

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Кан

Кан Кай

**Оценка оползневой опасности территорий с высокой сейсмичностью
(на примере Краснополянской тектонической зоны (Большой Сочи) и
эпицентральной зоны Вэньчуаньского землетрясения (Китай))**

Специальность 25.00.08 – Инженерная геология,
мерзлотоведение и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре инженерной и экологической геологии
геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** – ***Трофимов Виктор Титович*** – доктор геолого-минералогических наук, профессор
- Зеркаль Олег Владимирович*** – кандидат геолого-минералогических наук
- Официальные оппоненты** – ***Пендин Вадим Владимирович*** – доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», гидрогеологический факультет, заведующий кафедрой
- Постоев Герман Павлович*** – доктор технических наук, ФГБУН Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН), главный научный сотрудник
- Стром Александр Леонидович*** – кандидат геолого-минералогических наук, ООО «Центр Геодинамических Исследований», главный специалист

Защита диссертации состоится 17 мая 2019 г. в 17 часов на заседании диссертационного совета МГУ.04.01 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, МГУ имени М.В.Ломоносова, Геологический факультет, ауд. 415.

E-mail: mgu.04.01@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/187091505/>

Автореферат разослан 15 апреля 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук



Н.А. Харитонов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие оползневых процессов в пределах территорий с высокой сейсмичностью, в первую очередь горных регионах таких как, например, Краснополянский район (Сочи) и провинция Сычуань (Китай), представляет существенную опасность для населения и действующих сооружений. В частности, Вэньчуаньское землетрясение (12.05.2008) сопровождалось значительным ущербом, в том числе вызванным развитием более 60 тыс. сейсмогенных оползней и других проявлений склоновых процессов. Обеспечение устойчивого развития горных территорий с высокой сейсмичностью требует пристального изучения, результаты которого должны стать основой реализации мероприятий по инженерной защите действующих сооружений. Особенности современного состояния геологической среды горных территорий, формирование и развитие оползней в условиях сейсмического воздействия в рассматриваемых регионах, обусловлены действием целого ряда факторов, как рельеф, тектонические условия, характер сейсмического воздействия и прочностные характеристики грунтов, анализу которых посвящена представляемая работа. Анализ влияния перечисленных факторов является важным элементом количественной оценки устойчивости склонов и прогнозирования сейсмогенных оползней, обуславливая актуальность выполненного диссертационного исследования.

Цель и задачи работы. Основной целью является развитие методов количественной оценки устойчивости склонов в условиях сейсмического воздействия для прогнозирования оползневой опасности на основе математического моделирования.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Анализ и оценка инженерно-геологических условий территории Сочинской горно-климатической курортной зоны и эпицентральной зоны Сычуаньского землетрясения (12.05.2008);
2. Выделение набора факторов оползнеобразования, которые определяют развитие оползневых процессов в условиях сейсмического воздействия;
3. Выполнение количественной оценки устойчивости склонов с применением вероятностного анализа;
4. Выполнение количественной оценки с применением анализа чувствительности устойчивости склонов к воздействию факторов, на нее влияющих;
5. Выполнение количественной оценки устойчивости склонов с применением динамического метода.

Объектом исследования являются оползневые процессы.

Предметом исследования выступают особенности развития оползневых процессов при высокоинтенсивном сейсмическом воздействии на территории Краснополянской тектонической зоны (Большой Сочи) и эпицентральной зоны Вэньчуаньского землетрясения (Китай).

Фактический материал. Диссертационная работа основывается на материалах, полученных автором в период с 2014 г. по 2018 г. в процессе выполнения специализированных работ по изучению развития оползневых процессов и оценки устойчивости склонов в пределах территории Краснополянской тектонической зоны (Большой Сочи) и эпицентральной зоны Вэньчуаньского землетрясения (Китай). В 2014 г. автор принял участие в полевых работах ООО «Инжзащита», выполнявшихся в Краснополянской тектонической зоне (Большой Сочи). В 2016 г. автор участвовал в международной летней полевой школе, организованной Политехническим университетом г. Чэнду в провинции Сычуань, что позволило собрать фактический материал для выполнения анализа устойчивости склонов эпицентральной зоны Вэньчуаньского землетрясения. Математическое моделирование устойчивости склонов выполнялась автором с использованием лицензионного программного обеспечения на Геологическом факультете МГУ, в ООО «Инжзащита» и в Политехническом университете г. Чэнду. Все анализируемые количественные оценки устойчивости склонов, представленные в настоящей работе, были получены автором.

Также автором при подготовке настоящей работы был собран, проанализирован и обобщен обширный материал, содержащий результаты инженерно-геологических и других, ранее проведенных исследований, в пределах изучаемых территорий, опубликованный в КНР, в России и в других странах.

Методика исследования.

В настоящей работе автором были использованы методы пространственного анализа инженерно-геологической информации, выполненные в ГИС (в среде ArcGIS). Количественная оценка устойчивости склонов проведена с использованием методов предельного равновесия (метод Ямбу, Моргенштерна-Прайса), а также анализа напряженно-деформированного состояния (метод конечных элементов, метод конечных разностей). Оценка и анализ сейсмического воздействия на устойчивость склонов осуществлялась с использованием псевдостатического и динамического подходов. Для оценки вероятности активизации оползневого процесса были выполнены вероятностный анализ, анализ чувствительности, позволяющие оценить закономерности влияния тех или иных факторов на устойчивость склонов, реализованные в среде программного комплекса GeoStudio.

Научная новизна данной работы заключается в следующем:

1. Выполнен анализ и сопоставление инженерно-геологических условий и факторов формирования оползневой опасности на территории Краснополянской тектонической зоны (Большой Сочи) и эпицентральной зоны Вэньчуанского землетрясения (Китай).

2. Разработана методика комплексирования методов количественной устойчивости склонов с использованием вероятностного анализа, позволяющая установить взаимосвязь между получаемыми величинами коэффициентов устойчивости и вероятностью/опасностью развития оползневого процесса.

3. Проведен анализ чувствительности устойчивости склонов к воздействию факторов, на нее влияющих, при количественной оценке устойчивости склонов (для исследованных объектов в Краснополянской тектонической зоне), позволивший выявить зависимость устойчивости склонов от изменчивости факторов оползнеобразования.

4. Обоснована применимость «0.65-метода» при динамическом анализе устойчивости склонов в условиях сейсмического воздействия (на примере исследованных объектов в Краснополянской тектонической зоне и в эпицентральной зоне Вэньчуанского землетрясения) и показана сопоставимость результатов с оценками устойчивости склонов в условиях сейсмического воздействия, полученными с использованием псевдостатического анализа.

Личный вклад автора. В 2014 г. автор принимал участие в изучении оползневых проявлений на территории Краснополянской тектонической зоны (Большой Сочи). В 2016 г. автор принимал участие в международной летней полевой школе, организованной Политехническим университетом г. Чэнду в провинции Сычуань, включавшей обследование проявлений оползневых процессов в эпицентральной зоне Вэньчуаньского землетрясения. Полученные материалы позволили представить масштабы развития и характер активизации оползней и других склоновых процессов при высокоинтенсивном сейсмическом воздействии. Математические модели оползневых склонов различных изучаемых объектов были созданы и проанализированы непосредственно автором в лаборатории инженерной геодинамики и обоснования инженерной защиты территорий кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, в ООО «Инжзащита» и в Политехническом университете г. Чэнду.

Практическая значимость работы. В практическом плане результаты настоящей работы могут быть использованы при оценке устойчивости склонов областей с высокой сейсмичностью, при выборе районов размещения инженерных объектов, направленных на обеспечение устойчивого развития названных территорий.

Достоверность результатов исследования определяется применением современных подходов к количественной оценке устойчивости склонов при Вэньчуаньском землетрясении (12.05.2008) и подтверждается их сопоставимостью с фактическим развитием оползневых процессов на изучаемом участке в провинции Сычуань.

Защищаемые положения:

1. Сходность тектонической позиции регионов - Краснополянской тектонической зоны (Большой Сочи) и эпицентральной зоны Вэньчуаньского землетрясения (Китай), представляющих собой современные зоны коллизии, предопределяет близость ведущих компонентов инженерно-геологических условий, определяющих развитие и активность оползневых процессов. Геологические формации, участвующие в строении регионов, влияют на тип и масштабность оползневых процессов, предопределяя их различия.

2. Количественную оценку оползневой опасности в условиях сейсмического воздействия необходимо выполнять на основе динамического анализа устойчивости склонов, учитывая величины ожидаемых сейсмических ускорений, что обеспечивает большую обоснованность получаемых результатов по сравнению с результатами статического анализа.

3. Вероятностный анализ и анализ чувствительности устойчивости склонов к воздействию факторов, на нее влияющих, при количественной оценке устойчивости склонов позволяет повысить надежность получаемых результатов при оценке оползневой опасности в условиях сейсмического воздействия.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на конференции «Ломоносов-2017» (Москва, Россия, 2017 г.), на научно-практической конференции «Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения» (Москва, Россия, 2017 г.), на XIII Общероссийской научно-практической конференции и выставке «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, Россия, 2017 г.), на IV Мировом оползневом форуме (Любляна, Словения, 2017 г.), а также на международном симпозиуме EUROCK 2018 (Санкт-Петербург, Россия, 2018 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе 3 работы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ, и изданиях из перечня, рекомендованных Минобрнауки РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа, общим объемом 167 машинописных страниц, состоит из введения, пяти глав, заключения и списка

использованной литературы. Список литературы включает 171 наименование, количество иллюстраций – 89, число таблиц – 32.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научным руководителям доктору геолого-минералогических наук, профессору В.Т. Трофимову и кандидату геолого-минералогических наук, и.о. заведующего лабораторией инженерной геодинамики и обоснования инженерной защиты территорий О.В. Зеркалю за добрую помощь и постоянную поддержку в процессе работы над диссертацией.

Автор также выражает глубокую признательность сотрудникам кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета, в том числе доценту С.К. Николаевой, с.н.с. О.С. Барыкиной, в.с. И.П. Гвоздевой и другим. Автор выражает благодарность профессору РГГРУ имени Серго Орджоникидзе И.К. Фоменко за консультации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Современные представления о склоновых процессах на территориях с высокой сейсмичностью

Сильная расчлененность рельефа территорий, рассматриваемых в данной работе, особенности геологического строения обуславливают широкое развитие различных склоновых процессов. На изучаемых территориях встречаются такие процессы как: обвалы, оползни, сели и т.п. В настоящее время существует множество классификаций склоновых процессов, разработанных различными авторами, для различных целей. Проведенный анализ ранее предложенных классификаций показал значительные различия в принципах выделения типов и классов объектов, которые, в свою очередь, зависят от целей и задач, поставленных авторами при исследовании.

При подготовке настоящей работы использованы ранее разработанные генетические классификации оползней и других склоновых процессов, разработанные с учетом механизма смещений, специалистами геологического факультета МГУ (классификация Г.С. Золотарева, дальнейшее ее развитие в работах В.С. Федоренко).

Землетрясения издавна считаются одной из основных причин, вызывающих оползневые явления. Проблема влияния землетрясений на образование и развитие склоновых (оползней, обвалов) процессов, исходя из специфики их образования и механизма смещения, рассматривалась в многочисленных исследованиях. Представленный научный анализ оползней, вызванных землетрясениями, сделан с использованием крупных обзоров, составленных D.K. Keefer (Геологическая служба США, 1984), В.С. Федоренко (МГУ, СССР, 1988), Р.А. Ниязовым (ГИДРОИНГЕО,

Узбекистан, 2015), В.Тiwari (Университет Штата Калифорния, США, 2017) и целой серии работ, опубликованных в России, США, Китая, Японии, Италии, Чехии, Индии и других странах.

Настоящая работа опирается на ранее выявленные для различных регионов мира закономерности развития сейсмогенных оползней. В работе приведены данные о развитии сейсмогенных оползней и обвалов в различных регионах земного шара, исходя из анализа опубликованной литературы. Показана связь между магнитудой и плотностью сейсмогенных оползней. Выявлено, что количество оползней, вызванных землетрясениями, возрастает с увеличением магнитуды.

Глава 2. Представления о методах расчета устойчивости оползневых склонов на территориях с высокой сейсмичностью

К настоящему времени разработано множество методов количественной оценки устойчивости склонов. При подготовке настоящей работы была использована классификация расчетных методов, включающая 4 класса методов. Методы расчета устойчивости склонов условно можно разделить на несколько принципиальных групп: графические, основанные на анализе предельного равновесия, основанные на анализе предельного состояния и основанные на вероятностном анализе. Наиболее многочисленны методы, основанные на анализе предельного равновесия.

В работе рассмотрены следующие методы: метод построения равнопрочного откоса Н.Н. Маслова (метод F_p), метод Янбу, метод Г.М. Шахунянца, метод Р.Р. Чугаева, метод Бишопа, метод К. Терцаги, метод Н.Р. Моргенштерна- В.Е. Прайса, метод круга трения (ф-круга), метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР), метод граничных элементов (МГЭ), вероятностный анализ, анализ чувствительности.

В настоящее время количественная оценка устойчивости склонов с учетом сейсмического воздействия выполняется как с использованием псевдостатического анализа, так и с применением динамического анализа.

Псевдостатический подход основывается на применении теории предельного равновесия. Расчет ведется в предположении статического действия сейсмических сил. Сейсмическая сила является объемной.

При динамическом анализе расчет устойчивости склона основывается на использовании акселерограмм, что позволяет принимать во внимание фактическую продолжительность и интенсивность землетрясения. Динамические усилия прикладываются ко всем узлам в сетке конечных элементов.

В работе рассматривается применение псевдостатического анализа исходя из требований действующих нормативных документов. В настоящее время отсутствует

единый, общепринятый подход к учету сейсмического воздействия при количественной оценке устойчивости склонов. В нормативных документах, действующих в России, Китае и Европе, рекомендуются различные коэффициенты сейсмичности.

Глава 3. Сравнительный анализ инженерно-геологических условий Краснополянской тектонической зоны (Большой Сочи) и эпицентральной зоны Вэньчуаньского землетрясения (Китай)

Краснополянская тектоническая зона расположена между 43° и 44° северной широты и 40° и 41° восточной долготы. Она входит в составе Кавказской горной системы. Эпицентральная зона Вэньчуаньского землетрясения расположена между 30° и 33° северной широты и 102° и 106° восточной долготы. Она располагается в пределах Лунмэньшаньской горной системы.

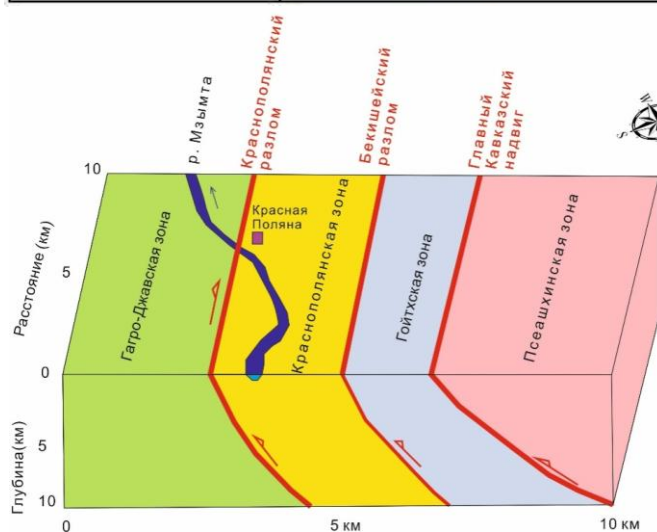
Сравним две изучаемые зоны по следующим инженерно-геологическим условиям (табл. 1). Краснополянская тектоническая зона и эпицентральная зона Вэньчуаньского землетрясения характеризуются близкими современными неотектоническими условиями, представляя собой зоны коллизии, характеризующиеся широким развитием тектонических нарушений, интенсивными тектоническими движениями (до 6-6,5 мм/год), которые сопровождаются высокоинтенсивным сейсмическим воздействием. Обе зоны имеют высокую расчлененность рельефа на фоне активного развития дизъюнктивной тектоники. На рисунке 1 показаны тектонические схемы двух зон. Указанные факторы предопределяют широкое развитие оползневых процессов. Факторами, влияющими на современную активность оползневых процессов, являются годовой режим метеоклиматических параметров и высокоинтенсивные сейсмические воздействия.

Наряду со сходными неотектоническими и геоморфологическими условиями, рассматриваемые регионы характеризуются определенными различиями. В Краснополянской тектонической зоне развиты среднемезозойские полускальные и скальные грунты, в частности, аргиллиты и порфириды. В эпицентральной зоне Вэньчуаньского землетрясения развиты домезозойские скальные грунты, такие как, доломиты и сланцы, отличающиеся высокой прочностью. Однако в зонах тектонического дробления значения прочности значительно падают. Особенности состава и строения верхней части геологического разреза предопределяют механизм развития оползней, их объемы, типичные для каждого из рассматриваемых регионов.

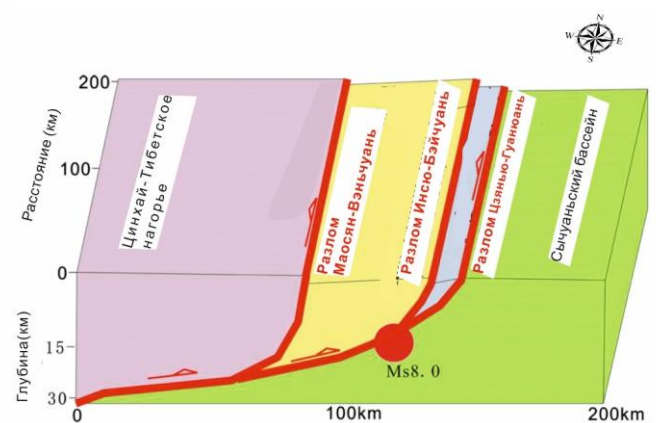
Сравнительный анализ инженерно-геологических условий двух зон

Регионы Компоненты ИГ условий	Краснополянской тектонической зоны (Большой Сочи)	Эпицентральная зона Вэньчуаньского землетрясения
1	2	3
Современная тектоническая позиция	Зона коллизии, сформировавшаяся при взаимодействии тектонических плит	Зона коллизии, сформировавшаяся при взаимодействии тектонических плит
Тектонические и неотектонические условия	Развито несколько систем тектонических нарушений кавказского (субширотного) и "антикавказского" (субмеридианального) направления. Скорость неотектонических деформаций до 5-6 мм/год. Прогнозируемая сейсмичность до $M_w = 7.3$.	Развито несколько систем разломов тектонической зоны Лунмэньшань (северо-восточного простирания). С запада на восток прослеживается серия взбросов и надвиговых систем. Скорость неотектонических деформаций до 6,5 мм/год. Зафиксированная максимальная сейсмичность $M_w = 7.9$ / $M_s = 8.0$ (Вэньчуаньское землетрясение 2008 г.).
Геологическое строение	Отложения имеют складчатое залегание с широким развитием зон тектонического дробления. Развиты среднемезозойские полускальные и скальные грунты, среди которых преобладают аргиллиты и порфириты. Четвертичные отложения представлены, преимущественно делювием и образованиями гравитационного ряда.	Отложения имеют складчатое залегание с широким развитием зон тектонического дробления. Развиты докембрийские и палеозойские скальные грунты, среди которых преобладают доломиты и сланцы. Мезозойские скальные и полускальные грунты развиты фрагментарно. Четвертичные отложения представлены преимущественно делювием и образованиями гравитационного ряда.
Геоморфологические условия	Тип рельефа – низкогорный, альпинотипный, отметки высот 700 - 2400 м, перепад высот до 1700 м, уклоны склонов – 20- 60°, аллювиальные террасы развиты фрагментарно.	Тип рельефа – среднегорный, альпинотипный с глубокими врезами. Северо-западная часть зоны выше юго-восточной части. Высота горных цепей неравномерна – от 700 до 5000 м, перепад высот 1000-4000 м, уклоны склонов – 20-60°, аллювиальные террасы развиты фрагментарно.
Климатические условия	Субтропический климат, максимальное месячное количество осадков 423 мм (м.ст. Ачишхо), выпадает в декабре, температура января - 4,9°C, температура июля 12,8 °C.	Муссонный климат, максимальное месячное количество осадков 593 мм (м.ст. Dujiangyan), выпадает в августе, температура января 5,1 °C, температура июля 22,9 °C.

1	2	3
Гидрологические условия	Расход рек 100 м ³ /с, тип долины р. Мзымты – эрозионная, V-образная (также все долины притоков), на участках перекрытий – U-образная с широким дном	Расход рек 455-2800 м ³ /с, тип долин рек – эрозионный, V-образный (также все долины притоков) из-за большого уклона русла реки, локально, на участках тектонического подпора и оползневых перекрытий – U-образная с широким дном
Гидрогеологические условия	К четвертичным отложениям приурочены грунтовые воды с глубинами залегания, варьирующими в широких пределах. Для массивов среднемеозойских пород характерны подземные воды трещинного и трещинно-пластового типа.	К четвертичным отложениям приурочены грунтовые воды с глубинами залегания, варьирующими в широких пределах. Для массивов докембрийские и палеозойские пород характерны подземные воды трещинного и трещинно-пластового типа.
Оползневые процессы	Развиты оползни объемами от десятков тыс. м ³ до нескольких десятков миллионов м ³ , отдельные наиболее крупные смещения достигают нескольких сот миллионов м ³ . Среди крупномасштабных оползней преобладают оползни скольжения, среди небольших оползней – оползни течения. Сейсмогенный характер оползней подтверждается при количественной оценке устойчивости.	Развиты оползни объемами от десятков тыс. м ³ до нескольких сот миллионов м ³ , отдельные наиболее крупные смещения достигают объемов свыше 1 км ³ . Среди крупномасштабных оползней преобладают каменные лавины, среди среднемасштабных и небольших оползней – оползни скольжения. Сейсмогенный характер оползней описан при изучении эпицентральной зоны Вэньчуаньского землетрясения 2008 г. и подтверждается при количественной оценке устойчивости.



(а)



(б)

Рис. 1. Тектонические схемы Краснополянкой тектонической зоны (а) и эпицентральной зоны Вэньчуаньского землетрясения (б) с активными разломами.

Для Краснополянской тектонической зоны характерны крупномасштабные оползни скольжения, а среди небольших оползней преобладают оползни течения и сложные оползни - оползни скольжения в аргиллитах, переходящие при смещении (при дезинтеграции аргиллитов и их увлажнении) в оползни течения. В эпицентральной зоне Вэньчуаньского землетрясения среди крупномасштабных оползней преобладают каменные лавины, среди небольших оползней – оползни скольжения. При этом, большинство из изученных оползней располагаются вдоль сейсмогенных разломов, по которым отмечались подвижки при Вэньчуаньском землетрясении. Полученные результаты анализа характера распространения оползней в эпицентральной зоне Вэньчуаньского землетрясения в условиях интенсивного сейсмического воздействия могут быть использованы (в качестве аналога) при оценке оползневой опасности в Краснополянской тектонической зоне. В частности, следует обратить особое внимание на высокую оползневую опасность территорий, примыкающих к зонам активных разломов в Краснополянской тектонической зоне.

Глава 4. Количественная оценка оползневой опасности для объектов Краснополянской тектонической зоны (Большой Сочи)

Одним из направлений решения проблемы оценки вероятности развития оползневых процессов является применение **вероятностного анализа**, сущность которого заключается в получении вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости склона в зависимости от вероятностных функций распределения физико-механических характеристик грунтов и величины сейсмического воздействия.

Представлен пример расчета устойчивости склонов на участке станции пассажирской подвесной канатной дороги (ППКД) Карусель-8 с применением вероятностного анализа. Схематичный инженерно-геологический разрез расчетного участка приведен на рисунке 2(а). Сначала был исключен постулат о неизменности во времени показателей свойств грунтов, определяющий использование исходных данных в составе стандартных, традиционно применяемых методов количественной оценки устойчивости склонов. Геомеханическая расчетная схема, использованная при анализе в среде Geostudio, показана на рисунке 2(б).

Потом принята необходимость учета возможной изменчивости физико-механических свойств грунтов во времени под действием различных факторов. Изменчивость показателей физико-механических свойств грунтов (плотность ρ , сцепление C и угол внутреннего трения ϕ) были оценены по результатам полевых и лабораторных работ. Также для рассматриваемой территории принималось

нормальное распределение величины сейсмического воздействия (K_c). В настоящей работе вероятностная функция распределения величины сейсмического воздействия оценивалась на основе акселерограммы. Предполагается, что сейсмическая сила направлена горизонтально и по направлению уклона склона. Таким образом, ускорения, имеющие положительный знак (т.е. направление которых совпадает с направлением уклона склона) принимаются в расчет, а ускорения, имеющие отрицательные значения - игнорируются. Графики распределения показателей физико-механических свойств грунтов и величины сейсмического воздействия приведены на рисунке 3.

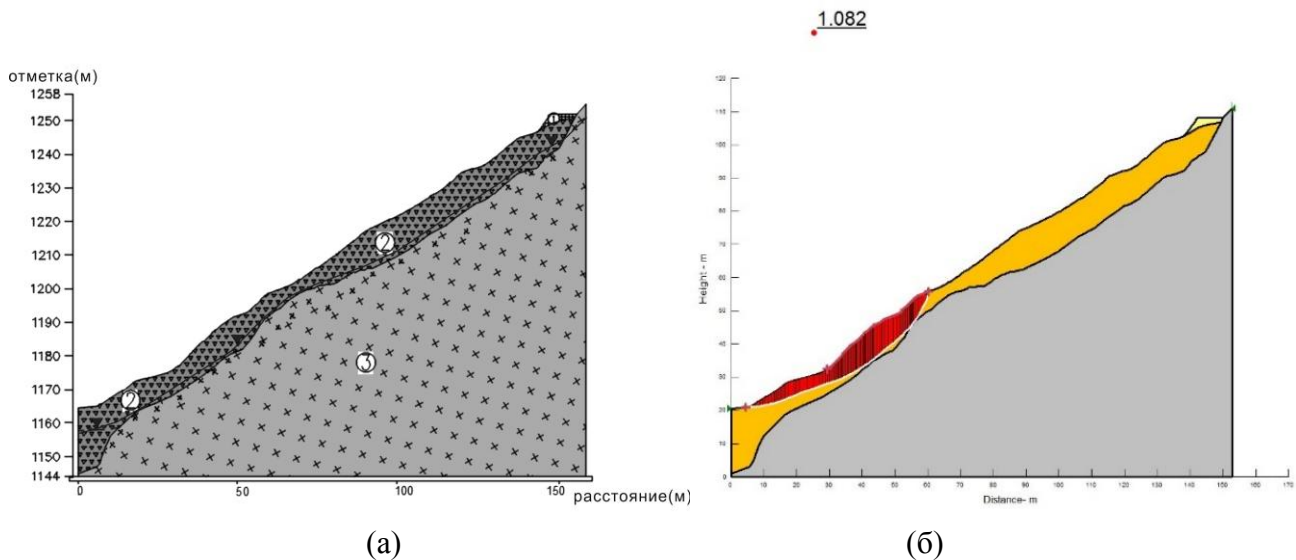


Рис. 2. (а) Схематичный инженерно-геологический разрез расчетного участка склона. Цифрами обозначены: 1 – техногенный насыпной грунт (tQ_{IV}); 2 – щебенистый грунт с суглинистым заполнителем ($c-dQ_{IV}$); 3 – порфирит (J_2pr). (б) геомеханическая расчетная схема (стандартный подход, без учета вероятностного анализа) с применением метода Моргенштерна-Прайса без сейсмического воздействия ($K_{уст}=1,082$).

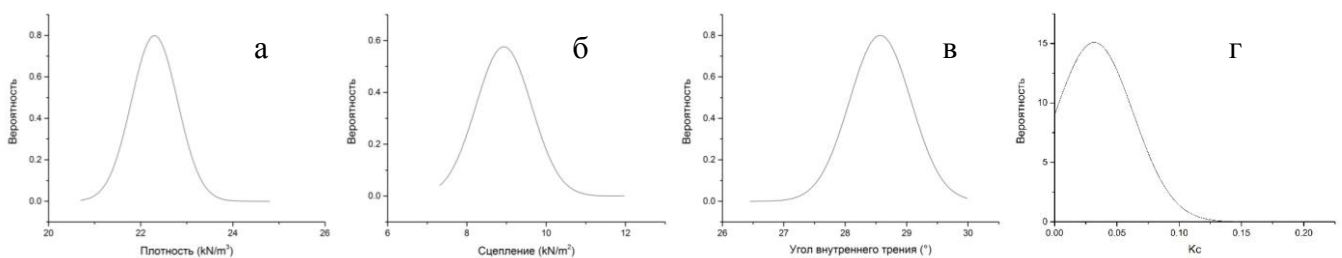


Рис. 3. Распределение учитываемых при расчете факторов (а. плотности грунтов; б. сцепления; в. угла внутреннего трения; г. величины сейсмического воздействия).

В дальнейшем, с использованием полученных показателей распределения величины исходных данных, с использованием метода Монте-Карло был выполнен расчет вероятностного распределения коэффициента устойчивости склона ($K_{уст}$), изменяющегося в зависимости от учитываемых факторов. При выполнении

вероятностной оценки устойчивости было проведено порядка элементарных 2000 расчетов, учитывающих различные сочетания показателей факторов. Полученные результаты приведены в таблице 2. Полученные распределения величин $K_{уст}$ без учета и с учетом возможного сейсмического воздействия показаны на рисунке 4.

Таблица 2

Результаты количественной оценки устойчивости склона с использованием вероятностной функции распределения показателей, учитываемых при анализе

	без сейсмического воздействия	с сейсмическим воздействием
$K_{уст}$ сред.	1,071	0,989
$K_{уст}$ мин.	0,970	0,800
$K_{уст}$ макс.	1,151	1,123
Стандартное отклонение $K_{уст}$	0,023795	0,051182
Вероятность развития оползневой процесса (при $K_{уст} < 1$), %	0,3	54,3

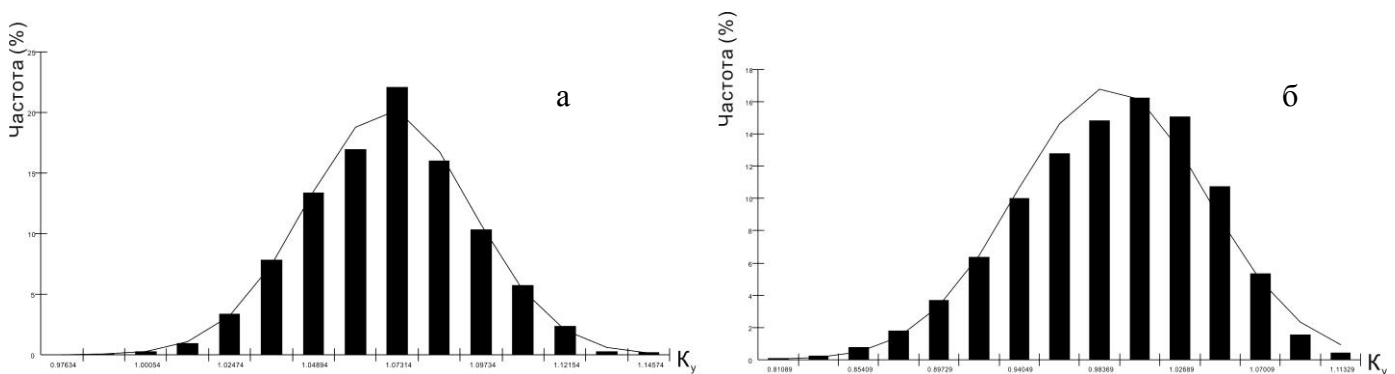


Рис. 4. а) Распределение $K_{уст}$ без учета сейсмического воздействия (среднее значение $K_{уст}=1,071$, $\sigma=0,023795$); б) распределение $K_{уст}$ с учетом возможного сейсмического воздействия (среднее значение $K_{уст}=0,989$, $\sigma=0,051182$).

Важным дополнением вероятностного подхода к количественной оценке устойчивости склонов является выполнение **анализа чувствительности**, заключающегося в рассмотрении значимости различных факторов в "чувствительности" склона к потере устойчивости. Особую роль анализ чувствительности количественной оценки устойчивости склонов играет в условиях, когда склоновый массив сложен разнородными грунтами, характеризующимися существенной изменчивостью свойств, позволяя оценить вклад каждого из рассматриваемых параметров в изменение устойчивости склона. Также важную роль анализ чувствительности количественной оценки устойчивости склонов играет в условиях, когда уклон поверхности склона и коэффициент сейсмичности являются вариационными.

Представлен пример расчета устойчивости склоновых массивов автомобильных дорог с применением анализа чувствительности. Были построены двухмерные модели для оценки устойчивости массивов методом предельного равновесия (метод Morgenштерна-Прайса) при различной крутизне склона в программной среде GeoStudio (рис. 5). Анализ чувствительности проводился с изменением только одного параметра, в то время как остальные величины характеризовались статистически осредненными значениями. При этом, чем больше степень изменения $K_{уст}$, тем состояние склона более чувствительно к этому показателю. Разброс значений также известен: плотность грунта 1,8-2,0 г/см³, сцепление 10-25 кПа и угол внутреннего трения 25-30°. Можно отметить, что разница в значениях коэффициента сейсмичности, рекомендуемых различными нормативным документами, составляющая от 2 до 4 раз (коэффициент сейсмичности 0,05-0,2). Наибольшее влияние на устойчивость склона оказывает изменчивость величины сцепления (C) и коэффициента сейсмичности (K_c) (см. рис. 6).

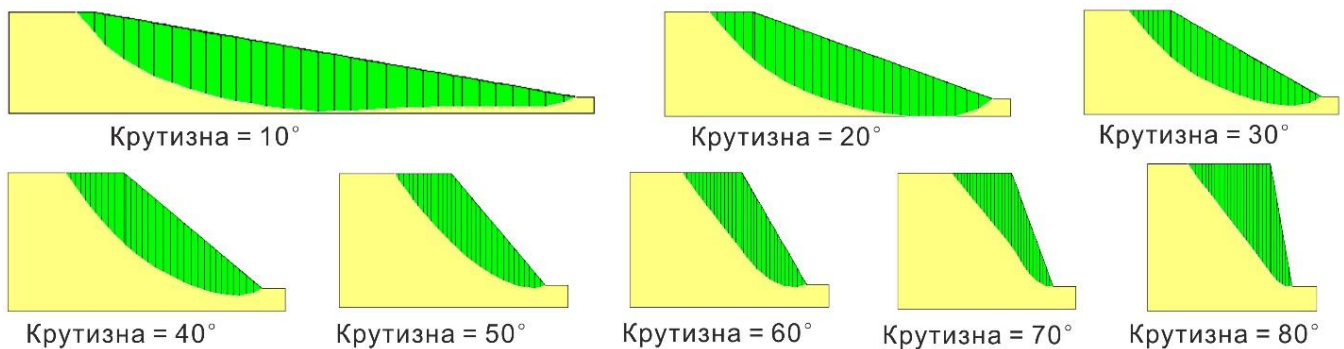


Рис. 5. Модели для оценки устойчивости массивов методом Morgenштерна-Прайса при разных уклонах склонов (10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70° и 80°)

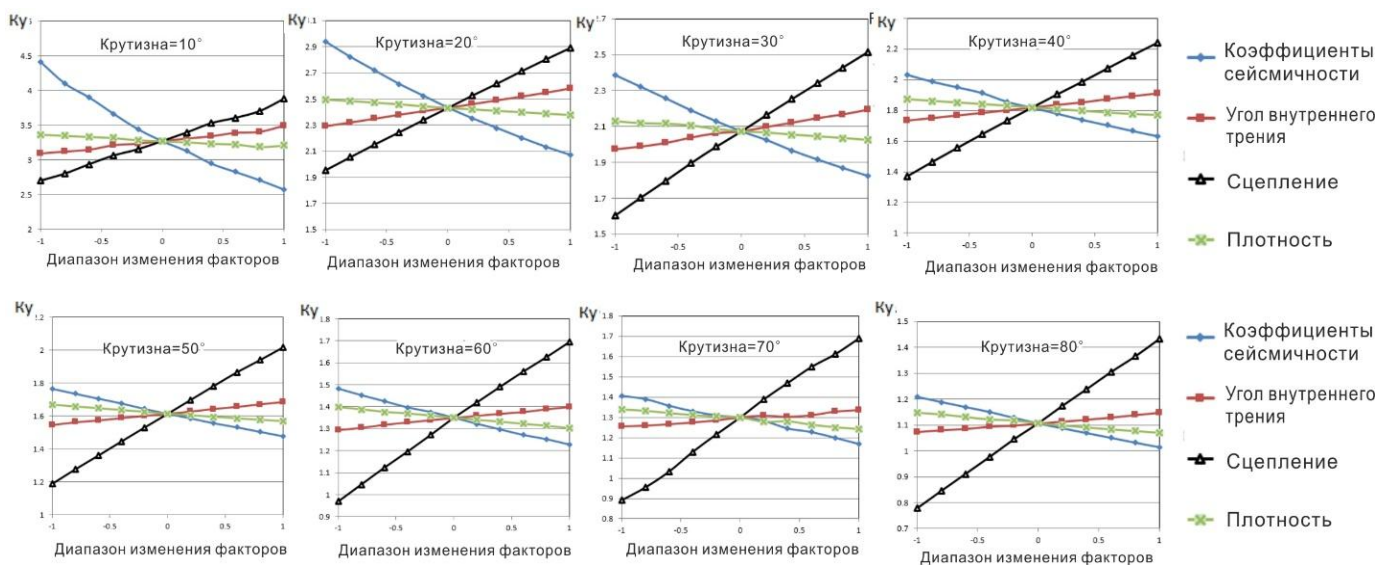


Рис. 6. Графики чувствительности устойчивости склона при различных уклонах склона (10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70° и 80°).

Сейсмическое воздействие при количественной оценке устойчивости склонов может быть оценено как на основе **псевдостатического анализа**, так и с применением **динамического анализа**, учитывающего величины ожидаемых сейсмических ускорений.

Однако, при динамическом анализе полученные величины минимального $K_{уст}^{min}$ и осредненного $K_{уст}^{cp}$ оказались нереалистичными. Количественные оценки устойчивости склонов с учетом сейсмического воздействия, полученные при динамическом анализе с применением «0.65-метода», сопоставимы с результатами оценок устойчивости, полученными при использовании псевдостатического анализа. По сравнению с итоговыми оценками, выполненными с применением псевдостатического анализа, результаты при «0.65-методу» оказываются более обоснованными, благодаря учету акселерограмм, что позволяет принимать во внимание фактические сейсмические ускорения.

В работе представлен пример расчета устойчивости склона на участке спортивного комплекса «Русские Горки» с применением динамического анализа. Рассматриваемый участок располагается на левобережье р. Мзымта в нижней части северного склона хр. Аибга. Оценка пространственной изменчивости крутизны склонов для рассматриваемой территории выполнялась с помощью стандартных процедур геоинформационной системы ArcGIS. На начальном этапе топографическая карта (с представлением рельефа в виде изолиний) была трансформирована в цифровую модель рельефа (DEM) (рис. 7), которая в дальнейшем явилась основой для построения карты уклонов дневной поверхности. Для анализа роли уклона поверхности в устойчивости склонов в программном комплексе Geostudio были подготовлены три геомеханические модели с крутизной склона в 20°, 30° и 40° (рис. 8).

Геологический разрез на рассматриваемом участке представлен толщей нижнеюрских аргиллитов, представляющих собой малопрочные (прочность на одноосное сжатие – 7,0 - 9,0 МПа) грунты средней плотности (2,0 - 2,5 г/см³). Аргиллиты существенно анизотропны. Сцепление, в зависимости от ориентировки трещин напластования, колеблется от 25 кПа до 300 кПа, а угол внутреннего трения составляет порядка 30°. Верхняя часть толщи аргиллитов представлена выветрелыми разностями, для которых характерно снижение прочности на одноосное сжатие до 3,0 - 3,5 МПа. Величина сцепления в выветрелых разностях аргиллитов составляет не более 10 кПа, а угол внутреннего трения – 26 - 28°. Изучение строения верхней части геологического разреза показало, что мощность выветрелой зоны аргиллитов достигает 10 м.

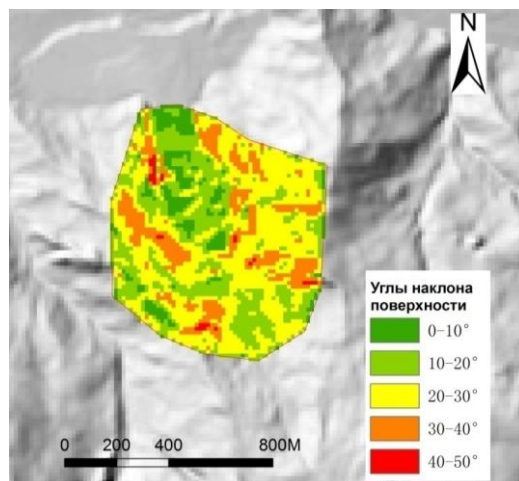


Рис. 7. Карта уклонов поверхности рассматриваемого участка северного склона хр.Аибга

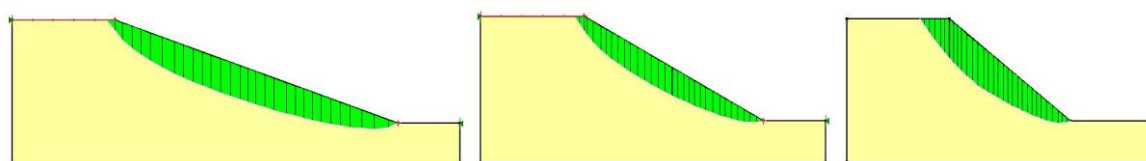


Рис. 8. Модели для расчета устойчивости склона с крутизной 20°, 30° и 40°.

Пример количественной оценки устойчивости склона, выполненной **методом Morgenstern-Price** без учета сейсмического воздействия для участка с крутизной поверхности 40°, плотностью 2,2 г/см³, углом внутреннего трения 28° и величиной сцепления равной 15 кПа, показан на рис. 9.

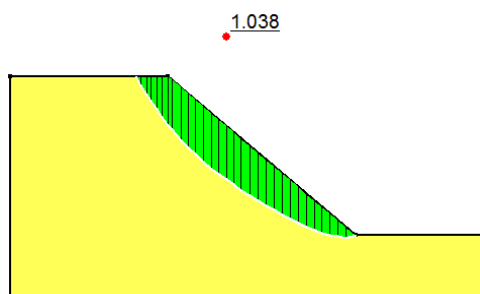


Рис. 9. Геомеханическая схема по результатам оценки устойчивости склона (крутизна 40°, сцеплением 15 кПа) по методу Morgenstern-Price без учета сейсмического воздействия ($K_{уст} = 1,038$)

При динамическом анализе расчет устойчивости склона основывается на использовании данных акселерограмм, что позволяет принимать во внимание фактическую продолжительность и интенсивность землетрясения. Решение задачи расчета устойчивости склона с учетом сейсмического воздействия в GeoStudio осуществляется следующим образом. На начальном этапе, на основе статического анализа определяется начальное поле напряжений, действующее в массиве грунтов. В дальнейшем, выполняется динамический анализ, позволяющий определить изменение напряженно-деформированного состояния массива при прохождении сейсмических волн.

Для расчета устойчивости склона были использованы модифицированные данные по Рачинскому землетрясению ($M_w=6.8$), произошедшего 29.04.1991 г. В соответствии с положениями СП 14.13330.2014 за исходные амплитудные характеристики колебаний грунта принимаются ускорения - 200 см/с^2 при сейсмичности 8 баллов. Поэтому горизонтальная акселерограмма была модифицирована путем увеличения пика горизонтальных ускорений до $0,2g$. Также пик вертикального ускорений увеличен до $0,13g$. Акселерограммы, после модифицирования, использованные при расчетах, приведены на рис. 10. Зависимость коэффициента устойчивости склона ($K_{уст}$) от времени сейсмического воздействия показана на графике, приведенном на рис. 11. Во время сейсмического воздействия минимальный коэффициент устойчивости $K_{уст}^{\min} = 0,937$.

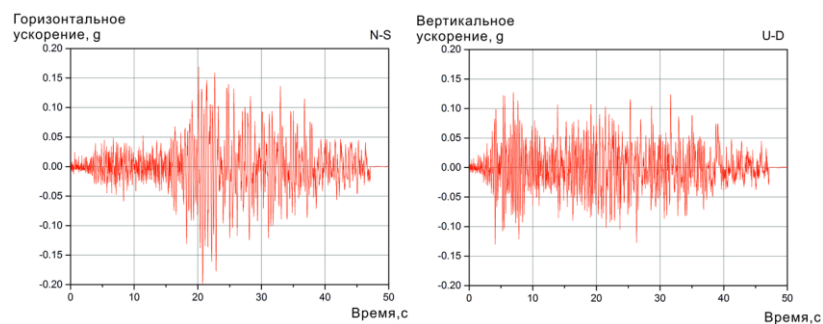


Рис. 10. Модифицированные акселерограммы горизонтальных и вертикальных ускорений, использованные при расчетах, по Рачинскому землетрясению ($M_w=6.8$).

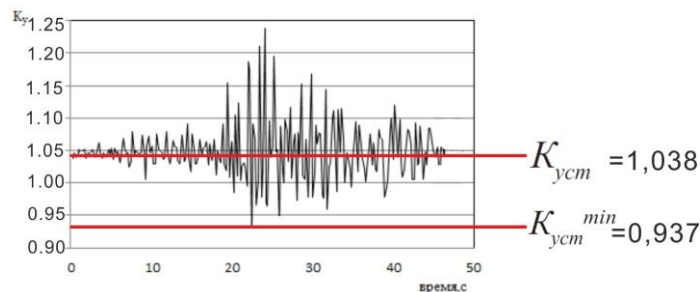


Рис. 11. График зависимости коэффициента устойчивости склона $K_{уст}$ от времени сейсмического воздействия (для модели склона с крутизной поверхности 40° , углом внутреннего трения 28° и величиной сцепления 15 кПа)

В настоящее время одним из нерешенных вопросов, препятствующих более широкому внедрению динамического анализа в практику расчетов устойчивости склонов, является проблема сопоставления величин $K_{уст}$, получаемые в рамках различных методов анализа и их модификаций. С. Су с соавторами [Су и др., 2003] предложили рассматривать в качестве результирующего $K_{уст}$ при выполнении динамического анализа значение минимального $K_{уст}^{\min}$. Для рассматриваемого участка был получен $K_{уст}^{\min} = 0,937$ (рис. 11). Y. Li с соавторами [Li и др., 2006] в качестве результирующего $K_{уст}$ при выполнении динамического анализа рассматривает среднее значение полученного $K_{уст}$. Для анализируемого участка был получен $K_{уст}^{cp} = 1,199$.

Н. Liu предложил «0.65-метод», который преобразовывает минимальные величины $K_{уст}^{min}$, полученные при выполнении динамического анализа [Liu и др., 2003]. Сущность предложенного подхода заключается в следующем. Очевидно, что при сейсмическом воздействии $K_{уст}$ колеблется, в том числе принимая минимальные значения коэффициента устойчивости – $K_{уст}^{min}$ (рис. 11). В то же время, в статических условиях (т.е. без сейсмического воздействия) развитие оползневых смещений определяется коэффициентом устойчивости $K_{уст}$. Предполагая, что нарушение устойчивости склона не обязательно происходит мгновенно при приложении сейсмической загрузки, предлагается принять, что $(K_{уст} - K_{уст}^{min})$ составляет 0,65 статического коэффициента устойчивости, отражая отклонение коэффициента устойчивости при сейсмическом воздействии от коэффициента устойчивости статических условий. Иными словами, полученные величины минимального коэффициента устойчивости $K_{уст}^{min}$, рассчитанного при динамическом анализе, и значения коэффициента устойчивости $K_{уст}$, рассчитанные при статическом анализе, могут быть использованы для получения приведенного коэффициента устойчивости $K_{уст}^{дин}$ динамического анализа по формуле следующего вида:

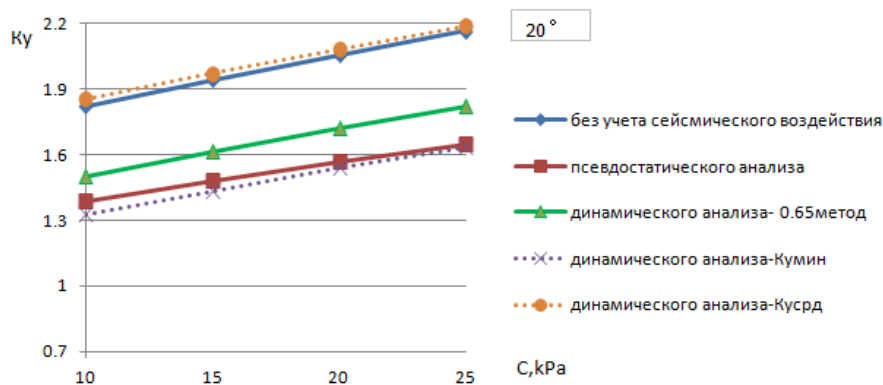
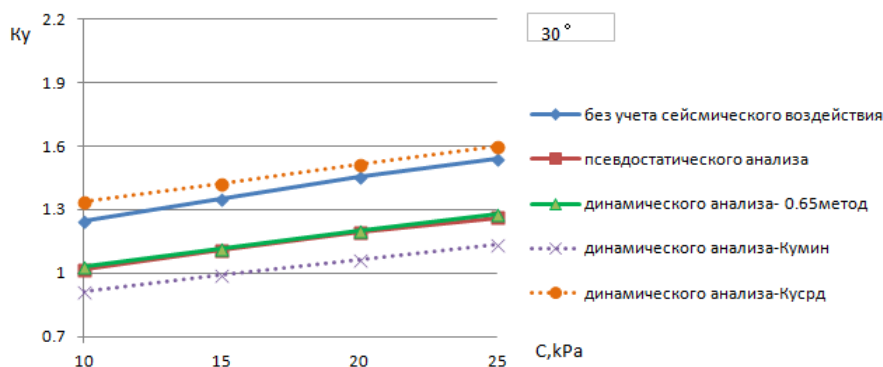
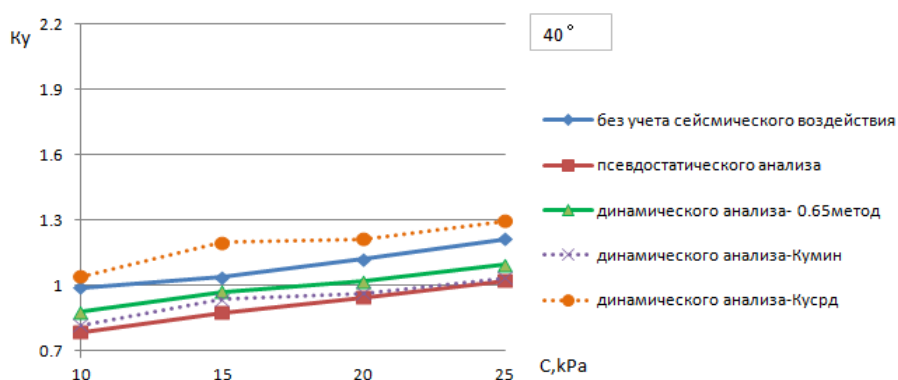
$$K_{уст}^{дин} = K_{уст} - 0,65 * (K_{уст} - K_{уст}^{min}) \quad (1)$$

Для рассматриваемого склона (крутизна 40°, сцепление 15 кПа) полученная величина $K_{уст}$ для статических условий составляет 1,038, минимальное расчетное значение $K_{уст}^{min}$ при динамическом анализе составляет 0,937, тогда $K_{уст}^{дин} = 0,972$.

На рисунках 12, 13 и 14 представлены графики зависимости расчетных величин коэффициента устойчивости от показателей прочностных характеристик (сцепление) аргиллитов для склонов различной крутизны. На рисунках 12, 13 и 14 хорошо видно, что усредненное значение полученного $K_{уст}^{cp}$ (оранжевый пунктир) как результирующего $K_{уст}$ при динамическом анализе неверно характеризует состояние склона, так как расчётная величина $K_{уст}^{cp}$ даже выше значений статического $K_{уст}$.

Считая, что нарушение устойчивости склона не обязательно происходит при мгновенной сейсмической нагрузке, минимальный $K_{уст}^{min}$ (фиолетовый пунктир) как результирующий $K_{уст}$, оказался слишком консервативным.

По сравнению с вышеперечисленными подходами, итоговые оценки, полученные с использованием «0.65-метода» оказываются более реалистичными и более сопоставимыми с результатами оценок устойчивости, получаемых при использовании псевдостатического анализа. Следует отметить, что для отдельных вариантов рассматриваемых условий (при крутизне склона равной 30°) количественные оценки устойчивости склонов, полученные с использованием динамического анализа с применением «0.65-метода» и полученные при псевдостатическом анализе, практически совпадают.

Рис. 12. Зависимости $K_{уст}$ от сцепления аргиллита для склонов крутизной 20° Рис. 13. Зависимости $K_{уст}$ от сцепления аргиллита для склонов крутизной 30° .Рис. 14. Зависимости $K_{уст}$ от сцепления аргиллита для склонов крутизной 40° .

Глава 4. Количественная оценка оползневой опасности участка развития сейсмогенного оползня-обвала Шуйцзинянь (эпицентральной область Вэньчуаньского землетрясения 2008 года)

Сейсмогенный оползень-обвал Шуйцзинянь, который образовался при Вэньчуаньском землетрясении 2008г., располагается в правом борту верхней части долины р. Дуба в уезде Чэньцзяба, сформировавшейся вдоль разлома Инсю-Бэйчуань (рис. 15а). Река Дуба является притоком р. Цзянь. Абсолютные отметки верхней части склона составляют около 1300 м, возвышаясь над долиной реки на 600 м (рис. 15б). Общее направление уклона склона юго-восточное, достигающее 40° . Протяженность оползня-обвала Шуйцзинянь составляет около 500 м при ширине до 300 м. Глубина оползневых деформаций – до 100 м, а объем грунтов, вовлеченных в смещение, достигает 12 млн. м^3 .

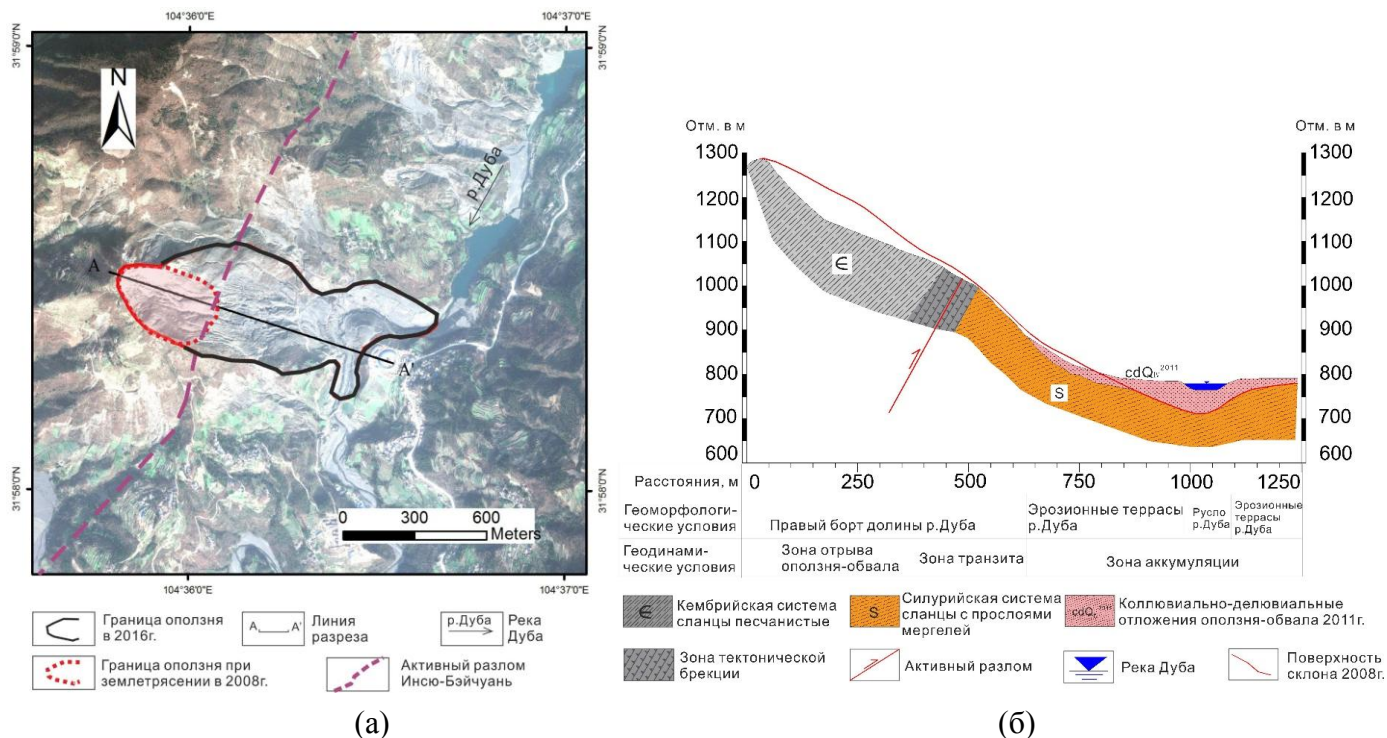


Рис. 15. (а) Схема изучаемого оползня-обвала Шуйцзинянь; (б) инженерно-геологический разрез А-А' оползневого склона.

Анализ устойчивости склона был выполнен по двум схемам – без и с сейсмическим воздействием, в двух вариантах, позволивших оценить влияние на устойчивость склонового массива тектонически раздробленной зоны, прослеживаемой в его средней части. Для расчета количественной оценки устойчивости склона применялся **метод Ямбу**. Расчет устойчивости оползневого склона при сейсмическом воздействии был выполнен на основе **псевдостатического анализа**. Из-за того, что склоновый массив осложнен разломом, при количественной оценке устойчивости склона значение коэффициента сейсмичности принимались равными $K_c = 0.3$. При построении геомеханических схем учитывалось наличие зоны трещиноватости, оказывающей влияние на общую устойчивость склона при землетрясении (рис. 16). Полученные результаты количественной устойчивости склона с учетом сейсмического воздействия и влияния зоны тектонического дробления приведены в таблице 3.

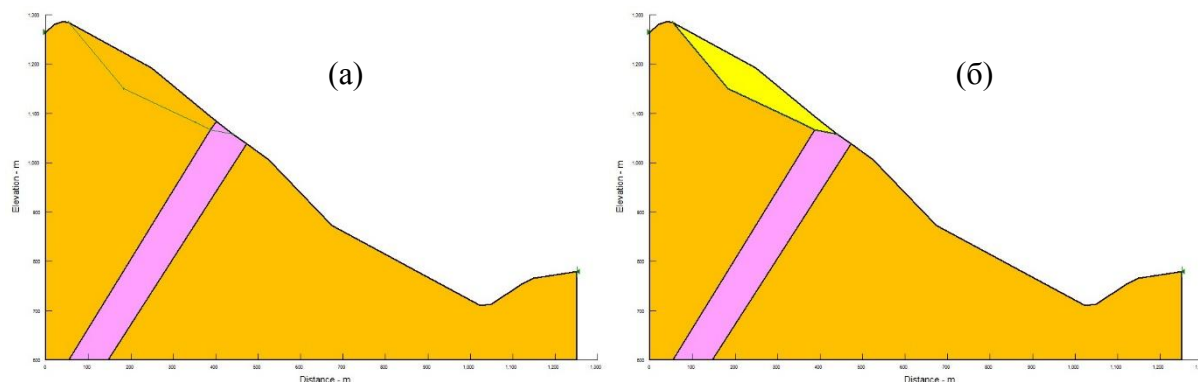


Рис. 16. Геомеханические схемы без учета (а) и с учетом (б) влияния зоны трещиноватости.

Результаты количественной оценки устойчивости склона

	без сейсмического воздействия	с сейсмическим воздействием ($K_c=0,3$)
$K_{уст}$ без учета влияния зоны тектонического дробления	4,18	2,99
$K_{уст}$ с учетом влияния зоны тектонического дробления	1,50	0,91

Оползень-обвал Шуйцзинянь имеет сейсмогенный характер. Выполненная количественная оценка устойчивости склона показала, что наличие в средней части склона зоны тектонического дробления, тяготеющей к взбросу Бэйчуань-Инсю, явилась ключевым фактором потери его устойчивости при Вэньчуаньском землетрясении, т.к. только при сочетании этих условий – наличие ослабленной зоны и сейсмического воздействия, расчетный коэффициент устойчивости становится меньше 1,0. Во всех иных случаях выполненные оценки показали, что склон сохраняет устойчивость ($K_y \gg 1,0$). При отсутствии зоны трещиноватости склон сохранил бы устойчивость в условиях интенсивного сейсмического воздействия.

Для оползня-обвала Шуйцзинянь **динамический анализ** также был выполнен. Полученный результат показывает, что динамический анализ по «**0.65-методу**» позволяет прогнозировать неустойчивость склона ($K_{уст}^{дин}=0,98$) на примере оползня Шуйцзинянь.

Количественная оценка устойчивости сейсмогенного оползня-обвала Шуйцзинянь при **трехмерном моделировании** была выполнена с использованием ПО FLAC с применением метода конечных разностей (рис. 17). При трехмерной оценке устойчивости склона был использован псевдостатический анализ, а значения коэффициента сейсмичности принимались равными $K_c = 0.3$. Полученный коэффициент устойчивости в условиях сейсмического воздействия составил $K_y = 0,93$.

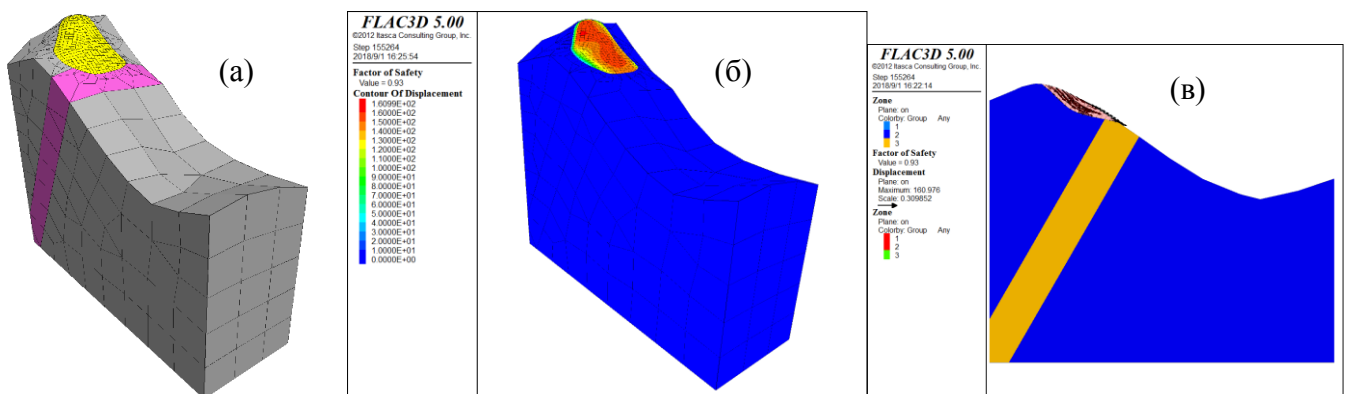


Рис. 17. а) Создание трехмерной модели оползня Шуйцзинянь в ПО FLAC; б) изолинии перемещения и коэффициент устойчивости при землетрясении, полученные методом конечных разностей в среде ПО FLAC ($K_y = 0,93$); в) сечение изолиний перемещения оползня-обвала Шуйцзинянь

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сопоставление инженерно-геологических условий Краснополянской тектонической зоны и эпицентральной зоны Вэньчуаньского землетрясения показало, что они характеризуются близкими современными неотектоническими условиями, представляя собой зоны коллизии с интенсивными тектоническими движениями (до 6-6,5 мм/год) и высокой сейсмичностью. Обе зоны имеют высокую расчлененность рельефа на фоне широкого развития дизъюнктивной тектоники.

Сравнительный анализ природных условий показал, что Сычуаньская зона характеризуется более высокими температурами и влажностью, чем Сочинская зона. Продольный уклон русел и расход рек Сычуаньской зоны значительно больше, чем уклон и расходы рек Сочинской зоны.

В Краснополянской тектонической зоне развиты среднемезозойские полускальные и скальные грунты, в частности, аргиллиты и порфириты. В эпицентральной зоне Вэньчуаньского землетрясения развиты домезозойские скальные грунты, такие как, доломиты и сланцы, отличающиеся высокой прочностью. Однако в зонах тектонического дробления значения прочности значительно падают. Большинство из изученных оползней располагаются именно вдоль сейсмогенных разломов, по которым отмечались подвижки при Вэньчуаньском землетрясении. Полученные результаты анализа характера распространения оползней в эпицентральной зоне Вэньчуаньского землетрясения в условиях интенсивного сейсмического воздействия могут быть использованы (в качестве аналога) при оценке оползневой опасности в Краснополянской тектонической зоне. В частности, следует обратить особое внимание на высокую оползневую опасность территорий, примыкающих к зонам активных разломов в Краснополянской тектонической зоне.

2. Одним из направлений решения проблемы оценки вероятности развития оползневых процессов в рамках количественной оценки устойчивости склонов является применение вероятностного анализа, сущность которого заключается в получении вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости склона в зависимости от вероятностных функций распределения физико-механических характеристик грунтов, слагающих склон и величины сейсмического воздействия.

В настоящей работе использован подход, основанный на определении вероятностной функции распределения величины сейсмического воздействия на основе данных акселерограммы. Использование вероятностного анализа при количественной оценке устойчивости склонов, предложенное в диссертационной работе, позволяет установить функциональную взаимосвязь между получаемыми

величинами коэффициентов устойчивости и вероятностью развития оползневого процесса.

3. Анализ чувствительности при количественной оценке устойчивости склонов позволяет выявить зависимость устойчивости склонов от изменчивости факторов оползнеобразования. Особую роль анализ чувствительности устойчивости склонов к воздействию факторов, на нее влияющих, играет в условиях, когда микрорельеф, физико-механические параметры грунтов и величины сейсмического воздействия характеризуются существенной изменчивостью, что позволяет оценить вклад каждого из рассматриваемых параметров в изменение устойчивости склона. Результаты оценки устойчивости склонов рассматриваемых территорий, полученные с использованием анализа чувствительности устойчивости склонов к воздействию факторов, на нее влияющих, показали существенное влияние выбора значений коэффициента сейсмичности.

4. В представленной работе реализованы современные подходы к количественной оценке устойчивости склонов при сейсмическом воздействии. Сейсмическое воздействие оценивалось с использованием псевдостатического и динамического анализа. Количественные оценки устойчивости склонов с учетом сейсмического воздействия, полученные при динамическом анализе с применением «0.65-метода», предложенного в КНР, сопоставимы с результатами оценок устойчивости, полученными при использовании псевдостатического анализа, и являются более реалистичными. Однако, по сравнению с итоговыми оценками, выполненными с применением псевдостатического анализа, результаты по «0.65-методу» оказываются более обоснованными, благодаря учету акселерограмм, которые позволяют принимать во внимание фактические сейсмические ускорения.

Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных п. 2.3

Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, опубликованных автором по теме диссертации:

1. **Кан К.**, Зеркаль О.В. Применение вероятностного анализа при количественной оценке устойчивости склона//Инженерная геология. – 2017. – № 4. – С.18-26.
2. **Кан К.**, Зеркаль О.В., Фоменко И.К., Пономарев Ан.Ал. Современные подходы к количественной оценке устойчивости склонов при сейсмическом воздействии//Инженерная геология. – 2018. – №8(1-2). – С.72-85.
3. Зеркаль О.В., Фоменко И.К., **Кан К.** Оценка устойчивости склонов в условиях сейсмического воздействия//Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – №4. – С. 32-35.

Публикации в иных научных изданиях:

1. **Кан К.**, Лю Ц., Зеркаль О.В. Псевдостатический анализ сейсмогенного оползня Шуйцзинянь при Вэньчуаньском землетрясении 2008 г.// Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения: Материалы научно-практической конференции, 13-14 апреля 2017 г. – М.: Геомаркетинг. – 2017. – С. 167–174.
2. **Кан К.**, Зеркаль О.В., Лю Ц. Сравнительный анализ учета сейсмического воздействия при количественной оценке устойчивости склонов в России, Китае и Европе//Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: XIII Общероссийская научно-практическая конференция и выставка (29.11-01.12.2017 г. Москва). – М.: Изд-во Геомаркетинг, – 2017. – С. 533-540.
3. **Кан К.**, Зеркаль О.В. Оценка устойчивости сейсмогенного оползня на основе трехмерного моделирования при землетрясении//Научный альманах. – 2018. – № 9-2(47). – С.119-122.
4. **Kang K.**, Zerkal O.V., Liu J., Huang S., Tao D. Comparison of Russian, Chinese and European seismic design on pseudo-static seismic coefficient in slope analysis//Journal of Civil Engineering and Construction. – 2018. – vol.7(2). – pp.57-62.
5. **Kang K.**, Zerkal O.V., Huang S.Y., Ponomarev A.A. Roadway Slope Stability Assessment in mudstone layers of Sochi (Russia)//Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proc. of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. – 2018. – № 2. – pp.1217-1222.