. – P. 204–213.

Delgado, J. Seismically-induced landslides in the Betic Cordillera (S Spain) / J. Delgado, J.A. Pelaez, R. Toma, F.J. Garcia-Tortosa, P. Alfaro, C. Lopez Casado // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2011. – 31 . – P. 1203–1211

Dieterich, J. H. Modeling of Rock Friction: 1. Experimental results and constitutive equations / J. H. Dieterich // *J. Geophys. Res.* – 1979. – Vol. 84. P. 2161–2168.

Dingle, R. V. The anatomy of a large submarine slump on a sheared continental margin (SE Africa) / R. V Dingle // *Journal of the Geological Society*. – 1977. – V.134(3). – P.293–310.

Dong, J. J. Velocity-Displacement Dependent Friction Coefficient and the Kinematics of Giant Landslide / J. J. Dong, C. M. Yang, W. L. Yu, C. T. Lee, Y. Miyamoto, T. Shimamoto // *Earthquake-Induced Landslides* . – 2012 . – P. 397-403

Forte, G. Analysis of major rock slides that occurred during the 2016–2017 Central Italy seismic sequence / G. Forte, L. Verrucci, A. Di Giulio, M. De Falco, P. Tommasi, G. Lanzo, K. W. Franke, A. Santo // *Eng. Geol.* – 2021. – 290, 106194.

Fotopoulou, S D. Vulnerability assessment of reinforced concrete buildings at precarious slopes subjected to combined ground shaking and earthquake induced landslide / S. D. Fotopoulou, K. D. Pitilakis // *Soil DynEarthqEng.* – 2017. – 93. – P.84–98.

Fredlund, D. G. Comparison of slope stability methods of analysis / D. G. Fredlund, J. Krahn // *Canadian Geotechnical Journal*. – 1977. – Vol. 14 (3). – P. 429–439.

Goldhirsch, I. Introduction to granular temperature / I. Goldhirsch // *Powder Technology*. – 2008. – Vol. 182, №. 2. – P. 130-136.

Heim, A. Der Bergsturz und Menschenleben / A. Heim. – Fretz und WasmuthVerlag. 1932. – 218 p.

Hibert, C. Dynamics of the Bingham Canyon Mine landslides from seismic signal analysis / C. Hibert, G. Ekström, C. P. Stark // *Geophysical Research Letters*. – 2014. – Vol. 41, №. 13. – P. 4535-4541.

Hu, W. Mineral changes quantify frictional heating during a large low-friction landslide / W. Hu, R. Huang, M. McSaveney, X. Zhang, L. Yao, T. Shimamoto // *Geology*. – 2018. – 46(3). – P. 223–226

Ingles, J. Effects of the vertical component of ground shaking on earthquake-induced landslide displacements using generalized Newmark analysis / J. Ingles, J. Darrozes, C. Soula // *Engineering Geology*. – 2006. – Vol.86. – P.134–147.

Jibson, R. W Regression models for estimating coseismic landslide displacement / R. W. Jibson // *Engineering Geology*. – 2007. – V.91(2-4). – P.209-218.

Jibson, R. W. Analysis of the seismic origin of landslides: Examples from the New Madrid seismic zone / R. W. Jibson, D. K. Keefer // *GSA Bulletin*. – 1993. – Vol. 105, No. 4. – P. 521-536.

Jibson, R. W. SLAMMER: Seismic Landslide Movement Modeled using Earthquake Records / R. W. Jibson, E. M. Rathje, M. W. Jibson, Y. W. Lee // *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*. – 2013. – nr.12.– chap.B1.

Keefer, D. K. Landslides caused by the M 7.6 Tecomán, Mexico earthquake of January 21, 2003 / D. K. Keefer, J. Wartman, O. C. Navarro, A. Rodriguez-Marek, G. F. Wiczorek // *Engineering Geology*. – 2006. – Vol.86(2-3). P.183–197.

Keffer, D. K. Landslides caused by earthquakes / D. K. Keffer // *GSA Bulletin*. – 1984. – Vol.95. –No.4. –P.406–421

Krahn, J. Slope stability computer program for Morgenstern-Price method of analysis / J. Krahn, V. E. Price, N. R. Morgenstern // *University of Alberta, Edmonton, Alta*. – 1971. – Vol. 14.

Lee, F. H. Centrifuge modelling of sand embankments and islands in earthquakes / F. H. Lee, A. N. Schofield // *Géotechnique*. – 1988. – Vol. 38, № 1. – P. 45-58.

Locat, J. COSTA-Canada, a Canadian contribution to the study of continental slope stability / J. Locat, B. Bornhold, P. Byrne, B. Hart, J. Hughes Clarke, J. - M. Konrad, S. Leroueil, B. Long, D. Mosher, D. Piper, R. Phillips, R. Popescu // 54th

Canadian Geotechnical Conference/2nd Joint IAH and CGS Groundwater Conference, ed M. Mahmoud, R. O. Van Everdingen, & J. Carss, International Association of Hydrogeologists :, Richmond B.C. Canada. – 2001. – P. 730-737.

Lucas, A. Frictional velocity-weakening in landslides on Earth and on other planetary bodies / A. Lucas, A. Mangeney, J. P. Ampuero // Nature Communications. – 2014. – Vol. 5, No. 3417. –P. 1–9.

Michelini, A. Advanced data processing of ground-based Synthetic Aperture Radar for slope monitoring in open pit mines / A. Michelini, P. Farina, N. Coli, F. Coppi, L. Leoni., G. Sá, T. Costa // 48th US Rock Mechanics, Geomechanics Symposium held in Minneapolis, MN, USA, 1–4 June 2014.

Ming, Z. Frictional properties of the rupture surface of a carbonate rock avalanche / Z. Ming, Y. Long, L. Weichao, W. Zhengbo // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. – 2022 . – 153 . –105088

Moore, J. R. Dynamics of the Bingham Canyon rock avalanches (Utah, USA) resolved from topographic, seismic, and infrasound data / J. R. Moore, K. L. Pankow, S. R. Ford, K. D. Koper, J. M. Hale, J. Aaron, C. F. Larsen // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. – 2017. – Vol. 122, No. 3. – P. 615-640.

Newmark, N. M. Effects of Earthquakes on Dams and Embankments / N. M. Newmark // Géotechnique. – 1965. – Vol. 15. – nr.2. – P.139–160.

Popescu, R. Comparison between VELACS numerical ‘class A’ predictions and centrifuge experimental soil test results / R. Popescu, J. H. Prevost // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 1995 – Vol. 14, No. 2. – P. 79-92.

Papadopoulos, G. A. Magnitude–distance relations for earthquake-induced landslides in Greece / G. A. Papadopoulos, A. Plessa // Engineering Geology. – 2000. – 58. – P. 377–386.

Qi, C. Viscosity of rock mass at different structural levels / C. Qi, C. Haoxiang, J. Bai, J. Qi, K. Li // ActaGeotechnica. — 2017. — Vol. 12. — P. 305 – 320.

Rodriguez, C. E. Earthquake-induced landslides: 1980–1997 / C. E. Rodriguez, J. J. Bommer, R. J. Chandler // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. — 1999. — 18. — P. 325–346.

Ruina, A. L. Slip instability and state variable friction laws / A. L. Ruina // *Journal of Geophysical Research*. – 1983. – 88(B12) . – P 10359–10370.

Sabetta, F. Estimation of response spectra and simulation of nonstationary ground motions / F. Sabetta, A. Pugliese // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 1996. — 86, 2. — P. 337–352.

Sheidegger, A. E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides /A. E. Sheidegger // *Rock Mechanics*. – 1973. – V. 5. – P. 231-236

Steedman, R. S. Centrifuge Modeling for Dynamic Geotechnical Studies, Proc. Second International Conferences on Recent Advances / R. S. Steedman // *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, March 11-15. – 1991. – abstract No. – P. 2401-2417.

Strom, A. Rock avalanche mobility: optimal characterization and the effects of confinement / A. Strom, L. Li, H. Lan // *Landslides*. – 2019. – V. 16. – P. 1437–1452

Togo, T. Energy partition for grain crushing in quartz gouge during subseismic to seismic fault motion: an experimental study / T. Togo, T. Shimamoto // *J. Struct. Geol.* – 2012. – 38. – P. 139–155.

Wang, T. Assessment of the effects of historical strong earthquakes on large-scale landslide groupings in the Wei River midstream / T. Wang, S. R. Wu, J. S. Shi, P. Xin, L. Z. Wu // *EngGeol.* –2018. –235. – P.11–19.

Wibberley, C. A. J. Recent advances in the understanding of fault zone / C. A. J. Wibberley, G. Yielding, G. Di Toro // *The Internal Structure of Fault Zones: Implications for Mechanical and Fluid-Flow Properties*. – The Geological Society of London. – 2008. – Vol. 299. P. 5–33.

Williams, J. R. The Theoretical Basis of the Discrete Element Method / J. R. Williams, G. Hocking, G. W. Mustoe // *NUMETA 1985, Numerical Methods of Engineering, Theory and Applications*. – 1985. – P. 897- 906.

Wilson, R. C. Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote Lake, California, earthquake / R. C. Wilson, D. K. Keefer // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1983. – Vol.73. – P. 863-877.

Yang, C. M. Initiation, movement, and run-out of the giant Tsaoling landslide — What can we learn from a simple rigid block model and a velocity–displacement dependent friction law? / C. M. Yang, W. L. Yu, J. J. Dong, C. Y. Kuo, T. Shimamoto, C. T. Lee, Y. Miyamoto // *Engineering Geology*. – 2014. – 182. – P. 158–181

Приложение А

№	Магнитуда	Эпицентральное расстояние, км	Глубина очага, км	Гипоцентральное расстояние, км	PGA, g	PGV, см/с	Литература
1	7,9	397,7	20	398,2	0,01	2,72	(Keefer, 1984)
2	8,1	248,8	15	249,3	0,02	5,45	
3	7	186,9	70	199,5	0,01	1,97	
4	8,6	330,5	14	330,8	0,02	7,21	
5	5,3	7,5	10	12,5	0,10	4,64	
6	7,7	298,5	15	298,8	0,01	2,90	
7	7,1	101,5	11	102,1	0,03	4,32	
8	9,2	713,7	40	714,8	0,01	6,56	
9	6,5	98,7	60	115,5	0,02	1,94	
10	6,5	34,4	9	35,5	0,06	6,31	
11	7,9	229,8	40	233,3	0,02	4,65	
12	7,1	156,5	41	161,7	0,02	2,72	
13	6,5	82,0	11	82,8	0,02	2,71	
14	6,1	86,0	48	98,5	0,02	1,45	
15	6,2	37,1	12	39,0	0,05	4,10	
16	7,1	109,1	5	109,2	0,03	4,03	
17	7,5	279,2	5	279,3	0,01	2,47	
18	5,5	32,5	24	40,4	0,03	1,80	
19	6,4	65,5	25	70,1	0,03	2,86	
20	7,4	108,8	17	110,2	0,03	5,61	
21	7,4	154,4	30	157,3	0,02	3,93	
22	5,6	50,2	13	51,9	0,03	1,57	
23	5,4	23,1	10	25,1	0,05	2,58	
24	5,8	39,8	8	40,6	0,04	2,51	
25	6,1	78,6	8	79,0	0,02	1,81	
26	6,8	39,8	40	56,4	0,04	5,57	
27	7,9	350,0	20	350,6	0,01	3,09	
28	8,1	212,0	15	212,5	0,02	6,39	
29	7,1	70,9	16	72,6	0,04	6,06	
30	7,2	122,4	30	126,0	0,02	3,91	
31	7	43,3	70	82,3	0,03	4,78	
32	5,3	7,1	10	12,3	0,10	4,72	
33	7,7	285,8	15	286,2	0,01	3,02	
34	7,1	40,5	11	41,9	0,07	10,50	

35	9,2	523,6	40	525,1	0,01	8,92
36	6,5	60,9	60	85,5	0,02	2,62
37	6,5	28,6	9	30,0	0,07	7,48
38	7,9	181,1	40	185,4	0,02	5,85
39	7,1	41,0	41	57,9	0,05	7,60
40	6,5	19,7	11	22,5	0,10	9,94
41	7,1	29,4	5	29,8	0,10	14,76
42	7,5	210,8	5	210,8	0,02	3,28
43	6,4	36,5	25	44,2	0,05	4,53
44	7,5	172,6	15	173,2	0,02	3,99
45	7,4	80,5	17	82,3	0,04	7,51
46	7,4	138,5	30	141,7	0,02	4,36
47	5,6	18,3	13	22,5	0,06	3,62
48	5,2	2,5	4	4,7	0,26	11,04
49	5,4	8,9	10	13,4	0,09	4,86
50	5,8	13,7	8	15,9	0,10	6,41
51	6,8	39,45	40	56,2	0,04	5,59
52	7,9	356,61	20	357,2	0,01	3,04
53	7,8	128,19	25	130,6	0,03	7,42
54	8,1	217,73	15	218,2	0,02	6,22
55	7,1	72,02	16	73,8	0,04	5,97
56	7,2	99,38	30	103,8	0,03	4,75
57	7	44,39	70	82,9	0,03	4,75
58	8,6	315,31	14	315,6	0,02	7,56
59	5,3	7,09	10	12,3	0,10	4,73
60	7,7	236,66	15	237,1	0,02	3,65
61	7,1	29,78	11	31,7	0,09	13,87
62	9,2	540,64	40	542,1	0,01	8,64
63	7,3	99,38	40	107,1	0,03	5,15
64	6,5	21,57	60	63,8	0,03	3,52
65	7,9	143,87	40	149,3	0,03	7,26
66	7,1	62,06	41	74,4	0,04	5,92
67	6,5	15,72	11	19,2	0,12	11,68
68	7,5	224,77	5	224,8	0,01	3,07
69	7,5	172,27	15	172,9	0,02	4,00
70	7,4	81,62	17	83,4	0,04	7,41
71	6,8	32,69	4	32,9	0,08	9,54
72	7,4	112,82	30	116,7	0,03	5,29
73	5,6	12,76	13	18,2	0,08	4,47
74	6,1	14,59	8	16,6	0,11	8,59
75	7,9	97,41	20	99,4	0,04	10,90
76	8,1	218,12	15	218,6	0,02	6,21

77	5,3	3,81	10	10,7	0,11	5,42
78	7,7	242,22	15	242,7	0,02	3,57
79	7,1	92,3	11	93,0	0,03	4,74
80	9,2	208,26	40	212,1	0,04	22,10
81	6,5	12,11	9	15,1	0,15	14,85
82	7,9	163,5	40	168,3	0,02	6,44
83	7,1	131,77	41	138,0	0,02	3,19
84	6,5	67,61	11	68,5	0,03	3,27
85	7,1	77,07	5	77,2	0,04	5,70
86	7,5	133,2	5	133,3	0,03	5,18
87	6,4	42,84	25	49,6	0,04	4,04
88	7,4	68,13	17	70,2	0,05	8,79
89	7,4	108,01	30	112,1	0,03	5,51
90	5,6	40,59	13	42,6	0,03	1,91
91	5,4	18,27	10	20,8	0,06	3,12
92	5,8	27,44	8	28,6	0,05	3,57
93	6,1	72,13	8	72,6	0,02	1,97
94	7,9	105,12	20	107,0	0,04	10,13
95	8,1	179,23	15	179,9	0,03	7,55
96	7,1	40,64	16	43,7	0,07	10,08
97	7,2	80	30	85,4	0,03	5,77
98	5,3	3,27	10	10,5	0,12	5,52
99	7,7	240,92	15	241,4	0,02	3,59
100	7,1	31,89	11	33,7	0,09	13,06
101	6,5	0,7	9	9,0	0,26	24,83
102	7,9	140,73	40	146,3	0,03	7,41
103	7,1	34,67	41	53,7	0,05	8,20
104	6,5	5,03	11	12,1	0,19	18,53
105	7,1	13,99	5	14,9	0,21	29,65
106	7,5	49,47	5	49,7	0,07	13,90
107	6,4	26,3	25	36,3	0,06	5,52
108	7,5	151,47	15	152,2	0,02	4,54
109	7,4	41,56	17	44,9	0,08	13,75
110	7,4	97,59	30	102,1	0,03	6,05
111	5,6	13,04	13	18,4	0,08	4,42
112	5,2	0,5	4	4,0	0,30	12,86
113	5,4	8,12	10	12,9	0,10	5,04
114	5,8	17,21	8	19,0	0,08	5,37
115	7,9	79,21	20	81,7	0,05	13,27
116	7,8	91,88	25	95,2	0,04	10,17
117	8,1	166,09	15	166,8	0,03	8,14
118	7,1	40,52	16	43,6	0,07	10,11

119	7,2	102,15	30	106,5	0,03	4,63		
120	5,3	3,74	10	10,7	0,11	5,44		
121	7,7	160,91	15	161,6	0,02	5,36		
122	7,1	28,26	11	30,3	0,10	14,52		
123	7,3	78,71	40	88,3	0,04	6,25		
124	7,9	115,18	40	121,9	0,03	8,89		
125	7,1	56,05	41	69,4	0,04	6,34		
126	6,5	1,6	11	11,1	0,21	20,16		
127	7,5	92,1	5	92,2	0,04	7,49		
128	7,5	150,55	15	151,3	0,02	4,57		
129	7,4	41,12	17	44,5	0,08	13,88		
130	6,8	16,87	4	17,3	0,15	18,12		
131	7,4	76,39	30	82,1	0,04	7,52		
132	5,6	9,96	13	16,4	0,09	4,97		
133	6,1	5,74	8	9,8	0,19	14,51		
134	6,8	13,5	10	16,8	0,16	18,70		(Papadopoulos , Plessa, 2000)
135	6	5,7	10	11,5	0,15	11,09		
136	6,4	8,7	6	10,6	0,21	18,95		
137	6,9	26,3	11	28,5	0,09	12,33		
138	6,1	5	9	10,3	0,18	13,88		
139	7,9	131	80	153,5	0,03	7,06		
140	6,4	16	20	25,6	0,08	7,82		
141	6,1	40	34	52,5	0,03	2,72		
142	6,4	23,3	20	30,7	0,07	6,52		
143	6,2	28	16	32,2	0,06	4,96		
144	6,4	7	34	34,7	0,06	5,77		
145	7,1	13	7	14,8	0,21	29,83		
146	6,2	3,6	6	7,0	0,29	22,85		
147	5,7	3,9	19	19,4	0,08	4,69		
148	6,7	31,6	15	35,0	0,07	8,03		
149	5,9	22	4	22,4	0,07	5,10		
150	5,3	10	4	10,8	0,11	5,39		
151	5,5	14	5	14,9	0,09	4,89		
152	3,8	15	5	15,8	0,03	0,68		
153	6,6	23,6	6,6	24,5	0,09	10,24		
154	6,9	30	10	31,6	0,08	11,12	(Rodriguez et al, 1999)	
155	6,7	35,4	7	36,1	0,07	7,78		
156	7,3	65,2	10	66,0	0,05	8,36		
157	5,8	16,4	28	32,4	0,05	3,14		
158	5,4	16,4	12	20,3	0,06	3,20		
159	6,6	25,9	20	32,7	0,07	7,67		
160	6	65,3	15	67,0	0,02	1,91		

161	5,8	44,8	17	47,9	0,03	2,13
162	6,2	65,3	5	65,5	0,03	2,44
163	6,6	36,5	65	74,5	0,03	3,36
164	5,6	16,4	25	29,9	0,05	2,72
165	6,8	8,6	5	9,9	0,27	31,58
166	7,1	118,3	8	118,6	0,02	3,71
167	7,3	90,9	19	92,9	0,03	5,94
168	7,8	206,3	25	207,8	0,02	4,66
169	7,6	74,5	22	77,7	0,05	9,96
170	7,1	23,9	15	28,2	0,11	15,61
171	7,3	47,5	17	50,5	0,06	10,94
172	6,7	121,9	14	122,7	0,02	2,29
173	7,6	101,3	17	102,7	0,04	7,53
174	6	9	39	40,0	0,04	3,19
175	7	101,7	22	104,1	0,03	3,78
176	5,8	20	11	22,8	0,07	4,46
177	6,8	31,6	18	36,4	0,07	8,64
178	6,6	50,1	12	51,5	0,04	4,87
179	7,1	22,1	14	26,2	0,11	16,84
180	6,8	44,1	22	49,3	0,05	6,38
181	6,9	30	10	31,6	0,08	11,12
182	6,2	35,4	7	36,1	0,05	4,43
183	6,9	65,2	10	66,0	0,04	5,33
184	6	16,4	28	32,4	0,05	3,93
185	5,7	16,4	12	20,3	0,07	4,48
186	6,5	25,9	20	32,7	0,07	6,85
187	7,1	65,3	15	67,0	0,04	6,57
188	6,1	44,8	17	47,9	0,04	2,98
189	6,8	36,5	65	74,5	0,03	4,21
190	5,9	16,4	25	29,9	0,05	3,81
191	6,7	8,6	5	9,9	0,26	28,22
192	6,9	118,3	8	118,6	0,02	2,97
193	7,4	90,9	19	92,9	0,04	6,65
194	7,7	206,3	25	207,8	0,02	4,17
195	7,5	74,5	22	77,7	0,05	8,90
196	7	23,9	15	28,2	0,10	13,95
197	7	47,5	17	50,5	0,05	7,80
198	6,7	121,9	14	122,7	0,02	2,29
199	7,4	101,3	17	102,7	0,03	6,01
200	6,2	9	39	40,0	0,05	3,99
201	6,8	101,7	22	104,1	0,02	3,02
202	5,9	20	11	22,8	0,07	5,00

203	6,8	31,6	18	36,4	0,07	8,64	(Chi-Wen Chen et al, 2017)
204	6,8	50,1	12	51,5	0,05	6,10	
205	6,8	22,1	14	26,2	0,10	12,01	
206	6,9	44,1	22	49,3	0,05	7,14	
207	6,9	75,6	10	76,3	0,03	4,61	
208	6,7	26,1	7	27,0	0,09	10,39	
209	7,3	34,3	10	35,7	0,09	15,44	
210	6,4	5,5	18	18,8	0,11	10,64	
211	5,4	10	12	15,6	0,08	4,16	
212	6,6	23,5	20	30,9	0,07	8,13	
213	6,6	37,2	65	74,9	0,03	3,35	
214	5,8	84,5	28	89,0	0,02	1,14	
215	6,8	67,4	5	67,6	0,04	4,65	
216	7,1	65,2	8	65,7	0,04	6,71	
217	7,3	45,5	19	49,3	0,07	11,19	
218	7,6	80,4	22	83,4	0,04	9,28	
219	6,8	58,9	27	64,8	0,04	4,85	
220	7,1	13,2	15	20,0	0,15	22,04	
221	7,3	20,6	17	26,7	0,12	20,66	
222	7,6	126,1	17	127,2	0,03	6,08	
223	6	25,9	39	46,8	0,03	2,73	
224	5,8	29,4	11	31,4	0,05	3,25	
225	6,8	58,9	18	61,6	0,04	5,10	
226	6,6	13,2	12	17,8	0,13	14,06	
227	7,1	15,5	14	20,9	0,15	21,09	
228	6,8	25,6	22	33,8	0,07	9,31	
229	5,5	20,1	3	20,3	0,06	3,58	
230	6,9	75,6	10	76,3	0,03	4,61	
231	6,2	26,1	7	27,0	0,07	5,92	
232	6,9	34,3	10	35,7	0,07	9,84	
233	6,4	5,5	18	18,8	0,11	10,64	
234	5,7	10	12	15,6	0,09	5,83	
235	6,5	23,5	20	30,9	0,07	7,26	
236	6,8	37,2	65	74,9	0,03	4,20	
237	5,9	84,5	28	89,0	0,02	1,28	
238	6,7	67,4	5	67,6	0,03	4,15	
239	6,9	65,2	8	65,7	0,04	5,35	
240	7,4	45,5	19	49,3	0,07	12,52	
241	7,5	80,4	22	83,4	0,04	8,29	
242	6,8	58,9	27	64,8	0,04	4,85	
243	7	13,2	15	20,0	0,14	19,70	
244	7	20,6	17	26,7	0,11	14,73	

245	7,4	126,1	17	127,2	0,03	4,85	(Fotopoulou et al, 2017)
246	6,2	25,9	39	46,8	0,04	3,42	
247	5,9	29,4	11	31,4	0,05	3,63	
248	6,8	58,9	18	61,6	0,04	5,10	
249	6,8	13,2	12	17,8	0,15	17,61	
250	6,8	15,5	14	20,9	0,12	15,04	
251	6,9	25,6	22	33,8	0,08	10,42	
252	5,7	20,1	3	20,3	0,07	4,48	
253	6,9	8,7	10	13,3	0,21	26,53	
254	7,3	29,59	10	31,2	0,11	17,66	
255	6,4	5,03	18	18,7	0,11	10,72	
256	5,4	9,23	12	15,1	0,08	4,29	
257	6,6	20,88	20	28,9	0,08	8,68	
258	7,1	68,12	8	68,6	0,04	6,42	
259	7,8	203,1	25	204,6	0,02	4,73	
260	7,6	75,91	22	79,0	0,05	9,79	
261	6,8	16,11	27	31,4	0,08	9,99	
262	7,1	18,03	15	23,5	0,13	18,78	
263	7,3	40,37	17	43,8	0,07	12,59	
264	6,7	160,44	14	161,0	0,01	1,74	
265	6	21,61	39	44,6	0,04	2,86	
266	6,8	50,47	18	53,6	0,05	5,86	
267	6,6	31,76	12	34,0	0,07	7,39	
268	6,8	32,58	22	39,3	0,06	7,99	
269	6,9	8,7	10	13,3	0,21	26,53	
270	6,9	29,59	10	31,2	0,09	11,26	
271	6,4	5,03	18	18,7	0,11	10,72	
272	5,7	9,23	12	15,1	0,10	6,01	
273	6,5	20,88	20	28,9	0,08	7,75	
274	6,9	68,12	8	68,6	0,04	5,13	
275	7,7	203,1	25	204,6	0,02	4,23	
276	7,5	75,91	22	79,0	0,04	8,74	
277	6,8	16,11	27	31,4	0,08	9,99	
278	7	18,03	15	23,5	0,12	16,78	
279	7	40,37	17	43,8	0,06	8,98	
280	6,7	160,44	14	161,0	0,01	1,74	
281	6,2	21,61	39	44,6	0,04	3,59	
282	6,8	50,47	18	53,6	0,05	5,86	
283	6,8	31,76	12	34,0	0,07	9,25	
284	6,9	32,58	22	39,3	0,07	8,94	
285	7,7	70	60	92,2	0,04	9,39	(Bommer et al, 2002)
286	6,2	33	7	33,7	0,05	4,74	

287	6,7	25	160	161,9	0,01	1,73	
288	6,8	60	23	64,3	0,04	4,89	
289	6	20	18	26,9	0,06	4,74	
290	6,2	5	5	7,1	0,28	22,61	
291	7,5	100	48	110,9	0,03	6,23	
292	6,5	15	32	35,3	0,06	6,34	
293	7,3	160	12	160,4	0,02	3,44	
294	7,5	270	5	270,0	0,01	2,56	
295	7	12	3	12,4	0,24	31,82	
296	7,8	65	18	67,4	0,06	14,36	
297	7,3	100	80	128,1	0,02	4,31	
298	6,1	35	12	37,0	0,05	3,86	
299	5,4	16	10	18,9	0,07	3,44	
300	7	120	27	123,0	0,02	3,20	
301	7,1	25	22	33,3	0,09	13,23	
302	5,1	25	7	26,0	0,04	1,78	
303	5,1	35	26	43,6	0,02	1,06	
304	7,6	100	10	100,5	0,04	7,70	
305	5,7	10	19	21,5	0,07	4,24	
306	6,5	120	80	144,2	0,01	1,55	
307	7,8	70	60	92,2	0,04	10,51	
308	6,3	33	7	33,7	0,06	5,30	
309	7,1	25	160	161,9	0,02	2,72	
310	6,2	20	18	26,9	0,07	5,94	
311	6,3	5	5	7,1	0,30	25,31	
312	7,6	100	48	110,9	0,03	6,97	
313	6,6	15	32	35,3	0,06	7,10	
314	7,1	160	12	160,4	0,02	2,75	
315	7,6	270	5	270,0	0,01	2,86	
316	7,6	12	3	12,4	0,33	62,53	
317	7,6	65	18	67,4	0,06	11,47	
318	7,3	100	80	128,1	0,02	4,31	
319	6,3	35	12	37,0	0,05	4,84	
320	5,7	16	10	18,9	0,08	4,83	
321	7,3	25	22	33,3	0,10	16,57	
322	5,5	25	7	26,0	0,05	2,80	
323	5,5	35	26	43,6	0,03	1,67	
324	5,8	10	19	21,5	0,07	4,75	
325	6,9	120	80	144,2	0,02	2,44	
326	7	35	17	38,9	0,07	10,11	
327	8	181	20	182,1	0,02	6,66	
328	8,3	206	25	207,5	0,02	8,20	

(Wang et al,
2018)

329	8,5	288	17	288,5	0,02	7,39	(Kuo-Jen Chang et al, 2006)
330	7,3	12,3	8	14,7	0,23	37,60	
331	6,8	25,3	15,6	29,7	0,09	10,57	
332	6,8	19,8	12,1	23,2	0,11	13,54	
333	6,7	24,9	12,5	27,9	0,09	10,08	
334	6,7	27,6	16,2	32,0	0,08	8,77	
335	6,7	22,7	12,5	25,9	0,09	10,83	
336	6,6	18,1	9,8	20,6	0,11	12,19	
337	6,6	41,6	8,6	42,5	0,05	5,90	
338	6,4	20,9	7,7	22,3	0,09	8,99	
339	6,2	28,7	17,4	33,6	0,05	4,76	
340	6,1	2,5	19,7	19,9	0,09	7,19	
341	6	28,1	24	37,0	0,04	3,45	
342	5	4,8	5	6,9	0,15	5,97	
343	4,8	8,4	5	9,8	0,10	3,38	
344	5	10,4	5	11,5	0,09	3,59	
345	4,7	14,8	1,1	14,8	0,06	1,99	
346	4,8	4,2	1,2	4,4	0,22	7,57	
347	4,7	16,3	10,9	19,6	0,04	1,51	
348	5	4,2	1,2	4,4	0,25	9,48	
349	4,8	16,3	10,9	19,6	0,05	1,69	
350	4,8	2,3	5	5,5	0,18	6,01	
351	5	13,6	5	14,5	0,07	2,86	
352	4,7	8,8	1,1	8,9	0,10	3,33	(Delgado et al, 2011)
353	6,6	7,9	5	9,3	0,26	26,83	
354	6	28,9	5	29,3	0,06	4,35	
355	7,3	117	33	121,6	0,03	4,54	
356	6,5	54	10	54,9	0,04	4,08	
357	5,9	54	10	54,9	0,03	2,08	
358	7,9	300	5	300,0	0,01	3,61	
359	7,6	100	24	102,8	0,04	7,52	
360	6,8	24,2	10	26,2	0,10	12,00	
361	6,2	19,5	12	22,9	0,08	6,98	
362	6,6	18	13	22,2	0,10	11,30	
363	6,2	42	10	43,2	0,04	3,70	
364	8	198	39	201,8	0,02	6,01	
365	5,8	46	11	47,3	0,03	2,15	
366	8,8	410	35	411,5	0,02	7,26	