

На правах рукописи

УДК 622.271.332/.333.001.25



КАЮМОВА Альфия Наиловна

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ПАРАМЕТРОВ КАМНЕПАДА
К ПОСТРОЕНИЮ БЕЗОПАСНЫХ УСТУПОВ
И БЕРМ БОРТОВ КАРЬЕРОВ**

Специальность 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэродинамика и горная теплофизика»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2011

Работа выполнена в **Институте горного дела
Уральского отделения Российской академии наук**

Научный руководитель – доктор технических наук
Сашурин Анатолий Дмитриевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Афанасьев Борис Гаврилович

кандидат технических наук
Саканцев Георгий Григорьевич

Ведущая организация – ГОУ ВПО «Уральский государственный
горный университет»

Защита диссертации состоится 24 марта 2011 г. в 11-00 ч. на заседании диссертационного совета Д 004.010.01 в Институте горного дела УрО РАН по адресу: 620219, г.Екатеринбург, ГСП-936, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института горного дела УрО РАН.

Просьба направлять отзывы почтой в 2 экземплярах, заверенных печатью организации, по указанному выше адресу.

Автореферат разослан 22 февраля 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



В.М. Аленичев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Безопасность и эффективность разработки месторождения открытым способом в значительной степени определяется конструкцией бортов карьера. Сложность задач по конструированию оптимального профиля борта в значительной мере обусловлена большим разнообразием факторов, влияющих на его параметры, неучет которых приводит к негативным последствиям. По данным Госгортехнадзора России, за последние пять лет оползни, обрушения и камнепады составляют всего 5,4% от общего числа аварий в карьерах, но доля несчастных случаев со смертельным исходом, связанных с обрушением кровли, кусков породы, уступов, достигает 19 %. При построении безопасных берм и уступов наряду с устойчивостью следует учитывать фактор камнепада, степень влияния которого остается слабоизученной, что не позволяет выработать достаточно обоснованные решения по оптимальному конструированию бортов карьеров.

Геомеханическое обоснование параметров камнепада к построению безопасных уступов и берм бортов карьеров является актуальной научной и технической задачей, имеющей существенное значение для повышения безопасности и эффективности отработки месторождений полезных ископаемых открытым способом.

Целью диссертации является изучение закономерностей движения камней по откосам уступов для определения параметров камнепада, обеспечивающих исходную информацию к построению безопасных уступов и берм бортов карьеров при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом.

Объектом исследования является процесс камнепада при открытой разработке месторождений полезных ископаемых, а **предметом исследования** закономерности движения породных отдельностей (камней) по откосам уступов и горизонтальным площадкам карьеров.

Идея диссертации заключается в использовании метода компьютерного моделирования движения падающих камней, учитывающего разнообразие

форм камней, свойств и геометрии поверхностей перемещения, позволяющих отстраивать безопасные уступы и бермы бортов карьеров.

Задачи исследований. Анализ состояния проблемы и поставленная цель потребовали решения следующих задач:

- обобщение исследований закономерностей движения камней по откосам и горизонтальным площадкам;
- установление факторов, влияющих на траекторию движения камней, и характера их влияния;
- разработка геомеханической модели камнепада на уступах карьера и реализация ее при помощи компьютерной программы Roxim;
- установление закономерностей изменения траекторий движения камней по откосам различной геометрии;
- обоснование выбора безопасного профиля отдельного откоса и борта в целом, обеспечивающего эффективную и безопасную разработку месторождения полезного ископаемого открытым способом;
- проверка в условиях промышленного эксперимента результатов компьютерного моделирования.

Методы исследований обеспечивали комплексный подход к решению поставленных задач и включали: анализ и обобщение научного и практического опыта по проблеме, использование аппарата компьютерного моделирования, обработку результатов исследования с применением статистических методов и адаптацию разработанных решений к обоснованию параметров камнепада.

Научные положения, выдвигаемые на защиту:

1 Динамика и параметры движения камней по откосам и площадкам уступов карьера выявляются с высокой оперативностью, детальностью и достоверностью получаемых результатов с помощью компьютерной программы, основанной на геомеханической модели, отражающей геометрию откосов, форму камней и упруго-пластические свойства поверхностного покрова.

2 Параметры скачкообразного движения камней, падающих с уступов на защищенную берму, зависят от высоты и угла откоса уступа, формы камней и упруго-пластических свойств поверхностного покрова, а дальность перемещения камня по горизонтальной берме, находясь в тесной корреляционной связи с этими факторами, уменьшается при увеличении угла уступа и уменьшении его высоты.

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждается:

- обоснованием представлений, основанных на законах механики твердого тела и геомеханических условий камнепада;
- большим объемом лабораторных исследований (более 300 вариантов компьютерных моделей, содержащих более 20 000 единичных случаев камнепада);
- сходимостью полученных результатов с результатами, полученными путем физического моделирования и натурных исследований;
- положительным опытом внедрения результатов работы на горных предприятиях.

Научная новизна работы:

- разработанная в работе методика расчета параметров камнепада и выявленные компьютерным моделированием их взаимосвязи с параметрами бортов, учитывающие многообразие форм породных отдельностей, свойств и геометрий поверхностей перемещений, позволяют оценивать размеры опасной зоны около нижней бровки уступа и определять размеры берм, с целью повышения эффективности и безопасности разработки месторождений полезных ископаемых открытым способом;
- установлено неоднозначное влияние угла наклона уступа на параметры камнепада: дальность выкатывания кусков породы на горизонтальную берму при углах наклона от 45 до 90° уменьшается, высота первичного отскока при увеличении угла наклона уступа увеличивается, длина первичного отскока в пределах углов наклона 45 – 65° равна $(0,33 \pm 0,03)H$, а в пределах 65 – 90° уменьшается в 7-8 раз; для уступов высотой 20 м она составляет менее 1 м.

Научная значимость результатов работы заключается:

- в обосновании геомеханической компьютерной модели камнепада, позволяющей выявить закономерности движения камней для определения параметров камнепада;
- в установлении взаимосвязи параметров камнепада с параметрами уступов рекомендуемых к применению.

Практическое значение работы заключается:

- в обосновании параметров опасной зоны около нижней бровки уступа, при расчете которой используются закономерности движения камней для расчета параметров камнепада;
- в установлении параметров камнепада, применяемых для построения безопасных уступов и берм бортов карьеров.

Личный вклад автора диссертации состоит:

- в анализе и обобщении теоретических и экспериментальных отечественных и зарубежных исследований;
- в разработке геомеханической модели камнепада;
- в совершенствовании программного продукта Roxim для проведения компьютерного моделирования;
- в исследовании закономерностей изменения геометрических элементов траектории движения камней по откосам различной геометрии;
- в разработке методики расчета траектории полета камней, учитывающей многообразие форм породных отдельностей, свойств и геометрии поверхностей перемещения, со степенью вероятности, достаточной для решения горнотехнических задач.

Реализация результатов работы. Основные научные выводы и рекомендации проверены на горных предприятиях. Результаты работы использованы ОАО «Уралгипроруда» на стадии проектирования Тейского карьера.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на международной конференции «Геомеханика в горном деле –

2000» (Екатеринбург, 2000), «Геомеханика в горном деле – 2002» (Екатеринбург, 2002), «Неделя горняка» (Москва, 2005, 2010), «Геомеханика в горном деле» (Екатеринбург, 2005, 2008, 2009), «Неделя горняка – 2009» (Москва, 2009), III Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (Екатеринбург, 2009).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, изложенных на 144 страницах машинописного текста, содержит 51 рисунок, 17 таблиц и список литературы из 71 наименования.

Автор выражает искреннюю благодарность и признательность своему научному руководителю доктору технических наук Сашурину Анатолию Дмитриевичу за содержательные консультации и советы при выполнении диссертационной работы. Автор признателен всему коллективу отдела геомеханики ИГД УрО РАН за большую помощь, поддержку и содействие в работе.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертации посвящена современному состоянию изученности явления камнепада. Перечислены и проанализированы результаты работ, проведенных в рамках исследования процесса камнепада, как в отечественной, так и в зарубежной литературе.

Во второй главе приведено обоснование геомеханической модели процесса камнепада, характеризующей движение камней по уступам и горизонтальным площадкам карьеров, учитывая разнообразие форм камней, свойств горных пород и геометрии поверхностей перемещений, и моделирующей возможные траектории движения кусков горной породы.

В третьей главе описано компьютерное моделирование, позволяющее разработанную геомеханическую модель камнепада реализовать при помощи компьютерной программы Roxim.

В четвертой главе рассмотрены исследования зависимости параметров камнепада от геометрии откоса. Приводится методика исследования траекторий камнепада. Приведены результаты исследования зависимостей параметров первичного отскока (длины и высоты) и дальности перемещения камней от геометрии уступа с учетом упруго-пластических свойств массива.

Пятая глава посвящена обоснованию параметров бортов карьеров с учетом камнепада на железорудных предприятиях Урала.

Современное состояние изученности процесса камнепада

Обзор современных методов изучения камнепада показал, что практически все методы сводятся к трем видам: физическое моделирование (Р.М.Ройнишвили, Г.Г.Саканцев, Р.П.Борисов, В.И.Малютин, В.А.Фокин), теоретические исследования (А.В.Мозжухин, Р.М.Исхаков, В.Г.Зотеев, Р.Ф.Крушати́н, В.В.Комаров) и компьютерное моделирование (Evert Hoek, M. Wilson, Bozzolo, Hung и Avans, Spang и Rautenstauch, Azzoni). Анализ этих работ, большинство из которых выполнено на основе промышленных экспериментов с получением данных для расчета опытным путем, приводит к выводу, что недостатком метода изучения явления камнепада путем сбора фактического материала является весьма ограниченные пределы входящих параметров, определяемые набором серий экспериментов. Наибольшие возможности в познании процесса камнепада представляет компьютерное моделирование, сочетающее в себе достоинства физического моделирования и теоретических исследований. Обзор существующей литературы по изучению параметров камнепада и нормативной документации показывает, что в отечественной практике проводились исследования кинематических характеристик падающих камней и существуют наработки по защите от камнепада железнодорожного полотна и автомобильных дорог. Значительный вклад в изучение процесса камнепада внесли Р.М.Ройнишвили, В.Г.Зотеев, Г.Г.Саканцев, Р.П.Борисов, В.И.Малютин, А.В.Мозжухин, Р.М.Исхаков и другие. Вопросы безопасности горных работ на карьере, в том числе и проблема защиты от камнепада отмечены в работах Н.В.Мельникова,

М.В.Васильева, В.В.Ржевского, В.Л.Яковлева, А.Д.Андросова, В.Н.Попова, С.И.Попова, Э.Л.Галустьяна, Г.Л.Фисенко и др. Применительно к карьерной практике есть опыт борьбы с камнепадом, но мероприятия требуют вложений различного порядка. Исследование камнепада на карьерах проводилось в рамках изучения кинематических характеристик движения породных отдельностей для определения длины пробега по берме и параметров камнеулавливающих сооружений на исследуемом карьере. Для изучения явления камнепада на другом карьере требуется проводить трудоемкие расчеты снова. Современные методики расчета параметров камнепада ограничены углами наклона уступов до 70° . Компьютерное моделирование позволяет варьировать геометрию уступа в широких пределах. Используя существующие закономерности механики движения куска породы по откосу и возможности компьютерного моделирования, можно оценить, каким образом камнепад влияет на построение безопасных уступов и берм бортов карьеров.

Основные защищаемые научные положения

1 Динамика и параметры движения камней по откосам и площадкам уступов карьера выявляются с высокой оперативностью, детальностью и достоверностью получаемых результатов с помощью компьютерной программы, основанной на геомеханической модели, отражающей геометрию откосов, форму камней и упруго-пластические свойства поверхностного покрова.

Объемная модель карьера представляет собой углубление в земной коре, оформленное в виде наклонных плоскостей с чередованием горизонтальных площадок. В диссертационной работе рассмотрена упрощенная плоская модель карьера, полученная путем сечения карьерной выемки вертикальной плоскостью, перпендикулярной основанию карьера. Из-за упрощений борт карьера представлен на плоскости без учета объемной компоненты. Для решения поставленной задачи борт карьера не рассматривается полностью, а взята часть борта, ограниченная одним или двумя уступами. Схематически профиль откоса борта карьера можно представить как двумерный наклонный

профиль откоса, состоящий из непрерывных участков прямых линий, которые находятся на пересечении поверхности откоса и вертикального сечения, в котором движется порода. Профиль определен системой координат с ускорением свободного падения, действующего вертикально вниз. Кусок породы, отделившийся от массива, представляет собой твердое тело с типичными формами, отражаемыми в модели, которое остается целым во время движения. Обрушение одного или нескольких кусков породы происходит в результате смещения из состояния равновесия отдельного изолированного блока горной породы на поверхности откоса. Все движения камня происходят в плоскости его симметрии, перпендикулярной к наклонной плоскости поверхности откоса. В начале движения кусок породы скользит или катится по откосу. При моделировании принимается, что все камни не взаимодействуют друг с другом, а двигаются так, как будто этот камень один. Дальнейшее движение куска породы под действием собственного веса состоит из некоторой комбинации движения с учетом сопротивления поверхности (качения или скольжения) и надземного движения, состоящего из траектории (параболической в случае свободного падения под действием гравитации), разделенной отскоками при ударе куска породы об откос или горизонтальную площадку. Направления движения и столкновения рассчитываются математическими уравнениями, основанными на классических законах кинематики, механики и энергии. К геомеханической модели камнепада разработан математический аппарат, учитывающий вероятностный характер исследуемого явления, позволяющий наиболее эффективно изучать закономерности явления камнепада для определения параметров откосов и уступов. Математическая модель определения параметров камнепада основывается на законах движения твердого тела по наклонной плоскости и движения материальной точки при ударах о наклонную плоскость. Высота отражения камня при падении определяется по выражению

$$h_{\max} = \frac{v_c^2}{2g} \rho^2 \sin^2 \alpha.$$

Расстояние падения камня при отскоке определяется по выражению

$$x = \frac{2v_{от}^2 \operatorname{tg} \psi_2 \cos^2 \psi_1}{g},$$

где v_c – скорость движения камня по откосу;

ρ – коэффициент восстановления нормальной составляющей скорости после удара;

g – ускорение свободного падения;

$v_{от} = v_c \rho \frac{\sin \psi_1}{\sin \psi_2}$ – скорость отражения камня;

ψ_1 – угол падения камня перед отскоком;

ψ_2 – угол отражения камня $\operatorname{arccctg} \psi_2 = \left(\frac{\rho}{1-\lambda} \operatorname{tg} \psi_1 \right)$;

λ – коэффициент мгновенного трения.

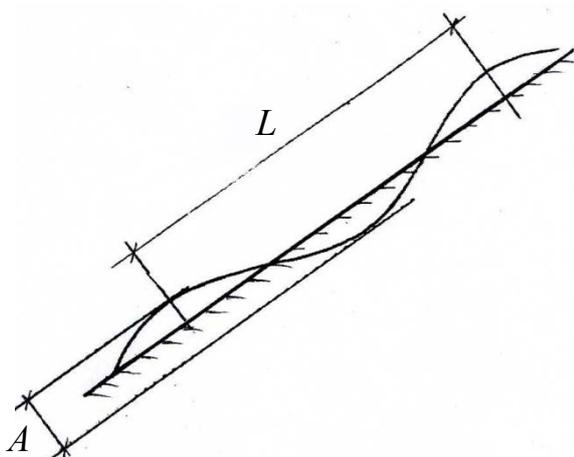
Положение границ модели камнепада определяется параметрами уступов и откосов, присущими данному карьере и технологии открытых горных работ. Разработанная модель может быть реализована при помощи компьютерной программы. В данной работе выполнено моделирование при помощи компьютерной программы Roxim, которая позволяет согласовать параметры геомеханической модели камнепада с параметрами компьютерной модели процесса камнепада. Roxim – это компьютерная программа, моделирующая процесс камнепада, дающая возможность пользователю на мониторе компьютера визуально представить траекторию движения по откосу отдельного взятого куска породы. Roxim представляет собой программный продукт, разработанный Дж. Вильсоном, профессором университета в г. Дарем (Великобритания), адаптированный к условиям проявления камнепада в карьерах.

Реализация входных параметров процесса камнепада в компьютерной программе. В зависимости от входных параметров характер движения камней может быть самым разнообразным. Значения входных параметров приняты характерными для условий железорудных месторождений Урала.

Свойства горных пород. Для моделирования камнепада важное значение имеют коэффициенты, характеризующие упруго-пластические свойства падающих камней и поверхности откоса: коэффициенты восстановления нормальной и тангенциальной составляющих скорости, коэффициент трения качения. Значения этих коэффициентов во многом зависят от физико-химического состава массива горных пород, наличия осыпи около нижней бровки уступа, времени года и других факторов. Данные исследования проводятся для уступов, поставленных в предельное положение с зачищенными бермами. Параметры неровности поверхности откоса в меньшей степени оказывают влияние на характер движения камней, но тем не менее задаются в модели следующим образом: амплитуда $A = 0,15 \div 0,2$ м, длина волны неровности $L = 1,5 \div 2$ м (рисунок 1). Плотность наиболее распространенных горных пород изменяется в пределах $2,6 - 3,3$ т/м³.

Параметры камней. Форма камней при моделировании принята характерной для рудных месторождений с поперечными размерами $0,3 - 0,5$ м.

Характер инициирования начала движения камней и тип движения камней по поверхности. В моделировании принято, что кусок породы, находясь на поверхности откоса, начинает свое движение с верхней точки откоса без каких-либо дополнительных условий для инициирования начала движения.



A – амплитуда,

L – длина волны неровности

Рисунок 1 – Определение параметров неровности поверхности уступа

Представление результатов моделирования и их обработка

Результаты исследований представляются в графическом и текстовом вариантах. Для первого строится траектория движения камней по откосам и

уступам (рисунок 2, *a*). Помимо наглядного изображения движения камней программа Roxim предоставляет возможность получить диаграммы распределения для оценки расстояния, пройденного камнем по берме (рисунок 2, *б*). В результате можно численно оценить, какое количество камней и на каком расстоянии от начала бермы остановилось.

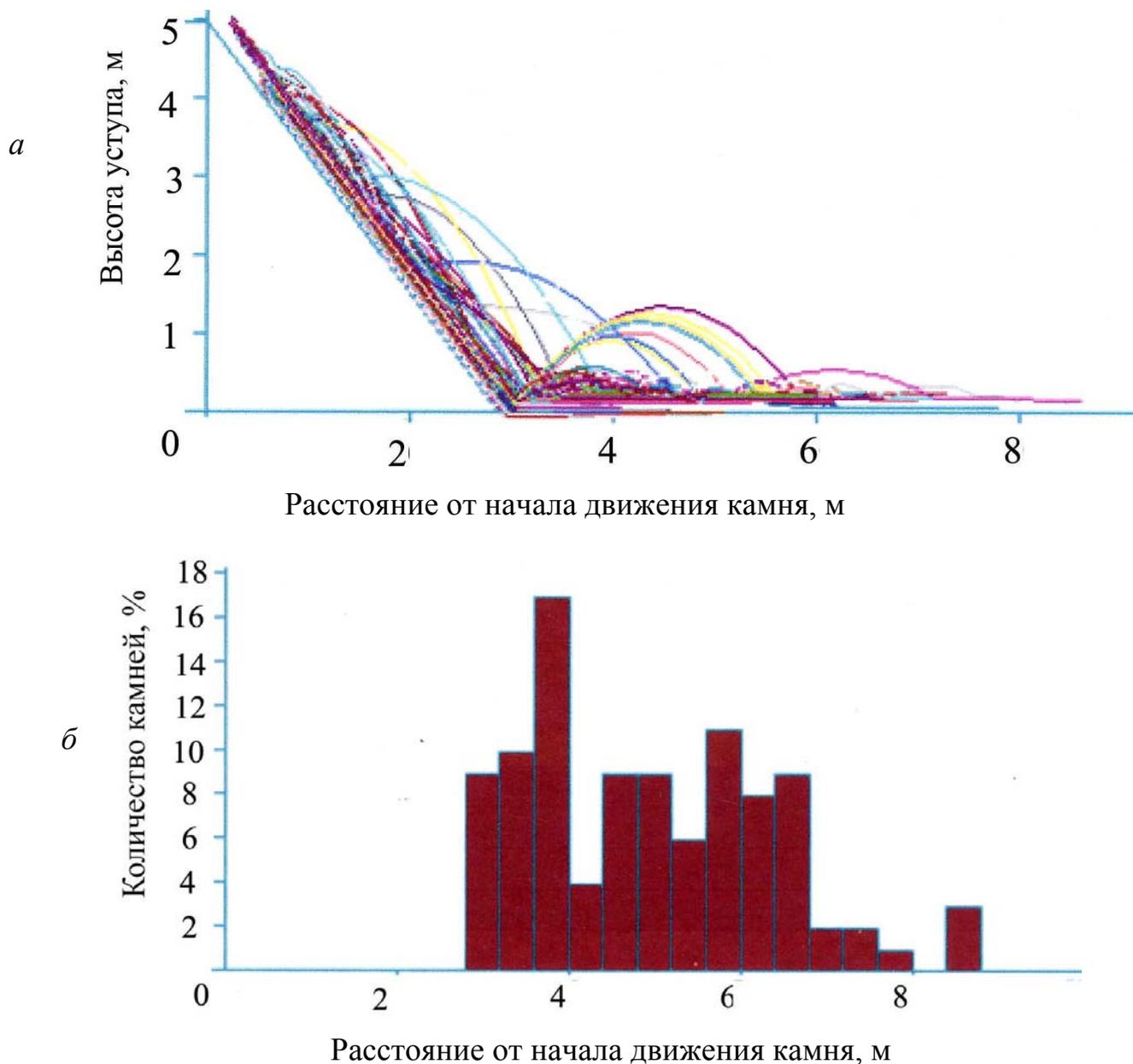


Рисунок 2 – Результаты компьютерного моделирования, представленные на мониторе компьютера:

a – траектория движения камней,

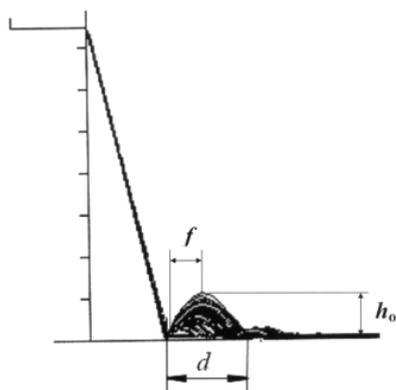
б – количественное распределение камней по горизонтальной берме

Численные значения координат точек соприкосновения куска породы (камня) с поверхностью уступа или бермы, значения скорости и энергии на

каждом отрезке пути представлены подробным образом в выходном файле sscar.out. Полученные графики и диаграммы нуждаются в дальнейшей обработке для получения закономерностей движения камней по откосам и уступам. Используя методы математической статистики, можно определить геометрические параметры движения камней, характерные для каждого варианта моделирования. Следовательно, варьируя входные данные в широком диапазоне, компьютерная программа Roxim позволяет получить результаты для определения зависимости параметров камнепада от различных параметров уступов с учетом свойств горных пород.

2 Параметры скачкообразного движения камней, падающих с уступов на защищенную берму, зависят от высоты и угла откоса уступа, формы камней и упруго-пластических свойств поверхностного покрова, а дальность перемещения камня по горизонтальной берме, находясь в тесной корреляционной связи с этими факторами, уменьшается при увеличении угла уступа и уменьшении его высоты.

При моделировании на компьютере исследовались уступы высотой 7,5 ; 10; 15 и 20 м. Траектория движения камней по уступам с определенной высотой исследовалась при различных углах наклона откоса от 45 до 90° с интервалом в 5°. Количество камней в каждом опыте 30. Условия протекания процесса камнепада на протяжении всех исследований сохранялись неизменными, изменялись только параметры уступов. В результате моделирования получены графические файлы с изображением траектории движения камней по откосу и берме и аналитические расчеты с указанием количества движений (скачков) камня, скорости на каждом участке, геометрических параметров движения камня. При детальном рассмотрении траектории движения камней по откосу и горизонтальной берме проведена оценка параметров первичного отскока (рисунок 3), так как они являются наиболее значимыми и характерными параметрами скачкообразного движения камня при смене направления движения.



h_0 – высота первичного отскока,
 d – ширина первичного отскока,
 f – расстояние от нижней границы уступа до
 максимального значения высоты отскока
 камня при ударе о горизонтальную берму

Рисунок 3 – Параметры первичного отскока

Исследование зависимости высоты первичного отскока от геометрии уступа. Результаты исследований представлены в таблице 1. Высота первичного отскока с увеличением угла наклона уступа увеличивается в пределах углов наклона уступа от 45 до 90° (рисунок 4).

Таблица 1 – Результаты исследования высоты первичного отскока

Угол откоса, град	Высота первичного отскока (м) при высоте откоса			
	7,5 м	10 м	15 м	20 м
45	0,12	0,21	0,31	0,44
50	0,11	0,25	0,41	0,52
55	0,15	0,27	0,48	0,62
60	0,15	0,32	0,53	0,7
65	0,23	0,35	0,63	0,88
70	0,16	0,41	0,55	0,93
75	0,26	0,47	0,76	1,06
80	0,32	0,46	0,74	1,02
85	0,32	0,42	0,63	0,97
90	0,46	0,59	1,03	1,28

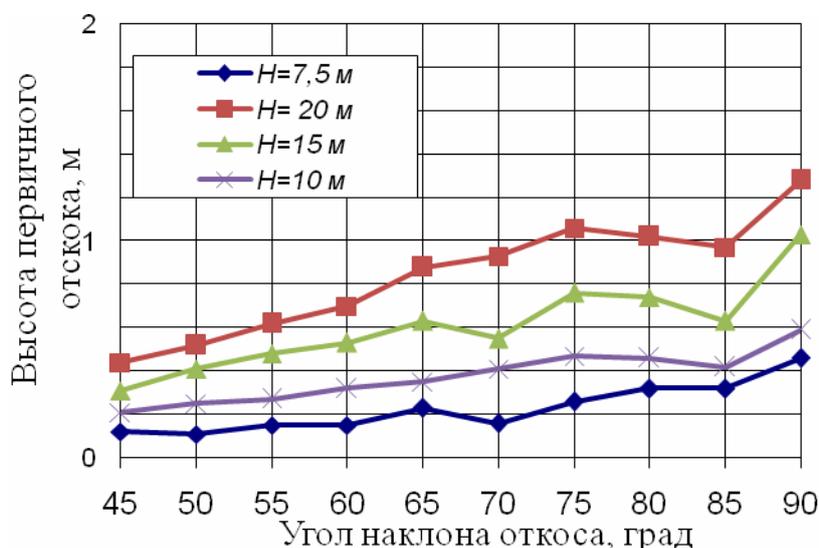


Рисунок 4 – Зависимость высоты первичного отскока от угла наклона откоса

Процесс камнепада – вероятностный процесс, в таблице 2 указана величина стандартного отклонения для полученных значений.

Таблица 2 – Величина стандартного отклонения для значений высоты первичного отскока

Высота уступа, м	Угол наклона уступа, град									
	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
7,5	0,05	0,06	0,06	0,08	0,08	0,05	0,06	0,11	0,08	0,12
10	0,147	0,13	0,08	0,05	0,05	0,13	0,13	0,08	0,21	0,07
15	0,067	0,097	0,098	0,11	0,08	0,028	0,09	0,13	0,12	0,18
20	0,04	0,065	0,12	0,12	0,15	0,17	0,096	0,05	0,16	0,06

Характер изменения высоты первичного отскока в зависимости от угла наклона уступа линейный, его можно представить в виде математической зависимости: для уступов высотой 7,5 м $h_o = 0,006 \alpha - 0,23$;

для уступов высотой 10 м $h_o = 0,007 \alpha - 0,121$;

для уступов высотой 15 м $h_o = 0,012 \alpha - 0,21$;

для уступов высотой 20 м $h_o = 0,016 \alpha - 0,29$,

где h_o – высота первичного отскока, м; α – угол наклона уступа, град.

Таким образом, высота первичного отскока прямо пропорциональна высоте уступа и углу наклона откоса уступа:

$h_o = H (0,008 \alpha - 0,014)$, где H – высота уступа, м.

Исследование зависимости длины первичного отскока от параметров уступа. Результаты исследований представлены в таблицах 3, 4.

Таблица 3 – Результаты исследования длины первичного отскока

Угол откоса, град	Длина первичного отскока (м) при высоте откоса			
	7,5 м	10 м	15 м	20 м
45	2,33	3,31	5,22	6,90
50	2,15	3,41	5,49	7,21
55	2,40	3,54	5,35	7,18
60	2,39	3,46	5,40	7,36
65	2,43	3,21	5,20	6,95
70	2,11	2,89	4,20	6,46
75	2,43	2,68	3,91	5,33
80	1,74	2,30	3,60	4,26
85	0,82	1,47	2,02	2,97
90	0,34	0,45	0,70	0,82

Таблица 4 – Величина стандартного отклонения
для значений длины первичного отскока

Высота уступа, м	Угол наклона уступа, град									
	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
7,5	0,34	0,36	0,33	0,74	0,22	0,48	0,96	0,31	0,39	0,08
10	0,37	0,40	0,40	0,50	0,45	0,43	0,23	0,40	0,34	0,27
15	0,32	0,37	0,40	0,49	0,34	0,31	0,40	0,32	0,27	0,17
20	0,50	0,55	0,60	0,50	0,70	0,65	0,55	0,38	0,51	0,33

Размер длины первичного отскока важен для определения ширины предохранительной бермы, а также для определения расстояния до предохранительных сооружений на берме, позволяющих улавливать все отколовшиеся от поверхности уступа опасные куски породы. Длины первичного отскока в зависимости от угла наклона уступа изменяется неравномерно (рисунок 5). На рисунке выделяются две характерные зоны.

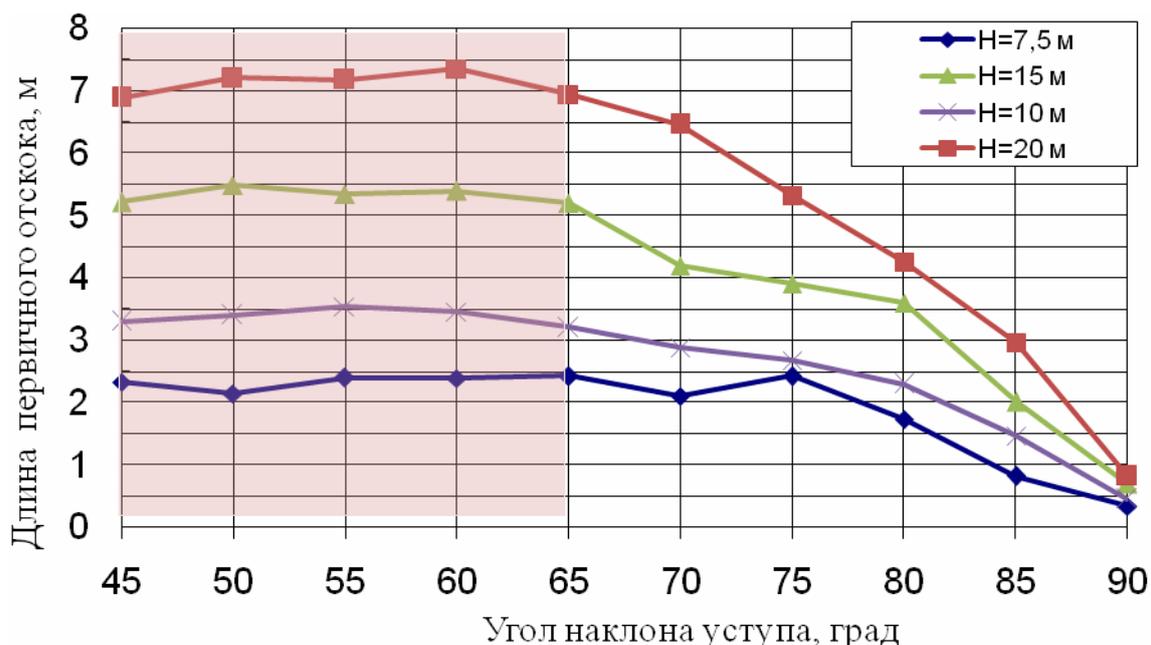


Рисунок 5 – Зависимость длины первичного отскока от параметров уступа

I зона – стабильная зона. Длина первичного отскока для уступов с углом наклона от 45 до 65° достигает максимального значения и составляет $(0,33 \pm 0,03)H$, где H – высота уступа. Длина первичного отскока камня изменяется пропорционально высоте уступа и зависит только от нее. Изменение угла наклона не оказывает влияния на исследуемый параметр.

II зона – зона уменьшения длины первичного отскока. При углах наклона уступа от 65 до 90° наблюдается значительное уменьшение длины первичного отскока камня (в 7-8 раз). Длина первичного отскока определяется зависимостью $d_0 = H(1,1 - 0,011 \alpha)$. Для уступов высотой до 20 м при крутых углах ($\alpha = 90^\circ$) она составляет менее 1 м.

Исследования дальности перемещения кусков породы по горизонтальной берме. Одной из важнейших проблем обеспечения безопасности горных работ в карьере является защита от падения отдельных камней и кусков породы с уступа на берму, т.е. у основания уступа можно выделить опасную зону, на которую возможно падение отделяющихся от поверхности откоса камней и кусков породы. По данным моделирования (таблица 5) построены графические зависимости дальности перемещения кусков породы на берму от высоты и угла наклона уступа (рисунок 6).

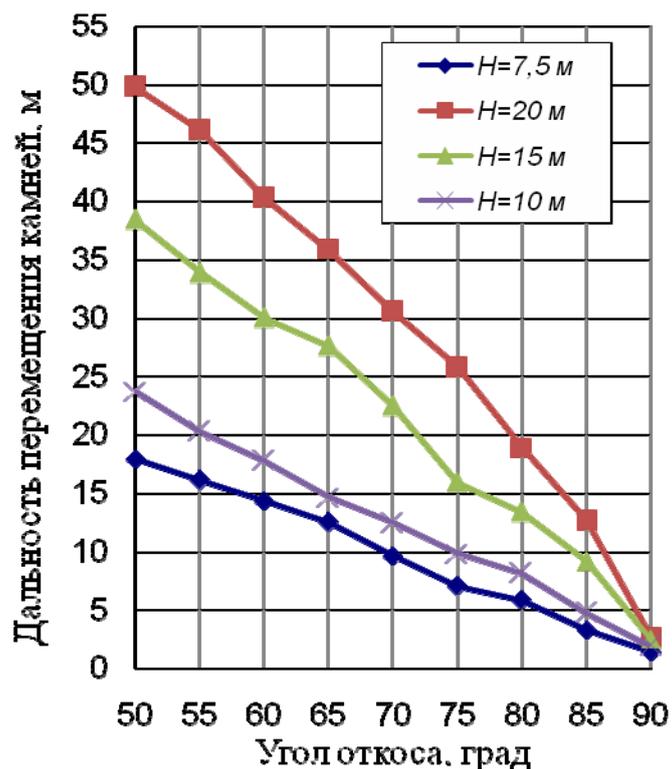


Рисунок 6 – Зависимость дальности перемещения кусков породы от высоты и угла наклона уступа

Обработка полученных данных проводилась методами математической статистики, позволяя получить из большого объема результатов измерений среднюю дальность перемещения кусков породы на берму.

Таблица 5 – Зависимость дальности перемещения кусков горной породы по берме от параметров уступа

Угол откоса, град	Путь (м), пройденный камнем по берме, при высоте уступа							
	7,5 м		10 м		15 м		20 м	
	Среднее значение	Стандарт. отклон	Среднее значение	Стандарт. отклон	Среднее значение	Стандарт. отклон	Среднее значение	Стандарт. отклон
45	19,36	4,55	26,95	3,81	41,44	8,55	52,30	4,60
50	17,96	3,40	23,74	4,49	38,42	6,80	49,80	4,57
55	16,12	3,40	20,30	4,63	33,89	6,16	46,10	5,90
60	14,32	3,56	17,80	4,43	30,03	5,96	40,30	7,50
65	12,51	2,84	14,69	3,66	27,63	4,87	35,80	5,70
70	9,66	3,49	12,45	5,10	22,50	3,11	30,59	6,38
75	7,05	2,70	9,87	5,01	15,93	4,23	25,79	5,20
80	5,87	2,90	8,14	4,05	13,40	5,0	18,92	4,34
85	3,28	3,39	4,75	3,53	9,20	3,8	12,67	8,27
90	1,43	0,56	1,90	1,19	2,54	0,5	2,73	0,90

Разброс значений для каждого примера моделирования характеризуется величиной стандартного отклонения (таблица 5). Дальность перемещения кусков горной породы по горизонтальной берме в зависимости от геометрии уступа $D = H(5,14 - 0,05 \alpha)$.

С учетом упруго-пластических свойств поверхностного покрова дальность перемещения камня по горизонтальной берме уменьшается при увеличении угла уступа и при уменьшении его высоты. Таким образом, при увеличении угла наклона уступа и уменьшении высоты уступа уменьшаются размеры опасной зоны около нижней бровки уступа.

Влияние упруго-пластических свойств массива на параметры камнепада. По результатам исследований построены графики зависимости высоты первичного отскока от коэффициентов, характеризующих упруго-пластические свойства поверхностного покрова (рисунки 7, 8). Свойства пород и состояние поверхностного покрова при ударе камня о поверхность откоса характеризуются коэффициентом восстановления нормальной составляющей скорости после удара ρ и коэффициентом мгновенного трения при ударе λ , выражающим относительное приращение тангенциальной скорости. Для реальных физических тел $0 < \rho < 1$ и $0 < \lambda < 1$. Типичные значения коэффициента восстановления нормальной составляющей скорости изменяются в диапазоне от 0,3 до 0,7. Мягкие почвы и поверхности, покрытые

растительностью, занимают более низкий предел диапазона, а более твердые коренные породы – верхний предел. Типичные значения коэффициента мгновенного трения при ударе располагаются в диапазоне от 0,1 (твердые породы) до 0,5 (мягкие, рыхлые породы, осыпь).

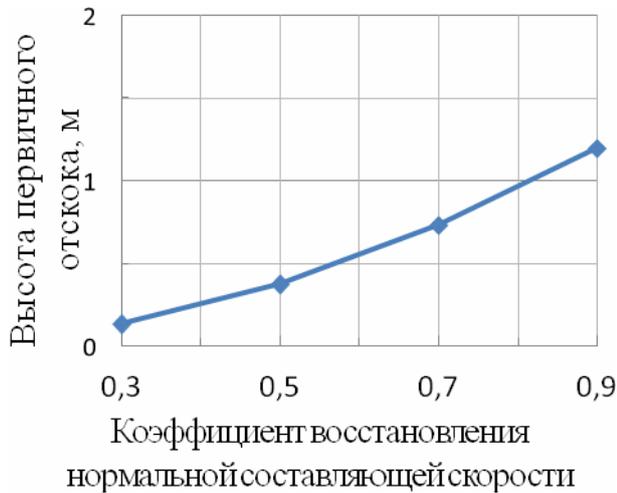


Рисунок 7 – Зависимость высоты первичного отскока от коэффициента восстановления нормальной составляющей скорости

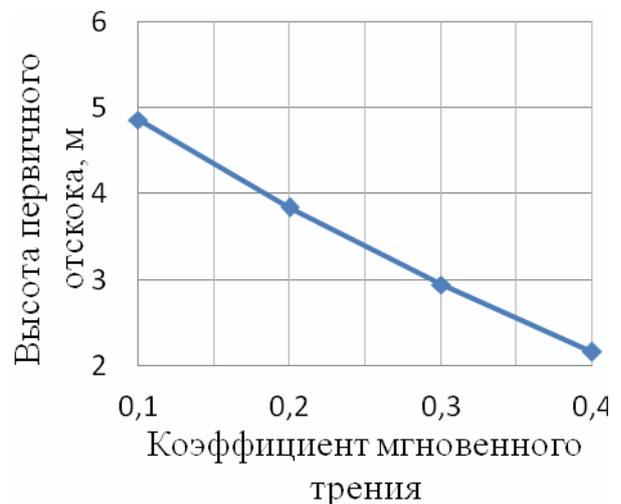


Рисунок 8 – Зависимость высоты первичного отскока от коэффициента мгновенного трения

Большие изменения траектории движения камней по откосу достигаются уже при незначительном изменении этих коэффициентов (в пределах 0,1). Исследования проводились для уступов высотой 10 м и углом наклона уступа 60°. Полученные зависимости представлены ниже:

Коэффициент восстановления нормальной составляющей скорости ρ	0,3	0,5	0,7	0,9
Высота первичного отскока h_o	1,2	0,735	0,375	0,135
Коэффициент мгновенного трения λ	0,1	0,2	0,3	0,4
Высота первичного отскока h_o	4,86	3,84	2,94	2,16

Результаты исследования закономерностей камнепада применены для определения параметров разработки Северо-западного борта Главного карьера Качканарского ГОКа, на котором возникли проблемы с обеспечением устойчивости массива и проявлениями камнепада в связи с развитием деформаций на этом участке, и для условий разработки деформированного

старыми подземными выработками участка Западного борта Меднорудянского карьера. Это позволило оценить предложенные варианты конструкций бортов карьеров по фактору опасности камнепада.

Компьютерное моделирование камнепада использовалось для обоснования ширины предохранительной бермы в проекте разработки Тейского карьера, выполненного ОАО «Уралгипроруда».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена важная научно-техническая задача геомеханического обоснования параметров камнепада к построению безопасных уступов и берм бортов карьеров. Разработанная методика расчета параметров камнепада и выявленные компьютерным моделированием их взаимосвязи с параметрами бортов, учитывающие многообразие форм породных отдельностей, свойств и геометрии поверхностей перемещения, позволяют оценивать размеры опасной зоны около нижней бровки уступа и определять размеры берм со степенью вероятности, достаточной для решения горнотехнических задач, с целью повышения эффективности и безопасности разработки месторождений полезных ископаемых открытым способом.

Основные результаты диссертации состоят в следующем:

1 Разработана геомеханическая модель процесса камнепада в карьере для изучения закономерностей движения камней по откосам и уступам, определены ее граничные условия и факторы, определяющие траектории перемещения камней.

2 Геомеханическая модель камнепада реализована при помощи компьютерной программы Roxim, которая позволяет оперативно учитывать все многообразие граничных условий и факторов, определяющих параметры камнепада.

3 Разработана методика исследования параметров камнепада. Исследованы наиболее значимые геометрические элементы траектории движения камней, оказывающие влияние на безопасность: высота и длина первичного отскока и

дальность перемещения кусков горной породы на берме, определяющие параметры опасной зоны около нижней бровки уступа.

4 Установлена зависимость высоты первичного отскока камня от параметров уступа. Наибольшие значения этой величины достигаются для высоких уступов и при крутых углах наклона уступа.

5 Установлено неоднозначное влияние угла наклона уступа на параметры камнепада: дальность выкатывания кусков породы на горизонтальную берму при углах наклона от 45 до 90° уменьшается, длина первичного отскока в пределах углов наклона уступа 45 – 65° равна $(0,33 \pm 0,03)H$, а в пределах 65 – 90° уменьшается в 7-8 раз; для уступов высотой 20 м она менее 1 м.

6 Упруго-пластические свойства поверхностного покрова оказывают значительное влияние на параметры скачкообразного движения камней. При увеличении коэффициента восстановления нормальной составляющей скорости высота первичного отскока увеличивается и, наоборот, при увеличении коэффициента мгновенного трения уменьшается высота первичного отскока.

Результаты выполненных исследований предназначены для организаций и предприятий, ведущих проектирование, строительство и эксплуатацию карьеров.

По теме диссертации опубликованы следующие основные работы:

В ведущих рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК России:

1 Каюмова А. Н. Прогноз последствий камнепада в карьерах / А. Н. Каюмова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. - № 9. – С. 257 - 261.

2 Каюмова А. Н. Закономерности камнепада и выбор конструктивных параметров бортов карьера / А. Н. Каюмова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 4. – С. 378 – 383.

3 Каюмова А. Н. Геомеханическое обоснование параметров бортов Тейского карьера с учетом фактора камнепада / А. Н. Каюмова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 7. – С. 262 - 268.

В научных сборниках и материалах конференций:

1 Каюмова (Исламова) А. Н. Влияние камнепада на параметры бортов карьера // Геомеханика в горном деле: сб. науч.тр. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 1999. – С. 95 – 99.

2 Каюмова (Исламова) А. Н. Моделирование камнепада при конструировании бортов карьеров // Геомеханика в горном деле – 2000: докл. Междунар. конф. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2000. – С. 268 – 273.

3 Каюмова А. Н. Разработка компьютерной геомеханической модели камнепада в карьере // Геомеханика в горном деле: докл. междунар. конф. 19-21 ноября 2002 г.– Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2003. – С. 287 – 293.

4 Каюмова А. Н. Обоснование параметров бортов карьеров с учетом фактора камнепада // Геомеханика в горном деле: докл. междунар. Конф., 5-8 июля 2005 г. – Екатеринбург: ИГД УРО РАН, 2005. – С. 327 – 334.

5 Каюмова А. Н. Применение компьютерного моделирования для борьбы с камнепадом на карьерах // Компьютерные технологии при проектировании и планировании горных работ: тр. Всерос. науч. конф. с междунар. участием / ГоИ КНЦ РАН. – Апатиты – СПб.: Реноме, 2009. – С. 154 – 156.

6 Каюмова А. Н. Особенности камнепада в рабочей зоне карьера // Геомеханика в горном деле: докл. Всерос. конф. 10-11 окт. 2008 г. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2008. – С. 149 – 150.

7 Каюмова А. Н. Использование компьютерной модели камнепада для обоснования параметров бортов Тейского карьера // Проблемы недропользования: материалы III всерос. молодеж. науч.-практ. конф., 10-13 февр. 2009 г. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2009. – С. 17 – 24.