

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

На правах рукописи

Белов Олег Дмитриевич

ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ
ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ ВАЛОВ ДЛЯ БОРЬБЫ С КАМНЕПАДОМ С
БОРТА КАРЬЕРА

2.8.3 - «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика,
маркшейдерское дело и геометрия недр»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор
Черепецкая Елена Борисовна

Москва, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Анализ современного состояния исследований камнепадных процессов	7
1.1 Предпосылки исследования камнепадных процессов	7
1.2 Причины возникновения камнепадов и методы оценки рисков	15
1.3 Численное моделирование движения обломка	19
1.4 Численное моделирование противокамнепадных конструкций	29
1.5 Выбор программного обеспечения для численного моделирования движения обломков по борту карьера.....	31
1.6 Постановка задач исследования	42
2 Определение влияния формы обломка на его максимальную кинетическую энергию.....	44
2.1 Предварительные аналитические оценки параметров движения	44
2.2 Проведение моделирования процессов движения обломков различных форм	48
Выводы к главе 2	58
3 Определение влияния высоты уступа и угла наклона на максимальную кинетическую энергию обломка эквивалентной формы	61
Выводы к главе 3	68
4 Расчет энергии поглощения предохранительных противокамнепадных валов с учетом их геометрических и геотехнических параметров.....	69
Выводы к главе 4.....	83
Заключение	85
Список использованных источников	87
Приложение А Методика расчета параметров предохранительных валов для борьбы с камнепадом с борта карьера	101
Приложение Б Справка о внедрении результатов диссертационного исследования.....	124

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. На сегодняшний день тематика камнепадов, оползней, обрушений и обвалов является одной из наиболее актуальных при ведении открытых горных работ, что обусловлено потенциальной опасностью, которую они представляют для людей и техники. Также важность исследования процессов камнепадов связана и с малой изученностью данного вопроса. Анализ отечественных и зарубежных источников показал, что вопрос изучения камнепадов стал активно подниматься только в последние несколько лет, причем в российской литературе основная часть исследований посвящена авто- и железнодорожной отрасли, в то время как в зарубежной литературе эта тематика освещается применительно и к горнодобывающей промышленности.

Следует также отметить, что с каждым годом число камнепадов неуклонно растет. Это связано с климатическими изменениями и, в первую очередь, с изменением градиента температур, что увеличивает ширину раскрытия трещин в массивах горных пород и приводит к росту числа камнепадов.

На основании вышесказанного становится очевидным, что разработка метода, позволяющего обосновывать оптимальные характеристики противокаменепадных конструкций, является актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является разработка метода расчета параметров предохранительных валов при камнепадах с бортов карьеров при ведении открытых горных работ на основе численного моделирования кинематических, динамических и энергетических характеристик движения обломков.

Основная идея работы заключается в установлении закономерностей движения обломков камнепада в зависимости от геометрии склона и характеристик обломков для обоснования оптимальных характеристик предохранительных валов.

Основные научные положения и их новизна:

1. Установлено, что наибольшей максимальной кинетической энергией при движении обломков камнепада с отскоком от склона при прочих равных параметрах обладает обломок эквивалентной формы.

2. Получены регрессионные зависимости максимальной кинетической энергии обломка эквивалентной формы от его объема для различных углов наклона и высот уступов на участке склона в диапазонах объемов от 0,5 до 10 м³, необходимые для проектирования предохранительных валов.

3. Разработан метод расчета параметров предохранительных валов, основанный на учете максимальной кинетической энергии обломка, позволяющий определить предельную энергию поглощения на основании конструкционных и геотехнических параметров.

Научная новизна работы заключается в:

- определении влияния формы обломка камнепада при прочих равных параметрах на его максимальную кинетическую энергию;
- установлении регрессионных зависимостей максимальной кинетической энергии обломка эквивалентной формы от угла наклона и высоты уступа для объемов от 0,5 до 10 м³,
- разработке метода расчета параметров предохранительных валов для борьбы с камнепадом с борта карьера и методики на его основе, которые позволяют рассчитать оптимальные параметры предохранительных валов для борьбы с камнепадом с борта карьера на основе прогнозируемых значений максимальной кинетической энергии обломка.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается сходимостью результатов моделирования, полученных с помощью программного комплекса RAMMS: Rockfall, с аналитическими расчетами и эмпирическими данными; высокой сходимостью значений максимальной кинетической энергии обломка, полученных по выведенным регрессионным моделям, с результатами численного моделирования.

Методы исследований включали анализ и обобщение результатов исследований в рассматриваемой области, приведенных в современной отечественной и зарубежной литературе; численное моделирование камнепадов в специализированном программном комплексе RAMMS: Rockfall; моделирование предохранительных валов в программном комплексе Plaxis 3D.

Научная значимость работы заключается в разработке метода расчета параметров предохранительных валов, основанного на учете максимальной кинетической энергии обломка.

Практическая значимость работы заключается в разработке методики, позволяющей обосновать оптимальные геометрические и геотехнические параметры предохранительных валов на основе прогнозируемых значений максимальной кинетической энергии обломка, что существенно сократит временные и финансовые издержки на проектирование, а также уменьшит число несчастных случаев и повреждений специализированного оборудования и техники.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на XXXII Международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2024» (29.01.2024-02.02.2024, г. Москва, Россия); VII Международной научно-технической конференции «Горная геология, геомеханика и маркшейдерия» (23.10.2024-24.10.2024, г. Донецк, Россия), XXXIII Международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2025» (03.02.2025-07.02.2025, г. Москва, Россия), XII Международной научно-практической конференции: World of Science (30.04.25 г. Пенза, Россия), VII Международной научно-практической конференции: Актуальные вопросы, науки, общества и образования (05.09.25, г. Пенза, Россия)

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 6 печатных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, 3 из которых соответствуют профилю защищаемой диссертации.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и 2 приложений, изложенных на 124 страницах текста, включает 40 иллюстраций, 19 таблиц, 114 литературных источников.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность научному руководителю Черепецкой Елене Борисовне за сопровождение работы, ценные советы и обсуждение, к.т.н., доценту кафедры физики Блохину Дмитрию Ивановичу за конструктивные замечания и предложения по численному моделированию движения обломков, Tatjana Scherrer и команде Team RAMMS за предоставление некоммерческой лицензии программного комплекса RAMMS:Rockfall, а также заведующему кафедры ФизГео Винникову Владимиру Александровичу за ценные замечания и предложения.

1 Анализ современного состояния исследований камнепадных процессов

1.1 Предпосылки исследования камнепадных процессов

Камнепад является одним из наиболее опасных явлений из-за его непредсказуемости, высокой скорости движения обломков и наносимого ущерба. Камнепад представляет собой отделение каменного блока (или нескольких) от вертикального или квазивертикального склона с последующим быстрым движением вниз, характеризующимся свободным падением, отскоком, качением и скольжением [1,2].

Публикация [1] представляет собой одно из ранних фундаментальных исследований в области оценки потенциальных рисков камнепадов и методов их контроля. К ключевым аспектам данной работы можно отнести следующее:

произведен анализ причин и факторов камнепадов, рассмотрены геологические, гидрогеологические и антропогенные факторы, способствующие образованию камнепадов;

заложены основы методов оценки рисков – предложены подходы к мониторингу и прогнозированию камнепадов, включая анализ общей устойчивости склонов;

рассмотрены возможные методы защиты – барьеры различных видов, укрепление склонов, проанализирована эффективность каждого способа и их ограничения;

подготовлены практические рекомендации по мерам защиты от камнепадов и их адаптации к конкретным условиям.

По сравнению с другими видами опасных явлений камнепады не получили такого освещения в технической литературе [2,3]. Однако из-за усложнения условий разработки месторождений открытым способом в сейсмоопасных регионах число проводимых исследований по тематике камнепадов неуклонно растет. Одной из главных причин роста проводимых

исследований стало увеличение числа происшествий с участием камнепадов [4-8].

Работа [2] посвящена анализу рисков камнепадов на автомобильных дорогах в условиях холодного засушливого климата на примере Синьцзян-Уйгурского автономного района в Китае. Основной акцент делается на влияние экстремальных климатических условий на устойчивость склонов. Авторы применяют комплексный подход, сочетающий полевые исследования с численным моделированием для прогнозирования траекторий падения обломков, и предлагают защитные меры (барьеры, укрепление склонов), которые учитывают специфику климатических условий. Работа демонстрирует переход от традиционных методов к цифровым технологиям в оценке рисков, подчеркивая важность учета региональных климатических и геоморфологических факторов при оценках рисков и проектировании защитных сооружений.

В публикации [3] представлены основные результаты в исследовании камнепадов, опубликованные с 2004 по 2009 в журнале Landslides. Авторами произведена систематизация понимания механизмов формирования камнепадов, методов контроля и мониторинга, прогнозирования, а также подходов к снижению потенциальных рисков. Особое внимание уделяется методам численного моделирования, дистанционному зондированию при помощи лидаров и внедрению систем раннего оповещения. Отдельно рассмотрено влияние климатических условий и их изменения на частоту камнепадных процессов.

Современные исследования единогласно подтверждают значительное влияние изменения климатических условий на активизацию камнепадов в горных регионах. В горном массиве Монблан зафиксировано удвоение частоты камнепадов с конца Малого ледникового периода (середина 19 века) [4]. Прямая корреляция между повышением температур и дестабилизацией скальных склонов выявлена в Альпах, где потепление на 1-2°C привело к увеличению числа камнепадов от 30 до 50% [5]. Ключевым фактором

дестабилизации является деградация мерзлоты - процесс оттаивания и сокращения площади многолетних мерзлых пород с устойчивым повышением среднегодовой температуры. Так, например, экстремальные летние температуры в 2003 и 2015 годах вызывали таяние льда в трещинах скал, что стало причиной обильных камнепадов [8]. Аналогичные процессы зафиксированы в Восточных Альпах, где потепление существенно снизило устойчивость склонов [6]. Современные исследования показывают, что снижение устойчивости склонов и повышение частоты камнепадов, вызванное климатическими изменениями носит всеобщий характер [7].

Защита людей и инфраструктуры от камнепадов является одной из наиболее сложных задач [9–11]. Для этой цели решающую роль играют процедуры оценки риска образования камнепада [12-15]. Поэтому исследования, связанные с камнепадами, имеют большое значение для прогнозирования и снижения риска данного явления, а также для улучшения возможностей смягчения его последствий. За последние четыре десятилетия в научной литературе для оценки опасности и риска падения камней предложены различные качественные и количественные подходы. Выбор между качественной и количественной методологией оценки возможных рисков связан в основном с имеющимся набором данных.

Всего исследования по изучению камнепадов можно разделить на 3 этапа:

Этап I: (1969–2001 гг.)— Этот этап выделяется тем, что его публикации заложили основные критерии оценки опасности камнепадов [16,17].

Статья [16] посвящена оценке дальности падения скальных обломков при помощи физического моделирования. Автор анализирует и предлагает альтернативу критерию Ричи (Ritchie criteria), который традиционно используется для оценки зон риска при камнепадах. Исследование базируется на трехмерных цифровых моделях рельефа (Digital Elevation Model) и вводит новые параметры, влияющие на конечную точку остановки обломков:

начальная скорость обломка, угол наклона склона, шероховатость поверхности и др.

Используя численные методы моделирования, автор демонстрирует, что классические эмпирические критерии (вроде модели Ричи) не всегда отражают реальную картину распространения обломков. Поэтому физически ориентированный подход предлагает более гибкую и точную оценку возможных зон поражения. В статье подчеркивается важность калибровки модели с использованием полевых данных, а также учитывается влияние степени эрозии поверхности и особенностей рельефа. Работа делает важный вклад в улучшение систем оценки риска камнепадных процессов.

Статья [17] посвящена количественной оценке опасности камнепадов на автомобильных дорогах и описывает реальный случай, произошедший на трассе Highway 99 в Британской Колумбии. Авторами предлагается новый метод оценки опасности камнепадов Rockfall Hazard Rating System (RHRS), который заключается в разделении откоса на дискретные участки с различными уровнями опасности. Для определения уровня опасности того или иного участка оцениваются следующие критерии: возможный объем обломков, высота потенциальной точки падения, прогнозируемая частота камнепадов, геологические особенности склона (тип породы, степень эрозии, трещиноватость), угол наклона, наличие защитных сооружений (барьеры, рвы), трафик и состав транспортного потока. Таким образом, авторами предлагается новый подход к оценке потенциальной опасности склонов вблизи транспортной инфраструктуры, а также выявляется перечень данных, необходимых для произведения расчетов.

Этап II:(2002–2016 гг.). —На данном этапе превалируют статьи, посвященные численному моделированию камнепадов [18,19], оценке рисков [20,21] и противокамнепадной защите [22, 23].

В статье [18] авторы рассматривают работу в программном комплексе STONE, предназначенном для численного моделирования движения обломков камнепадов на основе цифровой модели рельефа (Digital Elevation Model),

получаемой в результате топографической съемки. Программа позволяет определять скорость движения обломков в процессе движения, высоту отскока и кинетическую энергию. Авторами проведена серия моделирований движения обломков по крутым склонам с углами наклона от 60 град., валидация численных моделей проводилась при помощи эмпирических данных, полученных по реальным камнепадам в Йосемитской долине с 1857 по 2002 годы.

В работе [19] авторами рассматривается трехмерная численная модель движения обломка камнепада с высоким разрешением на основе цифровой модели рельефа, что позволяет существенно увеличить точность моделирования. Данная модель позволяет оценить скорость движения обломков и высоту отскока в процессе движения.

Авторы [20] предлагают количественный подход к оценке остаточного риска камнепадов (residual risk) — то есть риска, сохраняющегося после установки защитных сооружений (сеток, барьеров и ловушек). Исследование проведено на одном из склонов в Пиренеях, где уже ранее были установлены сетчатые барьеры. Модель оценивает, насколько эти меры эффективны и какой риск остаётся для людей, имущества и инфраструктуры. Методика, разработанная авторами, позволяет выделить потенциальные точки отделения обломков, их размеры, вероятность падения, а также траектории движения, при помощи численного моделирования определяются скорость движения обломков и высота отскока, оценивается возможность сетчатых барьеров остановить блоки определенного размера при заданной скорости, проверяется вероятность разрушения барьера обломком, на основании вышеперечисленных факторов определяется остаточный риск. По результатам проведения исследования авторами выявлено, что минимальный остаточный риск от камнепадов сохраняется даже после установки специальных сетчатых барьеров.

В работе [21] авторами произведена комплексная оценка опасности камнепадов в Йосемитской долине на основании данных, полученных по

реальным камнепадам, произошедшим с 1857 по 2002. Как и в исследовании [18], авторы публикации используют программный комплекс STONE, с помощью которого формируется каталог из 392 камнепадов. Для каждого камнепада проанализированы точки начала камнепада, объемы обломков, частота и влияние климатических условий. По результатам исследования была построена карта Йосемитской долины, которая определяет опасность камнепадов на каждом участке автомобильной дороги, при этом выявлено, что 31 % всей транспортной инфраструктуры находится в зоне умеренного риска и еще 14 % в зоне высокого риска.

В статье [22] авторами производится серия из 218 натурных экспериментов, заключающихся в определении влияния деревьев на движение обломков. Полученные данные впоследствии были использованы при создании программного комплекса RockyFor3D. Специальные блоки объемом $0,5 \text{ м}^3$, имитирующие обломки, спускали с различных участков склонов с деревьями и без. Выявлено, что наличие деревьев на пути движения обломка в среднем уменьшает его максимальную скорость на 26% и высоту отскока на 33%.

В публикации [23] авторами впервые вводится термин дендрогеоморфология, который служит для оценки пространственно-временного распределения камнепадов в швейцарских Альпах по анализу особенностей и повреждений деревьев на склонах, характеризующихся высокой частотой камнепадов по данным с 1600 по 2002 годы. Всего было изучено 135 лиственных деревьев, из которых изъяли 564 керна. На основании анализа кернов была выявлена 741 аномалия на годовичных кольцах (деформации, накопления смол, изменения ствола, различные наросты), которые по мнению авторов образовались в результате столкновения обломка с деревом. Исследуемая зона была разбита на 2 участка: южную и северную часть склона. Выявлено, что частота камнепадов на южной стороне склона в 2,5 раза превышает аналогичную за расчетный период для северной. Также определено, что наибольшее число камнепадов происходит в весеннее время,

что обуславливается циклом замораживания-оттаивания влаги, находящейся в трещинах горных пород на склонах.

Этап 3 (2017-2025 гг.) –появляются статьи, посвященные съемке с БПЛА [24], определению источника камнепада при помощи лидарной съемки и ГИС-систем [25].

В статье [24] представлено комплексное исследование сейсмогенного камнепада на острове Лефкада в Греции, где авторы применяют инновационные методы дистанционного зондирования при помощи беспилотных летательных аппаратов для детального картирования зон обрушения. Это позволило воссоздать рельеф склона с высоким разрешением и идентифицировать зоны повышенной опасности. По результатам съемки была создана цифровая модель рельефа и проведено численное моделирования движения обломков с последующей оценкой кинетической энергии каждого из них. Особое внимание в данной работе было уделено влиянию сейсмической активности на частоту камнепадных процессов. Выявлено, что даже умеренные землетрясения с магнитудой до 6,5 баллов по шкале Рихтера могут являться причиной масштабных камнепадов на склонах с низкой устойчивостью. Важным практическим результатом данного исследования стала разработка методологии оценки рисков, которая сочетает в себе современные технологии дистанционного зондирования и численного моделирования.

В публикации [25] авторами представлен новый подход к идентификации зон возникновения камнепадов при помощи лидарного сканирования, ГИС-технологий и машинного обучения. Исследование демонстрирует эффективность предложенного подхода в определении потенциальных зон возникновения камнепадов с точностью до 89,7 %, что существенно превосходит существующие методы. Особое внимание в данной работе уделено обработке больших массивов данных, полученных в результате лидарной съемки с последующим созданием на их основе цифровой модели рельефа. Практическая ценность работы заключается в

создании автоматизированной системы оценки рисков, адаптированной для сложных горных территорий, что подтверждено тестированием на участках с различными геологическими условиями.

В отечественной литературе исследования камнепадов в основном связаны с автодорожной и железнодорожной областями [26-30], исследования по камнепадам в области ведения открытых горных работ представлены лишь несколькими публикациями [31-35].

Представленные публикации охватывают ключевые аспекты проектирования и применения защитных систем от камнепадов в различных географических и геологических условиях. Работы [26, 27] посвящены практическому опыту борьбы с камнепадами на автомобильных дорогах в России, в частности в Приморском крае, где авторами произведен анализ эффективности различных решений по борьбе с камнепадами. В статье [27] особое внимание уделено адаптации методов защиты к специфике регионов с высокой влажностью и интенсивными осадками.

В работе [28] авторы подчеркивают необходимость комплексного подхода к защите горных дорог в Непале, где камнепады представляют серьезную опасность для людей и транспортной инфраструктуры. Авторы публикации предлагают сочетание пассивных (сетчатые барьеры и предохранительные валы) и активных (оценка рисков и мониторинг) мер с учетом ограниченных ресурсов региона. Работа [29] сфокусирована на оценке надежности гибких защитных систем (жестких и динамических сетчатых барьеров). В работе [30] показано применение решений компании «Маккаферри» для защиты объектов у скальных уступов, включая расчет устойчивости и оптимального технического решения по драпировке откоса.

Публикации [31-35] охватывают основные аспекты обеспечения безопасности при ведении открытых горных работ и защите от камнепадов. В работе [31] анализируются гравитационные аспекты безопасности, подчеркивается важность учета геомеханических характеристик массива при проектировании уступов. Авторы предлагают методику оценки устойчивости

бортов с учетом динамических нагрузок. Работы [31,32] посвящены специализированным решениям по защите карьерных дорог от камнепадов и обрушений при помощи выявления потенциально опасных участков. В исследованиях [34, 35] рассматривается моделирование обвалов и селей при ведении открытых горных работ в программном комплексе Flow-R с созданием цифровой модели рельефа.

Таким образом, на сегодняшний день все статьи можно разделить на три большие категории - первая группа описывает причины возникновения камнепадов и методы оценки рисков, вторая посвящена численному моделированию движения обломков, третья описывает меры по борьбе с камнепадами. Каждая из этих групп рассмотрена в следующих разделах.

1.2 Причины возникновения камнепадов и методы оценки рисков

На сегодняшний день не существует метода, который позволяет точно предсказать время возникновения и характеристики обломков, что обусловлено большим комплексом причин, влияющих на вероятность данного процесса. При этом основными причинами, влияющими на вероятность наступления камнепада, являются: трещиноватость массива, сейсмическая активность региона, климатические особенности, степень эрозии поверхности, антропогенные факторы и другие.

Согласно современной классификации причины возникновения камнепадов можно разделить по природе возникновения на естественные и техногенные, а также по времени воздействия на кратковременные и длительные [36].

Одной из наиболее распространенных причин возникновения камнепадов является высокая сейсмическая активность. Землетрясения способствуют нарушению целостности массива горных пород, образованию трещин и являются катализатором для возникновения камнепадов [37-40]. Рассматриваемые исследования посвящены комплексному изучению роли

землетрясений в активизации камнепадной активности. Работа [37] предлагает инновационный подход к анализу устойчивости опасных скальных массивов, сочетающий полевые наблюдения с численным моделированием движения обломков камнепадов при сейсмических воздействиях. Авторы выявили три ключевых механизма дестабилизации: резонансные колебания, локальные пластические деформации и нарушение целостности массива. В работе [38] представлена статистическая модель оценки вероятности камнепадов на основе анализа 120 исторических землетрясений в Альпах. Установлено, что 78% событий происходят при землетрясениях с магнитудой выше 6 баллов по шкале Рихтера, с экспоненциальным ростом частоты при увеличении магнитуды. В работе [39] проанализирована динамика камнепадной активности до, во время и после землетрясений в городе Кентербери в Англии в 2010 и 2011 годах. Выявлен 20-кратный рост частоты событий в период сейсмической активности с последующим постепенным возвращением к изначальным значениям в течение 5-7 лет. В публикации [40] авторы предложили физическую модель оценки опасности камнепадов на основе данных по сейсмической активности для территории Италии.

Вторым критерием, влияющим на частоту возникновения камнепадов, являются климатические условия. Под климатическими условиями в данном случае подразумевается среднегодовая, минимальная и максимальная температуры и количество осадков в теплое и холодное время года. Согласно последним исследованиям, количество камнепадов за расчетный период времени напрямую связано со средней температурой воздуха, толщиной снежного покрова в зимнее время и изменением градиента температур [41-44]. Исследования [41, 42] описывают взаимодействие термических и механических процессов в многолетнемерзлых скальных массивах. В работе [41] предложена модель, объясняющая, как циклическое замерзание-оттаивание и термические напряжения снижают прочность горных пород, приводя к образованию трещин и постепенной дестабилизации склонов. Публикация [42] дополняет эти выводы, демонстрируя, что пространственно-

временная изменчивость снежного покрова существенно влияет на температуру внутри массива мерзлых горных пород. Установлено, что снег действует как изолятор, замедляющий промерзание и способствующий неравномерному распределению температур, что усиливает механические напряжения в массиве и снижает общую устойчивость склона. Наименьшая вероятность камнепада наблюдается в холодное время года без осадков, в то же время значительная толщина снежного покрова или обильные осадки, предшествующие заморозкам, повышают вероятность камнепадов за счет создания дополнительной нагрузки на поверхность и водонасыщения систем трещин соответственно [43].

В работе [44] применяются методы лазерного сканирования для анализа связи между климатическими условиями и камнепадами. В исследовании выявлена четкая корреляция между экстремальными температурными колебаниями, осадками и активизацией обрушений, что подтверждает важность метеорологического мониторинга для оценки рисков камнепадов.

Третьей причиной возникновения камнепада является водная и ветровая эрозия поверхности. Согласно исследованиям [45-54] эрозия является одной из первоочередных причин возникновения камнепадов, наряду с сейсмической активностью и климатическими условиями.

В работе [45] авторы демонстрируют зависимость интенсивности оползневой эрозии от механических свойств пород. В работе количественно показано, что слабые породы (глинистые сланцы) подвергаются эрозии в 3-5 раз интенсивнее, чем устойчивые (граниты), формируя характерные пологие склоны за счет постоянного оползневого выноса материала.

В работе [46] показано снижение темпов эрозии горных пород на 15-20% в условиях глобального потепления, связывая это с сокращением числа циклов замерзания-оттаивания.

В работе [47] установлена четкая высотная зональность эрозии: нижние части склонов (до 2000 м) показывают 2-3-кратное увеличение степени эрозии

по сравнению с верхними (от 2000 до 3000 м) из-за более интенсивного температурного воздействия.

В работе [48] произведена количественная оценка эрозии горных пород в Гималаях с интенсивностью в 0,8-1,2 мм/год, причем 60% этого объема обеспечивается морозным выветриванием, что вызывает серьезное снижение устойчивости склонов и повышает вероятность камнепадов.

В работах [49,50] проанализировано влияние волновой эрозии на устойчивость со скоростью до 5 см/год, что также существенно влияет на общую устойчивость склонов и провоцирует обрушения.

В работе [51] задокументированы последствия тайфуна Моракот, обрушившегося на юго-восточную Азию в 2009. За 3 дня тайфуна выпала четверть годовой нормы осадков, что привело к пятидесятикратному росту эрозионной активности и увеличению случаев камнепадов.

Согласно исследованию [52], сформированному на основе десятилетних наблюдений за эрозионной активностью в Канаде, выявлено, что эрозия со средней скоростью 0,3-0,5 мм/год на участке склона высотой 100 метров в среднем вызывает 2,5 камнепада в год.

Работа [53] представляет фундаментальное исследование взаимосвязи между сейсмической активностью, камнепадами и эрозией горных склонов. Авторы разработали статистическую модель, количественно оценивающую вклад землетрясений в общий объем эрозионных процессов в сейсмоактивных регионах, а также описывающую влияние вышеперечисленных факторов на устойчивость склонов.

Согласно исследованию [54] выявлено, что на склонах, покрытых растительностью и защищенных от эрозионных процессов, при схожих значениях естественной трещиноватости наблюдается до 25% меньше камнепадов за идентичный временной промежуток.

1.3 Численное моделирование движения обломка

За последние двадцать лет значительная часть публикаций посвящена численному моделированию и прогнозированию последствий камнепадов [55-72], причем в основном используются следующие программные комплексы: Flow-R, RocFall, Rockfall Analyst, RockyFor3D и RAMMS:Rocfkall.

Наиболее простым из вышеперечисленных является программный пакет Flow-R, который базируется на эмпирической 2D модели, разработанной в среде MathLab. Модель учитывает топографические особенности рельефа местности и позволяет рассчитать дальность полета обломков, которые рассматриваются как материальные точки [67,68].

В статье [67] представлена разработка и апробация программного комплекса Flow-R, предназначенного для регионального картирования подверженности территорий гравитационным процессам, включая камнепады, сели и обвалы. Авторы детально описывают алгоритмы работы модели, основанные на анализе цифровых моделей рельефа с учетом трех ключевых параметров: уклона местности, кривизны поверхности и гидрологических особенностей. Особое внимание уделено методике калибровки модели, позволяющей адаптировать ее к различным геоморфологическим условиям. Тестирование программного комплекса проведено на примере конкретного горного массива в Швейцарских Альпах на площади 100 км², где достигнута точность прогнозирования опасных зон 82-89%. Важным преимуществом Flow-R является его открытый исходный код и возможность интеграции с распространенными GIS-пакетами, что делает его удобным инструментом для оценки природных рисков на больших территориях. Авторы подчеркивают, что разработанный подход особенно эффективен для предварительного выявления потенциально опасных участков на ранних стадиях территориального планирования.

Исследование [68] посвящено разработке полуавтоматизированного метода картирования подверженности склонов селевым процессам и паводкам

с использованием цифровой модели рельефа и программного обеспечения Flow-R. Авторы предлагают усовершенствованную методику, сочетающую автоматизированный анализ геоморфологических характеристик местности с экспертной оценкой. В работе детально описана процедура обработки цифровых моделей рельефа с разрешением 2 м, включая данные для моделирования в Flow-R. Особое значение имеет предложенный авторами алгоритм верификации результатов, основанный на сравнении с историческими данными о селевых событиях. Применение методики продемонстрировано на примере горных районов Канады, где достигнута точность идентификации опасных зон около 85%. Важным выводом исследования является подтверждение эффективности комбинации автоматизированных расчетов и экспертного анализа для повышения достоверности прогнозов, особенно при работе с крупномасштабными проектами.

В пакетах RocFall и Rockfall Analyst, описывающих плоское движение обломков, также рассматриваются перемещения сосредоточенных масс. Обе программы основаны на законах движения и теории столкновений и позволяют рассчитать кинетическую энергию, конечные точки падения и высоту отскока обломков в каждой точке профиля [58,69,70].

В [58] работе представлено специализированное расширение для ArcGis- RockFall Analyst, позволяющее проводить трехмерное моделирование камнепадов. Авторами разработан подход, сочетающий вероятностный анализ траекторий с пространственным распределением обломков. Программный инструмент использует цифровые модели рельефа высокого разрешения (до 1 м/пиксель) для расчета. Алгоритм учитывает несколько ключевых параметров: начальные условия отрыва, свойства материала, топографические особенности. Особенностью метода является возможность обработки до 100 000 траекторий с последующей генерацией карт опасности. Модель была успешно апробирована, показав точность 95% в определении зон риска.

Разработанное решение особенно ценно для инженерно-геологических изысканий при проектировании инфраструктуры в горных районах.

Исследование [69] посвящено анализу устойчивости гравийных склонов с использованием программного комплекса RocFall. Авторы детально изучили влияние геометрических параметров склона (высота до 80 м, угол наклона 30-50 град.) на динамику камнепадов. Особое внимание уделено оценке эффективности защитных барьеров, которая, как показали расчеты, снижается на 40% при углах склона более 45 град. В работе представлена методика калибровки модели по данным полевых наблюдений, позволившая достичь точности моделирования до 85%. Практическая значимость исследования заключается в разработке рекомендаций по оптимальному расположению защитных сооружений с учетом литологических особенностей рыхлых отложений. Результаты особенно актуальны для районов с интенсивным выветриванием и высокой селевой активностью.

В статье [70] представлены результаты численного моделирования траекторий камнепадов на основе цифровых моделей рельефа. Авторы установили, что 70% кинетической энергии теряется в первых 3-5 ударах обломков о склон, при этом максимальная высота отскока коррелирует с углом наклона поверхности. Исследование выявило неравномерное распределение энергии вдоль траектории движения, что имеет важное значение для проектирования защитных сооружений. Модель была верифицирована на примере склонов в провинции Сычуань (Китай) с погрешностью менее 12%.

Наиболее полными пакетами программ на сегодняшний день являются RockyFor3D и RAMMS: Rockfall.

Rockyfor3D базируется на имитационной модели, которая дает возможность рассчитывать траектории отдельных падающих камней в пространстве. Модель сочетает в себе физически обоснованные детерминированные алгоритмы со стохастическим подходом, что делает Rockyfor3D так называемой «вероятностной моделью траектории камнепада».

В исследовании [65] представлен комплексный сравнительный анализ трех современных программных комплексов для моделирования камнепадов - Flow-R, Rockyfor3D и RAMMS:Rockfall - на примере конкретного горного массива Мель де ля Нива в Швейцарских Альпах. Работа основана на детальном полевом исследовании с использованием БПЛА-съемки высокого разрешения (5 см/пиксель), что позволило создать точную цифровую модель рельефа для последующего моделирования. Авторы разработали методику сравнения, включающую оценку 12 ключевых параметров, таких как дальность полета обломков, распределение кинетической энергии, определение зон максимального риска и временные затраты на вычисления. Результаты показали, что каждый из протестированных программных продуктов имеет свои преимущества: Flow-R продемонстрировал эффективность при обработке больших территорий (обработка 100 км² за 2 часа) и выявлении потенциальных зон отрыва, но при этом показал расхождение до 35 % при сравнении эмпирических данных и результатов моделирования. Rockyfor3D показал наилучшие результаты при моделировании участков с большим количеством деревьев (точность 85%), благодаря уникальному алгоритму учета влияния растительности на траектории движения обломков. Моделирование в RAMMS: Rockfall показало максимальной точностью в расчетах энергии (расхождение менее 10%) и моделировании взаимодействия между обломками, что особенно важно для проектирования защитных сооружений. В работе также представлены конкретные практические рекомендации по калибровке параметров для каждого программного комплекса в зависимости от конкретных условий местности. Полученные результаты имеют значительную практическую ценность, позволяя осознанно выбирать оптимальный инструмент моделирования в зависимости от поставленных задач.

Наиболее совершенная 3D модель реализована в RAMMS: Rockfall, в которой каждый обломок рассматривается как абсолютно твердое тело неправильной формы. Предполагается, что каждый элемент камнепада

обладает тремя степенями свободы поступательного движения и тремя степенями свободы вращательного. Учитываются три силы сопротивления (силы трения скольжения и качения со стороны поверхности взаимодействия и сила сопротивления, пропорциональная скорости, действующая со стороны окружающей среды). Параметрами, определяющими движение, являются масса, три проекции момента инерции на оси координат, а также три проекции поступательной и вращательной скоростей.

В исследовании [71] авторы разработали математическую модель, учитывающую не только традиционные параметры вращения, но и эффекты удара и трения, что позволило значительно повысить точность прогнозирования траекторий каменных обломков. Особое внимание уделено анализу хаотического поведения обломков сложной формы при их движении по склону. Теоретические выкладки подтверждены экспериментальными данными с использованием высокоскоростной съемки, показавшими хорошее соответствие между расчетными и наблюдаемыми траекториями с коэффициентом детерминации R^2 равным 0,92. Разработанный алгоритм интегрирован в программный комплекс RAMMS: Rockfall, что существенно улучшило его возможности по моделированию сложных случаев камнепадов.

В исследовании [72] особое внимание уделено форме обломков. Выявлено, что форма обломков оказывает большее влияние на траекторию движения, чем масса. Авторы провели масштабный эксперимент с использованием 3D-печатных моделей камней различной формы и высокоточного отслеживания движения обломков при помощи высокоскоростных камер. Результаты показали, что сферические обломки могут преодолевать расстояние на 30-40% большее, чем обломки эквивалентной формы при идентичной массе. Особенно важным открытием стало выявление эффекта "аэродинамического подъема" для определенных форм, что ранее не учитывалось в моделях. На основе этих данных разработаны новые корректирующие коэффициенты для существующих моделей камнепадов. Исследование также предлагает новые методики

полевого анализа формы обломков для более точного прогнозирования опасных зон.

Как было описано в исследовании [72], при описании камнепада ключевыми факторами являются форма обломка и характеристики его движения - скорость, кинетическая энергия и высота отскока. На сегодняшний день согласно [73] принято выделять следующие формы обломков: сферическую, кубическую, эквивалентную (размеры обломка по трем направлениям примерно равны), плоскую (размеры по двум направлениям заметно превосходят размеры по третьему) и удлиненную (размеры по одному направлению заметно превосходят размеры по двум другим). В некоторых исследованиях [73-80] рассматриваются формы обломков, которые являются промежуточными между вышеперечисленными случаями. На рисунке 1 представлены типовые формы обломков, встречающихся при камнепадах.

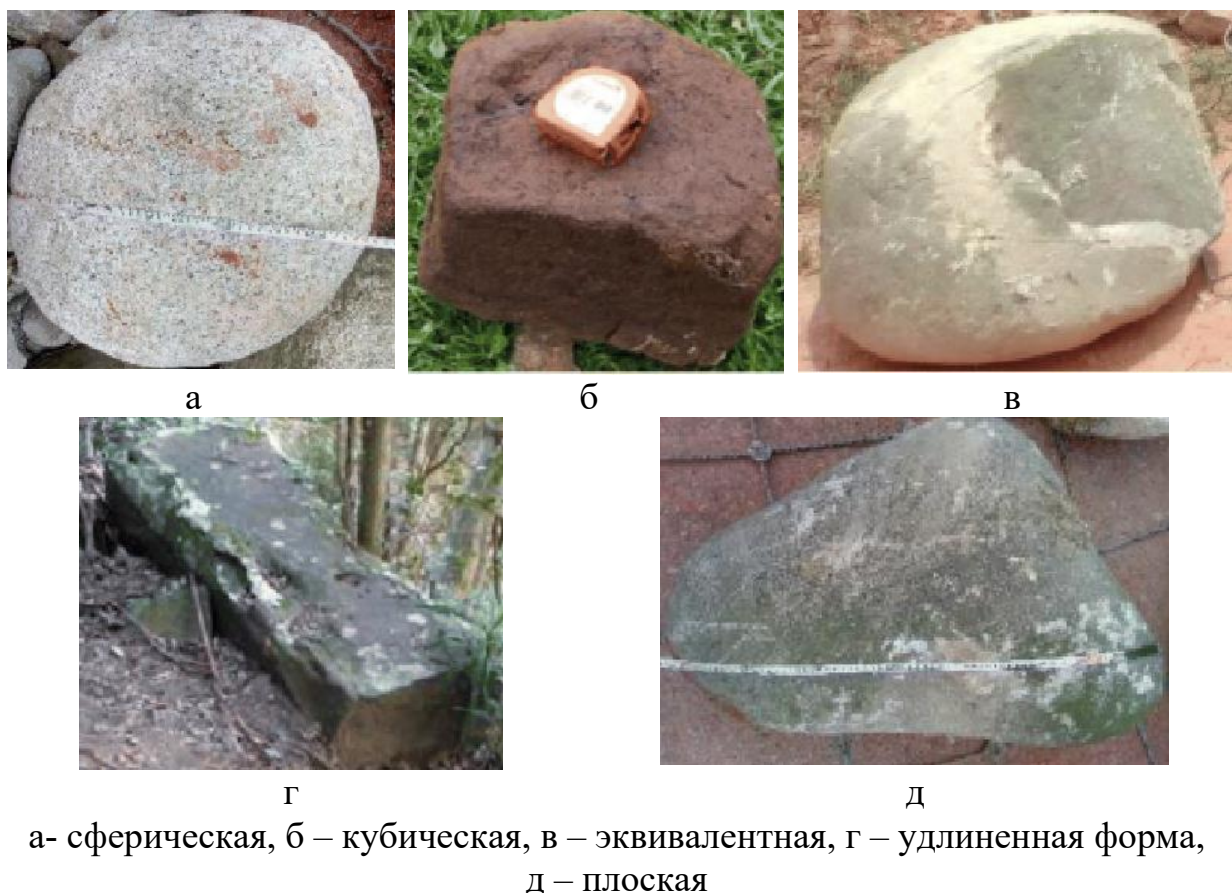


Рисунок 1 – Типовые формы обломков [73]

Большое внимание в современных источниках уделяется и влиянию характеристик рельефа на движение обломка. При открытых горных работах к таким характеристикам относится угол наклона, высота уступа, ширина бермы и физико-механические характеристики горных пород [81-90].

Исследование [81] представляет собой комплексный статистический анализ факторов, влияющих на камнепадную опасность при ведении открытых горных работ. Авторы провели масштабное исследование на 12 карьерах с различными геологическими условиями, применив современные методы машинного обучения. Особое внимание уделялось анализу взаимосвязи между геометрическими параметрами уступов (высота, угол наклона), структурными особенностями массива (трещиноватость, литология) и частотой камнепадов. Результаты показали, что критическими параметрами являются: углы наклона в диапазоне 35-55 град., расстояние между трещинами в массиве менее 0,5 метра, а также наличие зон с высокой степенью эрозии. Разработанная прогностическая модель продемонстрировала высокую точность (88%) при идентификации потенциально опасных участков. Практическая значимость работы заключается в возможности применения полученных результатов для оптимизации систем мониторинга и планирования горных работ, что позволяет существенно снизить риски для персонала и оборудования.

Исследование [82] посвящено комплексной оценке камнепадной опасности в районе храмового комплекса Сапташрунги Гада в штате Махараштра (Индия). Работа сочетает детальные полевые исследования с численным моделированием в программном комплексе RocFall. В ходе полевых работ авторы идентифицировали и классифицировали 22 потенциально опасных участка склонов, где частота камнепадов превышает 15 событий в год. Геологический анализ показал, что основной причиной нестабильности является интенсивное выветривание базальтов, образующих склоны вокруг храма. Особое внимание уделялось анализу влияния антропогенного фактора - вибраций от транспортных средств и строительной

деятельности. Численное моделирование позволило определить зоны поражения, что стало основой для разработки рекомендаций по защите храмового комплекса. Предложенные меры включают установку защитных сеток особой конструкции, а также организацию системы регулярного мониторинга с использованием беспилотных летательных аппаратов.

В исследовании [83] представлен комплексный анализ камнепадной опасности вдоль участка автомобильной дороги государственного значения SH-72, проходящей по сложному горному рельефу штата Махараштра в Индии. Авторами были проведены полевые исследования на протяжении 42 километров дорожного полотна, в ходе которых было идентифицировано и классифицировано 127 участков с повышенной камнепадной активностью. Методология исследования включала несколько взаимодополняющих подходов: геомеханические исследования с определением индекса качества горных пород (Rock Quality Designation), структурный анализ трещиноватости, статистическую обработку данных о частоте камнепадов за последние несколько лет, а также численное моделирование в специализированном программном обеспечении. Особое внимание уделялось анализу взаимосвязи между атмосферными осадками и активизацией камнепадных процессов - результаты показали, что 72% всех зарегистрированных случаев камнепадов происходили в течение 48 часов после выпадения интенсивных осадков (более 50 мм/сутки). На основе полученных данных авторы разработали классификацию опасных участков, выделив три основных типа: зоны прямого обрушения (характеризуются вертикальными обрывами высотой 15-25 метров), участки постепенного разрушения (с углами наклона 45-60 град.) и зоны скатывания обломков (на пологих склонах 30-45 град.). Практическим итогом исследования стали конкретные рекомендации по инженерной защите наиболее опасных участков дороги, включая установку защитных сеток, строительство улавливающих траншей и оптимизацию системы мониторинга в период обильных осадков.

В работе [84] произведена оценка камнепадной опасности в пещерном комплексе Аджанта в Индии. Авторы провели работу по комплексному анализу устойчивости скального массива, в котором расположены древние буддийские пещеры II века до н.э. Методология исследования включала детальное геомеханическое обследование с применением современных технологий: лазерное сканирование поверхности, термографический анализ для выявления скрытых трещин, определение физико-механических свойств пород. Особую ценность представляет разработанная авторами система мониторинга микросмещений с использованием датчиков высокой точности, позволившая зафиксировать сезонные колебания напряженного состояния массива. Численное моделирование в программе RocFall выявило три категории опасных участков: зоны с прогнозируемой энергией обломков до 100 кДж (охватывают 15% территории), 100-500 кДж (5% территории) и свыше 500 кДж (2% территории). Авторами был предложен специальный комплекс защитных мер с установкой малозаметных стальных сеток, устройством системы поверхностного водоотвода для уменьшения влияния инфильтрации, применение инъекционного укрепления трещин специальными составами на основе извести.

В исследовании [85] представлена детальная оценка камнепадной опасности для пещерного комплекса Эллора - объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО в Индии. Авторы провели комплексный анализ устойчивости скального массива, сочетая традиционные геомеханические методы с современными технологиями мониторинга. В ходе исследования были выполнены детальные измерения трещиноватости на 35 участках, определены физико-механические свойства базальтов с помощью лабораторных испытаний, а также проведено лазерное сканирование наиболее опасных участков. Численное моделирование в программе RocFall позволило выделить три категории опасных зон: участки с низкой прогнозируемой энергией обломков (до 50 кДж), средней (50-200 кДж) и высокой (более 200 кДж). Особое внимание уделено анализу влияния сезонных колебаний температуры

и влажности на устойчивость массива - результаты показали, что в сухой сезон наблюдается увеличение числа микротрещин на 15-20%.

В работе [86] представлены результаты экспериментального исследования взаимосвязи между твердостью горных пород по Шмидту и высотой отскока обломков. Авторы провели серию контролируемых испытаний с 12 типами горных пород, характерных для западной Индии, включая базальты, песчаники и известняки. Для каждого образца выполнено не менее 50 тестов на отскок с различными начальными условиями. Результаты показали четкую корреляционную зависимость ($R^2 = 0,89$) между значением твердости и высотой отскока обломка.

В исследовании [87] представлена методика оценки камнепадной опасности склонов с учетом ориентации трещин и сил трения. Также подробно рассмотрены различные типы защитных мер.

В исследовании [88] автор проводит систематический анализ 9 основных методик моделирования камнепадов, применяемых в мировой практике. Произведена оценка преимуществ и ограничений каждой из методик, включая точность прогноза траекторий, требования к входным данным и вычислительным ресурсам. Отдельный раздел посвящен анализу факторов, влияющих на дальность полета обломков, включая форму блоков, шероховатость склона и растительный покров.

Исследование [89] посвящено анализу влияния атмосферных осадков на активизацию камнепадных процессов на транспортных магистралях горных районов Индии. Авторы обработали данные о 542 зарегистрированных случаях камнепадов за десятилетний период, сопоставив их с метеорологическими данными. Установлено, что критическое значение имеет не только количество осадков, но и их интенсивность - ливни более 10 мм/час вызывают камнепады в 3 раза чаще, чем слабые затяжные дожди.

Таким образом можно сделать вывод, что численное моделирование движения обломков камнепадов достаточно широко освещено в современных исследованиях, однако на сегодняшний день не существует статей, которые

бы рассматривали влияние формы обломка и геометрии уступа при ведении открытых горных работ на энергию обломка, что является критически важным при проектировании противокампнепадных барьеров.

1.4 Численное моделирование противокампнепадных конструкций

Противокампнепадные барьеры представляют собой конструкции, реализующие торможение горных масс, сходящих с естественных и искусственных склонов. Современные противокампнепадные барьеры можно классифицировать по двум основным критериям [91-96]:

1. Конструкция барьера – ограждения сетчатого типа или грунтовые предохранительные валы;
2. Максимальная кинетическая энергия обломка, которую барьер может поглотить без разрушения – до 100 кДж, от 100 до 8500 кДж и от 8500 до 20 000 кДж.

На сегодняшний день существует три типа противокампнепадных барьеров:

1. Негнущиеся – представляют собой жесткие ограждения сетчатого типа, закрепленные на неподвижных опорах; максимальная энергия поглощения до 100 кДж
2. Динамические – представляют собой гибкие барьеры из плетеной кольчужной сети, закрепленные на подвижных опорах с дополнительными тросовыми креплениями; максимальная энергия поглощения до 8500 кДж
3. Предохранительные валы – армогрунтовая конструкция, представляющая собой насыпь, армированную геосинтетическими или композитными материалами, органическими или неорганическими вяжущими; максимальная энергия поглощения до 20 000 кДж.

На рисунке 2 представлены фотографии современных противокампнепадных барьеров.



а



б



в

а – негнущийся барьер, б – динамический барьер, в – предохранительный вал
Рисунок 2 – Типовые конструкции улавливающих барьеров [91]

Большая часть численного моделирования противокампнепадных конструкций осуществляется на основе метода конечных элементов, ключевыми программными комплексами являются Plaxis и Abaqus [97-99].

Для создания конечно-элементной модели первым этапом следует определить модель, которая будет описывать поведение грунта. Модель Мора-Кулона (Mohr-Coulomb model) – наиболее простая и распространённая грунтовая модель, базирующаяся на 5 критериях: E – модуль Юнга и ν – коэффициент Пуассона, c – удельное сцепление и ϕ – угол внутреннего трения, а также ψ – угол дилатансии. Модель Мора-Кулона наиболее часто встречается в работах, посвященных численному моделированию грунтовых противокампнепадных барьеров [100-104], что обусловлено наиболее простым входным набором данных по сравнению с другими моделями. Однако в представленных выше работах не было рассмотрено влияние основных критериев модели Мора-Кулона на энергию, которую может поглотить барьер без разрушения.

1.5 Выбор программного обеспечения для численного моделирования движения обломков по борту карьера

Как отмечалось ранее, наиболее полными программными комплексами для расчета характеристик процесса камнепада являются RAMMS: Rockfall и RockyFor3D. В 2015 году была опубликована работа [105] в которой на примере реального камнепада, произошедшего в Норвежской деревне Holaviki производится сравнение данных программных комплексов. Цифровая модель рельефа представлена на рисунке 3.

Целью расчетов являлось выявление конечных координат обломков и определение программного комплекса, который наиболее точно описывает их экспериментально наблюдаемое пространственное распределение.

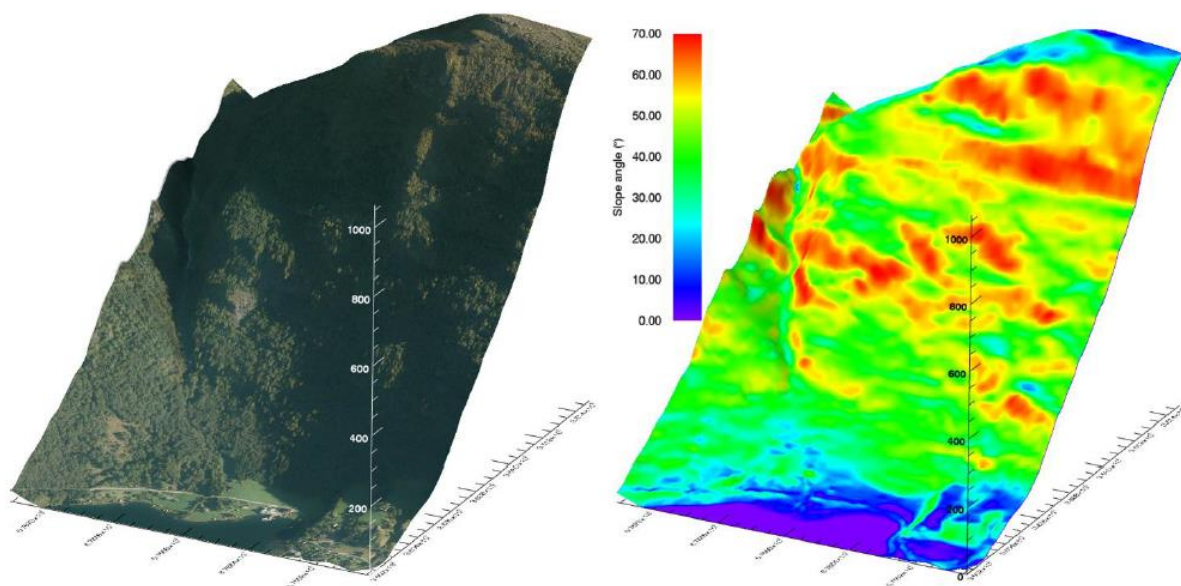


Рисунок 3 – Цифровая модель рельефа с визуализацией углов наклона дискретных участков [105]

По результатам исследования, проведенного Норвежским Геотехническим Институтом в 1995 году [106], выявлено, что средняя дальность полета обломков составила 310 м от основания склона. Начало камнепада зафиксировано на высоте 525 м, большая часть камней остановилась на высоте 75 м. Угол наклона склона составлял 60-70 градусов.

В каждом программном комплексе было создано по 4 модели с последовательным переходом от наиболее простой (модель № 1) к наиболее комплексной (модель № 4). Параметры моделей представлены в таблице 1. К основным параметрам моделей в RAMMS: Rockfall и RockyFor3D относятся – минимальное μ_{min} и максимальное μ_{max} трение, β – безразмерный коэффициент, влияющий на глубину проникновения обломков в грунт и лежащий в диапазоне от 50 до 200, K – безразмерный коэффициент, влияющий на скорость нарастания трения от минимального к максимальному, варьируется от 1 до 4, R – вязкопластичное сопротивление грунта, учитывающее возникновение пластических деформаций в грунте при столкновении с обломком. Дополнительно может учитываться сопротивление, создаваемое растительностью на пути движения обломка, и транспортная инфраструктура.

Оценка моделей на соответствие фактическим данным производилась путем выделения области радиусом 100 метров с центром в точке максимальной концентрации обломков реального камнепада и определения процента попадания обломков в данную область.

При создании моделей был использован твердый грунт (Hard terrain material). Другие возможные типы грунтов, реализованные в программном комплексе RAMMS: Rockfall приведены на рисунке 4.

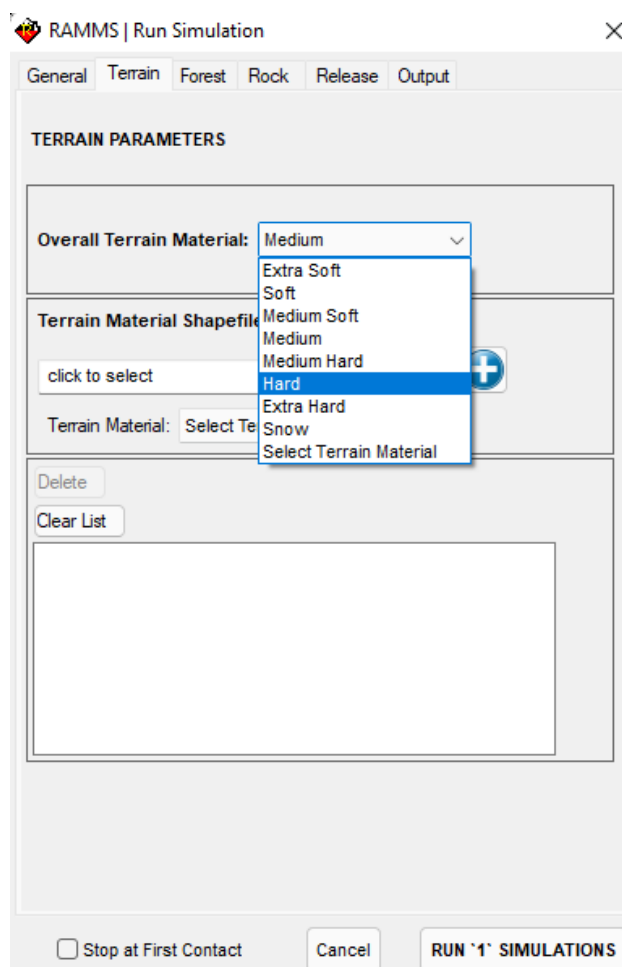


Рисунок 4 – Виды грунтов в RAMMS:Rockfall

Таблица 1 – Входные параметры моделей

№ модели	μ_{min}	μ_{max}	β	K	R	Дороги	Здания	Деревья
1	0,55	2	100	3	0,4	-	-	-
2	0,35	2	150	1,5	0,7	-	-	-
3	0,55	2	100	3	0,4	+	+	-
4	0,55	2	100	3	0,4	+	+	+

Модель № 1

Траектория полета имеет веерообразную форму, средняя дальность полета обломков составляет 550 м, максимальная скорость обломков достигает 61,23 м/с в основании склона, большинство обломков вылетело за пределы исследуемой зоны, в связи с чем произведено моделирование № 2 с более мягким грунтом, который позволит уменьшить дальность полета.

Модель № 2

Смена грунта на менее твердый значительно уменьшает дальность полета обломков, большинство не достигает подошвы склона, что не соответствует реальным данным, следовательно, в дальнейших расчетах грунт будет приниматься с характеристиками, использованными в модели № 1, для уменьшения дальности полета введен учет автомобильных дорог.

Модель № 3

Влияние автомобильных учтено выравниванием части рельефа со сменой физико-механических свойств на идентичные асфальтовому покрытию, деревья не учитывались.

Внедрение в модель дополнительных элементов в виде дорог уменьшило среднюю дальность полета обломков на 30-50 метров за счет дополнительного фактора, связанного с уменьшением кинетической энергии обломков при наличии препятствий. Результаты данного моделирования ближе к эмпирическим данным, и, следовательно, необходимо учитывать влияние дорог в процессе произведения расчётов, однако общая дальность полета все еще превосходит реальные значения. В связи с этим в модели № 4 дополнительно введен учет деревьев.

Модель № 4

В качестве дополнительного условия был добавлен учет деревьев со средней высотой 5 м и силой сопротивления 10 кН. Эффект от внедрения деревьев аналогичен эффекту от внедрения дорог – наблюдается снижение дальности полета и высоты отскока камней. Средняя высота отскока по результатам моделирования сценария № 3 составила 7,29 м, по результатам моделирования сценария № 4 – 6,83 м, что сказалось на средней дальности полета и увеличило концентрацию обломков в исследуемой зоне, что больше соответствует эмпирическим данным.

Результаты моделирования приведены на рисунках 5 – 8. На каждом из рисунков приведены траектории движения обломков и их скорости (слева) и точки остановки движения (справа).

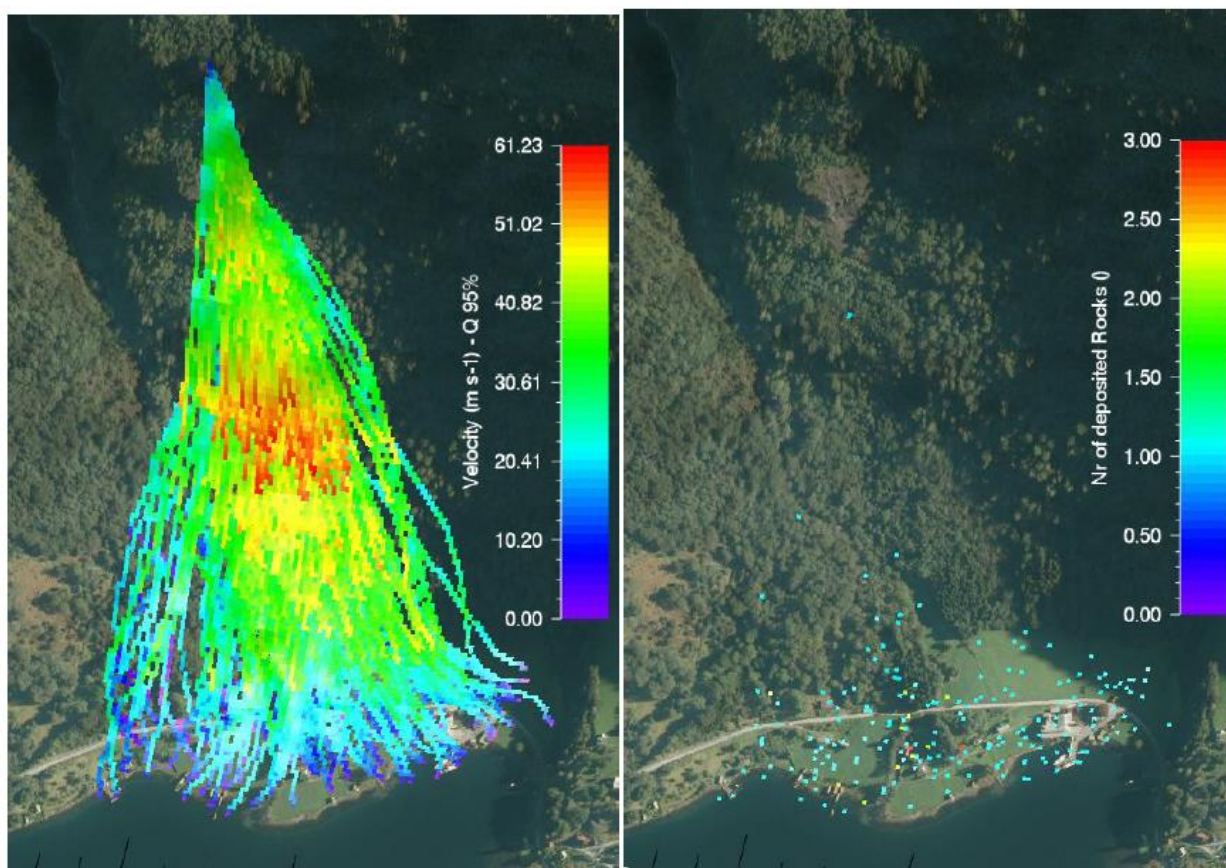


Рисунок 5 – Результаты расчетов модели № 1 [105]

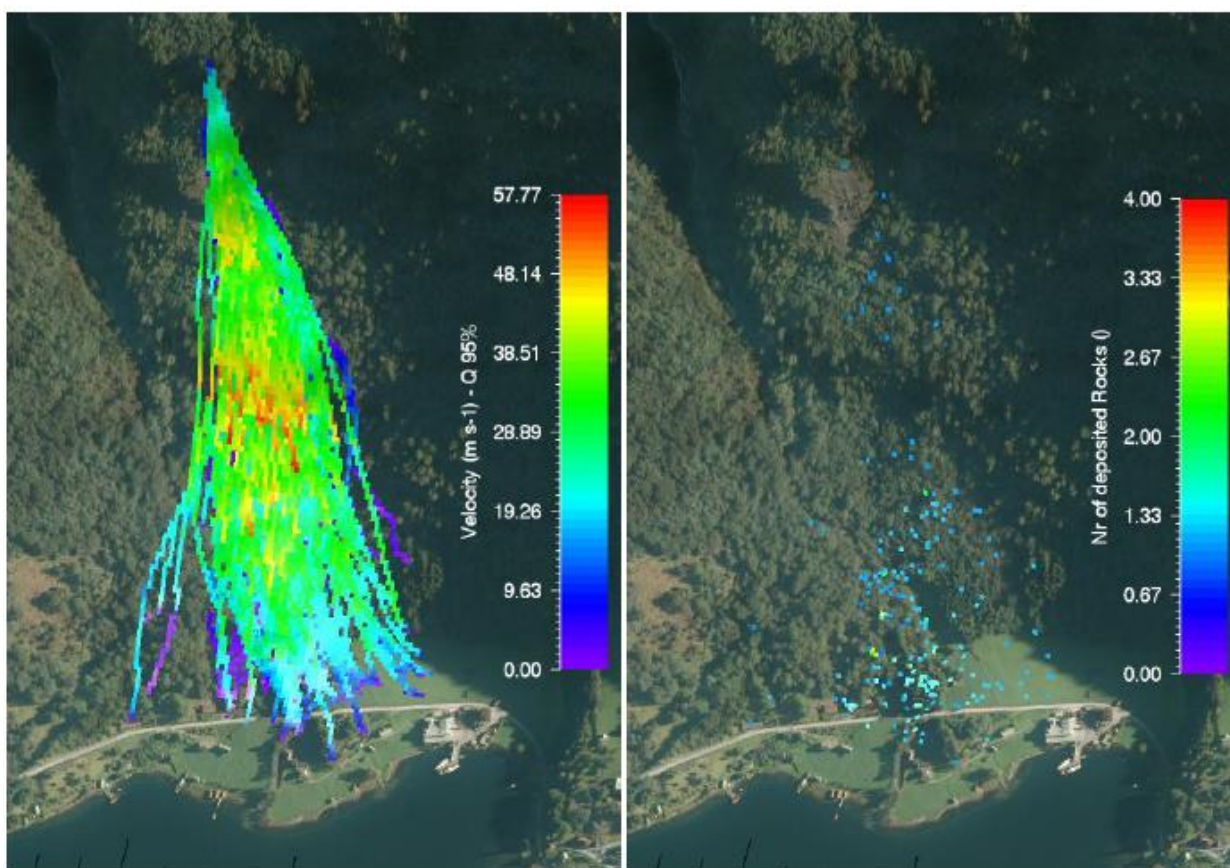


Рисунок 6 – Результаты расчетов модели № 2 [105]

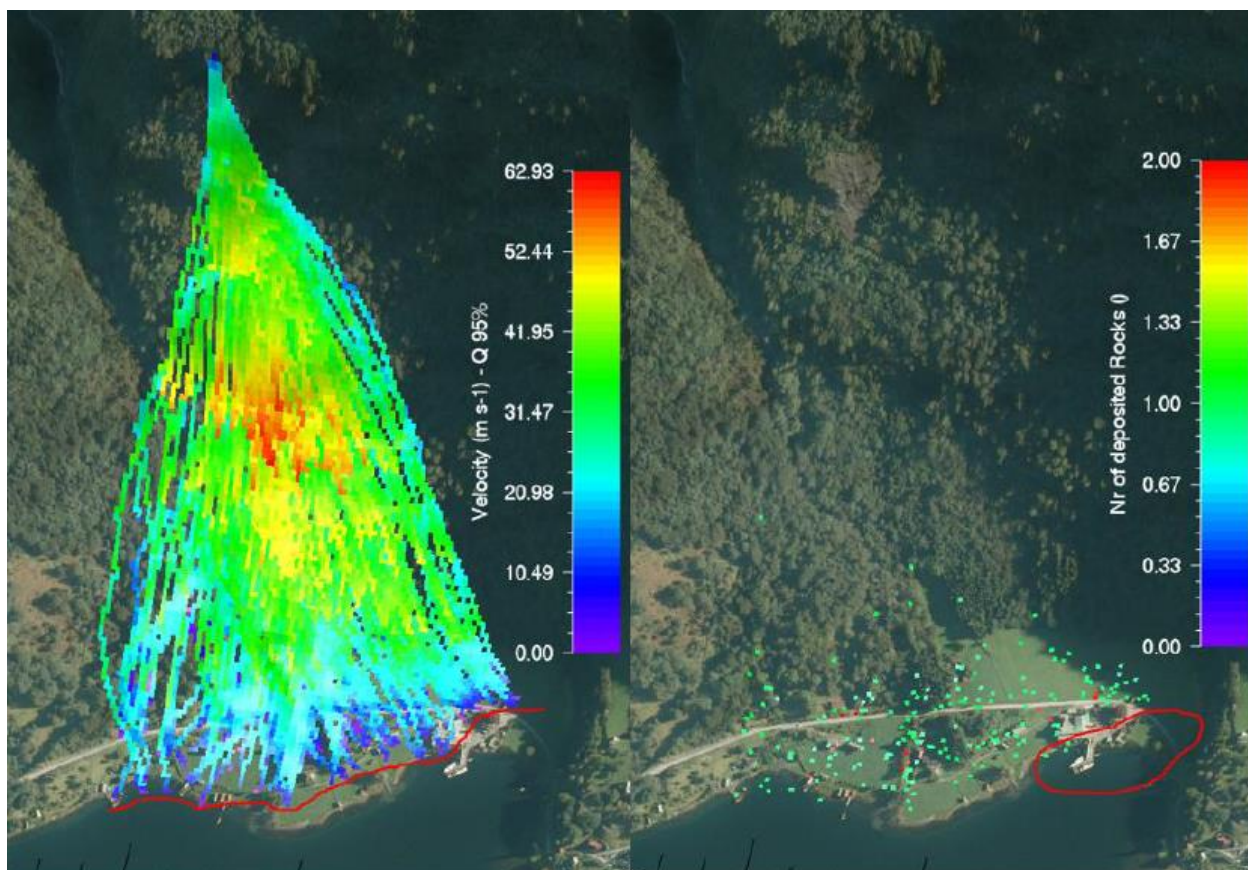


Рисунок 7– Результаты расчетов модели № 3 [105]

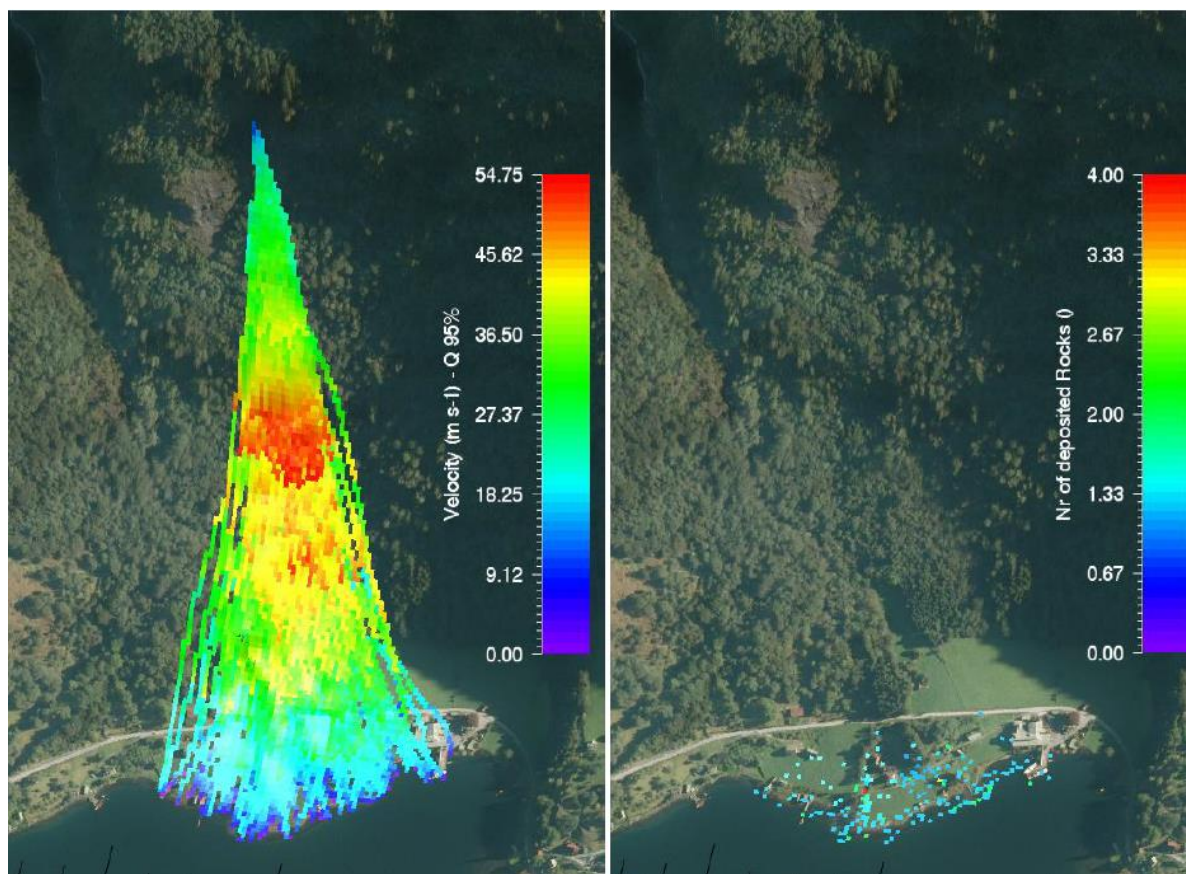


Рисунок 8 – Результаты расчетов модели № 4 [105]

На рисунке 9 отражены результаты расчетов модели № 4, где большая часть обломков относительно предыдущих моделей попала в зону исследования. Квадратами отмечены области концентрации обломков, цвет квадратов отражает количество обломков на заданном дискретном участке, чем темнее квадрат, тем большее обломков находится на данном участке. По результатам исследования выявлено, что 130 из 200 камней попадают в намеченную область исследования, остальные находятся на незначительном расстоянии за пределами, что позволяет судить о высокой точности экспериментальной модели.



Рисунок 9 – Сопоставление натуральных и экспериментальных данных при расчете модели № 4 в RAMMS:Rockfall [105]

Моделирование в RockyFor3D производилось аналогичным образом с постепенным переходом от более простой модели к более сложной путем последовательного введения дополнительных параметров. Так же было создано 4 модели с входными данными, идентичными тем, что использовались при расчетах в RAMMS: Rockfall. Результаты расчетов моделей в RockyFor3D приведены на рисунках 10-13.

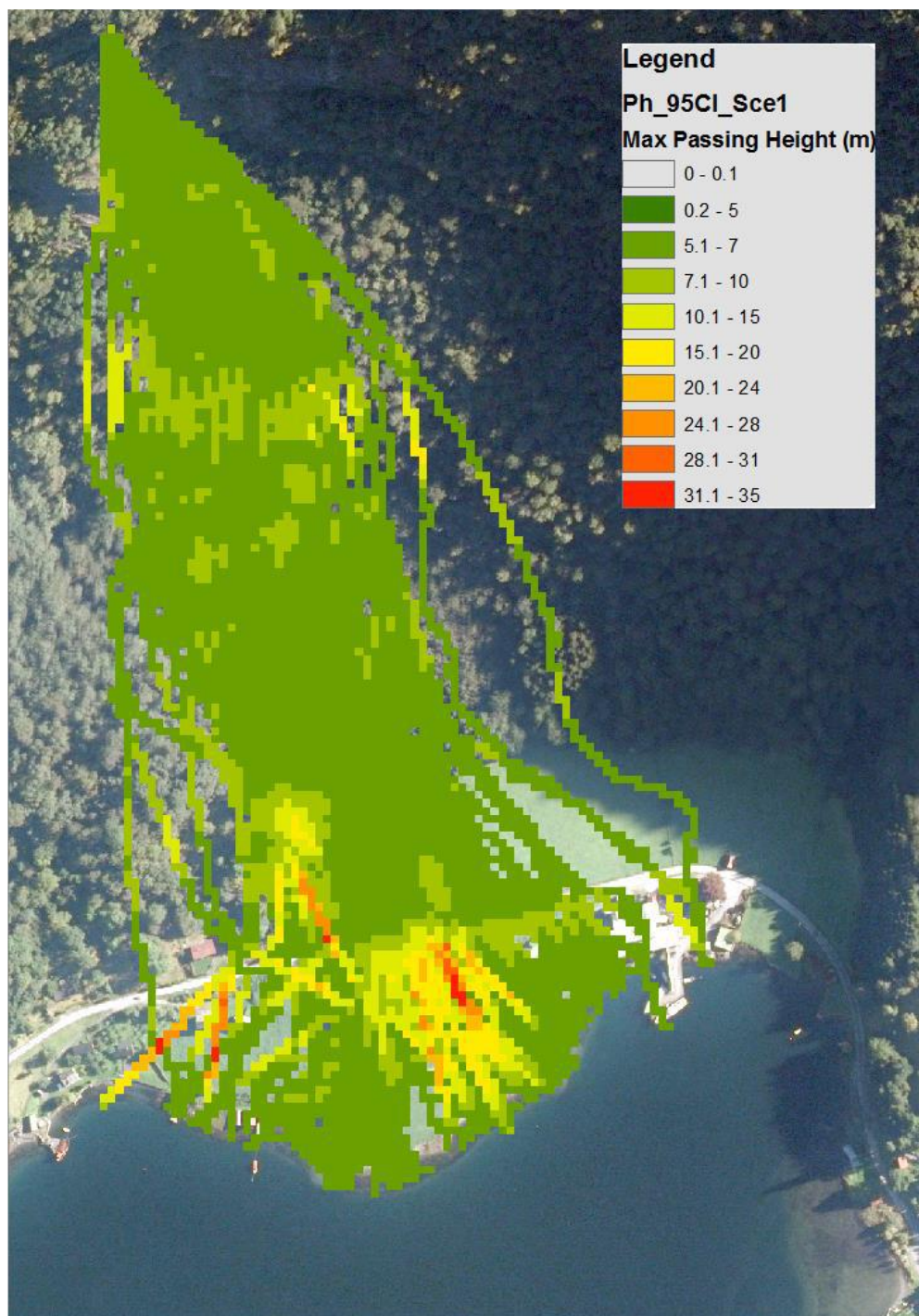


Рисунок 10 – Результаты расчетов модели № 1 в RockyFor3D [105]

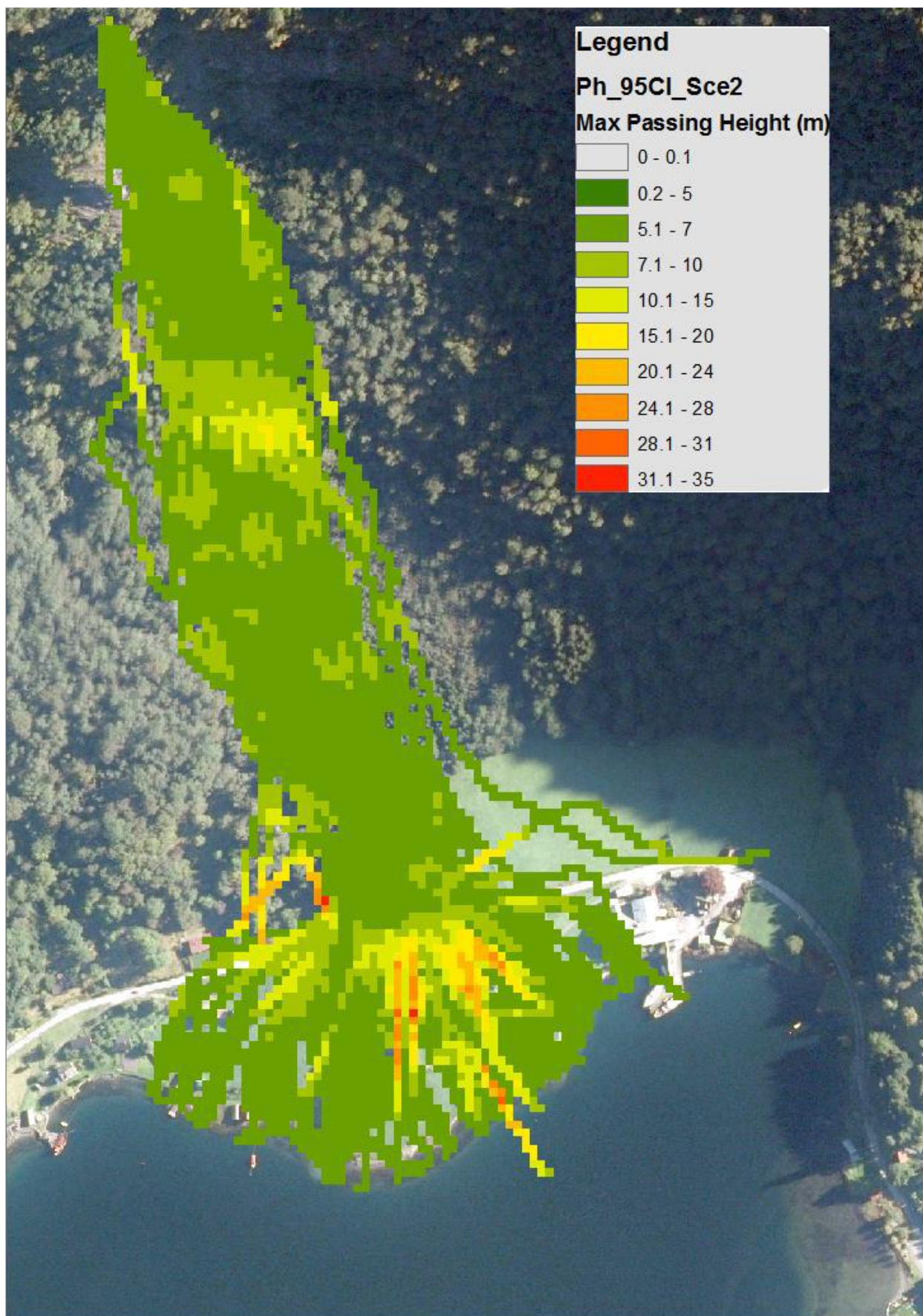


Рисунок 11 – Результаты расчетов модели № 2 в RockyFor3D [105]

По результатам расчетов моделей №1 и №2 в RockyFor3D выявлено, что большая часть обломков не попала в исследуемую зону, аналогичным образом с RAMMS:Rockfall, однако при этом количество обломков в зоне исследования меньше аналогичных в RAMMS:Rockfall. В связи с чем произведен расчет модели №4, как наиболее достоверно описывающего реальные значения.

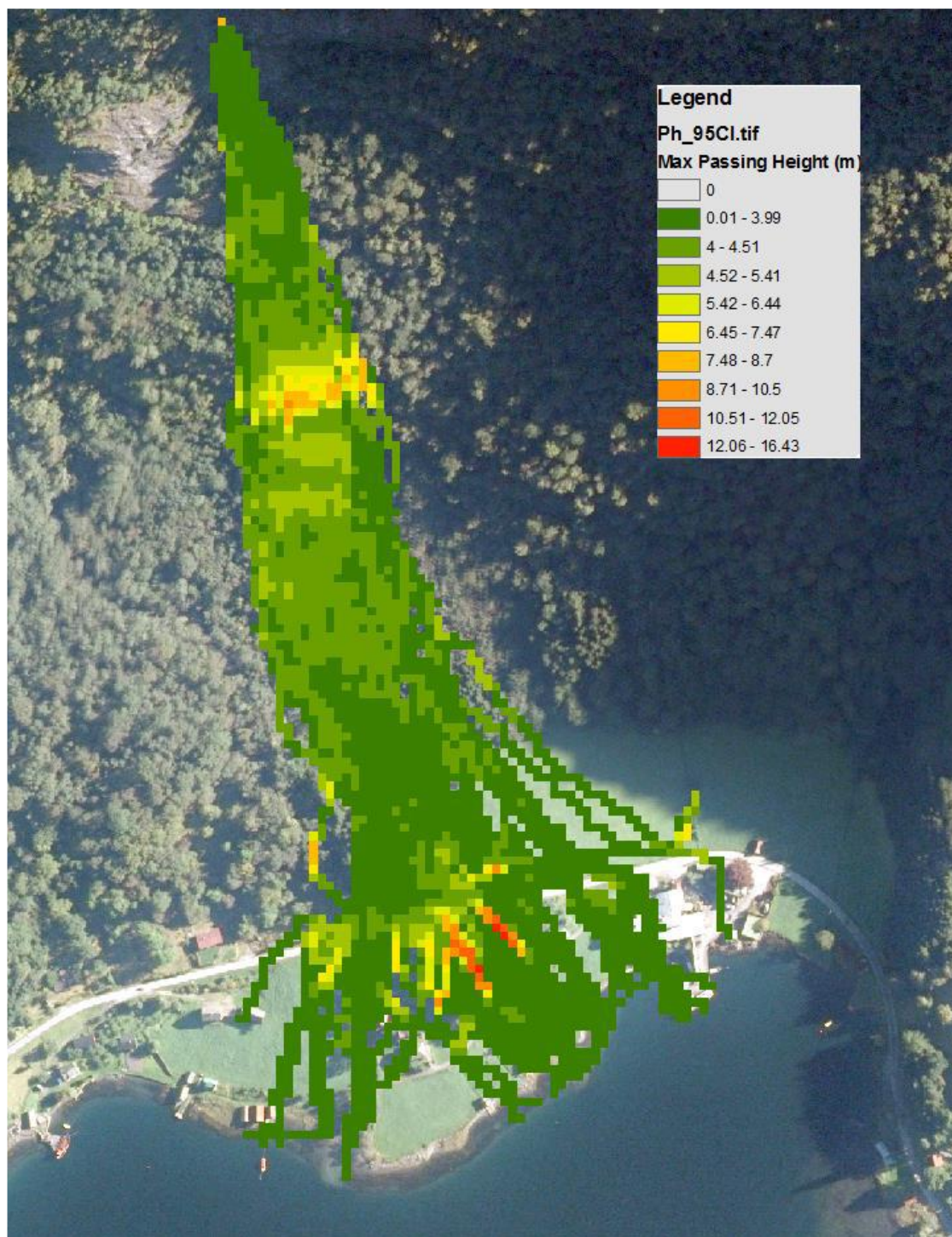


Рисунок 12 – Результаты расчетов модели № 4 в RockyFor3D [105]



Рисунок 13 – Сопоставление натуральных и экспериментальных данных при расчете модели № 4 в RockyFor3D [105]

По результатам расчета модели № 4 выявлено, что в исследуемую область попало 79 из 200 камней, средний разброс за пределами области исследования также превышает аналогичный для RAMMS:Rockfall.

Таким образом, RAMMS:Rockfall показывает более высокую точность при создании численных моделей движения обломка, в связи с этим в дальнейшем для расчетов будет задействован данный программный комплекс.

1.6 Постановка задач исследования

На основе анализа материалов данной главы было установлено, что для обоснования и разработки метода расчета параметров предохранительных валов для борьбы с камнепадом с борта карьера требуется провести ряд исследований, включающих численное моделирование движения обломка и противокамнепадных барьеров. Таким образом, была сформулирована цель диссертационной работы, заключающая в проведении численного моделирования движения обломка, выявлении влияния формы обломка и геометрии склона на его максимальную кинетическую энергию, проведении численного моделирования противокамнепадных предохранительных валов с определением оптимальных геометрических и геотехнических параметров на основе прогнозируемой максимальной кинетической энергии обломка. В соответствии с приведенной выше целью были сформулированы следующие задачи:

1. Провести анализ современной зарубежной и отечественной литературы по моделированию процессов камнепадов и противокамнепадных конструкций;
2. Обосновать выбор программного комплекса для моделирования камнепадных процессов;
3. Провести расчеты кинематических, динамических и энергетических характеристик движения обломков камнепада сферической формы на основе существующих аналитических моделей и нормативных документов для верификации результатов численного моделирования в выбранном программном комплексе;
4. Определить влияние геометрии склона и свойств обломков на динамические характеристики его движения.
5. Определить влияние геометрических размеров и физико-механических свойств материала предохранительных валов на энергию поглощения обломка.

6. Разработать метод расчета параметров предохранительных валов для борьбы с камнепадом с борта карьера и методику на его основе, позволяющий определить оптимальные геометрические и геотехнические характеристики предохранительных валов исходя из геометрии склона и объема обломка.

2 Определение влияния формы обломка на его максимальную кинетическую энергию

2.1 Предварительные аналитические оценки параметров движения

Перед проведением моделирования в программном пакете RAMMS:Rockfall рассмотрено движение обломка сферической формы объемом 1 м^3 . Расчет произведен на основании аналитических выражений, полученных в зарубежной литературе [88], [108-109], а также отечественной нормативно-технической документации согласно ОДМ 218.2.051-2015 «Рекомендации по проектированию и расчету противообвальных сооружений на автомобильных дорогах».

Обломок начал движение в верхней точке поверхности, состоящей из двух уступов высотой 30 м с углом наклона $\alpha=50$ град. и бермы шириной 8 м (рисунок 14).

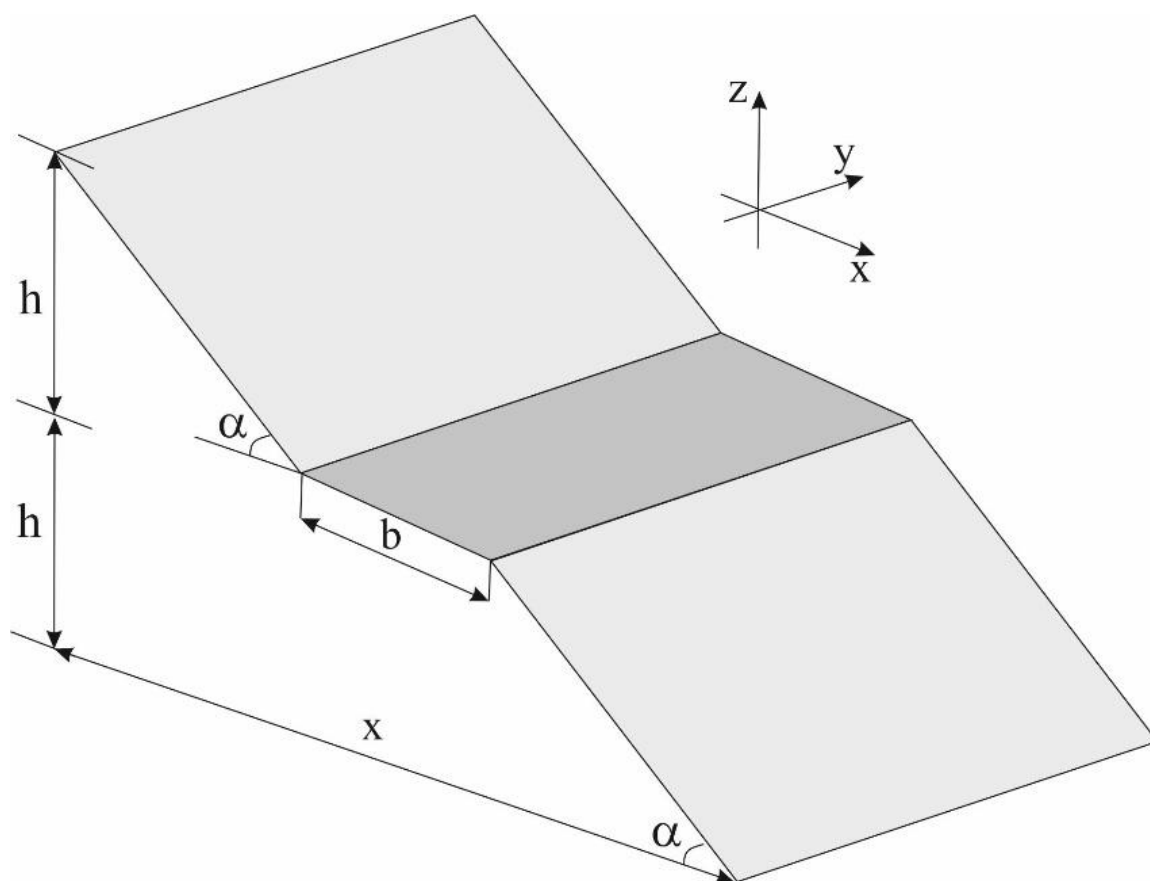


Рисунок 14 – Основные параметры модели

В работах, описывающих указанные аналитические расчетные схемы, обосновано, что при углах наклона склона $\alpha \approx 45\text{--}70$ град. движение сферически симметричного тела происходит без отрыва от поверхности [88]. Учет неровностей поверхностей скольжения приводит к необходимости введения динамического коэффициента трения μ_d и динамического угла трения φ_d , определяемых в соответствии с [88] следующим образом:

$$\mu_d = \operatorname{tg} \varphi_d = \operatorname{tg} \beta + k \cdot \frac{r}{R} \quad (2.1)$$

где $r \approx 0,21$ м – характерный размер неровностей на склоне, $k = 0,21$ – безразмерный коэффициент, $R = 0,63$ м – радиус сферического обломка. Также в [88] показано, что при учете вращательной компоненты движения при перемещении обломка по наклонной плоскости значения угла внутреннего трения β , следует назначать в диапазоне от 23 до 33,8 град. Для указанных значений $\mu_d = 0,74$.

В соответствии с законом сохранения энергии максимальная скорость поступательного движения центра масс скального обломка V при переходе на горизонтальную поверхность (подошву нижнего уступа) и отсутствии начальной скорости будет равна:

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot (H - \mu_d \cdot X)} \quad (2.2)$$

где $H = 2h = 60$ м – высота падения обломка, $X = 58$ м – смещение по горизонтали. Принимая в расчетах $\beta = 33,8$ град., $g = 9,8$ м/с² получим, что значение скорости тела V в момент его перехода с нижнего уступа на горизонтальную поверхность, рассчитанное по формуле (2.2) значение будет равно 18,3 м/с.

Полная кинетическая энергия $E_{\text{полн}}$ сферического обломка в конечной точке спуска при учете незначительного проскальзывания складывается из двух частей: энергии поступательного $E_{\text{пост}}$ и вращательного $E_{\text{вращ}}$:

$$E_{\text{полн}} = E_{\text{пост}} + E_{\text{вращ}} \quad (2.3)$$

$$E_{\text{пост}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (2.4)$$

$$E_{\text{вращ}} = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (2.5)$$

где $I = \frac{2}{5} \cdot m \cdot R^2$ – момент инерции, а $\omega = \frac{V}{R}$ – угловая скорость сферического обломка. Таким образом, значение полной кинетической энергии $E_{\text{полн}}$, рассчитанное по методике [88], составит 633 кДж.

На следующем этапе исследований производился расчет аналогичных энергетических и кинематических параметров для обломка сферической формы на основании ОДМ 218.2.05 – 2015. В соответствии с данным документом при расчете скоростей обломков V предполагается, что, независимо от топографии горного участка, по которому происходит движение, траектория движения обломка прямолинейна, а расчетное значение угла наклона склона усредняется по его длине. Скорость скального обломка сферической формы в этом случае рассчитывается по следующей формуле:

$$V = \varepsilon \cdot \sqrt[2]{H}, \quad (2.6)$$

где ε – коэффициент, определяемый в соответствии с ОДМ 218.2.05 – 2015. Для рассматриваемого случая ($\alpha = 50^\circ$) принимается $\varepsilon = 2,26$. Тогда значение скорости V , рассчитанное по формуле (2.6), составит 17,5 м/с.

В связи с тем, что ОДМ 218.2.05 – 2015 не регламентирует расчет полной кинетической энергии, произведем расчет по формуле (2.4) для скорости $V = 17,5$ м/с - получим $E_{\text{полн}} = 579$ кДж.

Для дальнейших численных экспериментов по оценке кинематических параметров движения обломка сферической формы в RAMMS:Rockfall физико-механические характеристики грунта, слагающего исследуемый склон, будут заданы как Hard (смотри рисунок 4), что идентично скальным горным породам. При расчете в модели не учитывалось разрушение грунта и его деформация.

На рисунке 15 приведен график зависимости кинетической энергии обломка сферической формы от горизонтального перемещения при движении по склону. Из приведенного на рисунке 15 графика можно сделать вывод, что максимальное значение кинетической энергии обломка достигается у основания нижнего уступа и составляет 570 кДж. При этом значение скорости будет равняться $V = 18,3$ м/с.

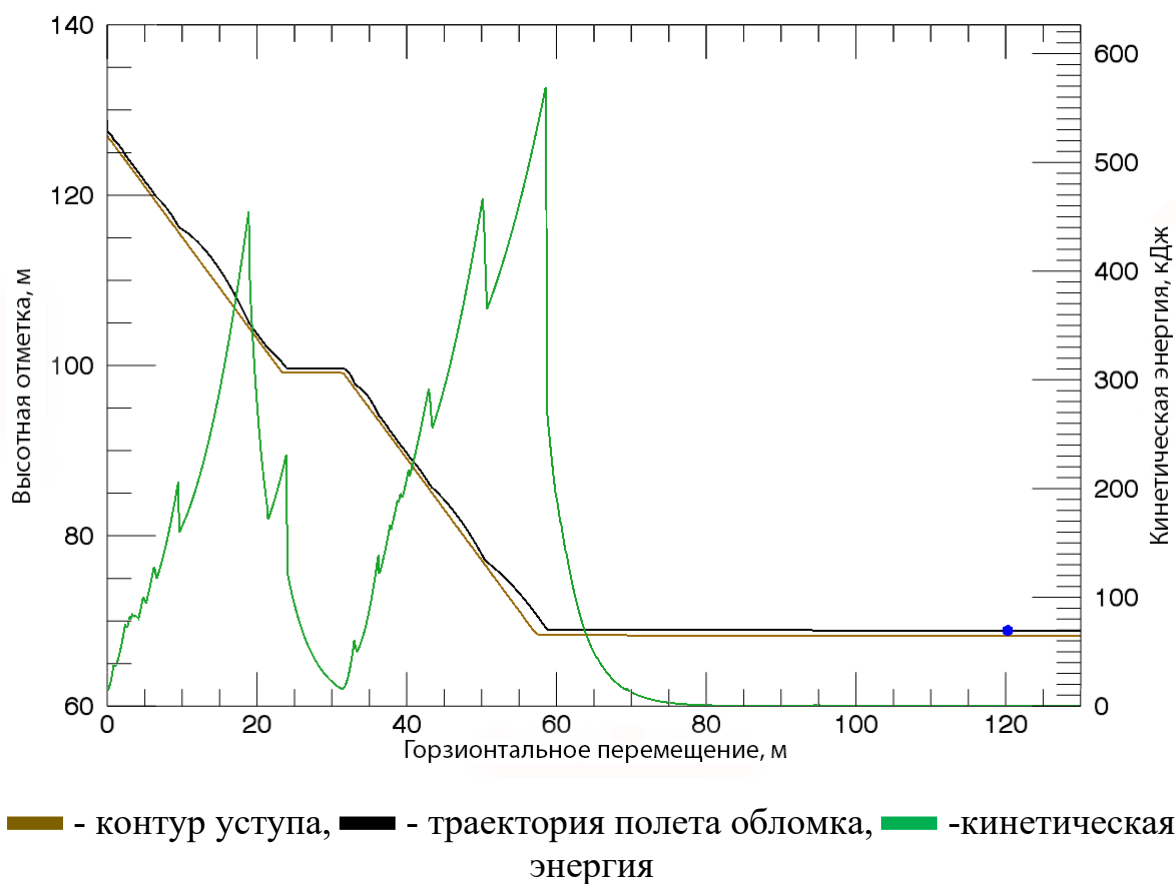


Рисунок 15 – Зависимость кинетической энергии обломка сферической формы от горизонтального перемещения при движении по склону

Сравнение значений скорости поступательного движения центра масс и полной кинетической энергии сферического скального обломка, полученных по результатам аналитических оценок и численного моделирования, приведено в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты расчетов максимальной кинетической энергии обломков и максимальной скорости поступательного движения центра масс различными методами

Методика расчета	Максимальная скорость центра масс, м/с	Максимальная кинетическая энергия, кДж	Горизонтальное перемещение, м
Численное моделирование в RAMMS:Rockfall	18,3	570	120,0
Аналитический расчет согласно [88]	18,3	633	106,5
Расчет согласно ОДМ 218.2.051-2015	17,5	579	118,5

По результатам сравнительного анализа выявлено, что методика, описанная в ОДМ 218.2.051-2015 «Рекомендации по проектированию и расчету противообвальных сооружений на автомобильных дорогах» наиболее близко описывает результаты численного моделирования по значениям максимальной кинетической энергии обломка и горизонтальному перемещению, однако она не учитывает форму обломка, что обуславливает необходимость проведения численного моделирования.

2.2 Проведение моделирования процессов движения обломков различных форм

Для моделирования в RAMMS: Rockfall [105,110] необходимо иметь данные топографической съемки изучаемого объекта. Для симуляции топографической съемки был написан программный код в среде Python, который на основе вводимых данных (высоты уступа, угла наклона и ширины бермы) создает трехмерное облако точек, имитирующее топографическую съемку.

Создана цифровая модель борта карьера, состоящая из двух уступов высотой 30 м с углом наклона 50 градусов и бермы шириной 8 м (рисунок 16) с удлиненной площадкой у подошвы нижнего уступа.

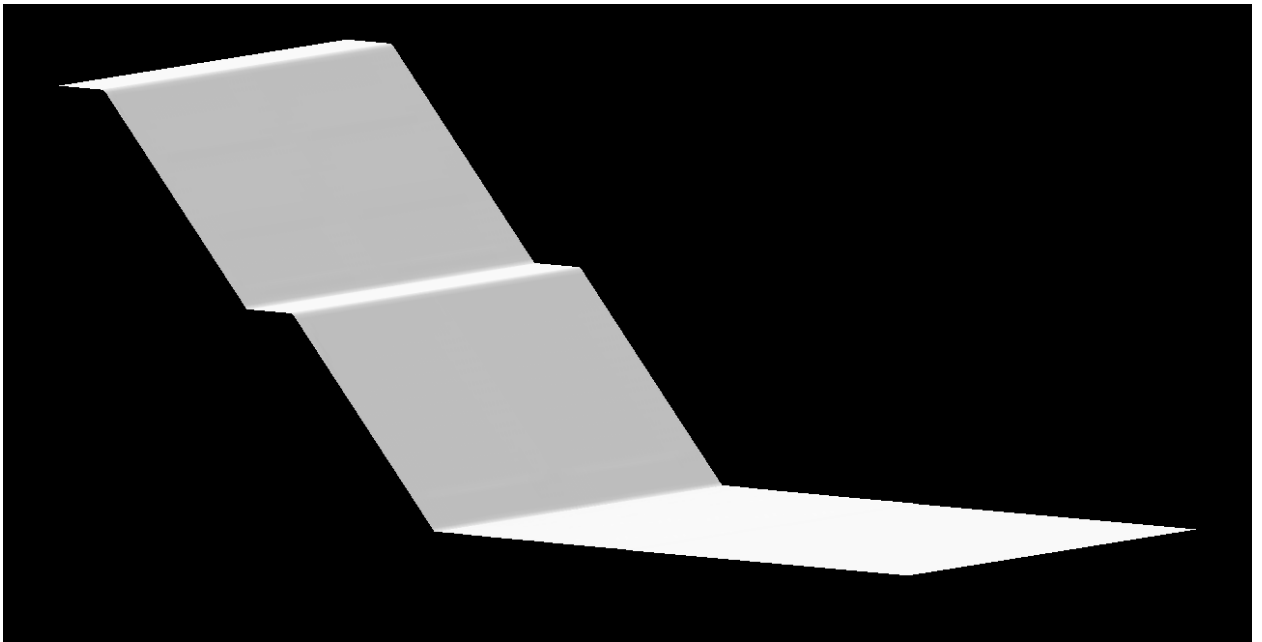


Рисунок 16 – Модель двух уступов карьера с заданными характеристиками

В связи с тем, что ключевым параметром является форма обломка, а не его объем, то все обломки будут заданы объемом 1 м^3 и плотностью 2700 кг/м^3 , как и при выполнении аналитических расчетов. В качестве горных пород, составляющих исследуемое месторождение, приняты скальные горные породы, не подверженные деформациям и разрушению, которые в программном комплексе RAMMSL: Rockfall задаются как *hard terrain material* (рисунок 4).

Первой была рассмотрена кубическая форма. Изменение кинетической энергии в процессе перемещения обломка кубической формы представлено на рисунке 17.

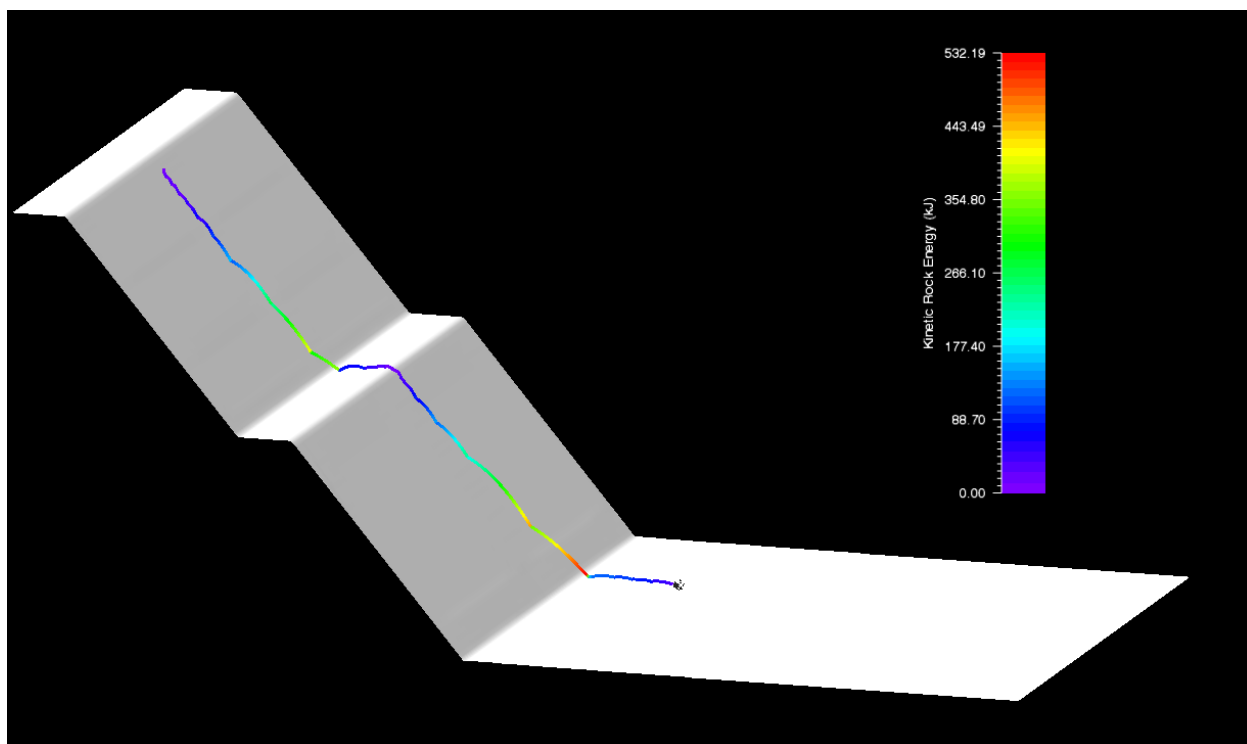
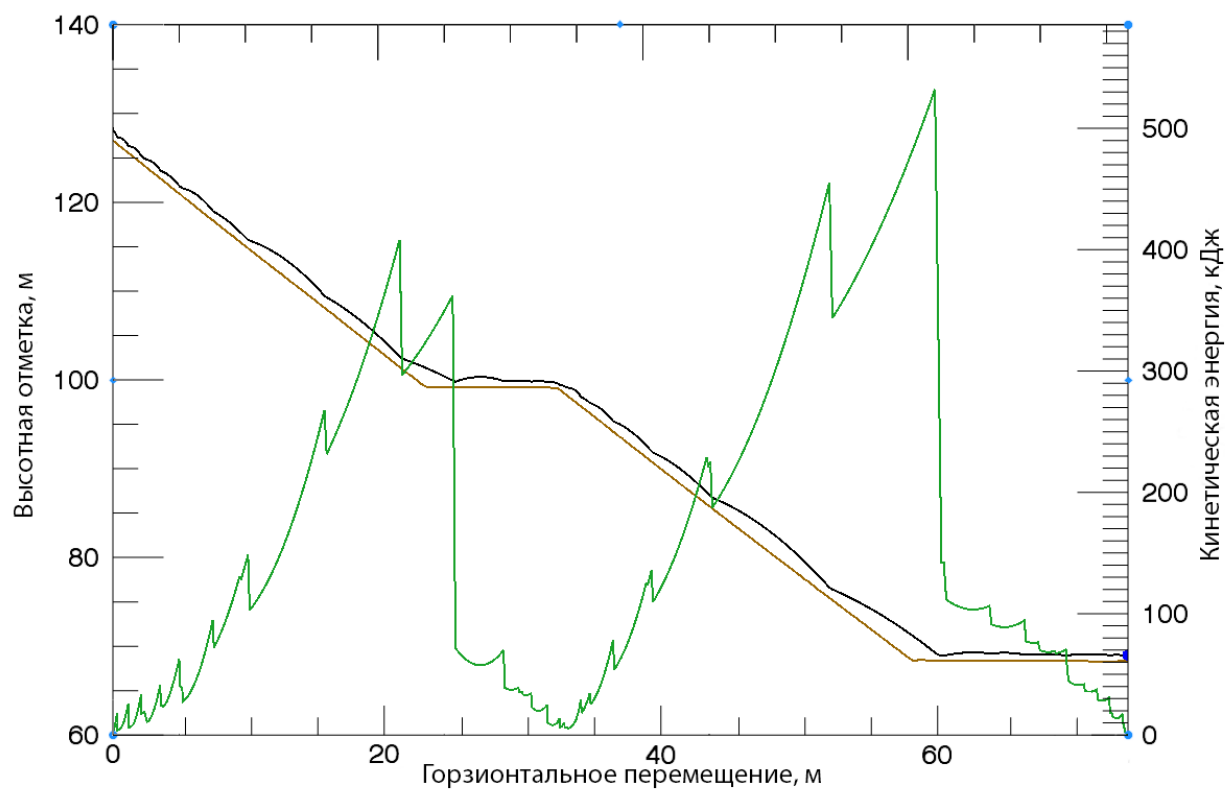


Рисунок 17 – Изменение кинетической энергии в процессе перемещения обломка кубической формы

В результате проведения моделирования обломка кубической формы перемещение по горизонтали составило 76,7 метра, при этом остановка движения произошла на дне карьера (рисунок 17). Максимальная высота отскока относительно поверхности уступов составила 2,79 метра, максимальная скорость в процессе движения достигала 18,7 м/с, максимальное значение кинетической энергии поступательного и вращательного движения составило 532,2 кДж.

Зависимость кинетической энергии обломка кубической формы от горизонтального перемещения при движении по склону представлена на рисунке 18.



— - контур уступа, — - траектория полета обломка, — - кинетическая энергия

Рисунок 18 – Зависимость кинетической энергии обломка кубической формы от горизонтального перемещения при движении по склону

Окно создания обломка эквивалентной формы и его характеристики приведены на рисунке 19.

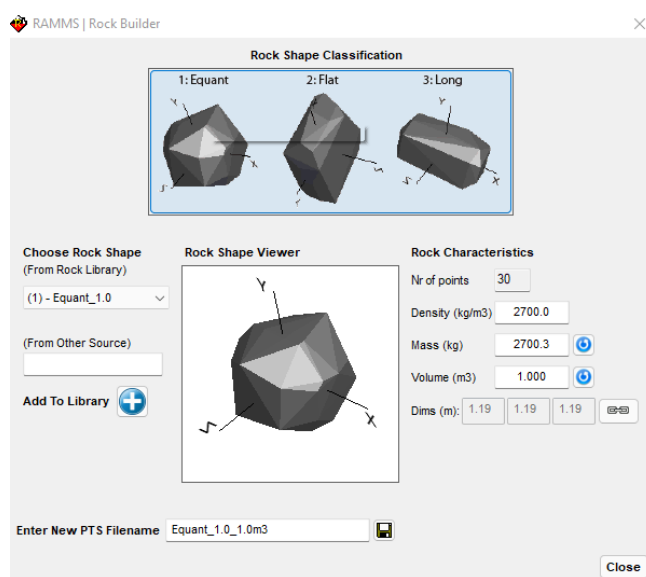


Рисунок 19 - Окно создания обломка эквивалентной формы и его характеристики

Изменение кинетической энергии обломка эквивалентной формы в процессе перемещения по уступам представлено на рисунке 20.

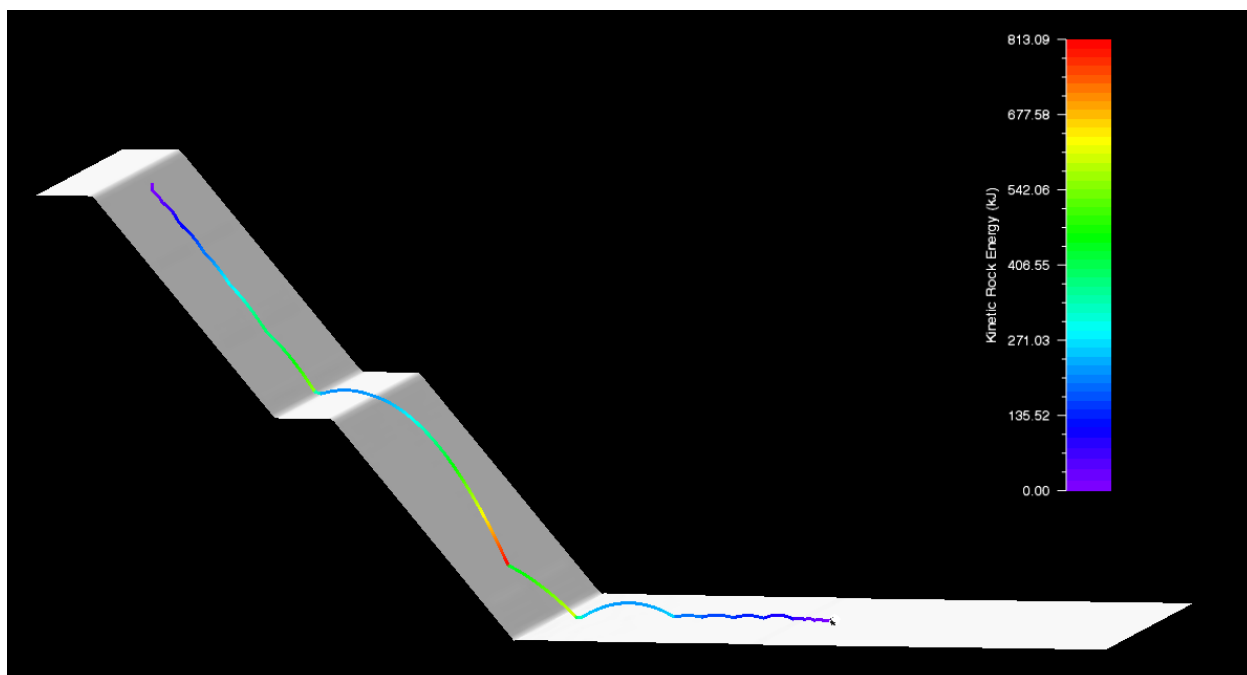


Рисунок 20 – Изменение кинетической энергии в процессе перемещения обломка эквивалентной формы

Результаты моделирования обломка эквивалентной формы схожи с результатами сферической: перемещение по горизонтали составило 97,5 метров, остановка движения произошла на дне карьера. Из рисунка 20 видно, что наибольшую энергию (813,1 кДж) обломок набирает у дна карьера, полная остановка движения происходит после преодоления расстояния 35,6 м по дну карьера. По результатам моделирования видно, что обломок эквивалентной формы при равных условиях обладает большей скоростью и кинетической энергией, чем обломки кубической и сферической форм, однако наличие плоских граней и как следствие большая площадь контакта обломка с поверхностью уменьшают итоговое перемещение. Как видно на рисунке 19 обломок эквивалентной формы обладает множеством плоских граней относительно малой площади, стык таких граней образует ребра. Падение обломка на ребро обеспечивает больший отскок, чем при падении на плоскую грань. Из всех форм обломков, представленных в данной работе,

эквивалентная обладает наибольшим числом ребер, что повышает вероятность попадания на них и, как следствие обеспечивает значительный прирост скорости, кинетической энергии и высоты отскока относительно других форм, что будет подтверждено дальнейшими результатами моделирования.

График зависимости кинетической энергии обломка эквивалентной формы от горизонтального перемещения при движении по склону представлен на рисунке 21.

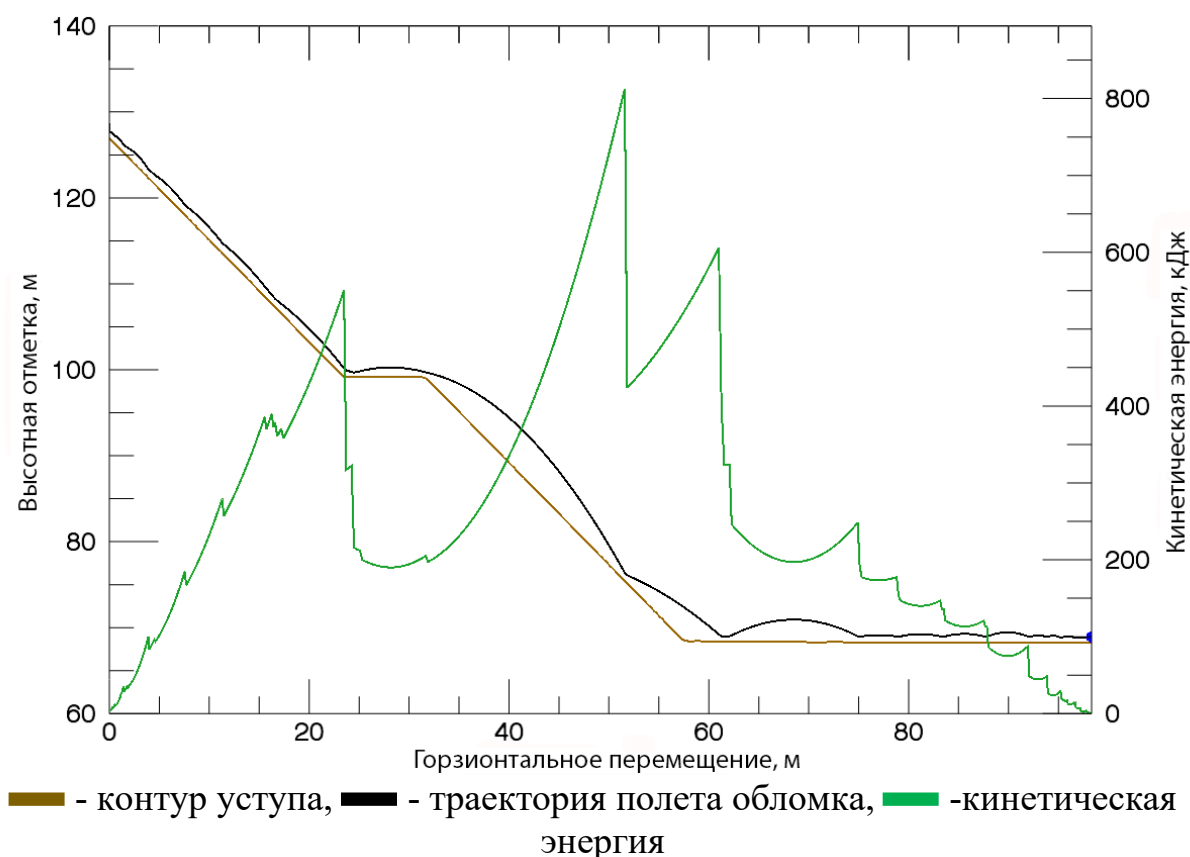


Рисунок 21 –Зависимость кинетической энергии обломка эквивалентной формы от горизонтального перемещения при движении по склону

Окно создания обломка плоской формы и его характеристики приведены на рисунке 22.

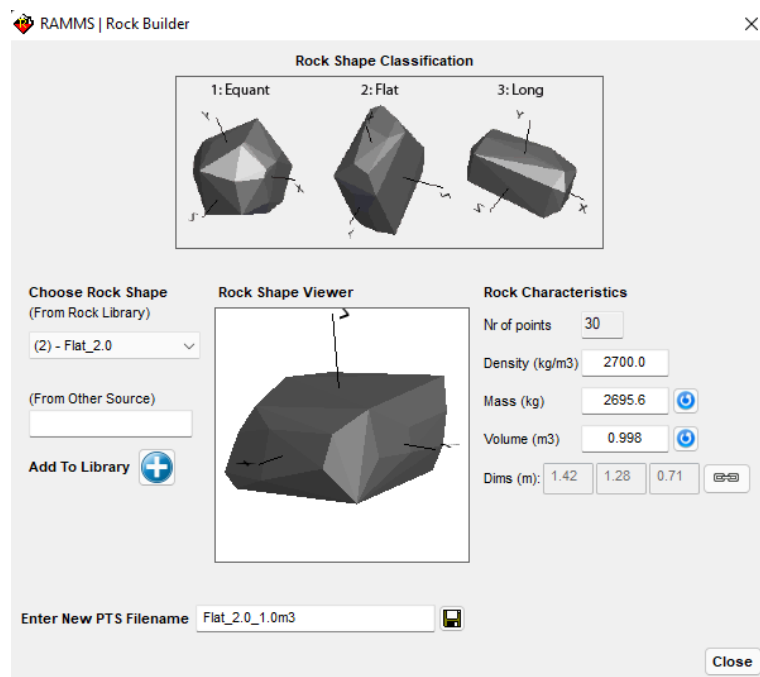


Рисунок 22 - Окно создания обломка плоской формы и его характеристики

Изменение кинетической энергии обломка плоской формы в процессе перемещения по уступам представлено на рисунке 23.

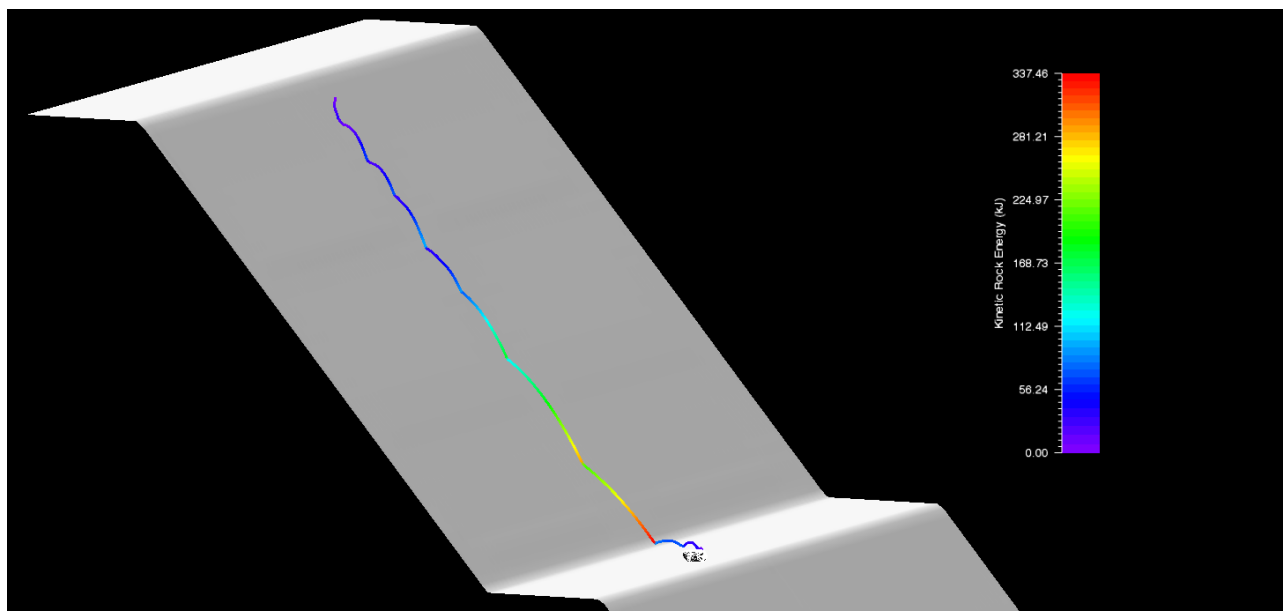


Рисунок 23 – Изменение кинетической энергии в процессе перемещения обломка плоской формы

По результатам моделирования обломка плоской формы выявлено, что данный обломок обладает наименьшей энергией среди всех форм. Это обусловлено наибольшей площадью контакта с поверхностью уступов, а

также меньшим числом ребер, чем у обломка эквивалентной формы. Как видно из рисунка 23 обломок остановил свое движение на берме.

График зависимости кинетической энергии обломка плоской формы от горизонтального перемещения при движении по склону представлен на рисунке 24.

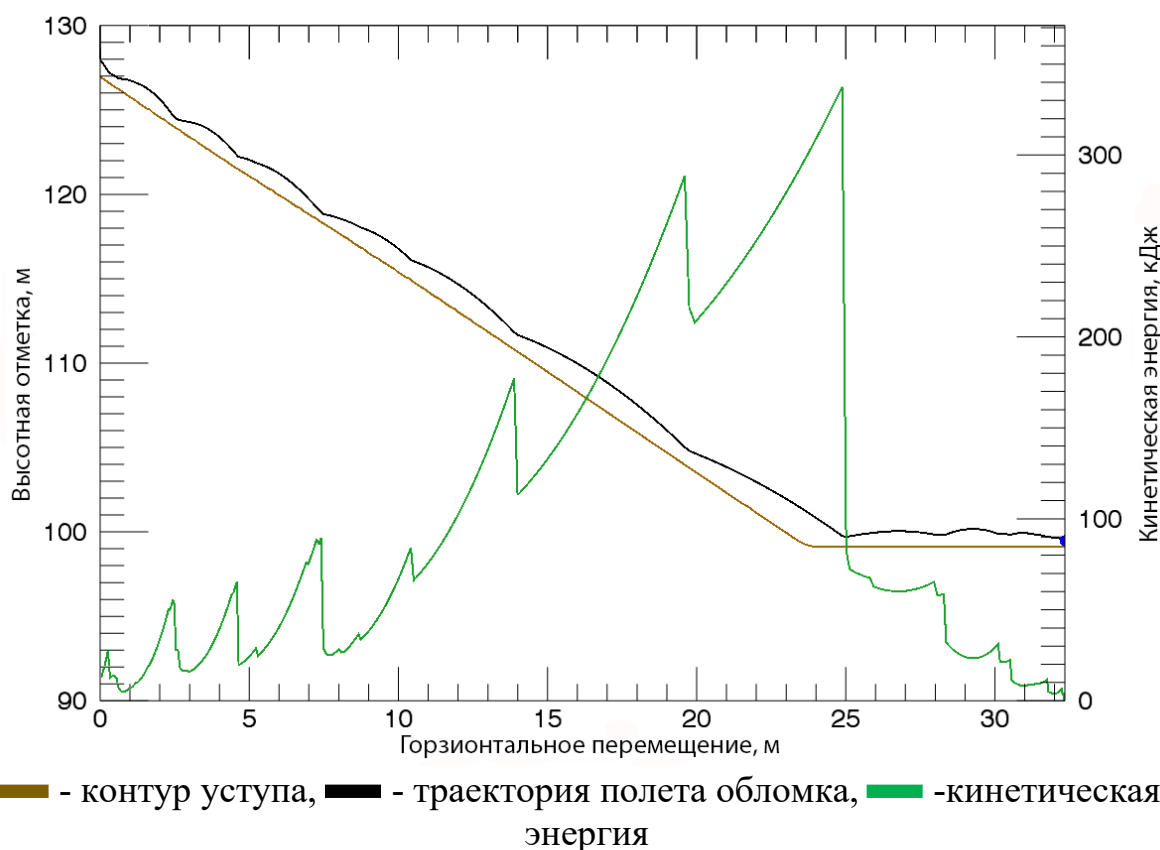


Рисунок 24 – Зависимость кинетической энергии обломка плоской формы от горизонтального перемещения при движении по склону

Окно создания обломка удлиненной формы и его характеристики приведены на рисунке 25.

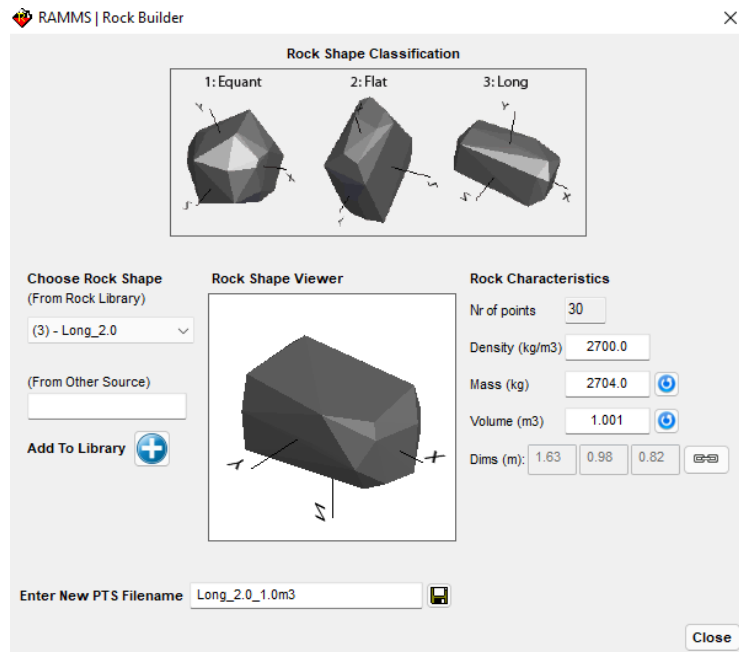


Рисунок 25 - Окно создания обломка удлиненной формы и его характеристики

Изменение кинетической энергии обломка удлиненной формы в процессе перемещения по уступам представлено на рисунке 26.

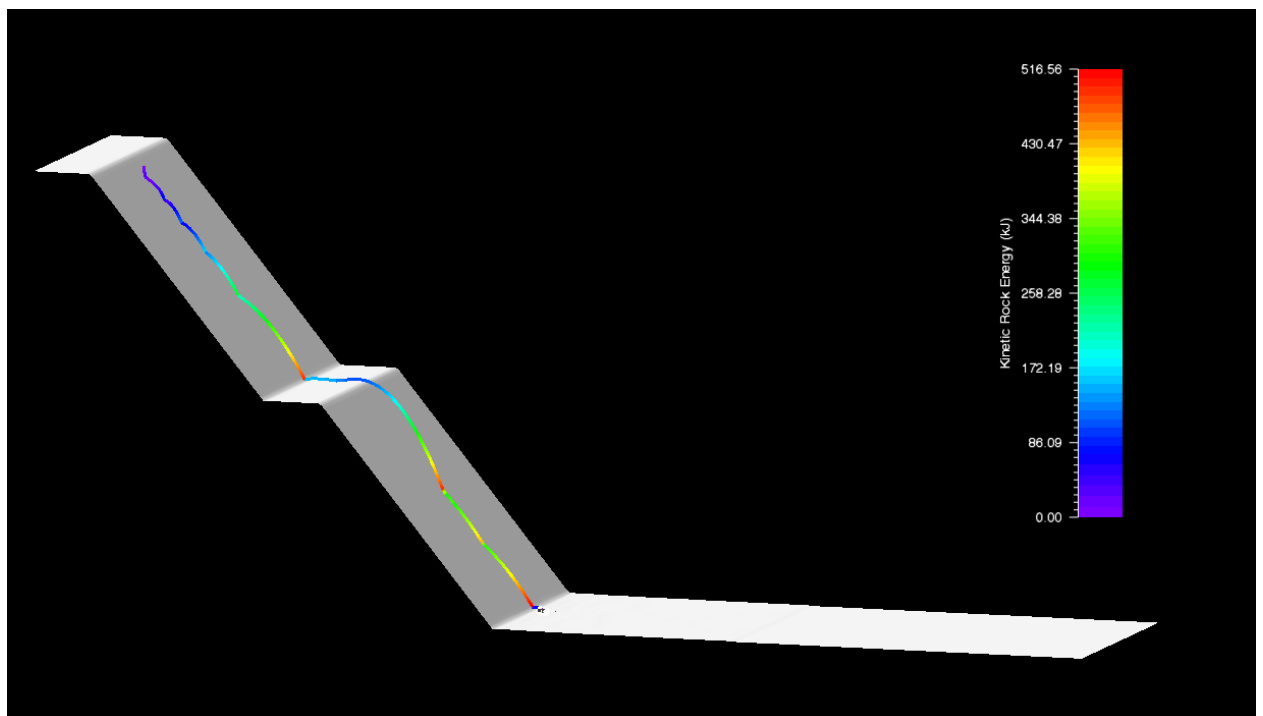


Рисунок 26 – Изменение кинетической энергии в процессе перемещения обломка удлиненной формы

В результате проведения моделирования обломка удлиненной формы выявлено, что перемещение обломка по горизонтали составило 63,3 метра, максимальное значение кинетической энергии (516,56 кДж) наблюдается перед столкновением обломка со дном карьера, после чего происходит торможение и полная остановка движения.

График зависимости кинетической энергии обломка удлиненной формы от горизонтального перемещения при движении по склону представлен на рисунке 27.

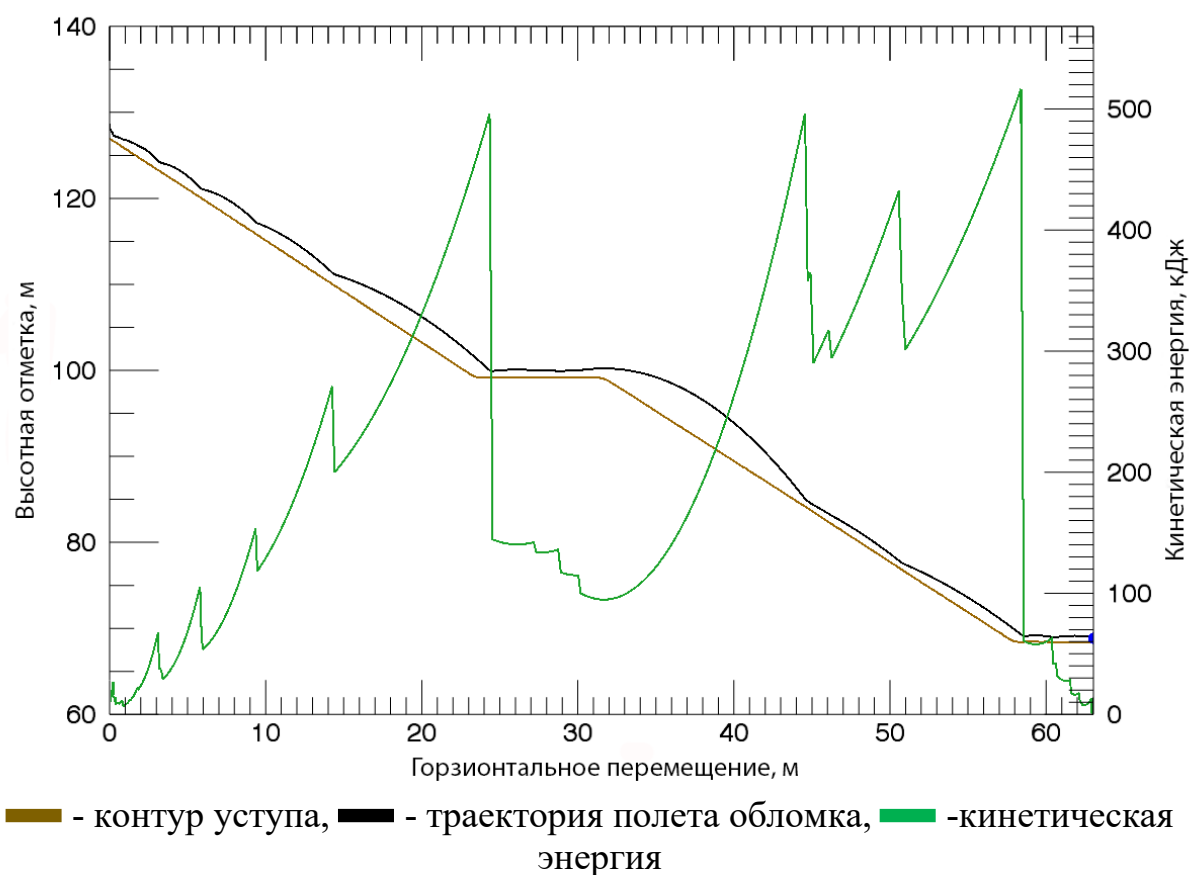


Рисунок 27 – Зависимость кинетической энергии обломка плоской формы от горизонтального перемещения при движении по склону

Обобщение результатов моделирования приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Обобщенные результаты моделирования обломков различных форм

Форма обломка	Максимальная скорость, м/с	Максимальная высота отскока, м	Максимальная кинетическая энергия, кДж	Дальность полета, м
Кубическая	18,7	2,8	532,2	76,7
Сферическая	18,3	2,3	569,5	120,0
Эквивалентная	23,9	5,4	813,1	97,5
Плоская	14,9	2,1	337,5	32,3
Удлиненная	18,8	4,8	516,6	63,3

Поскольку наибольшей кинетической энергией обладает обломок эквивалентной формы, то дальнейшее моделирование проведено для обломков данной формы [111,112].

Выводы к главе 2

По результатам проведенного моделирования определено влияние формы обломка камнепада на его скорость, максимальную кинетическую энергию, горизонтальное смещение обломка (дальность полета) и высоту отскока. Обломки кубической, сферической и удлиненной форм обладают близкими значениями максимальной кинетической энергии, однако дальность полета, скорость и высота отскока отличны в каждом из случаев. Выявлено, что горизонтальное смещение обломка обратно пропорционально максимальной площади контакта обломка с поверхностью. Это четко прослеживается для всех исследуемых форм: сферический обломок обладает наименьшей площадью контакта и наибольшим горизонтальным перемещением, в то же время плоский обломок характеризуется максимальной площадью контакта и минимальным горизонтальным перемещением.

Также определено, что рост числа плоских граней и, как следствие, ребер в месте их стыка, вызывает увеличение максимальной высоты отскока обломка от поверхности, что сопровождается возрастанием максимальной скорости и максимальной кинетической энергии.

Вышесказанные утверждения иллюстрируются результатами моделирования обломка эквивалентной формы, площадь контакта которого с поверхностью меньше, чем у обломков кубической, плоской и удлиненной формы, а его горизонтальное перемещение больше. В то же время, его площадь контакта больше, чем у обломка сферической формы, а горизонтальное перемещение меньше.

При этом обломок эквивалентной формы характеризуется наибольшим числом ребер, что приводит к повышению вероятности падения на ребро, что заметно увеличивает высоту отскока от поверхности, его скорость и максимальную кинетическую энергию. Из результатов численного моделирования видно, что обломок эквивалентной формы обладает наибольшими значениями высоты отскока, скорости и максимальной кинетической энергии.

По результатам эмпирических расчетов выявлено, что значения, полученные по методике, описанной в ОДМ 218.2.051-2015 «Рекомендации по проектированию и расчету противообвальных сооружений на автомобильных дорогах», наиболее близки к результатам численного моделирования. Однако данная методика предназначена только для расчетов обломков сферической формы, что видно по высокой сходимости результатов численного моделирования и эмпирического расчета для обломков сферической формы, и плохо подходит для обломков других форм.

Вышесказанное позволило сформулировать следующие выводы:

1. Форма обломка оказывает существенное влияние на его динамические характеристики движения, при одинаковом объеме обломков разных форм их максимальная кинетическая энергия может отличаться в 2,4 раз;
2. Чем больше площадь грани максимального размера у обломка, тем меньше его горизонтальное перемещение, так, например, у обломка сферической формы наименьшая площадь контакта с поверхностью и

максимальное перемещение, а у обломка плоской формы наибольшая максимальная площадь контакта с поверхностью и наименьшее перемещение;

3. Рост числа плоских граней и, как следствие, ребер на месте их стыка, вызывает увеличение максимальной высоты отскока обломка от поверхности и возрастание максимальной скорости и кинетической энергии.

3 Определение влияния высоты уступа и угла наклона на максимальную кинетическую энергию обломка эквивалентной формы

Для имитации склона и проведения численного моделирования было создано несколько трехмерных моделей, состоящих из двух уступов с различными комбинациями следующих параметров: высотой $h = 15$ м, 30 м и 45 м, углами наклона $\alpha = 50$ град., 60 град. и 70 град., шириной бермы $b = 8$ м и горизонтальной площадкой в основании модели. Моделирование будет производиться для обломков с объемами от 0,5 до 10 м³, что описывает полный диапазон объемов, встречающихся при проведении открытых горных работ [80].

В результате проведения моделирования различных объемов обломков для моделей с углами наклона 50 град., 60 град. и 70 град., шириной бермы 8 м и высотой уступа 30 м были получены следующие значения максимальной кинетической энергии обломков, приведенные в таблице 4.

Таблица 4 - Зависимость максимальной кинетической энергии обломка от его объема и угла наклона с высотой уступов 30 метров

Объем обломка, м ³	Максимальная кинетическая энергия обломка, кДж, при различных значениях угла наклона уступа		
	50 град.	60 град.	70 град.
0,5	317	353	389
1	650	716	801
2	1309	1443	1664
3	2012	2185	2680
4	2908	3105	3684
5	3914	4269	4584
6	5083	5615	6111
8	7652	8154	8478
10	10485	12179	13798

График зависимости максимальной кинетической энергии обломка от его объема для каждого угла наклона представлен на рисунке 28.

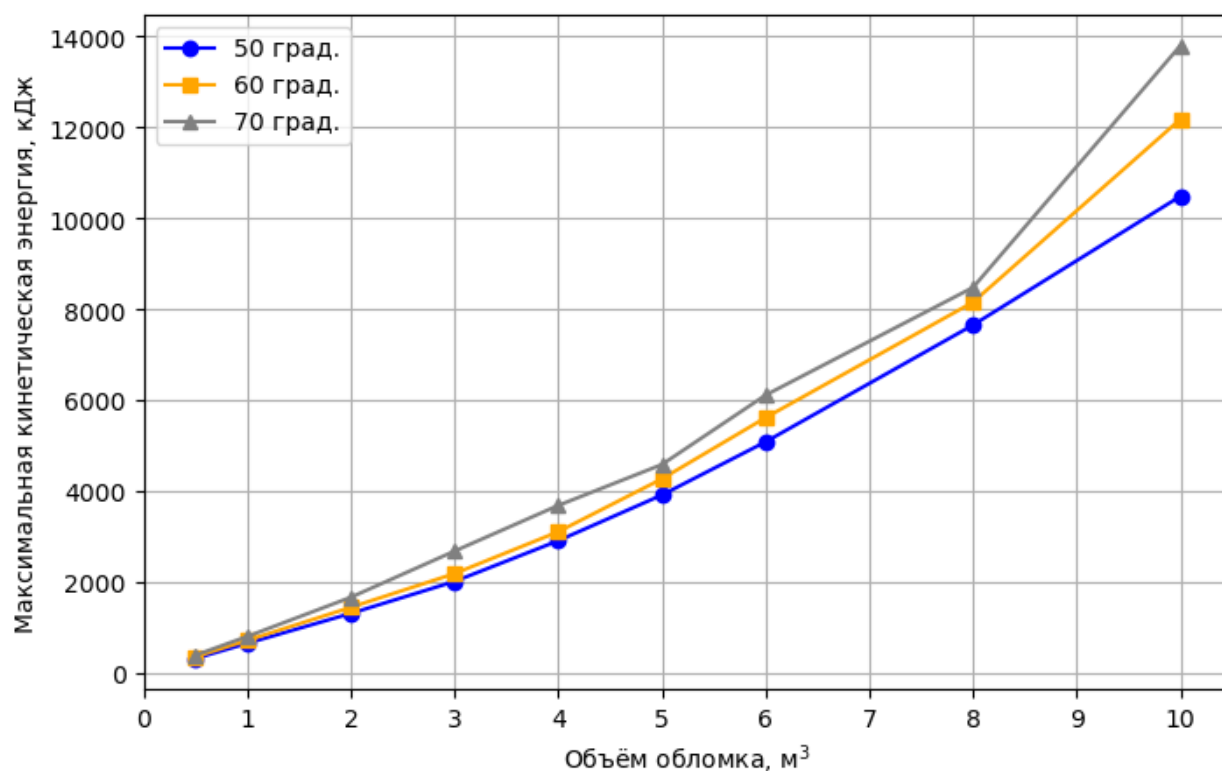


Рисунок 28 – График зависимости максимальной кинетической энергии обломка от объема для различных углов наклона

Определена удельная максимальная кинетическая энергия обломка (энергия, приходящаяся на 1 м³ обломка), для каждого угла наклона путем деления соответствующего значения максимальной кинетической энергии на его объем. Полученные значения представлены в таблице 5.

Таблица 5 - Значения удельной максимальной кинетической энергии обломка для различных величин его объемов и углов наклона при высоте уступа 30 м

Объем обломка, м³	Удельная максимальная кинетическая энергия обломка, кДж/м³		
	50 град.	60 град.	70 град.
0,5	634	706	778
1	650	716	801
2	655	722	832
3	671	728	893
4	727	776	921
5	783	854	917
6	847	936	1019
8	957	1019	1060
10	1049	1218	1380

Исходя из значений, представленных в таблице 5, можно сделать заключение, что удельная максимальная кинетическая энергия возрастает с увеличением угла наклона уступа, а также при увеличении объема самого обломка.

На основании анализа графика, представленного на рисунке 28, можно сделать вывод, что зависимость максимальной кинетической энергии обломка от его объема представляет собой полином второй степени. Регрессионные зависимости максимальной кинетической энергии обломка от его объема для уступа высотой 30 м приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Регрессионные зависимости максимальной кинетической энергии обломка от его объема для высоты уступа 30 метров и углов наклона 50,60 и 70 град.

Угол наклона, град.	Регрессионные зависимости
50	$y = 53,93 \cdot x^2 + 508,13 \cdot x + 53,73$
60	$y = 75,38 \cdot x^2 + 425,83 \cdot x + 207,42$
70	$y = 89,99 \cdot x^2 + 395,36 \cdot x + 400,19$

По выражениям, приведенным в таблице 6, произведен расчет максимальной кинетической энергии для обломков эквивалентной формы объемами 2,5 м³ и 7 м³. Данные объемы лежат в границах полученных графиков, однако не участвовали в их построении. Также произведено численное моделирование с обломками данных объемов. Сравнение расчетных значений кинетической энергии на основе регрессионных зависимостей и значений, полученных в ходе численного моделирования представлено в таблице 7. Расхождение между результатами численного моделирования и расчетными значениями не превысило 4,0%.

Таблица 7 - Сравнение расчетных значений максимальной кинетической энергии и результатов моделирования

Объем обломка, м ³	Кинетическая энергия обломка, кДж					
	Расчетные значения			Результаты моделирования		
	50 град.	60 град.	70 град.	50 град.	60 град.	70 град.
2,5	1664	1743	1951	1448	1697	2082
7	6256	6882	7577	6184	6836	7584

При этом по результатам, представленным в таблице 7 видно, что в каждом случае, значения, полученные в результате численного моделирования в RAMMS:Rockfall, очень близки к расчетным, таким образом, использование данных уравнений для определения прогнозируемой максимальной кинетической энергии обломка с последующим расчетом на основе этих значений геометрических и геотехнических параметров предохранительного вала позволит обеспечить необходимый запас по прочности.

Аналогичный расчет произведен для высот уступов 15 и 45 метров. Регрессионные зависимости представлены в таблицах 10 и 13 соответственно.

График зависимости максимальной кинетической энергии обломка от объема для каждого угла наклона с высотой уступа 15 метров представлен на рисунке 29.

Таблица 8 - Зависимость максимальной кинетической энергии обломка от его объема и угла наклона для уступа высотой 15 м

Объем обломка, м ³	Максимальная кинетическая энергия обломка, кДж, при различных значениях угла наклона уступа		
	50 град.	60 град.	70 град.
0,5	152	167	177
1	308	352	383
2	622	735	799
3	952	1087	1354
4	1284	1548	1863
5	1783	2018	2387
6	2186	2597	2918
8	2980	3410	3947
10	3875	4399	5087

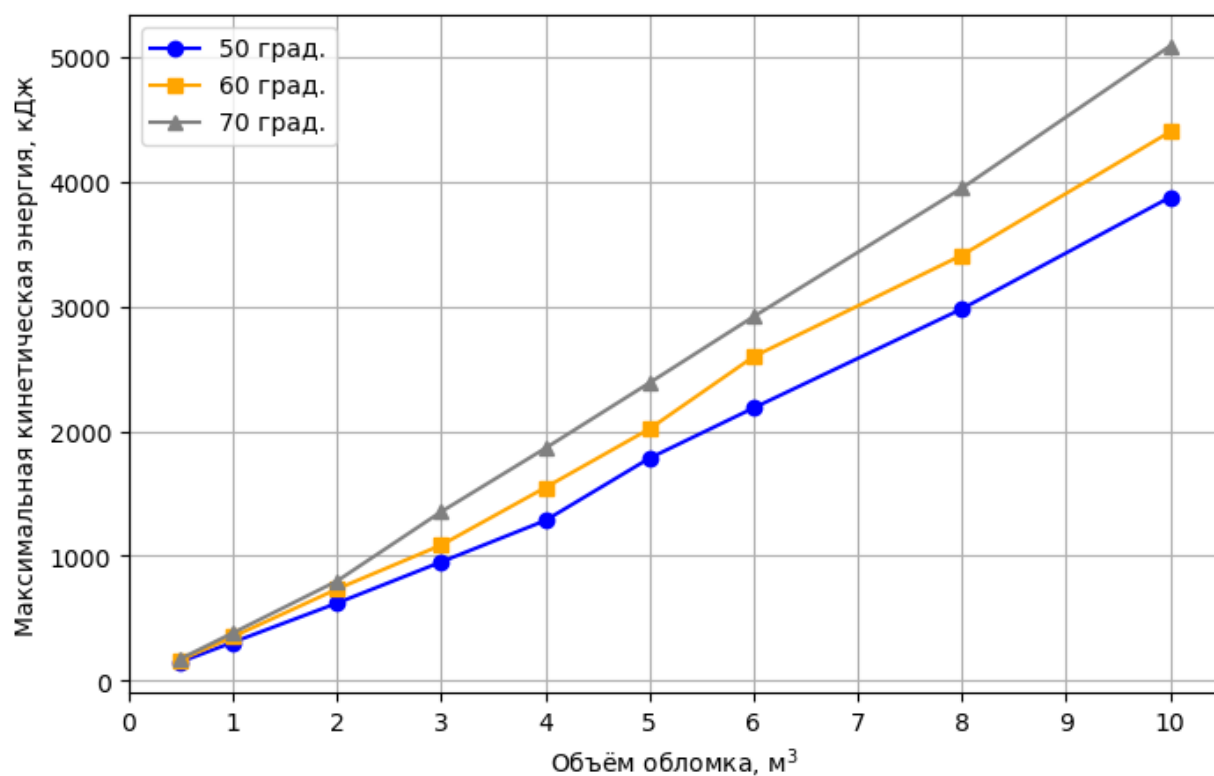


Рисунок 29 – График зависимости максимальной кинетической энергии от объема обломка для уступа высотой 15 метров

Значения удельной максимальной кинетической энергии обломка при высоте уступа 15 м представлены в таблице 9.

Таблица 9 - Значения удельной максимальной кинетической энергии обломка для различных величин его объемов и углов наклона уступа для уступа высотой 15 м

Объем обломка, м³	Удельная максимальная кинетическая энергия обломка, кДж/м³		
	50 град.	60 град.	70 град.
0,5	304	334	354
1	308	352	383
2	311	368	400
3	317	362	451
4	321	387	466
5	357	404	477
6	364	433	486
8	373	426	493
10	388	440	509

Регрессионные зависимости максимальной кинетической энергии обломка от его объема для уступа высотой 15 м приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Регрессионные зависимости максимальной кинетической энергии обломка от его объема для высоты уступа 15 метров и углов наклона 50,60 и 70 град.

Угол наклона, град.	Регрессионные зависимости
50	$y = 7,76 \cdot x^2 + 313,96 \cdot x + 26,70$
60	$y = 6,06 \cdot x^2 + 386,64 \cdot x + 56,09$
70	$y = 5,12 \cdot x^2 + 466,36 \cdot x + 90,45$

График зависимости максимальной кинетической энергии обломка от объема для каждого угла наклона с высотой уступа 45 метров представлен на рисунке 30.

Таблица 11 - Зависимость максимальной кинетической энергии обломка от его объема и угла наклона для уступа высотой 45 м

Объем обломка, м ³	Максимальная кинетическая энергия обломка, кДж, при различных значениях угла наклона уступа		
	50 град.	60 град.	70 град.
0,5	468	502	524
1	954	1067	1098
2	1942	2151	2272
3	3041	3591	4185
4	4082	4912	6157
5	5118	6285	7986
6	6159	7578	10007
8	8257	10211	13850
10	10487	13389	18082

График зависимости максимальной кинетической энергии обломка от объема для каждого угла наклона с высотой уступа 45 метров представлен на рисунке 30.

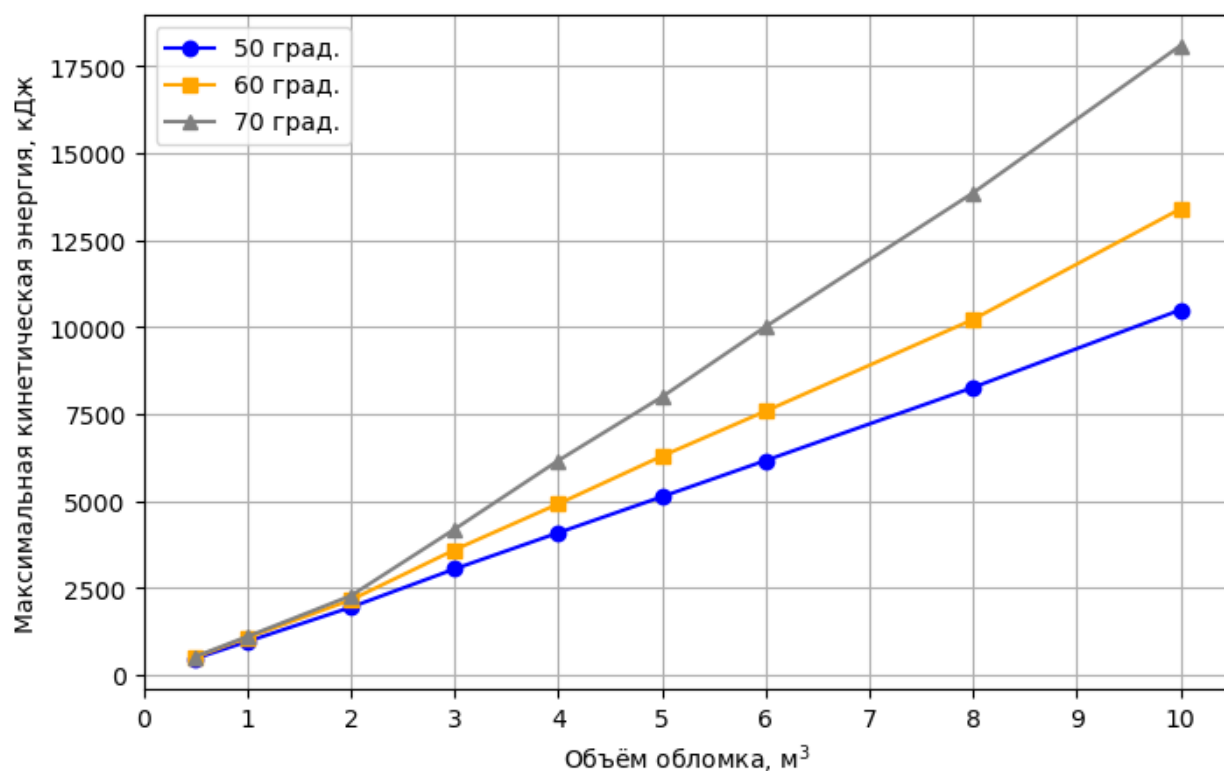


Рисунок 30 – График зависимости максимальной кинетической энергии от объема обломка для уступа высотой 45 метров

Значения удельной максимальной кинетической энергии обломка при высоте уступа 45 м представлены в таблице 13.

Таблица 12 - Значения удельной максимальной кинетической энергии обломка для различных величин его объемов и углов наклона уступа

Объем обломка, м³	Удельная максимальная кинетическая энергия обломка, кДж/м³		
	50 град.	60 град.	70 град.
0,5	936	1004	1048
1	954	1067	1098
2	971	1076	1136
3	1014	1197	1395
4	1021	1228	1539
5	1024	1257	1597
6	1027	1263	1668
8	1032	1276	1731
10	1049	1339	1808

Регрессионные зависимости максимальной кинетической энергии обломка от его объема для уступа высотой 45 м приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Регрессионные зависимости кинетической энергии обломка от его объема для высоты уступа 45 метров и углов наклона 50,60 и 70 град.

Угол наклона, град.	Регрессионные зависимости
50	$y = 4,09 \cdot x^2 + 1001,20 \cdot x + 52,96$
60	$y = 16,02 \cdot x^2 + 1185,80 \cdot x - 137,97$
70	$y = 36,85 \cdot x^2 + 1494,6 \cdot x + 475,82$

Выводы к главе 3

По результатам проведения моделирования определено влияние высоты уступа и угла наклона на максимальную кинетическую энергию обломка эквивалентной формы. Выявлено, что увеличение высоты уступа и угла наклона приводит к росту максимальной кинетической энергии обломка, также с ростом объема обломка увеличивается и удельная максимальная кинетическая энергия обломка.

Выявлено, что зависимость максимальной кинетической энергии обломка эквивалентной формы от объема для представляет собой полином второй степени в диапазоне объемов от 0,5 до 10 м³. Для каждой комбинации высот уступов и углов наклона в данном диапазоне выведены уравнения регрессия, которые связывают объем обломка и его максимальную кинетическую энергию. Проведено сравнение расчетных значений, полученных по уравнениям регрессии, и результатов моделирования для обломков с объемами 2,5 м³ и 7 м³, которые находятся в пределах исследуемого диапазона, однако не участвовали в построении графиков и выведении уравнений регрессии, среднее расхождение между результатами численного моделирования и расчетными значениями не превысило 4,0 % [113]. Таким образом, данные регрессионные зависимости обеспечивают необходимый уровень точности и подходят для оценки прогнозируемых значений максимальной кинетической энергии обломков эквивалентной формы.

4 Расчет энергии поглощения предохранительных противокамнепадных валов с учетом их геометрических и геотехнических параметров

Для создания конечно-элементной модели вала требуется определить геометрические характеристики самого вала: высоту h , ширину b , глубину d , а также угол заложения откосной части α . Схема предохранительного вала представлена на рисунке 31.

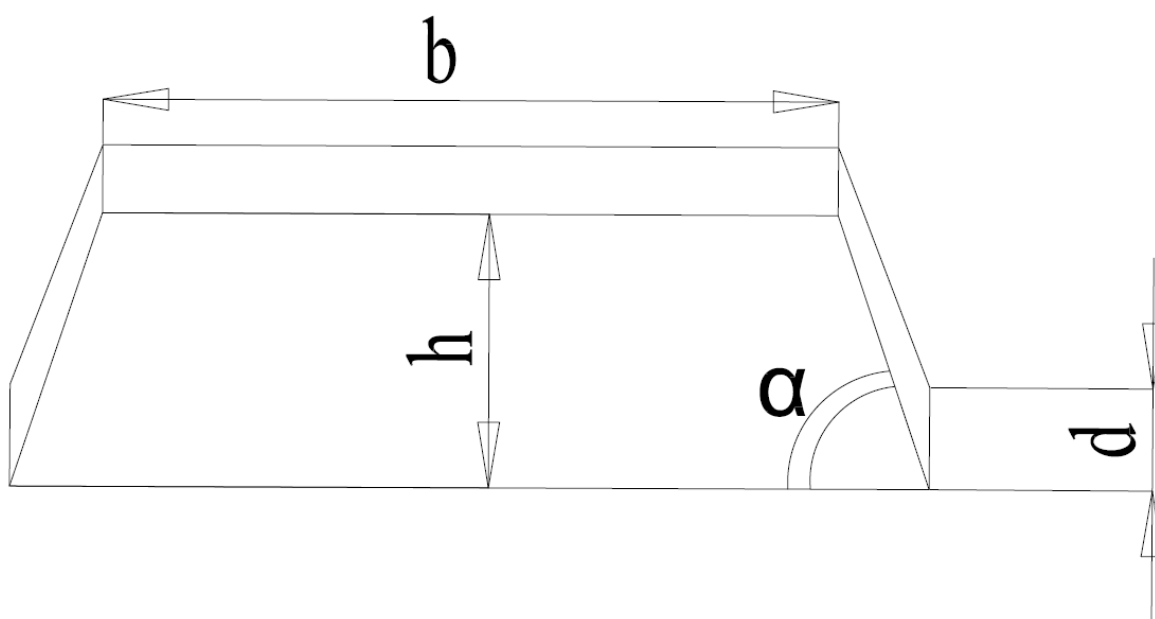


Рисунок 31 – Геометрические характеристики предохранительного вала

Высоту барьера определим, исходя из максимальной высоты отскока обломка эквивалентной формы объемом 1 м^3 , которая равняется 5,4 м. Следовательно, высота барьера должна быть не меньше данного значения. Для создания первичной модели примем высоту равной 6,0 м. Ширину барьера возьмем равной удвоенной высоте (12 м), глубину – половине высоты (3 м).

Также для создания конечно-элементной модели требуется определить характеристика грунта отсыпки предохранительного вала. Физико-механические характеристики грунтов определены в соответствии с

приложением А СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83». Удельный вес грунта $\gamma=16$ кН/м³, модуль Юнга $E=44$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,33$, удельное сцепление $c=45$ кПа, угол внутреннего трения $\varphi=34^\circ$.

При расчете принято допущение, что вся кинетическая энергия обломка $E_{\text{полн}}$ переходит в работу деформации A_{def} грунта, которая в свою очередь равняется предельной энергии поглощения предохранительного вала W .

$$E_{\text{полн}} = A_{\text{def}} = W = 813 \text{ кДж} \quad (4.1)$$

Тогда средняя сила, приложенная к поверхности предохранительного вала, определяется соотношением:

$$F = \frac{A_{\text{def}}}{d} = \frac{813 \cdot 10^3}{3} = 271 \text{ кН} \quad (4.2)$$

где d – глубина предохранительного вала, м

При значении средней силы $F = 271$ кН давление на грунт:

$$P = \frac{F}{S} = 244 \text{ кН/м}^2 \quad (4.3)$$

где $S = 1,11 \text{ м}^2$ – площадь контакта обломка с поверхностью предохранительного вала.

Нагрузка будет задаваться как динамическая с затуханием на 10% каждые 0,025 с – таким образом будет имитироваться поглощение энергии предохранительным валом.

Распределение деформации грунта по направлению приложения нагрузки представлены на рисунке 32.

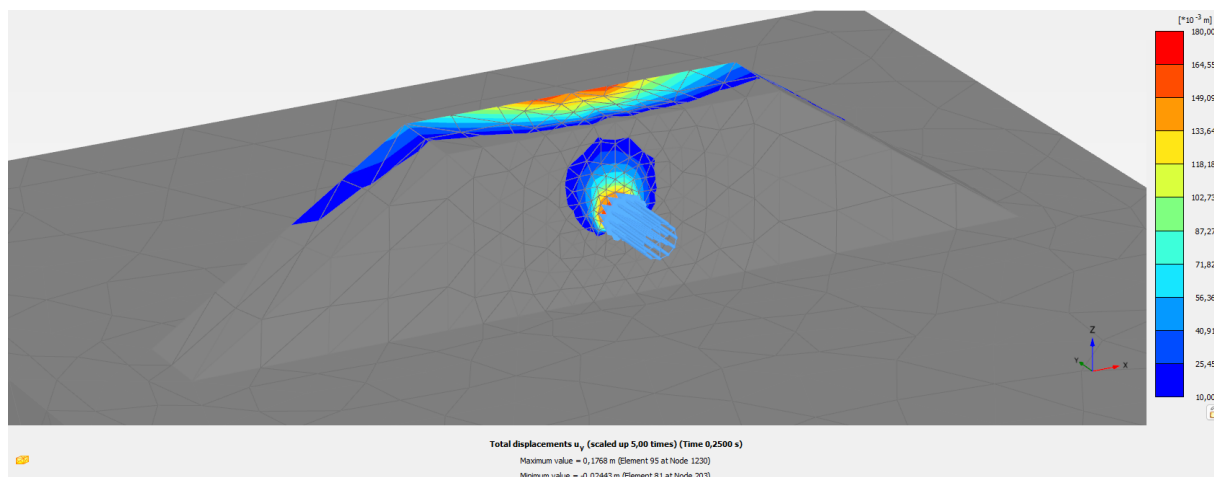


Рисунок 32 – Распределение деформации грунта предохранительного вала по направлению приложения нагрузки при $d=3$ м, $c=45$ кПа, $E=44$ МПа, $\varphi=34^\circ$, $\nu=0,33$

Максимальное значение деформации составило 17,7 см, следовательно, разрушение не наступило, данное значение деформации принято за базисный уровень при проведении численного моделирования.

На следующем этапе расчетов проведено исследование влияние изменения физико-механических свойств грунта отсыпки предохранительного вала на его абсолютную деформацию по направлению приложения нагрузки.

В таблице 14 приведены значения физико-механических характеристик грунтов, использованные при численном моделировании.

Таблица 14 – Характеристики грунта для численного моделирования

Глубина вала, м	Характеристики грунта				
	Грунт	Удельное сцепление, кПа	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Угол внутреннего трения, °
3	Супеси и пески элювиальные	15	44	0,33	34
3		20	44	0,33	34
3		25	44	0,33	34
3		30	44	0,33	34
3		35	44	0,33	34
3		40	44	0,33	34
3		45	44	0,33	34
3		45	14	0,33	34
3		45	19	0,33	34
3		45	24	0,33	34
3		45	29	0,33	34
3		45	34	0,33	34
3		45	39	0,33	34
3	Щебень	45	44	0,22	34
3	Брекчия	45	44	0,27	34
3	Суглинок	45	44	0,4	34
3	Супеси и пески элювиальные	45	44	0,33	20
3		45	44	0,33	25
3		45	44	0,33	30
3		45	44	0,33	40
2		45	44	0,33	34
1		45	44	0,33	34
4		45	44	0,33	34
5		45	44	0,33	34

На рисунке 33 представлено распределение деформации грунта предохранительного вала по направлению приложения нагрузки при удельном сцеплении равном 15 кПа.

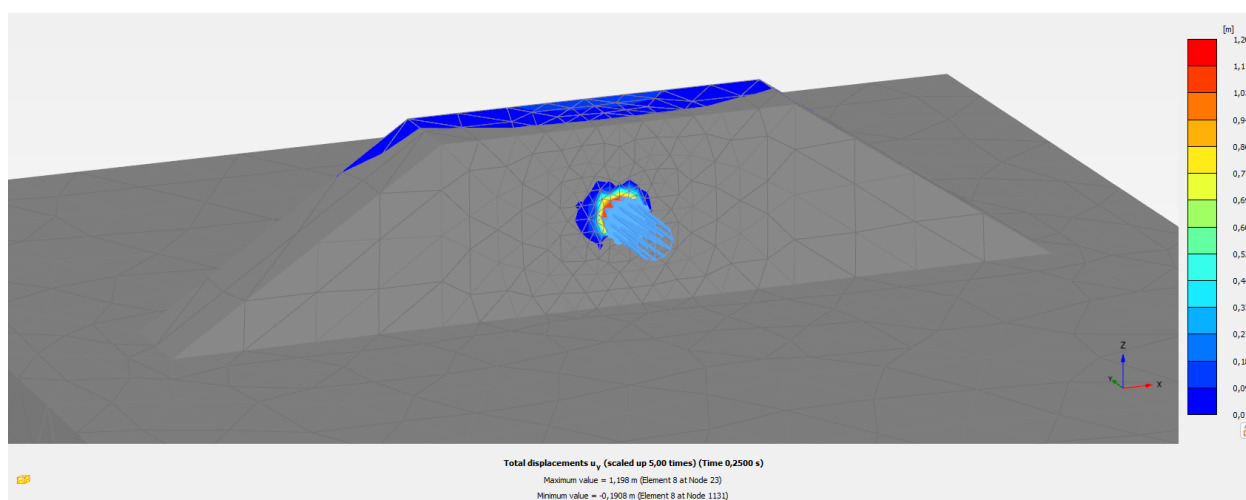


Рисунок 33 – Распределение деформации грунта предохранительного вала по направлению приложения нагрузки при $d=3$ м, $c=15$ кПа, $E=44$ МПа, $\varphi=34^\circ$, $\nu=0,33$

График зависимости абсолютной деформации грунта предохранительного вала от его удельного сцепления представлен на рисунке 34.

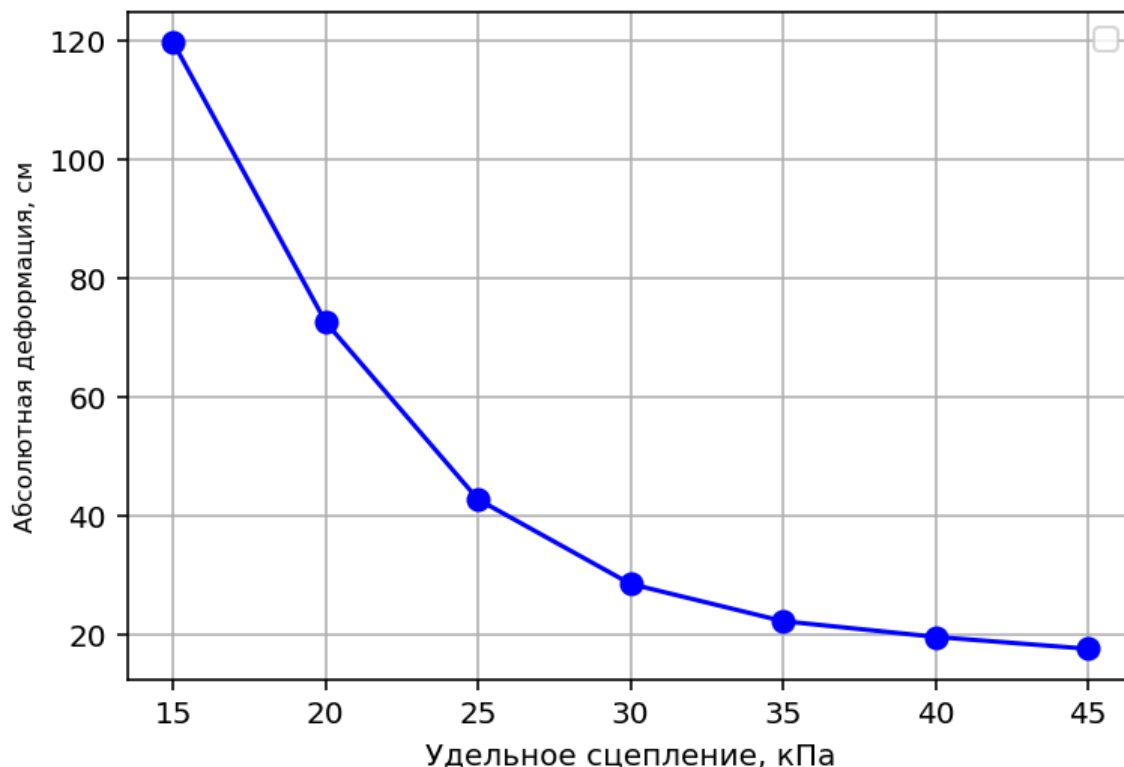


Рисунок 34 – График зависимости абсолютной деформации грунта от удельного сцепления при $d=3$ м, $E=44$ МПа, $\varphi=34^\circ$, $\nu=0,33$

По результатам численного моделирования можно сделать вывод, что изменение удельного сцепления оказывает значительное влияние на способность предохранительного вала поглощать кинетическую энергию обломков. Обусловлено это тем, что малые значения удельного сцепления характеризуют несвязные грунты и как следствие большая часть объема предохранительного вала не участвует в поглощении энергии обломка, что хорошо видно из рисунка 33, где большая часть грунта не подвержена деформациям.

На рисунке 35 представлены изолинии деформации грунта предохранительного вала по направлению приложения нагрузки при минимальном модуле Юнга равном 14 МПа.

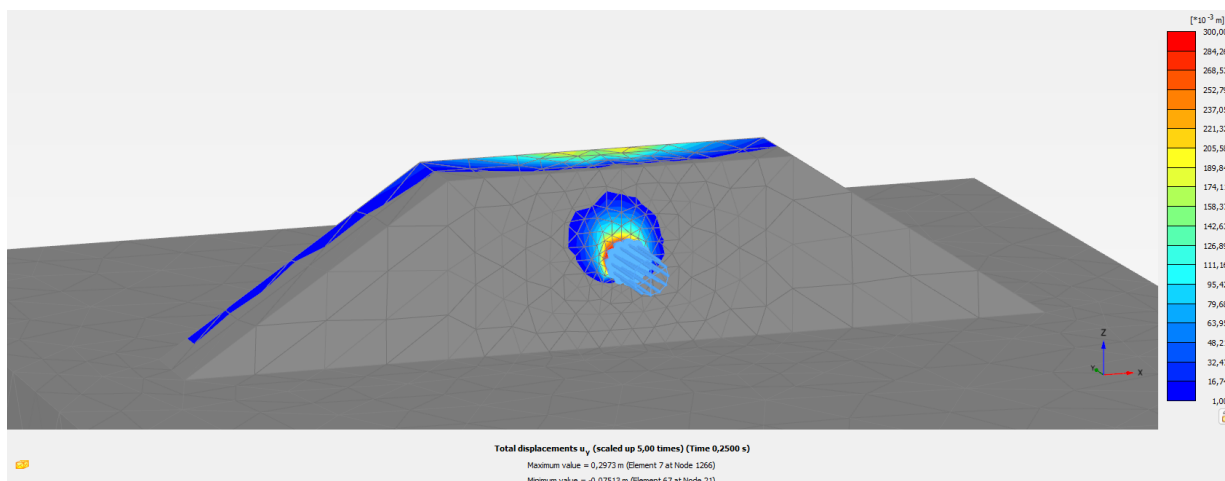


Рисунок 35 – Распределение деформации грунта предохранительного вала по направлению приложения нагрузки при $d=3$ м, $c=45$ кПа, $E=14$ МПа, $\varphi=34^\circ$, $\nu=0,33$

График зависимости абсолютной деформации грунта предохранительного вала от модуля Юнга представлен на рисунке 36.

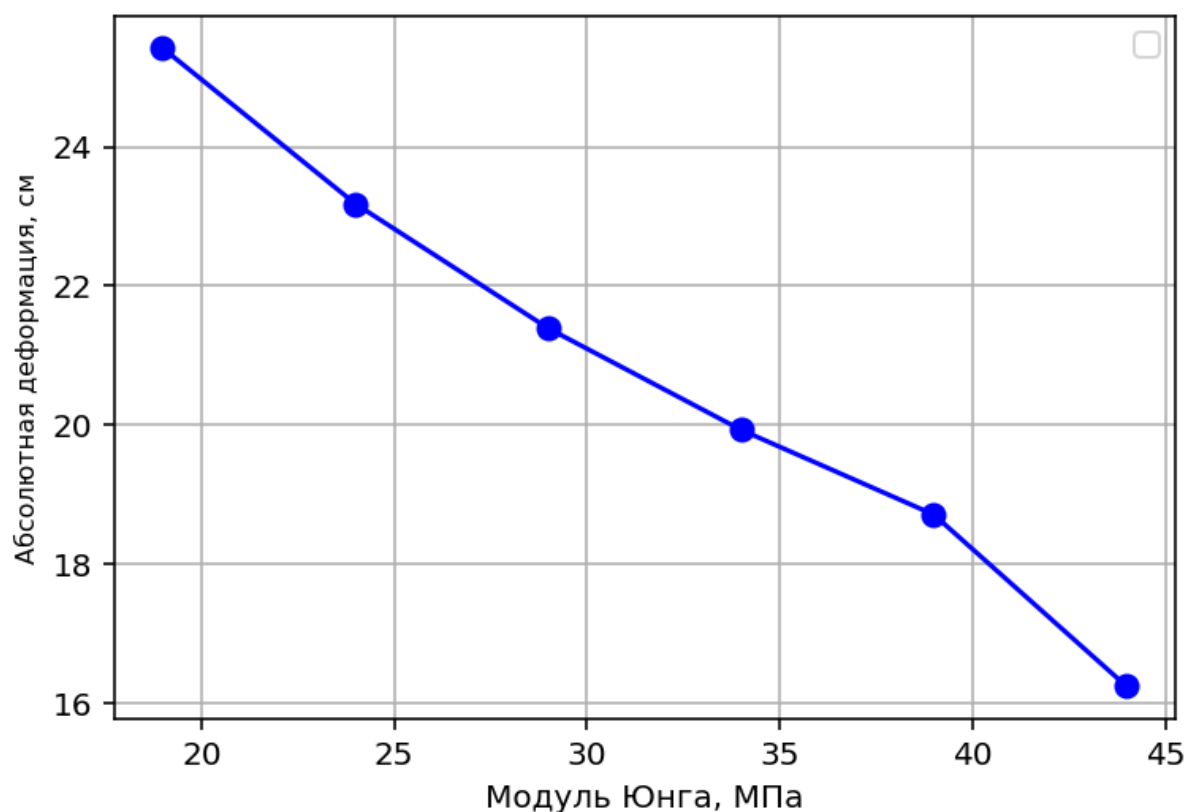


Рисунок 36 – График зависимости абсолютной деформации грунта от модуля Юнга при $d=3$ м, $c=45$ кПа, $\varphi=34^\circ$, $\nu=0,33$

Как видно из рисунка 36, изменение модуля Юнга без изменения коэффициента Пуассона, что равносильно изменению прочностных характеристик грунта, не оказывает такого сильного влияния на деформации.

На рисунке 37 представлены изолинии деформации грунта предохранительного вала по направлению приложения нагрузки при минимальном коэффициенте Пуассона равном 0,22.

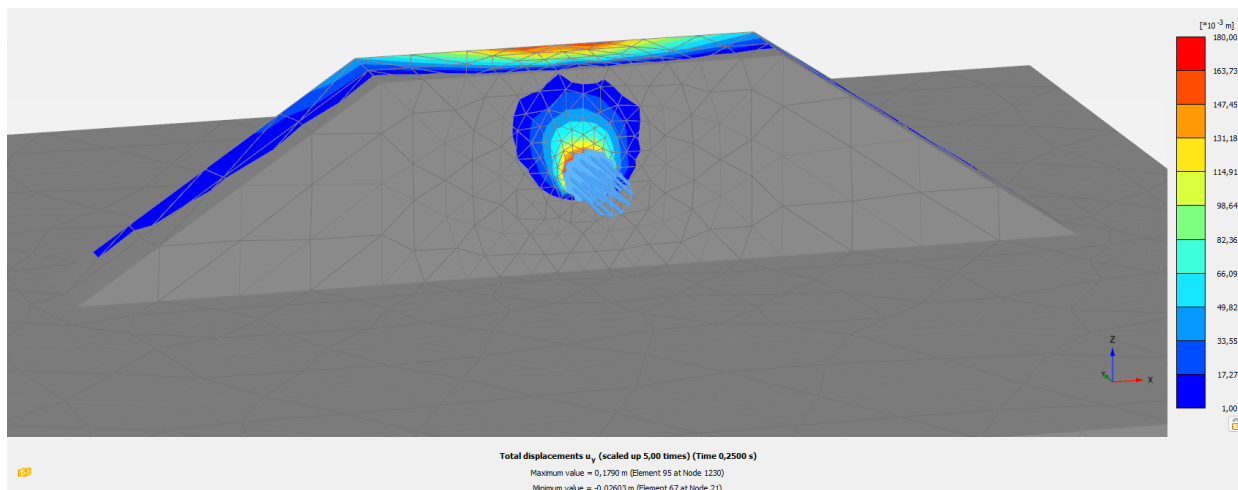


Рисунок 37 – Распределение деформации грунта предохранительного вала по направлению приложения нагрузки при $d=3$ м, $c=45$ кПа, $E=44$ МПа $\varphi=34^\circ$, $\nu=0,22$

График зависимости абсолютной деформации грунта предохранительного вала от коэффициента Пуассона представлен на рисунке 38.

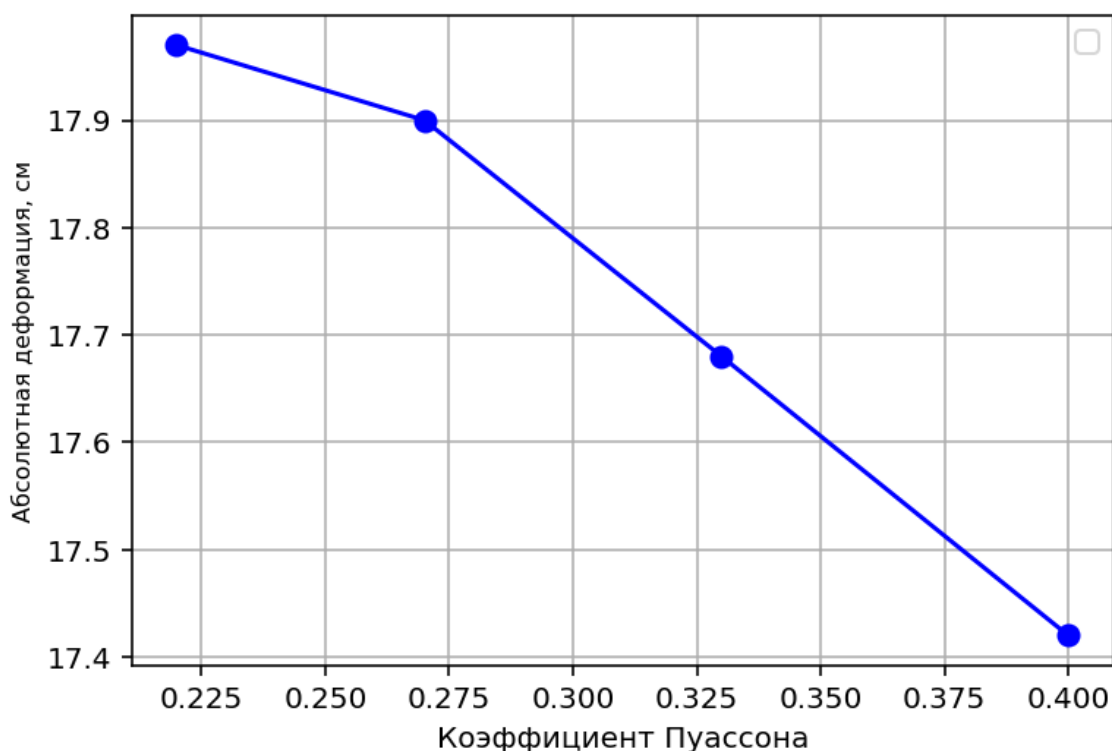


Рисунок 38— График зависимости абсолютной деформации грунта от коэффициента Пуассона при $d=3$ м, $c=45$ кПа, $E=44$ МПа $\varphi=34^\circ$

Как видно из рисунка 38, изменение коэффициента Пуассона не оказывает значительного влияния на значения деформации.

На рисунке 39 представлены изолинии деформации грунта предохранительного вала по направлению приложения нагрузки при минимальном значении угла внутреннего трения равном 20° .

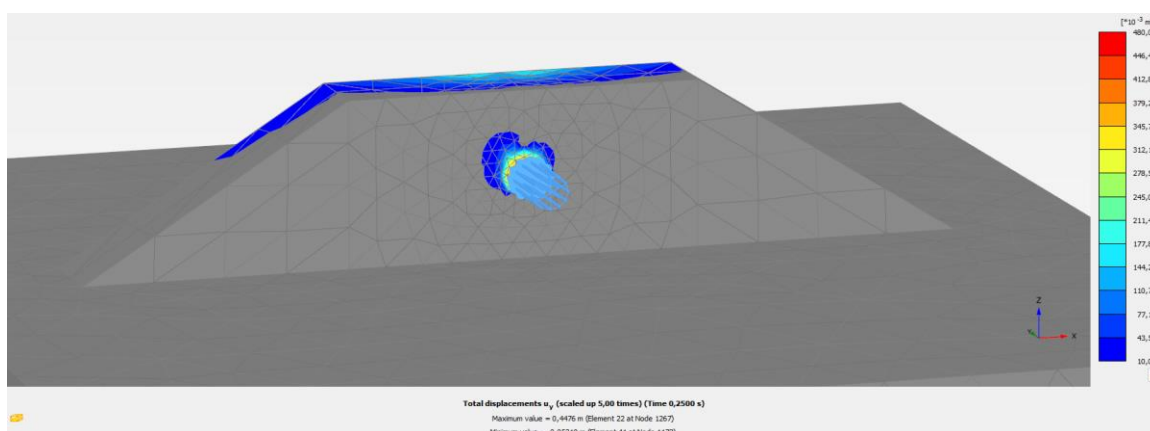


Рисунок 39 – Распределение деформации грунта предохранительного вала по направлению приложения нагрузки при $d=3$ м, $c=45$ кПа, $E=44$ МПа, $\varphi=20^\circ$, $\nu=0,33$

График зависимости деформации от угла внутреннего трения представлен на рисунке 40.

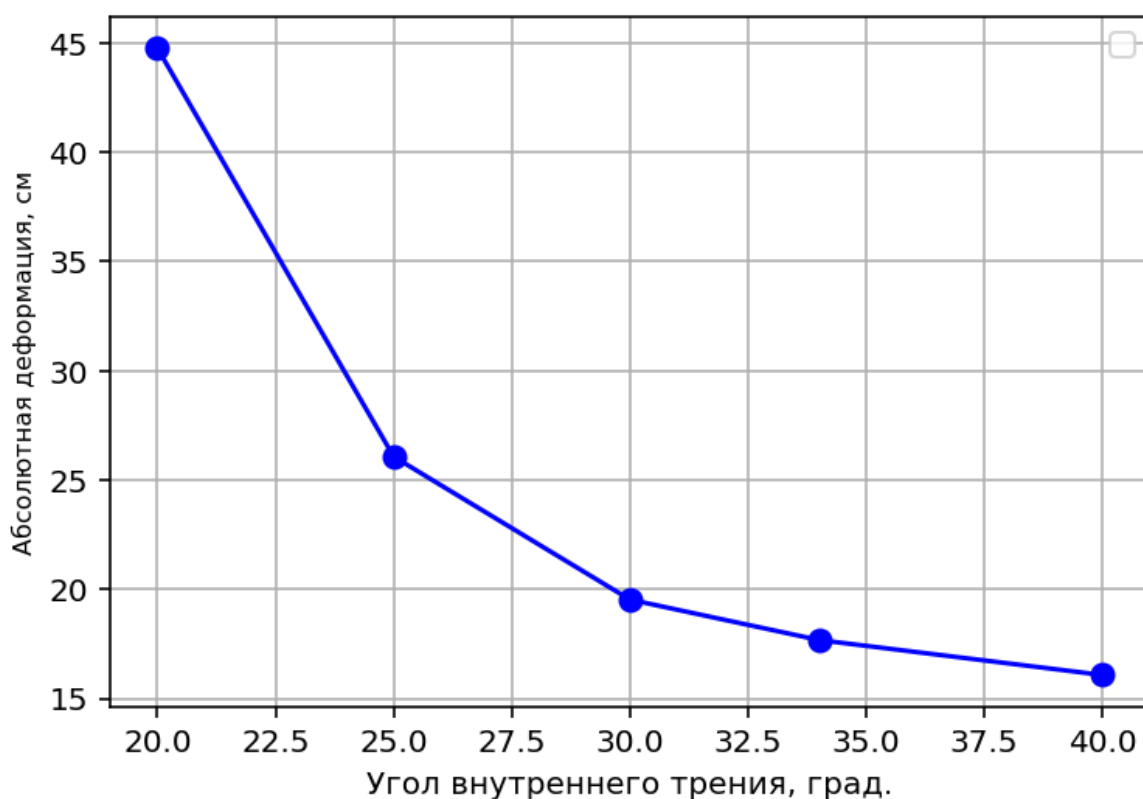


Рисунок 40– График зависимости абсолютной деформации грунта от угла внутреннего трения $d=3$ м, $c=45$ кПа, $E=44$ МПа, $\nu=0,33$

Как видно из рисунка 40 уменьшение угла внутреннего трения соответствует значительному росту деформации. Это обусловлено тем, что угол внутреннего трения характеризует способность грунтов сопротивляться сдвиговым деформациям.

Дополнительно для каждого набора входных параметров, представленных в таблице 11, было проведено моделирование с повышением энергии обломка пока абсолютная деформация предохранительного вала не сравняется с его глубиной, что позволяет оценить предельное значение кинетической энергии обломка, которую может поглотить предохранительный вал без разрушения. Сводная таблица результатов численного моделирования энергии поглощения предохранительных валов приведена в таблице 15.

Таблица 15 – Результаты численного моделирования энергии поглощения предохранительных валов

Глубина вала, м	Характеристики грунта					Энергия поглощения барьера, кДж
	Грунт	Удельное сцепление, кПа	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Угол внутреннего трения, °	
3	Супеси и пески элювиальные	15	44	0,33	34	20070
3		20	44	0,33	34	27489
3		25	44	0,33	34	31848
3		30	44	0,33	34	35141
3		35	44	0,33	34	38555
3		40	44	0,33	34	38901
3		45	44	0,33	34	41239
3		45	14	0,33	34	38268
3		45	19	0,33	34	39930
3		45	24	0,33	34	40519
3		45	29	0,33	34	40786
3		45	34	0,33	34	41019
3		45	39	0,33	34	41119
3	Щебень	45	44	0,22	34	40862
3	Брекчия	45	44	0,27	34	41052
3	Суглинок	45	44	0,4	34	41452
3	Супеси и пески элювиальные	45	44	0,33	20	21602
3		45	44	0,33	25	28245
3		45	44	0,33	30	35794
3		45	44	0,33	40	49734
2		45	44	0,33	34	8940
1		45	44	0,33	34	660
4		45	44	0,33	34	101880
5		45	44	0,33	34	214757

По результатам, представленным в таблице 15 можно сделать вывод, что наибольшее влияние на предельную энергию поглощения предохранительного вала оказывают удельное сцепление грунта c и глубина предохранительного вала d . При прочих равных параметрах выбор грунта с большим удельным сцеплением может повысить предельную энергию поглощения до 2 раз, также видно, что каждый дополнительный метр глубины предохранительного вала очень сильно влияет на предельную энергию поглощения. Увеличение глубины с 3 до 4 до метров позволяет повысить энергию поглощения с 50 МДж до 102 МДж, а с 4 до 5 метров со 102 до 215 МДж.

На основании значений, полученных при помощи численного моделирования, и программного кода в среде Python, был произведен подбор оптимального уравнения регрессии, которое связывает глубину

предохранительного вала d [м] и физико-механические характеристики грунта (модуль Юнга E [МПа], коэффициент Пуассона ν , удельное сцепление c [кПа], угол внутреннего трения φ [°]) с его предельной энергией поглощения. В результате выбора оптимального уравнения регрессии получены следующие результаты: линейная регрессия – значение коэффициента детерминации R^2 составило 0,176; полиномиальная регрессия второй степени - значение коэффициента детерминации R^2 составило 0,963; полиномиальная регрессия третьей степени - значение коэффициента детерминации R^2 составило 0,732; логарифмическая регрессия - значение коэффициента детерминации R^2 составило 0,750; гиперболическая регрессия - значение коэффициента детерминации R^2 составило 0,421; экспоненциальная регрессия - значение коэффициента детерминации R^2 составило 0,719. Таким образом, полиномиальная регрессия второй степени наиболее достоверно описывает зависимость предельной энергии поглощения предохранительного вала от его геометрических и геотехнических параметров. Полученное представлено в формуле (4.4), коэффициенты подстановки приведены таблице 16.

$$\begin{aligned}
 W = S \cdot d \cdot (& k_0 + k_d \cdot d + k_c \cdot c + k_E \cdot E + k_\nu \cdot \nu + k_\varphi \cdot \varphi + k_{d^2} \cdot d^2 \\
 & + k_{dc} \cdot d \cdot c + k_{dE} \cdot d \cdot E + k_{d\nu} \cdot d \cdot \nu + k_{d\varphi} \cdot d \cdot \varphi + k_{c^2} \cdot c^2 + k_{cE} \cdot c \cdot E + k_{c\nu} \cdot c \cdot \nu + k_{c\varphi} \cdot c \cdot \varphi + k_{E^2} \cdot E^2 \\
 & + k_{E\nu} \cdot E \cdot \nu + k_{E\varphi} \cdot E \cdot \varphi + k_{\nu^2} \cdot \nu^2 + k_{\nu\varphi} \cdot \nu \cdot \varphi + k_{\varphi^2} \cdot \varphi^2)
 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Таблица 16 – Коэффициенты подстановки для уравнения энергии поглощения

Коэффициент	Значение	Размерность
k_0	–8150	$\frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$
k_d	–0,386	$\frac{\text{кН}}{\text{м} \cdot \text{м}^2}$
k_c	0,340	$\frac{\text{кН}}{\text{кПа} \cdot \text{м}^2}$
k_E	–0,030	$\frac{\text{кН}}{\text{МПа} \cdot \text{м}^2}$
k_ν	–14,4	$\frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$
k_φ	–0,094	$\frac{\text{кН}}{\text{град} \cdot \text{м}^2}$

Продолжение таблицы 16

Коэффициент	Значение	Размерность
k_{d^2}	1911	$\frac{\text{кН}}{\text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2}$
k_{dc}	-16,4	$\frac{\text{кН}}{\text{м} \cdot \text{кПа} \cdot \text{м}^2}$
k_{dE}	-17,1	$\frac{\text{кН}}{\text{м} \cdot \text{МПа} \cdot \text{м}^2}$
k_{dv}	-43,3	$\frac{\text{кН}}{\text{м} \cdot \text{м}^2}$
$k_{d\varphi}$	-13,4	$\frac{\text{кН}}{\text{м} \cdot \text{град} \cdot \text{м}^2}$
k_{c^2}	-6,70	$\frac{\text{кН}}{\text{кПа} \cdot \text{кПа} \cdot \text{м}^2}$
k_{cE}	13,6	$\frac{\text{кН}}{\text{кПа} \cdot \text{МПа} \cdot \text{м}^2}$
k_{cv}	-647	$\frac{\text{кН}}{\text{кПа} \cdot \text{м}^2}$
$k_{c\varphi}$	7,34	$\frac{\text{кН}}{\text{кПа} \cdot \text{град} \cdot \text{м}^2}$
k_{E2}	-2,83	$\frac{\text{кН}}{\text{МПа} \cdot \text{МПа} \cdot \text{м}^2}$
k_{Ev}	-632	$\frac{\text{кН}}{\text{МПа} \cdot \text{м}^2}$
$k_{E\varphi}$	-5,14	$\frac{\text{кН}}{\text{МПа} \cdot \text{град} \cdot \text{м}^2}$
k_{v^2}	111420	$\frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$
$k_{v\varphi}$	-489	$\frac{\text{кН}}{\text{град} \cdot \text{м}^2}$
k_{φ^2}	8,12	$\frac{\text{кН}}{\text{град} \cdot \text{град} \cdot \text{м}^2}$

По формуле (4.4) был произведен расчет энергии поглощения для каждого набора входных данных, сравнение представлено в таблице 17.

Таблица 17 – Сравнение результаты численного моделирования энергии поглощения предохранительных валов и расчетных значений

Глубина вала, м	Характеристики грунта					Энергия поглощения вала, кДж	
	Грунт	Уд. сцеп., кН/м ²	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Угол внутреннего трения, град.	Результаты моделирования	Расчетные значения
3	Супеси и пески элювиальные	15	44	0,33	34	20070	21159
3		20	44	0,33	34	27489	27036
3		25	44	0,33	34	31848	31795
3		30	44	0,33	34	35141	35441
3		35	44	0,33	34	38555	37969
3		40	44	0,33	34	38901	39381
3		45	44	0,33	34	41239	39677
3		45	14	0,33	34	38268	38212
3		45	19	0,33	34	39930	39634

Продолжение таблицы 17

Глубина вала, м	Характеристики грунта	Энергия поглощения вала, кДж	Глубина вала, м	Характеристики грунта	Энергия поглощения вала, кДж	Глубина вала, м	Характеристики грунта
3	Супеси и пески элювиальные	45	24	0,33	34	40519	40586
3		45	29	0,33	34	40786	41066
3		45	34	0,33	34	41019	41076
3		45	39	0,33	34	41119	40613
3	Щебень	45	44	0,22	34	40862	44236
3	Брекчия	45	44	0,27	34	41052	41052
3	Суглинок	45	44	0,4	34	41452	41452
3	Супеси и пески элювиальные	45	44	0,33	20	21602	23783
3		45	44	0,33	25	28245	28242
3		45	44	0,33	30	35794	34056
3		45	44	0,33	40	49734	49734
2		45	44	0,33	34	8940	9577
1		45	44	0,33	34	660	595
4		45	44	0,33	34	101880	103621
5		45	44	0,33	34	214757	214136

Расхождение результатов численного моделирования и расчетных значений составила 2,5%, что является достаточным для оценки энергии поглощения барьера без проведения численного моделирования [114,115].

Дополнительно произведена оценка статистической значимости коэффициентов регрессии, представленных в формуле (4.4). Для каждого коэффициента рассчитываются t критерий Стьюдента, путем деления коэффициента регрессии на соответствующую ему стандартную ошибку, и уровень значимости p . Критерий значимости: $\alpha = 0,05$, это значит, что при уровне значимости p меньше критерия значимости α статистический коэффициент будет считаться значимым. Результаты статистической оценки значимости коэффициентов представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Результаты определения статистической значимости коэффициентов корреляции

Коэффициент	Значение	Стандартная ошибка (SE)	t критерий Стьюдента	Значимость ($\alpha=0,05$)
k_0	-8150,913	1057,921	-7,705	Да
k_d	-0,386	1,843	-0,209	Нет
k_c	0,340	0,308	1,105	Нет
k_E	-0,030	0,073	-0,414	Нет
k_v	-14,381	36,909	-0,390	Нет
k_φ	-0,094	1,180	-0,080	Нет
k_{d^2}	1911,141	232,785	8,209	Да
k_{dc}	-16,328	1,668	-9,789	Да
k_{dE}	-17,052	0,418	-40,820	Да
k_{dv}	-43,270	21,081	-2,052	Да
$k_{d\varphi}$	-13,390	0,673	-19,888	Да
k_{c^2}	-6,704	0,044	-151,418	Да
k_{cE}	13,639	0,109	125,043	Да
k_{cv}	-647,036	5,505	-117,522	Да
$k_{c\varphi}$	7,343	0,176	41,780	Да
k_{E^2}	-2,832	0,006	-444,913	Да
k_{Ev}	-632,777	3,270	-193,456	Да
$k_{E\varphi}$	-5,142	0,104	-49,246	Да
k_{v^2}	111420,377	2890,360	38,549	Да
$k_{v\varphi}$	-488,987	14,589	-33,517	Да
k_{φ^2}	8,118	0,046	177,391	Да

По результатам оценки модели выявлено следующее: статистическими незначимыми оказались $k_d, k_c, k_E, k_v, k_\varphi$, все остальные коэффициенты значимы.

В формуле (4.5) приведено уравнение регрессии с исключением статистически незначимых коэффициентов.

$$\begin{aligned}
 W = S \cdot d \cdot (& k_0 + k_{d^2} \cdot d^2 + k_{dc} \cdot d \cdot c + k_{dE} \cdot d \cdot E + k_{dv} \cdot d \cdot v \\
 & + k_{d\varphi} \cdot d \cdot \varphi + k_{c^2} \cdot c^2 + k_{cE} \cdot c \cdot E + k_{cv} \cdot c \cdot v + k_{c\varphi} \\
 & \cdot c \cdot \varphi + k_{E^2} \cdot E^2 + k_{Ev} \cdot E \cdot v + k_{E\varphi} \cdot E \cdot \varphi + k_{v^2} \cdot v^2 \\
 & + k_{v\varphi} \cdot v \cdot \varphi + k_{\varphi^2} \cdot \varphi^2)
 \end{aligned} \quad (4.5)$$

По формуле (4.5) произведен аналогичный расчет и выполнено сопоставление со значениями, полученными по формуле (4.4). Сопоставление представлено в таблице 19.

Таблица 19 – Сопоставление значений предельной энергии поглощения вала, полученных по формулам (4.4) и (4.5)

Глубина вала, м	Характеристики грунта					Энергия поглощения вала, кДж	
	Грунт	Удельное сцепление, кН/м ²	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Угол внутреннего трения, град.	Формула 4.4	Формула 4.5
3	Супеси и пески элювиальные	15	44	0,33	34	21159	21176
3		20	44	0,33	34	27036	27047
3		25	44	0,33	34	31795	31802
3		30	44	0,33	34	35441	35441
3		35	44	0,33	34	37969	37964
3		40	44	0,33	34	39381	39370
3		45	44	0,33	34	39677	39661
3		45	14	0,33	34	38212	38192
3		45	19	0,33	34	39634	39616
3		45	24	0,33	34	40586	40568
3		45	29	0,33	34	41066	41048
3		45	34	0,33	34	41076	41057
3		45	39	0,33	34	40613	40595
3	Щебень	45	44	0,22	34	44236	44215
3	Брекчия	45	44	0,27	34	41052	41032
3	Суглинок	45	44	0,4	34	41452	41437
3	Супеси и пески элювиальные	45	44	0,33	20	23783	23762
3		45	44	0,33	25	28242	28224
3		45	44	0,33	30	34056	34037
3		45	44	0,33	40	49734	49718
2		45	44	0,33	34	9577	9566
1		45	44	0,33	34	595	588
4		45	44	0,33	34	103621	103601
5		45	44	0,33	34	214136	214114

Максимальное расхождение между значениями, полученными по формулам (4.4), и (4.5) составило 1,18 %. Таким образом, исключение статически незначимых коэффициентов позволило оптимизировать формулу без потери точности расчета энергии поглощения предохранительного вала.

Выводы к главе 4

В результате проведения численного моделирования предохранительных валов в программном комплексе Plaxis 3D определено, что наибольшее влияние из физико-механических характеристик грунтов на энергию поглощения предохранительного вала оказывает удельное сцепление, а меньшее влияние оказывает коэффициент Пуассона. Следовательно, при проектировании данного вида барьеров рекомендуется подбирать грунты с

максимально возможным удельным сцеплением, либо предусматривать мероприятия по увеличению степени связности грунтов путем внесения органических или неорганических вяжущих веществ.

На основании вышесказанного следует, что при проектировании противокампаных предохранительных валов следует подбирать грунты отсыпки с максимальным значением удельного сцепления, а именно глины и суглинки, что позволит оптимизировать размеры конструкции и избежать дополнительных мероприятий по укреплению, что существенно снизит итоговые размеры и стоимость конструкции.

Также выведено уравнение, которое позволяет оценить предельную энергию, которую может поглотить предохранительный вал без разрушения. При помощи данного уравнения на основании физико-механических характеристик грунта, который будет использован для отсыпки и прогнозируемые значения максимальной кинетической энергии обломка можно подобрать оптимальную глубину d предохранительного вала. Высоту предохранительного вала h следует назначать исходя из максимальной прогнозируемой высоты отскока обломка, угол заложения откосной части α не должен превышать угол внутреннего трения грунта, ширина предохранительного вала b определяется индивидуального для каждого проекта в зависимости от зоны, которую следует оградить от обломков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований содержится решение актуальной научной задачи по обоснованию и разработке метода расчета параметров предохранительных валов для борьбы с камнепадом с борта карьера, что позволяет существенно упростить проектирование предохранительных валов и обеспечить безопасность при проведении открытых горных работ.

Основные научные и практические результаты работы и выводы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Проведены анализ и систематизация отечественного и зарубежного опыта по исследованию процессов камнепада.
2. Обоснован выбор программного комплекса для моделирования камнепадных процессов.
3. Выполнено сравнение кинематических и динамических характеристик движения обломка сферической формы на основе аналитического расчета и численного моделирования.
4. Определено влияния формы обломка камнепада на его скорость, кинетическую энергию, дальность полета и высоту отскока.
5. Выявлено, что обломок эквивалентной формы характеризуется максимальной кинетической энергией относительно остальных форм при прочих равных.
6. Получены регрессионные зависимости максимальной кинетической энергии обломка от его объема для разных комбинаций высот и углов наклона уступов.
7. Выявлено, что зависимость максимальной кинетической энергии обломка эквивалентной формы от его объема представляет собой полином второй степени для объемов в диапазоне от 0,5 до 10 м³.

8. Определено, что при увеличении объема обломка камнепада эквивалентной формы наблюдается рост удельной кинетической энергии обломка.

9. Выявлено, что наибольшее влияние на предельную энергию поглощения противокамнепадного предохранительного вала оказывает удельное сцепление грунта и глубина вала.

10. Получена регрессионная зависимость энергии поглощения предохранительного вала от его геометрических и геотехнических параметров.

11. Разработан метод расчета параметров предохранительных валов для борьбы с камнепадом с борта карьера и методика на его основе, которые позволяют рассчитать оптимальные параметры предохранительных валов для борьбы с камнепадом с борта карьера на основе прогнозируемых значений максимальной кинетической энергии обломка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ritchie A. M. Evaluation of Rockfall and Its Control. Highw. Res. Rec. 1963, Vol.17, pp. 13–28.
2. Yang P., Shang Y., Li Y., Wang H., Li K. Analysis of Potential Rockfalls on a Highway at High Slopes in Cold-Arid Areas (Northwest Xinjiang, China). Sustainability. 2017, Vol. 9, № 414. <https://doi.org/10.3390/su9030414>
3. Sassa K., Tsuchiya S., Ugai K., Wakai A., Uchimura T. Landslides: A review of achievements in the first 5 years. Landslides. 2009, Vol. 6, pp. 275–286. DOI:10.1007/s10346-009-0172-5
4. Courtial-Manent L., Mugnier J., Ravanel L., Carcaillet J., Deline P., Buoncristiani J. A significant doubling of rockfall rates since the Little Ice Age in the Mont-Blanc massif, inferred from ¹⁰Be concentrations and rockfall inventories // Earth and Planetary Science Letters. 2025, Vol. 651, № 119142. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2024.119142>.
5. Stoffel, M., Trappmann, D., Coullie, M. Rockfall from an increasingly unstable mountain slope driven by climate warming // Nature Geoscience. 2024, Vol.17, pp. 249–254. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01390-9>
6. Savi S, Comiti F, Strecker MR. Pronounced increase in slope instability linked to global warming: A case study from the eastern European Alps // Earth Surface Processes and Landforms. 2021; Vol. 46, pp. 1328–1347. <https://doi.org/10.1002/esp.5100>
7. Stoel M., Tiranti D., Huggel C. Climate change impacts on mass movements — Case studies from the European Alps. Sci. Total Environ. 2014, Vol. 493, pp. 1255–1266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.102>
8. Ravanel L., Magnin F., Deline P. Impacts of the 2003 and 2015 summer heatwaves on permafrost-affected rock-walls in the Mont Blanc massif. Sci. Total Environ. 2017, Vol. 609, pp. 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.055>

9. Lambert S., Bourrier F. Design of rockfall protection embankments: A review. Eng. Geol. 2013, Vol. 154, pp. 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.12.012>

10. Aguilar Aguilar M., Briones Bitar J., Carrión Mero P., Chávez M.A., Morante Carballo, F. Diseño de las soluciones de estabilización en el cementerio patrimonial de Guayaquil, Ecuador. In Proceedings of the 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Industry, Innovation, and Infrastructure for Sustainable Cities and Communities”, Montego Bay, Jamaica, 24–26 July 2019, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions: Boca Ratón, FL, USA, 2019. DOI:10.18687/LACCEI2019.1.1.368

11. Morante F., Aguilar M., Ramírez G., Blanco R., Carrión P., Briones J., Berrezueta E. Evaluation of Slope Stability Considering the Preservation of the General Patrimonial Cemetery of Guayaquil, Ecuador. Geosciences. 2019, Vol. 9, №103. <https://doi.org/10.3390/geosciences9030103>

12. Fell R. Landslide risk assessment and acceptable risk. Can. Geotech. J. 1994, Vol. 31, pp. 261–272. <https://doi.org/10.1139/t94-031>

13. Scavia C., Barbero M., Castelli M., Marchelli M., Peila D., Torsello G., Vallero G. Evaluating rockfall risk: Some critical aspects. Geoscience. 2020, Vol. 10, № 98. <https://doi.org/10.3390/geosciences10030098>

14. Cagnoli B., Romano G. P. Effect of grain size on mobility of dry granular flows of angular rock fragments: An experimental determination. J. Volcanol. Geotherm. Res. 2010, Vol. 193, pp. 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.03.003>

15. Aguilar M., Torrens R. B., Bernal C. B., Bitar J. B., Mero P. C., Carballo F. M. Caracterización geomecánica y análisis de las afectaciones del macizo rocoso en el casco urbano de Zaruma, Ecuador. In Proceedings of the 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Industry, Innovation, and Infrastructure for Sustainable Cities and Communities”, Montego Bay, Jamaica, 24–26 July 2019, Latin American and Caribbean

Consortium of Engineering Institutions: Boca Ratón, FL, USA, 2019, pp. 1-9.
DOI:10.18687/LACCEI2019.1.1.362

16. Keylock C., Domaas U. Evaluation of Topographic Models of Rockfall Travel Distance for Use in Hazard Applications. *Arctic Antarct. Alp. Res.* 1999, Vol. 31, № 312. <https://doi.org/10.1080/15230430.1999.12003314>

17. Bunce C.M., Cruden D., Morgenstern N.R.. Assessment of the hazard from rock fall on a highway. // *Canadian Geotechnical Journal*. 1997, Vol. 34, pp. 344-356. 10.1139/cgj-34-3-344.

18. Guzzetti F., Crosta G., Detti R., Agliardi F. STONE: A computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Comput. Geosci.* 2002, Vol. 28, pp. 1079–1093. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00025-0](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00025-0)

19. Agliardi F., Crosta G. B. High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2003, Vol. 40, pp. 455–471. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00021-2](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00021-2)

20. Corominas J., Copons R., Moya J., Vilaplana J. M., Altimir J., Amigó J. Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area. *Landslides* 2005, Vol. 2, pp. 343–357. <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0022-z>

21. Guzzetti F., Reichenbach P., Wieczorek G. F. Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2003, Vol. 3, pp. 491–503. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-491-2003>

22. Dorren L. K. A., Berger F., Putters U. S. Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2006, Vol. 6, pp. 145–153. <https://doi.org/10.5194/nhess-6-145-2006>

23. Stoel M., Schneuwly D., Bollschweiler M., Lièvre I., Delaloye R., Myint M., Monbaron M. Analyzing rockfall activity (1600–2002) in a protection forest—A case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology*. 2005, Vol. 68, pp. 224–241. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.043>

24. Saroglou C., Asteriou P., Zekkos D., Tsiambaos G., Clark M., Manousakis J. UAV-based mapping, back analysis and trajectory modeling of a coseismic

rockfall in Lefkada island, Greece. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2018, Vol. 18, pp. 321–333. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-321-2018>

25. Fanos A. M., Pradhan B. A Spatial Ensemble Model for Rockfall Source Identification from High Resolution LiDAR Data and GIS. IEEE Access. 2019, Vol. 7, pp. 74570–74585. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2919977

26. Коновалов Е. А. Система защиты от камнепадов // Инженерная защита – 2014. – № 4 – С. 58-63.

27. Коновалов Е. А., Сербо С. В. Борьба с камнепадами в Приморском крае // Инженерная защита – 2014 – № 1 – С. 26-33.

28. Гнявали К. Р., Шреста Р., Бхаттараи А., Магар П. Р., Дхунгана А. Р., Сукупайо И., Думару Р. О необходимости инженерной защиты непальской горной дороги от камнепадов // Геоинфо. – 2022 – № 2 – С. 6 – 19.

29. Фольквейн А., Фулде М., Кригер-Хауксон И. Оценка возможностей и надежности гибких систем защиты от камнепадов // Геоинфо. – № 7 – С. 42–47.

30. Горбачева Т. М. Обеспечение безопасности объекта под скалистым уступом от камнепадов: решение «Маккаферри» во Франции // Геоинфо – 2022 – № 12 – С. 46 – 55.

31. Решетняк С. П., Фокин В. А., Тарасов Г. Е., Александров В. А., Тогунов М. Б., Данилкин А. А., Каира В. Е. Гравитационные аспекты обеспечения безопасности работ в прибортовой зоне карьера // Горный журнал. – 2005. № 2. – С.71–72.

32. Мелихов М. В., Чащинов Г. В. Применение технологии скейлинг для защиты карьерного автотранспорта от камнепадов // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2017. – № 14. – С. 311–314.

33. Шубин Г. В., Заровняев Б. Н., Акишев А. Н., Лукин Э. Р. Защита транспортных берм от камнепада с уступов бортов глубоких карьеров // Известия Тульского Государственного Университета. Науки о Земле. – 2019. – № 2. – С.243–252.

34. Horton P., Jaboyedoff M., Rudaz B., Zimmermann M. Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2013. V. 13, p. 869–885. doi:10.5194/nhess-13-869-2013
35. Sturzenegger M., Holm K., Carie-Ann L., Matthias J. Semi-automated regional scale debris flow and debris flood susceptibility mapping based on digital elevation model metrics and Flow-R software, 7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, 2019, pp 1 -9.
36. Мариничев М. Б. Защита территорий от камнепадных процессов: учеб. пособие. – Краснодар: Изд-во ИЦ МНИФ «Общественная наука», 2017. – 97 с
37. Zheng L., Wu Y., Zhu Z., Ren K., Wei Q., Wu W., Zhang H. Investigating the Role of Earthquakes on the Stability of Dangerous Rock Masses and Rockfall Dynamics // *Frontiers in Earth Science.* 2022, Vol. 9, pp. 1-11. DOI=10.3389/feart.2021.824889
38. Marzorati S., De amicis M. Rock falls induced by earthquakes: A statistical approach // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering.* 2002, Vol. 22, pp. 565-577. 10.1016/S0267-7261(02)00036-2.
39. Massey, C. I., Olsen, M. J., Wartman, J., Senogles, A., Lukovic, B., Leshchinsky, B. A. Rockfall activity rates before, during and after the 2010/2011 Canterbury earthquake sequence // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2022, Vol. 127, pp. 1-25. <https://doi.org/10.1029/2021JF006400>
40. Alvioli M., Falcone G., Mendicelli A., Mori F., Fiorucci F., Ardizzone F., Moscatelli M. Seismically induced rockfall hazard from a physically based model and ground motion scenarios in Italy // *Geomorphology.* 2023, Vol. 429, № 108652. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108652>.
41. Draebing, D., Krautblatter, M. & Dikau, R. Interaction of thermal and mechanical processes in steep permafrost rock walls: a conceptual approach // *Geomorphology.* 2014, Vol. 226, pp. 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.08.009>

42. Draebing, D., Haberkorn, A., Krautblatter, M., Kenner, R. & Phillips, M. Thermal and mechanical responses resulting from spatial and temporal snow cover variability in permafrost rock slopes, Steintaelli, Swiss Alps: thermal and mechanical responses to snow in permafrost rock slopes // *Permafrost Periglacial Processes*. 2016, Vol.28, pp. 140–157. DOI:10.1002/ppp.1921
43. Zhang, T. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: an overview // *Reviews of Geophysics*. 2005, Vol. 43, № 2004RG000157. <https://doi.org/10.1029/2004RG000157>
44. Birien, T. and Gauthier, F. Assessing the relationship between weather conditions and rockfall using terrestrial laser scanner to improve risk management // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2023, Vol. 23, I. 1, pp.343-360. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-326>, 2022.
45. Larsen, I.J., Montgomery, D.R., Korup, O. Landslide erosion controlled by hillslope material // *Nature Geoscience* 3. 2010, pp. 247–251. <https://doi.org/10.1038/ngeo776>
46. Draebing D., Mayer T., Jacobs B., A. Binnie S., Dühnforth M., T. McColl S. Holocene warming of alpine rockwalls decreased rockwall erosion rates // *Earth and Planetary Science Letters*. 2024, Vol. 626, № 118496. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118496>
47. Draebing D., Mayer T., Jacobs B. Alpine rockwall erosion patterns follow elevation-dependent climate trajectories // *Communications Earth and Environment*. 2022, Vol. 21. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00348-2>
48. Orr E. N., Owen L. A., Saha S., Hammer, S. J. & Caffee M. W. Rockwall slope erosion in the north-western Himalaya // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2021, Vol. 126, № e2020JF005619. <https://doi.org/10.1029/2020JF005619>
49. Lim, M., Rosser, N., Allison, R., Petley, D. Erosional processes in the hard rock coastal cliffs at Staithes, North Yorkshire // *Geomorphology*. 2010, Vol. 114, pp. 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.02.011>

50. Lim M., Rosser N., Petley D., Keen M. Quantifying the controls and influence of tide and wave impacts on coastal rock cliff erosion // *Journal of Coastal Research*. 2011, Vol. 27, pp. 46–56. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-09-00061.1>
51. Lin G.W., Chen H., Hovius N., Horng M.J., Dadson S., Meunier P., Lines, M. Effects of earthquake and cyclone sequencing on landsliding and fluvial sediment transfer in a mountain catchment // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2008, Vol. 33, pp.1354–1373. DOI:10.1002/esp.1716
52. Luckman, B.H. Rockfalls and rockfall inventory data; some observations from the Surprise Valley, Jasper National Park, Canada // *Earth Surface Processes*. 1976, Vol. 1, I.3, pp. 287–298. <https://doi.org/10.1002/esp.3290010309>
53. Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F., Reichenbach, P. Landslides, earthquakes, and erosion // *Earth and Planetary Science Letters*. 2004, Vol. 229, pp.45–59. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.10.018>
54. Krautblatter M., Moser M, Schrott L., Wolf J., Morche D. Significance of rockfall magnitude and solute transport for rock slope erosion and geomorphic work in an Alpine trough valley // *Geomorphology*. 2012, Vol. 167, pp. 21-34. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.04.007>
55. Nasimi¹ R., Moreu F., Stormont J. Crack detection using tap-testing and machine learning techniques to prevent potential rockfall incidents. *Engineering Research Express*. 2021, Vol.3, pp. 45-55. DOI 10.1088/2631-8695/ac3fa
56. Erfen H. F. W. S., Musta B. Rock Endpoints and Barriers Estimation of Slope Failure in Pinousuk Gravel Slopes using Rocfall Simulation // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, Vol. 1103, I.1, id.012033, 9 pp. DOI:10.1088/1755-1315/1103/1/012033
57. Yuanyuan H., Lei N., Yan L., Wang H., Senfeng J., Xiaohan Z. The study of rockfall trajectory and kinetic energy distribution based on numerical simulations // *Natural Hazards*. 2021, Vol. 106. pp. 1 -21. DOI:10.1007/s11069-020-04457-z
58. Hengxing Lan, C. D. Martin, C.H. Lim, RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling //

Computers & Geosciences. 2007, Vol. 33, I. 2, p. 262–279.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.05.013>

59. Zhan J., Yu Z., Lv Y., Peng J., Song S., Yao Z. Rockfall Hazard Assessment in the Taihang Grand Canyon Scenic Area Integrating Regional-Scale Identification of Potential Rockfall Sources // Remote Sens, Vol. 14, 2022, № 3021.
<https://doi.org/10.3390/rs14133021>

60. Noël F., Nordang S. F., Jaboyedoff M., Digout M., Guerin A., Locat J., Matasci B. Comparing Flow-R, Rockyfor3D and RAMMS to Rockfalls from the Mel de la Niva Mountain: A Benchmarking Exercise, Geosciences. 2023, Vol. 13, p. 200. <https://doi.org/10.3390/geosciences13070200>

61. Mustafa U., Muhammed Z.O., Mesut Ş., Mehmet F.A. Evaluation of rockfall hazard based on UAV technology and 3D Rockfall Simulations. International Journal of Environment and Geoinformatics (IJECEO), Vol. 10. I. 4, p. 001-016. doi. 10.30897/ijegeo.10323768

62. Torsello G., Vallero G., Castelli M. The role of block shape and slenderness in the preliminary estimation of rockfall propagation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, Vol. 833, p. 012177. DOI 10.1088/1755-1315/833/1/012177.

63. Hengxing Lan, Martin C. D., Lim C. H. RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling // Computers & Geosciences. 2007, vol. 33, no. 2, pp. 262—279. DOI: 10.1016/j.cageo.2006.05.013.

64. Zhan J., Yu Z., Lv Y., Peng J., Song S., Yao Z. Rockfall hazard assessment in the taihang grand canyon scenic area integrating regional-scale identification of potential rockfall sources // Remote Sensing. 2022, vol. 14, article 3021. DOI: 10.3390/rs14133021.

65. Noël F., Nordang S. F., Jaboyedoff M., Digout M., Guerin A., Locat J., Matasci B. Comparing Flow-R, Rockyfor3D and RAMMS to Rockfalls from the Mel de la Niva Mountain: A Benchmarking Exercise // Geosciences. 2023, vol. 13, p. 200. DOI: 10.3390/geosciences13070200.

66. Utlu M., Öztürk M. Z., Şimşek M., Akgümüş M. F. Evaluation of rockfall hazard based on UAV technology and 3D Rockfall Simulations // International Journal of Environment and Geoinformatics. 2023, vol. 10, no. 4, pp. 001—016. DOI: 10.30897/ijegeo.10323768.

67 Horton P., Jaboyedoff M., Rudaz B., Zimmermann M. Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2013, vol. 13, pp. 869—885. DOI: 10.5194/nhess-13-869-2013.

68. Sturzenegger M., Holm K., Carie-Ann L., Matthias J. Semi-automated regional scale debris flow and debris flood susceptibility mapping based on digital elevation model metrics and Flow-R software / 7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation. 2019, pp. 1—9.

69. Erfen H. F. W. S., Musta B. Rock endpoints and barriers estimation of slope failure in pinousuk gravel slopes using rocfall simulation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, Vol. 1103, no. 1, article 012033. DOI: 10.1088/1755-1315/1103/1/012033.

70. Yuanyuan H., Lei N., Yan L., Wang H., Senfeng J., Xiaohan Z. The study of rockfall trajectory and kinetic energy distribution based on numerical simulations // Natural Hazards. 2021, Vol. 106, pp. 1—21. DOI: 10.1007/s11069-020-04457-z.p.

71. Leine R.I., Capobianco G., Bartelt, P., Christen M., Caviezel A. Stability of rigid body motion through an extended intermediate axis theorem: application to rockfall simulation // Multibody System Dynamics. 2021, Vol. 52, pp. 431-455. doi: 10.1007/s11044-021-09792-y

72. Caviezel A., Ringenbach A., Demmel S.E., Dinneen C.E., Krebs N., Bühler Y., Christen M., Meyrat G., Stoffel A., Hafner E., Eberhard L.A., Von Rickenbach D., Simmler K., Mayer P., Niklaus P.S., Birchler T., Aebi T., Cavigelli L., Schaffner M., Bartelt P. The relevance of rock shape over mass - implications for rockfall hazard assessments // Nature Communications. 2021, Vol. 12, № 5546 (9 pp.). doi: 10.1038/s41467-021-25794-y

73. Umili G., Taboni B., Ferrero A.M. Influence of uncertainties: A focus on block volume and shape assessment for rockfall analysis // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023, V.15, I. 9. p. 2250-2263. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.03.016>.
74. Kong, D.; Wu, F.; Saroglou, C.; Sha, P.; Li, B. In-Situ Block Characterization of Jointed Rock Exposures Based on a 3D Point Cloud Model. *Remote Sens*. 2021, V. 13, p. 2540. <https://doi.org/10.3390/rs13132540>
75. Shen W., Zhao T., Dai F., Jiang M., Zhou G.G. DEM analyses of rock block shape effect on the response of rockfall impact against a soil buffering layer // *Engineering Geology*. 2019, V. 249, p. 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.12.011>
76. Zhang Y, Xie L, He B, Zhao P. Research on the Impact Force of Rockfall Impacting Sand Cushions with Different Shapes // *Applied Sciences*. – 2022. Vol. 12, I. 7, №:3540. <https://doi.org/10.3390/app12073540>
77. Yi G., Xiang-Rong H., Xi-Qiang Y., Xiao-Yu P., Ling-Da M., Hao-Kang W., Yuan-Yuan H. Analysis of Rockfall Hazards Stopping position and Energy dissipation based on Orthogonal experiment // *E3S Web Conf*. -2021. Vol. 261, № 01004. DOI: 10.1051/e3sconf/202126101004
78. Zheng L, Zhu Z, Wei Q, Ren K, Wu Y, Wu W and Zhang H. A Stochastic Rockfall Model Related to Random Ground Roughness Based on Three-Dimensional Discontinuous Deformation Analysis // *Front. Earth Sci*. – 2021. Vol. 9, № 819751. doi: 10.3389/feart.2021.819751
79. Wang, Y., Jiang, W., Cheng, S., Song, P., and Mao, C. Effects of the impact angle on the coefficient of restitution in rockfall analysis based on a medium-scale laboratory test // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*. – 2018. Vol. 18, I. 11, pp. 3045–3061. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-3045-2018>, 2018
80. Ruiz Carulla R., Corominas J. Analysis of Rockfalls by Means of a Fractal Fragmentation Model // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020, Vol. 53., I. 2. DOI:10.1007/s00603-019-01987-2.

81. Bourgeois J., & Warren S., Armstrong J. Utilization of Statistical Analysis to Identify Influential Slope Parameters Associated with Rockfall at Open Pit Mines. Mining // Metallurgy & Exploration. -2023. Vol.40, I.4, pp. 1101-1112. Doi:10.1007/s42461-023-00776-4.
82. Ansari, M.K., Ahmad, M., Rajesh Singh and Singh, T.N. (2012). Rockfall Assessment near Saptashrungi Gad Temple, Nashik, Maharashtra, India, International Journal of Disaster Risk Reduction, 22, pp.77-83.
83. Ahmad, M., Umrao, R.K. Ansari, M.K. and Singh, T.N. Assessment of Rockfall Hazard along the Road Cut Slopes of State Highway-72, Maharashtra, India // Geomaterials. 2013, Vol. 3, I.1, pp. 15- 23.
84. Ansari, M.K., Ahmad, M., Rajesh Singh and Singh, T.N. Rockfall hazard assessment at Ajanta Cave, Aurangabad, Maharashtra, India // Arabian Journal of Geosciences. 2014, Vol. 7, I.5, pp. 1773- 1780.
85. Ansari, M.K., Ahmad, M. and Singh, T.N. Rockfall Hazard Analysis of Ellora Cave, Aurangabad, Maharashtra, India // International Journal of Science and Research. 2014, Vol. 3, I.5, pp. 427- 431.
86. Ansari, M.K., Ahmad, M., Rajesh Singh and Singh, T.N. Correlation between Schmidt Hardness and Coefficient of Restitution of Rocks // African Journal of Earth Sciences. 2014, Vol. 104, pp. 1-5.
87. Hoek, E., Bray, J.W. Rock slope engineering. CRC Press, 1981, Vol.1, pp. 341-351. <https://doi.org/10.1201/9781482267099>.
88. Dorren, L.K.A. A review of rockfall mechanics and modelling approaches // Progress in Physical Geography. 2003, Vol. 27, pp. 69–87.
89. Ansari, M.K., Ahmad, M., Rajesh Singh, Singh, T.N., Ghalayani, I. Rainfall, A Major Cause for Rockfall Hazard along the Roadways, Highways and Railways on Hilly Terrains in India // Springer Publishers. 2014, Vol. 7, pp. 457-460. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09300-0_8
90. Keller E., A. Environmental geology. 4th Edition. Columbus: Charles E. Merrill Publishing Company A Bell & Howell Company, 2008, 480 p.

91. Горбачева Т. М. Обеспечение безопасности объекта под скалистым уступом от камнепадов: решение «Маккаферри» во Франции // Геоинфо. — 2022. — № 12. — С. 46—55.

92 Фольквейн А., Фулде М., Кригер-Хауксон И. Оценка возможностей и надежности гибких систем защиты от камнепадов // Геоинфо. — 2021. — № 7. — С. 42—47.

93 Шеина Т.В., Авдеева Е.А. Технологии защиты автодорог от камнепадов // Градостроительство и архитектура. -2018. -№ 8(1). - С.28-34.

94 Bichler A., Stelzer G. Special solutions in hazard mitigation // Proceedings of the 6-th Canadian GeoHazards Conference (GeoHazards 6), Queen's University in Kingston, Kingston, Ontario, Canada, 15–18 June 2014. The Canadian Geotechnical Society (CGS).

95 Решетняк С. П., Фокин В. А., Тарасов Г. Е., Александров В. А., Тогунов М. Б., Данилкин А. А., Каира В. Е. Гравитационные аспекты обеспечения безопасности работ в прибортовой зоне карьера // Горный журнал. — 2005. — № 2. — С. 71—72.

96 Мелихов М. В., Чащинов Г. В. Применение технологии скейлинг для защиты карьерного автотранспорта от камнепадов // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. — 2017. — № 14. — С. 311—314.

97. Julian S.H. Kwan, Eric H.Y. Sze, and Carlos Lam. Finite element analysis for rockfall and debris flow mitigation works // Canadian Geotechnical Journal. 2019, Vol. 56 (9), pp. 1225-1250. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0628>.

98. Vigna S., Marchelli M., Biagi V., Peila D. Numerical Simulation of Rockfall Protection Embankments in Natural Soil // Geosciences. 2023, Vol. 368. 10.3390/geosciences13120368.

99. Lambert S., F. Bourrier. Design of rockfall protection embankments: A review // Engineering Geology. 2013, Volume 154, pp. 77-88, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.12.012>.

100. Ronco C., Oggeri C., Peila D. Design of reinforced ground embankments used for rockfall protection // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2009, Vol. 9, № 4. DOI: 10.5194/nhess-9-1189-2009.
101. Maegawa K. Experiments on Rockfall Protection Embankments with Geogrids and Cushion // *Int. J. of GEOMATE*. 2011, Vol. 1, № 1, pp. 19-24.
102. Zhiwei X., Liang Lu G. Numerical investigation on the response of ground-reinforced embankments under repeated impact. *Engineering Geology*. 2025, Vol. 345, № 107875. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107875>.
103. Lambert, S., Gupta, R., Bourrier, F., Vincent A. On the Simulation-Based Quantification of Energy Dissipation in Rockfall Protection Structures: Case of an Articulated Wall Modelled with the NSCD Method // *Rock Mech Rock Eng* (2024). <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04222-9>
104. Maheshwari, S., Bhowmik, R. Performance assessment of a protection embankment designed for a rockfall-prone slope along lesser Himalayas of Jammu and Kashmir, India // *Natural Hazards*. 2024, Vol. 121, pp. 4095–4133. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06959-6>
105. Dam Thanh Vo. RAMMS:Rockfall versus Rockyfor3D in rockfall trajectory simulations at the Community of Vik, Norway, Master Thesis in Geosciences, Discipline: Environmental geology and geohazards, Department of Geosciences, Faculty of Mathematics and Natural Sciences. 2015, University of Oslo, 62 p.
106. Azzoni, A., Labarbera, G., and Zaninetti, A. Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical-model // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1995, Vol. 32, I. 7, p. 709-724. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(95\)00018-C](https://doi.org/10.1016/0148-9062(95)00018-C)
108. Scheidegger A. Physical aspects of natural catastrophes, Elsevier, 1975, 289 p.
109. Kirby J., Statham L. Surface stone movement and scree formation // *The Journal of Geology*. 1975, Vol. 83, I.3, pp. 349-362. <https://doi.org/10.1086/628097>

110 Белов О. Д. Сравнительный анализ современного программного обеспечения для моделирования камнепадов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 3. – С. 155–169. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_155.

111 Белов О.Д. Зависимость кинетической энергии, максимальной высоты отскока, горизонтального перемещения и скорости обломка камнепада от его формы // Труды РАНМИ. 2024. №3 (41). DOI 10.24412/2519-2418-2024-341-246-267

112 Белов О.Д., Черепецкая Е.Б., Блохин Д.И. Исследование влияния формы продуктов скально-обвальных процессов на их кинематические и энергетические параметры // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17. – № 1. – С. 195–203. DOI: 10.21177/1998-4502-2025- 17-1-195-203.

113 Белов О.Д. Определения влияния объема обломка камнепада эквивалентной формы на его максимальную кинетическую энергия для различных комбинаций высот уступов и углов наклона // Актуальные вопросы науки, общества и образования. Сборник статей VII Международной научно-практической конференции (05.09.2025, г. Пенза). – 2025, с. 223-228.

114 Белов О. Д. Оценка энергии поглощения предохранительных противокамнепадных валов с учетом их конструкционных и геотехнических параметров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 7. – С. 24–37. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_24.

115 Белов О.Д. Расчет оптимальных параметров противокамнепадного предохранительного вала // WORLD OF SCIENCE. Сборник статей XII Международной научно-практической конференции (30.04. 2025, г. Пенза). – 2025, с. 335-338.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ
ВАЛОВ ДЛЯ БОРЬБЫ С КАМНЕПАДОМ С БОРТА КАРЬЕРА

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»

Кафедра физических процессов горного производства и геоконтроля

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
НИТУ МИСИС

д-р техн. наук, профессор

М.Р. Филонов

« » 2025 г.



МЕТОДИКА

расчета параметров предохранительных валов для борьбы с камнепадом с
борта карьера

Автор:

Аспирант каф. ФизГео НИТУ МИСИС

Белов О.Д. Белов

Методика рассмотрена и одобрена
на заседании кафедры ФизГео НИТУ МИСИС

Протокол № 8 от «24» апреля 2025 г.

В.Винников зав. каф., д.ф.-м.н. В.А. Винников

«25» апреля 2025 г.

МОСКВА

2025

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие положения	104
2. Требования к исходным данным	105
3. Определение максимальной кинетической энергии обломка.....	105
4. Алгоритм расчета	107
5. Список использованных источников	110
Приложение А Программный код в среде Python для определения оптимальной регрессионной зависимости кинетической энергии обломка.	111
Приложение Б Программный код в среде Python для иммитации топографической съемки склона с двумя уступами.....	117
Приложение В Программный код в среде Python для определения оптимальной регрессионной зависимости предельной энергии поглощения предохранительного вала	121

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 Настоящая методика устанавливает порядок расчета предельной энергии поглощения противокампнепадных предохранительных валов на основе их конструкционных и геотехнических параметров с использованием численного моделирования в программном комплексе PLAXIS 3D.

1.2 Настоящие методические рекомендации предназначены для проектирования предохранительных валов при ведении открытых горных работ.

1.3 Методические рекомендации содержат: требования к исходным данным, результаты численного моделирования предохранительных валов, алгоритм расчета прямым и обратным способами.

1.4 В основе настоящей методики лежат принципы конечно-элементного моделирования и регрессионного анализа.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ИСХОДНЫМ ДАННЫМ

В качестве основных параметров предохранительного вала выступают его геометрические параметры: глубина d [м], высота h [м], ширина b [м] и угол заложения откосной части α [град.], а также физико-механические характеристики грунта (модуль Юнга E [МПа], коэффициент Пуассона ν , удельное сцепление c [кПа], угол внутреннего трения φ [град]). Конструкция предохранительного вала приведена на рисунке 1.

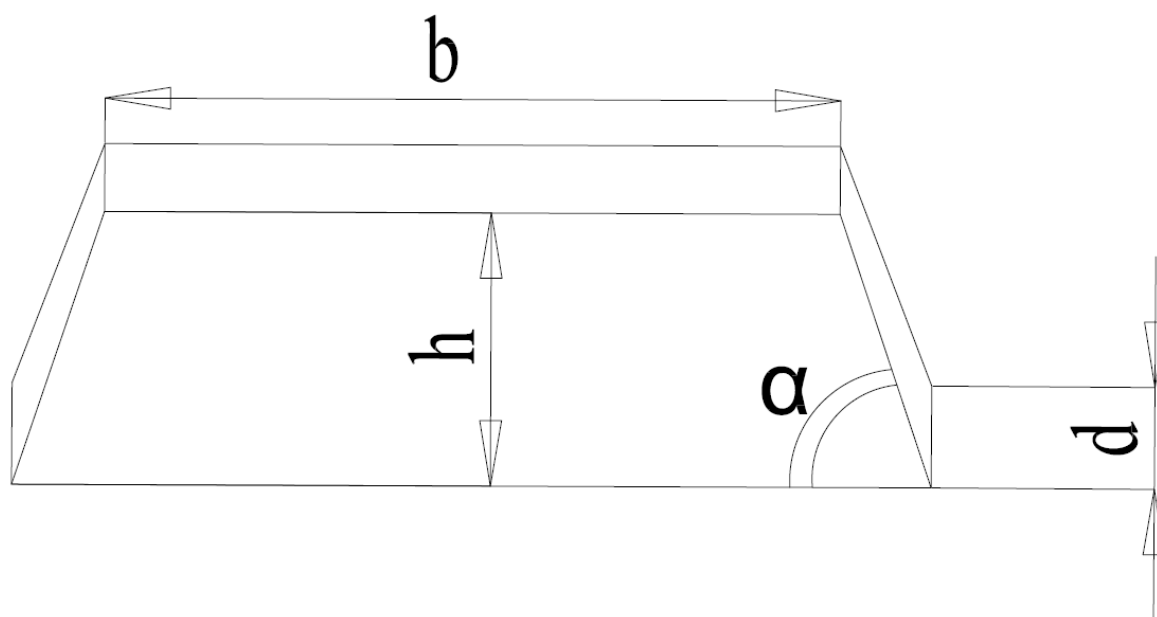


Рисунок 1 – Конструктив противокаменного предохранительного вала

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ОБЛОМКА

По результатам проведения численного моделирования в программном комплексе RAMMS:Rockfall для различных комбинаций параметров склона (рисунок 2) и объемов обломков были выведены регрессионные зависимости. Выявлено, что зависимость максимальной кинетической энергии обломка от его объема представляет собой полином второй степени для обломков эквивалентной формы с объемом в диапазоне от 0,5 до 10 м³.

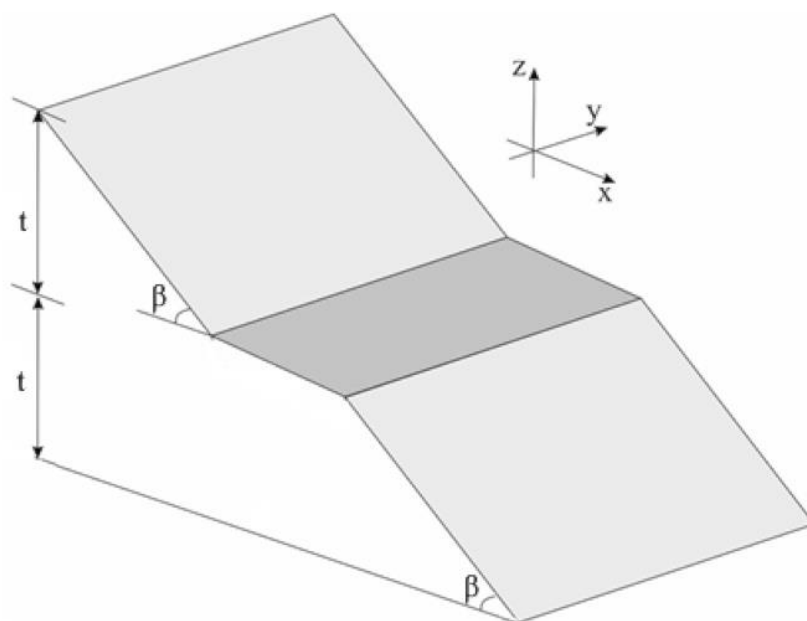


Рисунок 2 – Параметры склона, необходимые для создания модели

Регрессионные зависимости максимальной кинетической энергии от параметров склона для обломков эквивалентной формы объемом от 0,5 до 10 м³ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Регрессионные зависимости максимальной кинетической энергии

Высота уступа, м	Угол наклона, град.	Регрессионные зависимости
15	50	$y = 7,76 \cdot x^2 + 313,96 \cdot x + 26,70$
	60	$y = 6,06 \cdot x^2 + 386,64 \cdot x + 56,09$
	70	$y = 5,12 \cdot x^2 + 466,36 \cdot x + 90,45$
30	50	$y = 53,93 \cdot x^2 + 508,13 \cdot x + 53,73$
	60	$y = 75,38 \cdot x^2 + 425,83 \cdot x + 207,42$
	70	$y = 89,99 \cdot x^2 + 395,36 \cdot x + 400,19$
45	50	$y = 4,09 \cdot x^2 + 1001,20 \cdot x + 52,96$
	60	$y = 16,02 \cdot x^2 + 1185,80 \cdot x - 137,97$
	70	$y = 36,85 \cdot x^2 + 1494,6 \cdot x + 475,82$

4. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА

Расчет подразумевает под собой определение оптимальных характеристик противокаменного предохранительного вала на основе известной максимальной кинетической энергии обломка. Таким образом суть данного способа сводится к подбору оптимальных геометрических и физико-механических параметров вала, чтобы его предельная энергия поглощения была не меньше значения максимальной кинетической энергии обломка.

Алгоритм определения оптимальных параметров предохранительного вала прямым способом следующий:

1. Высота предохранительного вала h назначается не менее максимальной высоты отскока обломка, полученной по результатам численного моделирования в программном комплексе RAMMS:Rockfall: Программный код для имитации топографической съемки склона представлен в Приложении Б.

2. Угол заложения откосной части предохранительного вала назначается равным углу внутреннего трения грунта φ .

3. Далее необходимо определить площадь контакта обломка с предохранительным валом, для обломка эквивалентной формы рассчитывается как площадь круга с диаметром равным размеру обломка по любой из осей (размеры обломка эквивалентной формы по всем осям приблизительно равны).

4. На основании формулы (2), полученной при помощи программного кода в среде Python, представленного в Приложении В) и исходя из физико-механических параметров грунта отсыпки предохранительного вала и площади контакта обломка, методом подбора определить оптимальное значение глубины.

$$W = S \cdot d \cdot (k_0 + k_d \cdot d + k_c \cdot c + k_E \cdot E + k_v \cdot v + k_\varphi \cdot \varphi + k_{d2} \cdot d^2 + k_{dc} \cdot d \cdot c + k_{dE} \cdot d \cdot E + k_{dv} \cdot d \cdot v + k_{d\varphi} \cdot d \cdot \varphi + k_{c2} \cdot c^2 + k_{cE} \cdot c \cdot E + k_{cv} \cdot c \cdot v + k_{c\varphi} \cdot c \cdot \varphi + k_{E2} \cdot E^2 + k_{Ev} \cdot E \cdot v + k_{E\varphi} \cdot E \cdot \varphi + k_{v2} \cdot v^2 + k_{v\varphi} \cdot v \cdot \varphi + k_{\varphi2} \cdot \varphi^2) \quad (2)$$

где W – максимальная кинетическая энергия обломка, кДж;

S – площадь контакта обломка с валом, м²;

E – модуль Юнга E , МПа;

v – коэффициент Пуассона;

c – удельное сцепление, кПа;

φ – угол внутреннего трения, град.,

k – коэффициенты подстановки, представленные в таблице 3.

Таблица 2 – Коэффициенты подстановки для уравнения энергии поглощения

Коэффициент	Значение	Размерность
k_0	–8150,913	$\frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$
k_d	–0,386	$\frac{\text{кН}}{\text{м} \cdot \text{м}^2}$
k_c	0,340	$\frac{\text{кН}}{\text{кПа} \cdot \text{м}^2}$
k_E	–0,030	$\frac{\text{кН}}{\text{МПа} \cdot \text{м}^2}$
k_v	–14,381	$\frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$
k_φ	–0,094	$\frac{\text{кН}}{\text{град} \cdot \text{м}^2}$
k_{d2}	1911,141	$\frac{\text{кН}}{\text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2}$
k_{dc}	–16,328	$\frac{\text{кН}}{\text{м} \cdot \text{кПа} \cdot \text{м}^2}$
k_{dE}	–17,052	$\frac{\text{кН}}{\text{м} \cdot \text{МПа} \cdot \text{м}^2}$
k_{dv}	–43,270	$\frac{\text{кН}}{\text{м} \cdot \text{м}^2}$
$k_{d\varphi}$	–13,390	$\frac{\text{кН}}{\text{м} \cdot \text{град} \cdot \text{м}^2}$
k_{c2}	–6,704	$\frac{\text{кН}}{\text{кПа} \cdot \text{кПа} \cdot \text{м}^2}$
k_{cE}	13,639	$\frac{\text{кН}}{\text{кПа} \cdot \text{МПа} \cdot \text{м}^2}$
k_{cv}	–647,036	$\frac{\text{кН}}{\text{кПа} \cdot \text{м}^2}$
$k_{c\varphi}$	7,343	$\frac{\text{кН}}{\text{кПа} \cdot \text{град} \cdot \text{м}^2}$

Продолжение таблицы 2

Коэффициент	Значение	Размерность
k_{E2}	-2,832	$\frac{\text{кН}}{\text{МПа} \cdot \text{МПа} \cdot \text{м}^2}$
k_{Ev}	-632,777	$\frac{\text{кН}}{\text{МПа} \cdot \text{м}^2}$
$k_{E\varphi}$	-5,142	$\frac{\text{кН}}{\text{МПа} \cdot \text{град} \cdot \text{м}^2}$
k_{v2}	111420,377	$\frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$
$k_{v\varphi}$	-488,987	$\frac{\text{кН}}{\text{град} \cdot \text{м}^2}$
$k_{\varphi2}$	8,118	$\frac{\text{кН}}{\text{град} \cdot \text{град} \cdot \text{м}^2}$

По результатам выполнения данной последовательности действий получаем полный набор геометрических параметров предохранительного вала с заданными физико-механическими параметрами грунта и предельной энергией поглощения не менее максимальной кинетической энергии обломка.

5. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белов О. Д. Сравнительный анализ современного программного обеспечения для моделирования камнепадов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 3. – С. 155–169. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_155.
2. Белов О.Д. Зависимость кинетической энергии, максимальной высоты отскока, горизонтального перемещения и скорости обломка камнепада от его формы // Труды РАНМИ. 2024. №3 (41). DOI 10.24412/2519-2418-2024-341-246-267
3. Белов О.Д. Оценка энергии поглощения предохранительных противокаменпадных валов с учетом их конструкционных и геотехнических параметров. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 7.
4. Belov O.D., Cherepetskaya E.B., Blokhin D.I. The products shape influence investigation of rock fall processes on their kinematic and energy parameters. Sustainable Development of Mountain Territories. 2025, vol. 17, no. 1, pp. 195–203. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-195-203.
5. Белов, О. Д. Расчет оптимальных параметров противокаменпадного предохранительного вала // World of science: сборник статей XII Международной научно-практической конференции, Пенза, 30 апреля 2025 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2025. – С. 335-338.
6. Белов О.Д. Определения влияния объема обломка камнепада эквивалентной формы на его максимальную кинетическую энергия для различных комбинаций высот уступов и углов наклона // Актуальные вопросы науки, общества и образования. Сборник статей VII Международной научно-практической конференции (05.09.2025, г. Пенза). – 2025, с. 223-228.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ПРОГРАММНЫЙ КОД В СРЕДЕ PYTHON ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ОПТИМАЛЬНОЙ РЕГРЕССИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ КИНЕТИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ ОБЛОМКА

```
import pandas as pd
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.linear_model import LinearRegression, Ridge, Lasso,
ElasticNet
from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures
from sklearn.metrics import mean_squared_error, r2_score
import numpy as np
from sklearn.kernel_ridge import KernelRidge
# Пример данных (три независимые переменные X1, X2, X3 и
зависимая переменная Y)
def read_values_from_file(filename):
    with open(filename, 'r') as file:
        values = [float(line.strip()) for line in file] # Считываем значения и
преобразуем в float
    return values
# Чтение данных из файлов
x1 = read_values_from_file('H.txt')
x2 = read_values_from_file('A.txt')
x3 = read_values_from_file('V.txt')
y = read_values_from_file('E.txt')
# Создание словаря с данными
data = {
    'X1': x1,
    'X2': x2,
    'X3': x3,
```

```

    'Y': y
}

# Преобразуем данные в DataFrame
df = pd.DataFrame(data)

# Разделим данные на признаки (X) и целевую переменную (Y)
X = df[['X1', 'X2', 'X3']]
y = df['Y']

# Разделим данные на обучающую и тестовую выборки
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.3,
random_state=42)

# Функция для оценки модели
def evaluate_model(model, X_train, X_test, y_train, y_test):
    model.fit(X_train, y_train)
    y_pred = model.predict(X_test)

    mse = mean_squared_error(y_test, y_pred)
    r2 = r2_score(y_test, y_pred)
    return mse, r2

# Оценка различных моделей
models = {
    'Линейная регрессия': LinearRegression(),
    'Ridge регрессия': Ridge(alpha=1.0),
    'Lasso регрессия': Lasso(alpha=0.1),
    'ElasticNet регрессия': ElasticNet(alpha=0.1, l1_ratio=0.5),
    'Kernel Ridge регрессия': KernelRidge(alpha=1.0),
}

# Список для хранения уравнений регрессии и результатов
results = []

# Оценим все модели
for model_name, model in models.items():

```

```

mse, r2 = evaluate_model(model, X_train, X_test, y_train, y_test)
print(f"Модель: {model_name}")
print(f"Среднеквадратичная ошибка: {mse}")
print(f"Коэффициент детерминации R^2: {r2}")
print()
# Формируем строку для записи уравнения
if hasattr(model, 'coef_'): # Для линейных моделей
    coefficients = model.coef_
    intercept = model.intercept_
    equation = f"Модель: {model_name} -> Y = {intercept:.3f} +
{coefficients[0]:.3f}*X1 + {coefficients[1]:.3f}*X2 + {coefficients[2]:.3f}*X3"
else: # Для моделей, не имеющих коэффициентов (например,
KernelRidge)
    equation = f"Модель: {model_name} не имеет явного уравнения"
# Добавляем результаты в список
results.append(f"{equation} \nСреднеквадратичная ошибка: {mse}
\nКоэффициент детерминации R^2: {r2}\n")
# Проверим полиномиальные регрессии (степени от 2 до 3)
for degree in range(2, 4): # Для полиномиальных регрессий только
степени 2 и 3
    poly = PolynomialFeatures(degree=degree)
    X_poly_train = poly.fit_transform(X_train)
    X_poly_test = poly.transform(X_test)
    # Оценка полиномиальной регрессии
    mse, r2 = evaluate_model(LinearRegression(), X_poly_train, X_poly_test,
y_train, y_test)
    print(f"Полиномиальная регрессия (степень {degree}):")
    print(f"Среднеквадратичная ошибка: {mse}")
    print(f"Коэффициент детерминации R^2: {r2}")
    print()

```

```

# Формируем строку для записи уравнения
poly_model = LinearRegression()
poly_model.fit(X_poly_train, y_train)
coefficients = poly_model.coef_
intercept = poly_model.intercept_
equation = f"Полиномиальная регрессия (степень {degree}) -> Y =
{intercept:.3f} + {coefficients[1]:.3f}*X1 + {coefficients[2]:.3f}*X2 +
{coefficients[3]:.3f}*X3"

# Добавляем результаты в список
results.append(f"{equation} \nСреднеквадратичная ошибка: {mse}
\nКоэффициент детерминации R^2: {r2}\n")

# Логарифмическая регрессия
X_train_log = np.log(X_train + 1e-5) # Добавляем малую величину,
чтобы избежать логарифмирования 0
X_test_log = np.log(X_test + 1e-5)

# Оценка логарифмической регрессии
mse, r2 = evaluate_model(LinearRegression(), X_train_log, X_test_log,
y_train, y_test)

print(f"Логарифмическая регрессия:")
print(f"Среднеквадратичная ошибка: {mse}")
print(f"Коэффициент детерминации R^2: {r2}")
print()

# Формируем строку для записи уравнения
log_model = LinearRegression()
log_model.fit(X_train_log, y_train)
coefficients = log_model.coef_
intercept = log_model.intercept_
equation = f"Логарифмическая регрессия -> Y = {intercept:.3f} +
{coefficients[0]:.3f}*log(X1) + {coefficients[1]:.3f}*log(X2) +
{coefficients[2]:.3f}*log(X3)"

```

```

# Добавляем результаты в список
results.append(f"{equation} \nСреднеквадратичная ошибка: {mse}
\nКоэффициент детерминации R^2: {r2}\n")

# Гиперболическая регрессия (X -> 1/X)
X_train_hyper = 1 / (X_train + 1e-5) # Добавляем малую величину,
чтобы избежать деления на 0
X_test_hyper = 1 / (X_test + 1e-5)

# Оценка гиперболической регрессии
mse, r2 = evaluate_model(LinearRegression(), X_train_hyper, X_test_hyper,
y_train, y_test)

print(f"Гиперболическая регрессия:")
print(f"Среднеквадратичная ошибка: {mse}")
print(f"Коэффициент детерминации R^2: {r2}")
print()

# Формируем строку для записи уравнения
hyper_model = LinearRegression()
hyper_model.fit(X_train_hyper, y_train)
coefficients = hyper_model.coef_
intercept = hyper_model.intercept_
equation = f"Гиперболическая регрессия -> Y = {intercept:.3f} +
{coefficients[0]:.3f}*(1/X1) + {coefficients[1]:.3f}*(1/X2) +
{coefficients[2]:.3f}*(1/X3)"

# Добавляем результаты в список
results.append(f"{equation} \nСреднеквадратичная ошибка: {mse}
\nКоэффициент детерминации R^2: {r2}\n")

# Экспоненциальная регрессия (Y -> log(Y))
y_train_exp = np.log(y_train + 1e-5) # Добавляем малую величину,
чтобы избежать логарифмирования 0
y_test_exp = np.log(y_test + 1e-5)

# Оценка экспоненциальной регрессии

```

```

mse, r2 = evaluate_model(LinearRegression(), X_train, X_test, y_train_exp,
y_test_exp)

print(f"Экспоненциальная регрессия:")
print(f"Среднеквадратичная ошибка: {mse}")
print(f"Коэффициент детерминации R^2: {r2}")
print()

# Формируем строку для записи уравнения
exp_model = LinearRegression()
exp_model.fit(X_train, y_train_exp)
coefficients = exp_model.coef_
intercept = exp_model.intercept_

equation = f"Экспоненциальная регрессия -> Y = {intercept:.3f} +
{coefficients[0]:.3f}*X1 + {coefficients[1]:.3f}*X2 + {coefficients[2]:.3f}*X3"

# Добавляем результаты в список
results.append(f"{equation} \nСреднеквадратичная ошибка: {mse}
\nКоэффициент детерминации R^2: {r2}\n")

# Записываем все уравнения и результаты в файл
with open('regression_results.txt', 'w') as f:
    for result in results:
        f.write(result + '\n')

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ПРОГРАММНЫЙ КОД В СРЕДЕ PYTHON ДЛЯ ИММИТАЦИИ
ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ СКЛОНА С ДВУМЯ УСТУПАМИ

```
# введите размеры верхней квадратной площадки
h=int(input("Введите высоту уступа: "))
a1=int(input("Введите ширину бермы: "))
r=float(input("Введите разрешение съемки: "))
angle=int(input("Введите угол наклона уступа в градусах:"))
from math import sin,cos, pi,ceil
a=ceil(a1/r)
s=a*a
matrix = [[0 for j in range(3)] for i in range(s)]
matrix_s = [[0 for j in range(3)] for i in range(s)]
# Заполняем матрицу значениями
for i in range(s):
    for j in range(3):
        if j == 2:
            matrix[i][j] = h # Если j равно 2, заполняем значением h
        else:
            if j==1:
                matrix[i][j]=i // a
            else:
                matrix[i][j]=i % a
for i in range(s):
    for j in range(3):
        if j == 2:
            matrix_s[i][j] = matrix[i][j]
        else:
            if j==1:
```

```

        matrix_s[i][j]= round(matrix[i][j]*r,2)
    else:
        matrix_s[i][j]=round( matrix[i][j]*r,2)
# Выводим заполненную матрицу
with open('ТОПО.txt', 'a') as file:
    file.write('\n') # Добавляем пустую строку перед записью новой
матрицы
    for row in matrix_s:
        row_str = ''.join(str(elem) for elem in row)
        file.write(row_str + '\n')

L=h*(cos(angle/360*pi*2)/sin(angle/360*pi*2))
Lr=ceil(L)
print(Lr)
# Число строк в матрице
Sh=Lr/r
Shag=ceil(Sh)
N1=Shag*a
N=ceil(N1)
matrix1 = [[0 for j in range(3)] for i in range(N)]
matrix1_s = [[0 for j in range(3)] for i in range(N)]
min=0
for i in range(N):
    for j in range(3):
        if j == 2:
            matrix1[i][j] = h-
((i%Shag)/Shag)*Lr*(sin(angle/360*pi*2)/cos(angle/360*pi*2))
            if min<matrix1[i][j]:
                min=matrix1[i][j]
        else:

```

```

        if j==1:
            matrix1[i][j]= (i // Shag)*r
        else:
            matrix1[i][j]=a1+((i%Shag)/Shag)*Lr
for i in range(N):
    for j in range(3):
        if j == 2:
            matrix1_s[i][j] =round(matrix1[i][j],2)
        else:
            if j==1:
                matrix1_s[i][j]= round(matrix1[i][j],2)
            else:
                matrix1_s[i][j]=round( matrix1[i][j],2)
with open('ТОПО.txt', 'a') as file:
    file.write('\n') # Добавляем пустую строку перед записью новой
матрицы
    for row in matrix1_s:
        row_str = ' '.join(str(elem) for elem in row)
        file.write(row_str + '\n')
star=Lr/r+a
matrix2 = [[0 for j in range(3)] for i in range(s)]
matrix2_s = [[0 for j in range(3)] for i in range(s)]
for i in range(s):
    for j in range(3):
        if j == 2:
            matrix2[i][j] = min
        else:
            if j==1:
                matrix2[i][j]=i // a
            else:

```

```

        matrix2[i][j]=star+i % a
for i in range(s):
    for j in range(3):
        if j == 2:
            matrix2_s[i][j] = matrix2[i][j]
        else:
            if j==1:
                matrix2_s[i][j]= round(matrix2[i][j]*r,2)
            else:
                matrix2_s[i][j]=round( matrix2[i][j]*r,2)
with open('ТОПО.txt', 'a') as file:
    file.write('\n') # Добавляем пустую строку перед записью новой
матрицы
    for row in matrix2_s:
        row_str = ' '.join(str(elem) for elem in row)
        file.write(row_str + '\n')

```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ПРОГРАММНЫЙ КОД В СРЕДЕ PYTHON ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ОПТИМАЛЬНОЙ РЕГРЕССИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРЕДЕЛЬНОЙ
ЭНЕРГИИ ПОГЛОЩЕНИЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОГО ВАЛА

```
import pandas as pd
import numpy as np
from itertools import combinations_with_replacement
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.linear_model import LinearRegression, Ridge, Lasso,
ElasticNet
from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures
from sklearn.metrics import mean_squared_error, r2_score
from sklearn.kernel_ridge import KernelRidge
# Функция для чтения значений из файла
def read_values_from_file(filename):
    with open(filename, 'r') as file:
        values = [float(line.strip()) for line in file]
    return values
# Читаем данные из файлов# Читаем данные из файлов
x1 = read_values_from_file('DU.txt')
x2 = read_values_from_file('CU.txt')
x3 = read_values_from_file('EU.txt')
x4 = read_values_from_file('NuU.txt')
x5 = read_values_from_file('FiU.txt')
y = read_values_from_file('DeltaU.txt')
# Формируем DataFrame без переменной G
data = {
    'X1': x1, 'X2': x2, 'X3': x3,
    'X4': x4, 'X5': x5, 'Y': y
```

```

}
df = pd.DataFrame(data)
# Удаление NaN
df = df.dropna()
# Разделяем данные
X = df[['X1', 'X2', 'X3', 'X4', 'X5']]
y = df['Y']
# Разделяем на обучающую и тестовую выборки
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.3,
random_state=42)
# Функция оценки модели
def evaluate_model(model, X_train, X_test, y_train, y_test):
    model.fit(X_train, y_train)
    y_pred = model.predict(X_test)
    return mean_squared_error(y_test, y_pred), r2_score(y_test, y_pred)
# Функция для генерации имен полиномиальных признаков
def get_polynomial_feature_names(X, degree):
    feature_names = list(X.columns)
    poly = PolynomialFeatures(degree)
    poly.fit_transform(X) # Генерация признаков
    # Генерация имен новых признаков
    output_feature_names = poly.get_feature_names_out(feature_names)
    return output_feature_names
results = []
# Полиномиальная регрессия (2 и 3 степень)
for degree in [2, 3]:
    poly = PolynomialFeatures(degree)
    X_poly_train, X_poly_test = poly.fit_transform(X_train),
poly.transform(X_test)
    poly_model = LinearRegression().fit(X_poly_train, y_train)

```

```

mse, r2 = evaluate_model(poly_model, X_poly_train, X_poly_test,
y_train, y_test)

feature_names = get_polynomial_feature_names(X_train, degree)
equation = f"Полиномиальная регрессия (степень {degree}): Y =
{poly_model.intercept_:.3f} " + \
    " ".join([f"+ {coef:.3f}*{name}" for coef, name in
zip(poly_model.coef_, feature_names) if coef != 0])

print(f"Уравнение: {equation}")
results.append(f"{equation}\nMSE={mse:.3f}, R²={r2:.3f}\n")

# Сохранение результатов
with open('regression_results.txt', 'w', encoding='utf-8') as f:
    for result in results:
        f.write(result + '\n')

print("Результаты сохранены в 'regression_results.txt'")

```

Приложение Б

Справка о внедрении результатов диссертационного исследования



Общество с ограниченной ответственностью
«СТЕКЛОНИТ Менеджмент»
(ООО «СТЕКЛОНИТ Менеджмент»)

117465, город Москва, ул. Генерала Тюленева, д.
4А, стр.3, этаж 2, офис 209
Телефон: (495) 223 77 22
E-mail: sale@steklonit.com
www.steklonit.com
ОГРН 1027728010771
ИНН 7728270005, КПП 772801001

22.09.2025 № 298

На № _____ от _____

О внедрении результатов
диссертационной работы

Справка

о внедрении результатов диссертационной работы аспиранта кафедры
Физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ МИСИС
Белова Олега Дмитриевича

Компания ООО «СТЕКЛОНИТ Менеджмент», входящая в состав Дивизиона «Росатом Композитные Технологии», - российская научно-производственная компания, ориентированная на внедрение инновационных композитных материалов и высокотехнологичных решений для:

- машиностроения (авиационного, вертолётостроения, автомобилестроения, судостроения, вагоностроения)
- строительной отрасли, включая дорожное строительство
- горнодобывающей отрасли
- электротехнической отрасли
- металлопереработки и многих других.

Результаты диссертационного исследования Белова Олега Дмитриевича на тему «Обоснование и разработка метода расчета параметров предохранительных валов для борьбы с камнепадом с борта карьера» использованы при разработке технических решений по проектированию комплексной инженерной защиты от оползней, селей, лавин и камнепадов с целью защиты автомобильных и железных дорог, а также транспортной системы карьеров.

Технический директор



Адам А.И.