

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Институт морской геологии  
и геофизики Дальневосточного  
отделения Российской академии  
наук

д.ф.-м.н. Л.М. Богомолов  
15 ноября 2023 г.



### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук на диссертационную работу Шарафиева Зульфата Забировича «ИНИЦИИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ОПОЛЗНЕЙ ПРИ МНОГОКРАТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 - Геофизика.

**Актуальность.** Диссертационная работа Шарафиева З.З. посвящена детальному исследованию условий возникновения оползней на природных и модельных склонах под воздействием сейсмических волн от различных источников. Актуальность темы вытекает из состояния исследований проблемы устойчивости склонов при многократных воздействиях сейсмических волн от землетрясений или взрывов. Широко применяемые методы расчета устойчивости склонов основаны на квазистатическом описании всех нагрузок и не обеспечивают достаточной точности в случае динамических воздействий. Эти подходы приводят к занижению критических значений параметров сейсмических колебаний, которые инициируют движение оползня. Использование таких подходов негативно отразится на экономической эффективности горнодобывающих предприятий. Более адекватная модель, описывающая условия инициирования оползней при многократном воздействии сейсмических колебаний, с необходимостью должна базироваться на надежных, воспроизводимых данных. Создание экспериментальных стендов или установок с модельными склонами, на которые воздействуют колебания с

регулируемыми параметрами, обеспечивает набор таких данных за небольшое время. Поэтому, представленные в диссертации результаты экспериментального и теоретического исследования закономерностей деформационных эффектов на склонах при многократных сейсмических воздействиях, актуальны.

**Цель работы** - выявить закономерности развития деформаций склонов методом лабораторного эксперимента с многократным воздействием динамических нагрузок, и установить на этой основе критерии обрушения склонов.

Сформулированная цель согласована с основными решаемыми задачами.

- Создание установок для исследования инициирования разрушения склонов при воздействиях упругих волн, распространяющихся в вертикальном или горизонтальном направлении.

- Разработка методики выполнения лабораторных экспериментов, направленных на определение критических значений параметров динамических нагрузок на модельные склоны при однократном и многократном сейсмическом воздействии.

- Проведение лабораторных экспериментов.

- Измерения параметров сейсмических колебаний на разных расстояниях от массовых взрывов на карьерах КМА.

- Обобщение результатов экспериментов, сравнение с реакцией склонов на воздействие различных источников сейсмических колебаний.

- Разработка феноменологической модели процесса инициирования обрушения склона при многократном сейсмическом воздействии.

### **Научная новизна.**

Для исследования закономерностей процесса деформирования модельных склонов при многократном сейсмическом воздействии впервые проведено столь большое количество экспериментов на специально разработанной установке. Разработана и отлажена оригинальная методика экспериментальных исследований одиночных и многократных динамических воздействий на склон, собран и обобщен большой объем экспериментальных данных.

В работе получен ряд новых научных результатов, наиболее важными из которых являются следующие:

- Обрушение склонов при многократном воздействии сейсмических колебаний происходит при условии, что минимальные значения пиковых ускорений,  $PG_{\min}$ , и скоростей,  $PGV_{\min}$ , превышают пороговые величины. Пороговые значения  $PG_{\min}$  выше, чем значения критических ускорений в случае квазистатических нагрузок на склон.



- При многократном сейсмическом воздействии происходит резкое снижение критической скорости смещения грунта PGV, вызывающей обрушение склона при фиксированных значениях ускорения PGA.

- Снижение критических значений параметров PGA и PGV в случае многократных воздействий на склоны по сравнению со случаем однократных увеличивается с уменьшением коэффициента статического запаса устойчивости FS.

- Величина пикового ускорения в сейсмических волнах  $PGA_{min} \sim 0,01g$  определяет предел, при превышении которого их воздействие на склоны осадочных пород приводит к появлению нарушений.

Тем самым выявлены новые закономерности необратимого деформирования склонов при многократном сейсмическом воздействии.

#### **Практическая значимость.**

Отличительной особенностью диссертации является то, что полученные результаты могут, так или иначе, использоваться при проектировании и эксплуатации карьеров, обустройстве и мониторинге отвалов и оползнеопасных склонов. Стоит особо выделить значимость разработанной феноменологической модели, которая позволяет выработать подход к принятию решений при оценке опасности схода оползня в районах горнодобывающих предприятий под воздействием сейсмических волн от серийных источников. Другим показателем практической значимости является положение, что массовые промышленные взрывы не влияют радикально на устойчивость откосов отвалов вскрышных пород месторождений КМА в совокупности с результатами об инициировании оползней при многократном воздействии сейсмических волн. Это указывает на необходимость сейсмического мониторинга не только на самих объектах (горнодобывающих предприятиях), но и на окружающих их территориях, и особенно касается карьеров, расположенных в сейсмоопасных регионах, где деформационный мониторинг склонов должен дополняться сейсмическим.

**Обоснованность и достоверность** обеспечивается значительным объемом экспериментальных данных, полученных с использованием современных методик измерений и обработки, соответствием полученных результатов с результатами других исследований по смежной тематике.

#### **Апробация работы.**

По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах (входящих в перечень ВАК). Материалы диссертационной

работы были представлены на 7 научных конференциях и совещаниях, включая международные.

### **Структура и содержание диссертации.**

Диссертация Шарафиева З.З. состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Работа содержит 126 страниц текста, 41 рисунок, 6 таблиц и список литературы из 119 наименований. Структура и оформление диссертации соответствуют рекомендованного ВАКом ГОСТа 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления». Автореферат отражает содержание диссертации с достаточной полнотой и ясностью.

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, научная новизна, практическая значимость и основные научные результаты, выносимые на защиту, определен личный вклад автора.

В **первой** главе проведен обзор состояния исследований вопросов устойчивости склонов и существующих подходов и методов расчета предельного состояния материалов, слагающих склоны. Обзор охватывает основные результаты длинного ряда работ по воздействию на склоны сейсмических колебаний, вызванных землетрясениями и мощными взрывами. При изложении результатов физического и численного моделирования условий возникновения оползня на склонах или обрушения отвалов подчеркнута ключевая роль фрикционных свойств грунтов у поверхности скольжения, в частности уменьшение коэффициента внутреннего трения с ростом скорости в диапазоне более 1 мкм/с. Внимание обращено на то, что и при оценках предельного равновесия с учетом сил инерции, и в методах критических субгоризонтальных перемещений (подход Ньюмарка) учитываются пиковые ускорения в сейсмических колебаниях, но не факт повторяемости воздействий. На основании проведенного обзора конкретизированы задачи диссертации, касающиеся экспериментальных исследований инициирования оползней многократным сейсмическим воздействием.

Во **второй** главе приведено описание установок для исследования инициирования оползней при субвертикальном и субгоризонтальном динамическом воздействии, а также методики экспериментов. Установки позволяют реализовать разовое и многократное сейсмическое воздействие на модельный склон, а также режим вибровоздействия (с увеличенной длительностью). В описание методики включена информация о системе измерений параметров динамических воздействий и смещения блоков, необходимая для понимания результатов экспериментов. Также рассмотрены условия подобия натурального и модельного склона, и на этой основе сформулированы требования к испытываемым



материалам. Исходя из этих требований, для модельных склонов подобраны: кварцевый песок с небольшой примесью глины и/или глицерина в основной массе и тот же песок с добавкой цемента в слое у контакта, обладающие низкими значениями сцепления.

**Третья глава** является центральной в диссертационной работе, она посвящена собственно экспериментальному исследованию механики инициирования обрушения склона при динамических воздействиях с разными параметрами. Представлены результаты, полученные соискателем, в экспериментах с тремя видами динамических воздействий на склоны: импульсного разового, импульсного многократного и вибрационного. Всего было проведено более 1000 экспериментов. Для интерпретации данных во всех случаях использовались диаграммы максимальная массовая скорость,  $PGV$  – максимальное ускорение,  $PGA$ , на которых выделялись кластеры точек (значений параметров воздействий), соответствующих сохранению устойчивости склона или его обрушению.

В случае однократного импульсного воздействия показано, что при пиковых ускорениях  $PGA$  выше критического уровня  $PGA_{min}$  происходит неупругая деформация и локальное разрушение грунта. При достаточно высоких значениях пиковой скорости  $PGV > PGV_{min}$  это приводит к обрушению склона. Как при вертикальных, так и при горизонтальных ускорениях при воздействиях величина  $PGA_{min}$  слабо зависит от угла склона. Эта величина значительно превышает значение критического ускорения для случая квазистатической нагрузки и определяется, в основном, свойствами прочности грунта.

В случае многократного воздействия, если пиковые ускорения превышают  $PGA_{min}$ , то остаточные смещения могут накапливаться по мере накопления циклов нагружения, пока не будет достигнуто критическое смещение, при котором склон теряет устойчивость. И при многократном импульсном воздействии, и при воздействии вибраций (подразумевается длинный цуг колебаний) критические параметры пиковых массовых ускорений и скорости, при превышении которых склон разрушался, гораздо ниже, чем при одиночном воздействии. Отмечено, что этот эффект наиболее выражен для крутых склонов при малых коэффициентах устойчивости  $FS \sim 1$ .

Критическое значение скорости  $PGV_{min}$  возрастает по мере снижения угла склона, в отличие от параметра  $PGA_{min}$ , который, как и при однократном воздействии, меняется незначительно при изменениях угла склона и соответствующих им изменениях коэффициента устойчивости  $FS$ . Интересен и важен результат, представленный на рис. 3.12, - по мере накопления числа импульсов деформация склона, определяемая по

смещению кромки, происходит с нарастающей интенсивностью (по крайней мере в некотором диапазоне массовых скоростей PGV). Это, по-видимому, отражает, что до перехода к неустойчивости образование локальных нарушений в материале склона идет в «режиме с обострением».

Случай вибрационного воздействия на скольжение жесткого блока по склону имел свои особенности, связанные с тем, что при включенном вибраторе движение блока включало 2 составляющие: колебания на заданной извне частоте 50 и 80 Гц и поступательное движение. Устойчивый режим скольжения блока с модуляцией скорости при включении/выключении вибратора сохраняется, если средняя скорость «ползучести» не превышает некоторую величину порядка 0.1 мм/с, а величина перемещения блока относительно склона меньше критического значения  $D_{max}$  порядка десятков мм. В противоположном случае (большие перемещения и средние скорости свыше 1.5 мм/с) происходит переход к неустойчивости, проявляющейся как ускоряющаяся ползучесть. Выявлено, что в условиях проведенных экспериментов на этой стадии имеет место эффект снижения трения с ростом скорости. Потеря устойчивости при скольжении блока обусловлена, скорее всего, механизмом скоростного разупрочнения материала на контакте блока со склоном.

**В четвертой** главе анализируются параметры сейсмических волн, воздействующих на оползневые склоны в природных условиях. Эти параметры сопоставляются с результатами лабораторных экспериментов, проводится обобщение, своего рода сценирование процесса оползнеобразования под воздействием сейсмических волн от различных источников, которое названо феноменологической моделью.

В начале главы 4 описываются источники, по которым в диссертации создана база данных о магнитуах 366 землетрясений и предельных эпицентральных расстояниях до оползней, зафиксированных после этих событий. База данных включает сведения о максимальных ускорениях и скоростях смещения грунта в окрестности оползневых склонов. Информация о параметрах сейсмических волн, воздействующих на склоны в природных условиях, отображена на диаграммах PGA – PGV, что позволило установить нижний предел максимальных ускорений в волне  $PGA_{min} \sim 0,01g$ , приводящих к нарушениям состояния склонов.

Далее в четвертой главе описаны проведенные диссертантом полевые исследования влияния промышленных взрывов на территории Лебединского и Михайловского ГОКов на устойчивость откосов карьеров и бортов отвалов. По записям стационарных и мобильных сейсмических станций были определены параметры воздействия



сейсмозрывных волн, и установлено, что сейсмозрывное воздействие не оказывало существенного влияния на состояние откоса вблизи карьера. Тем не менее, последствие массовых взрывов (т.е. многократные воздействия) может приводить к накоплению повреждений в материалах склона.

Один из разделов главы 4 посвящен компьютерному моделированию в рамках подхода Ньюмарка. Расчеты проводились для записей волновых форм ускорений грунта в случаях землетрясений разных магнитуд и взрыва в карьере Лебединского ГОКа, а также для модельных акселерограмм. Расчеты подтвердили, что критическая величина смещения по Ньюмарку,  $D_N \sim 10\text{--}20$  см, достигается, когда пиковое ускорение PGA в 5–10 раз превышает квазистатический предел,  $a_c$ . Также показано, что при волновой форме акселерограммы, как у землетрясения Westmorland, 1981,  $M=5.9$ , десятисантиметровое смещение достигается при величине  $PGA \sim 2.5 a_c$ , а в случае взрывов PGA должно быть как минимум в 20 раз выше значения  $a_c$ . Другими словами, эффективность воздействия сейсмических волн от землетрясений оказалась выше, чем сейсмозрывных волн.

Итогом исследований диссертанта стала феноменологическая модель процесса оползнеобразования при многократном сейсмическом воздействии, которая представлена в виде набора положений, упорядочивающих обнаруженные закономерности. В модель также включены основные принципы квазистатической устойчивости склона, сведения о триггерах неустойчивости, информация о коэффициентах трения пород, слагающих склоны. Феноменологическая модель использована для выработки рекомендаций по оценке возможности инициирования оползня однократным или многократным сейсмическим воздействием. Достоинства феноменологической модели и предложенных рекомендаций продемонстрирована на примере оценки устойчивости отвалов пород на месторождениях КМА. Стоит отметить оценку характерных значений  $PGA \sim (0,4\text{--}0,6)g$ , при которых некоторые участки отвалов со степенью обводненности  $m=0.5$  могут стать опасными.

В **Заключении** приведены результаты, полученные в рамках диссертационного исследования и отражающие научную новизну и практическую значимость работы. Стоит отметить, что результаты не перефразируют «дословно» положения феноменологической модели, а являются, скорее, другой формой обобщения обширного материала.

Содержание диссертации, а конкретно, изложенные в главах 3 и 4 материалы, обосновывают **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  $PGV$ .

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.

Автореферат с достаточной полнотой отражает содержание диссертации.

**Замечаний** по работе немного, они отражают высокий интерес к результатам диссертации и могут рассматриваться как рекомендации по продолжению исследований.

- При интерпретации диаграмм  $PGA - PGV$  и обобщении о пороге инициирования обрушения по скорости и ускорению использован только визуальный анализ, или также программы распознавания кластеров точек? В диссертации это не оговорено. Наличие предельных значений  $PGA_{min}$ ,  $PGV_{min}$  легко прослеживается на диаграммах и не вызывает сомнений, но это не снимает вопрос о единственности интерпретации (как в задачах распознавания образов, или в обратных задачах геофизики). По изложенным материалам можно предположить, к примеру, что область значений пиковых ускорений и скоростей  $PGA_{min}$ ,  $PGV_{min}$ , когда воздействие приводит к разрушению, определяется неравенством

$$(PGA - PGA_{min})^\alpha (PGV - PGV_{min})^\beta / (FS - 1)^\gamma > PF_{crit},$$

где показатели степени  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и параметр разрушения  $PF_{crit}$  – числовые параметры, принимающие положительные значения и зависящие от кратности воздействия. Отсюда замечание о возможной неединственности, значимость пределов  $PGA_{min}$ ,  $PGV_{min}$  состоит в том, что они являются лишь необходимыми условиями инициирования обрушения склонов.

- При описании, как составлялась база данных по сейсмогенным оползням (Приложение А), не оговорено, какие допускались временные задержки между главным сейсмособытием и возникновением оползня. Даны только библиографические ссылки, что



неудобно. Ведь результаты лабораторных экспериментов естественно сопоставлять с ко-сейсмической активацией движения грунта на склонах. Вместе с тем, известно множество случаев активизации оползней через длительное время (несколько месяцев и более) после землетрясения.

- В диссертации иногда встречаются неточности или опечатки, например в формулах (1.7), (2.2).

**Рекомендация** по продолжению исследований. Вопрос о лабораторном исследовании триггерного воздействия на оползневые склоны, когда может возникать задержка инициирования, выходит за рамки данной диссертации. Один из вариантов постановки эксперимента для лучшего понимания задержанного обрушения – модернизация опытов с многократным воздействием, при которой после первого воздействия интенсивность последующих (сила ударов) существенно снижается. Будет ли при этом происходить обрушение модельного склона после большого числа циклов?

Диссертация Шарафиева З.З. является законченным научно-квалификационным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. Работа является оригинальной и обладает несомненной научной новизной и практической значимостью. Научные результаты диссертации соответствуют п. 7 (Оценка сейсмической опасности и риска, сейсмическое районирование и изучение устойчивости промышленных сооружений и гражданских зданий в связи с сейсмическим и геодинамическим риском) и п. 10 (Изучение физики и рисков возникновения природных и природно-техногенных геокатастроф) Паспорта специальности 1.6.9. «Геофизика». Таким образом, диссертация «ИНИЦИИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ОПОЛЗНЕЙ ПРИ МНОГОКРАТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ» соответствует критериям «Положения о присуждения ученых степеней» (Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), «О внесении изменений в Положение о присуждения ученых степеней (Постановление Правительства РФ от 21.04.2016 г. № 335), предъявляемым к кандидатским диссертациям. За исследование закономерностей инициирования оползней при многократных сейсмических воздействиях и разработку феноменологической модели оползневых процессов, вносящих значимый вклад в обеспечение оползневой безопасности и безопасности работ на карьерах горно-обогатительных комбинатов, соискатель Шарафиев Зульфат Забирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 «Геофизика».

Отзыв на диссертацию З.З. Шарафиева рассмотрен и одобрен на заседании Ученого совета ИМГиГ ДВО РАН 15 ноября 2023 г. (протокол № 7), присутствовали 15 из 18 членов.

Ведущий научный сотрудник

лаборатории сейсмологии ИМГиГ ДВО РАН,

кандидат физико-математических наук



Прытков Александр Сергеевич

Сведения об организации

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

693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б

Телефон: +7 (4242) 791-517

E-mail: nauka@imgg.ru