

*На правах рукописи*

**Баженова Александра Владимировна**



**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СМЕЩЕНИЯ РУДНЫХ  
КОНТУРОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ РАЗВАЛА  
ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ НА КАРЬЕРАХ**

*Специальность 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2023

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, доцент

*Хохлов Сергей Владимирович*

**Официальные оппоненты:**

*Закалинский Владимир Матвеевич*

доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, отдел Проблем геомеханики и разрушения горных пород (отдел №5), ведущий научный сотрудник;

*Тюпин Владимир Николаевич*

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», кафедра прикладной геологии и горного дела, профессор.

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск.

Защита диссертации состоится **25 сентября 2023 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 25 июля 2023 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ  
Павел Игоревич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования.** Показатели потерь и разубоживания руды являются основными при оценке полноты и качества извлечения полезного ископаемого из недр. В настоящее время актуальность нормирования показателей потерь и разубоживания руды связана с учетом влияния технологических факторов, осуществление которого возможно за счет повышения объемов извлечения руды при ведении взрывных работ. С целью учета состояния минерально-сырьевой базы ведется государственный баланс запасов полезных ископаемых на всех этапах добычи полезных ископаемых. Таким образом, контроль за показателями извлечения является важным процессом при добыче полезного ископаемого.

Смещение контура рудного тела происходит при каждом взрыве, отсутствие контроля может привести к тому что, руда будет направляться в отвал пустых пород, а пустые породы пойдут в переработку на фабрику. Это особенно важно при разработке золоторудных месторождений с небольшим содержанием полезного компонента. В настоящее время процент разубоживания рудной массы при разработке месторождений открытым способом достигает 20%, что приводит к значительным экономическим потерям.

Анализ исследований в области буровзрывных работ на золотодобывающих предприятиях показывает несостоятельность прямых методов определения смещения рудных тел, таких как использование различных маркеров, в связи с погрешностями в определении местоположения маркеров и недоказанностью идентичности перемещения маркеров и горной массы. Также можно сделать вывод, что с учетом выполненных на эту тему исследований, общей математической модели прогнозирования формирования развала при взрывной подготовке горной массы предложено не было.

Точная информация по перемещению горной массы после взрыва позволит осуществлять контроль за содержанием полезного компонента в горной массе с целью извлечения всего запланированного объема полезных компонентов.

Исходя из вышесказанного, **актуальной задачей** является реализация комплексного подхода по прогнозированию смещения рудных контуров при формировании развала взорванной горной массы, требующего минимального количества исходных данных и при этом отличающегося простотой в реализации на предприятии.

**Степень разработанности темы исследования.** Несмотря на значительное количество методов исследования движения горных пород точность и качество прогноза не всегда удовлетворяет потребностям горнодобывающих компаний. При этом необходимость осуществлять прогнозирование движения неоднократно доказана, например, в работах Гилбрайд, Харрис и Тэйлор, Ферт. Одним из примеров теоретической модели для прогнозирования перемещения взорванной горной массы является трехмерная кинематическая модель Янга и Каветского. Для достижения высокоточного мониторинга движения горных пород, вызванного взрывом, применяется система мониторинга, предложенная Тортон, Енани, Энгман, Эшун и Дзигборди. Исследователи Чен, Чжао, Юн-ю, Ким, Ли, Юн, Стенфорс, Пуш, Онерра, Мюллер, Джонсон, Иверсон пытались прогнозировать результаты взрывных работ, используя численные, а также аналитические методы исследования.

Значительный вклад в исследование моделирования и прогнозирования параметров развала взорванной горной массы внесли отечественные ученые: Баранов Е.Г., Блинов А.Н., Боровиков В.А, Ванягин И.Ф., Додис Я.М., Жариков И.Ф., Кабелко С. Г., Кушко А.А., Лаптев Ю.В., Лемеш Н.И., Либерцев О.Н., Ломоносов Г.Г., Ракишев Б.Р., Цирель С.В. и другие исследователи.

Содержание диссертации **соответствует паспорту научной специальности** по пунктам 9, 10.

**Объект исследования** – рудосодержащие участки в массиве и развале горной массы при проведении взрывных работ.

**Предмет исследования** – закономерность перемещения рудосодержащей горной массы.

**Цель работы** – повышение показателей полноты и качества извлечения руды при уступной отбойке за счет селективной выемки на основе прогнозирования смещения контуров рудных тел при формировании развала взорванной горной массы.

**Идея диссертационной работы** – использование установленных новых зависимостей формирования развала взорванной горной массы на карьерах для прогноза смещения контуров рудных тел.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

Анализ существующих методов исследования процессов перемещения взорванной горной массы и релевантности использования данных методов для оценки смещения рудного контура, установление границ применимости методов, выявление достоинств и недостатков применения каждого.

Разработка алгоритма расчета смещения рудных контуров при формировании развала взорванной горной массы, на основе которого создать математическую модель расчета смещения рудных контуров в двухмерной постановке.

Проведение натурных экспериментов по определению настроечного коэффициента, предложенного в математической модели.

Численное моделирование развала взорванной горной массы с использованием современных программных продуктов.

Апробация предложенной математической модели и разработка концепции проведения анализа для корректировки технологии ведения буровзрывных работ и определения экономического эффекта.

**Научная новизна работы:**

1. Установлено, что формирование развала взорванной горной массы можно рассматривать единым объемом, который рассыпается на отдельные фрагменты в момент приземления.

2. Установлена зависимость угла наклона вектора начальной скорости центра тяжести разрушаемой части массива горных пород от ширины отбиваемого блока, определяемой количеством рядов до свободной поверхности.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

Выделение рудосодержащих кондиционных участков в развале взорванной горной массы после перемещения позволяет уменьшить потери руды при экскавации за счет применения селективной выемки на карьерах. Полученные результаты позволяют предсказывать значения перемещения рудных контуров в развале взорванной горной массы. Результаты диссертации внедрены в деятельности АО «Полюс Алдан» при разработке Куранахского рудного поля, получен акт внедрения от 19.04.2023. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Методология и методы исследования.** Проведение исследований осуществлялось в соответствии с системным подходом, математическим и численным моделированием процессов по определению рудного контура в развале взорванной горной массы и натурными измерениями.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Значение угла наклона вектора начальной скорости центра тяжести отбиваемого блока возрастает с каждым последующим рядом по зависимости вида  $\alpha = 0,45 \cdot n + 40,8$ .

2. Смещение рудных контуров необходимо определять косвенными методами, которые состоят из решения системы уравнений, описывающих движение взорванной горной массы при различных условиях.

3. Для песчано-глинистых пород формирование развала следует рассматривать как последовательное перемещение единых объемов, которые рассыпаются на отдельные фрагменты в момент приземления.

**Степень достоверности результатов исследования** обусловлена использованием стандартных методов математического и численного моделирования и их сходимостью с результатами натуральных экспериментов.

**Апробация результатов.** Основные положения диссертации и результаты исследований были изложены и получили одобрение на восьми конференциях: Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023» (Москва, МГУ, 2023 г.), XXXI Международном научном симпозиуме «Неделя горняка 2023» (Москва, МИСИС, 2023 г.), Всероссийской конференции конкурса «Актуальные проблемы недропользования» (СПб, СПбГГУ, 2021 г., 2020 г.), Полезные ископаемые России и их освоение (СПб, СПбГГУ, 2021 г.), X Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (СПб, СПбГГУ, 2020 г.), XVI International Forum-Contest of Students and Young Researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources» (СПб, СПбГГУ, 2020 г.), III Всероссийской научной конференции «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса» (СПб, СПбГГУ, 2020 г.).

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе научной лите-

ратуры по оценке методов смещения рудных контуров, разработке алгоритма расчета смещения рудных контуров при формировании развала взорванной горной массы, предложена математическая модель расчета смещения рудных контуров в двухмерной постановке; обработке результатов натурных исследований. Проведения исследований разлета частиц с помощью численного моделирования.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования освещены в 4 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

**Структура работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 105 наименований и одного приложения. Диссертация изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 78 рисунков и 16 таблиц.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, доценту, к.т.н. Хохлову С.В.; автор также благодарен за научное консультирование работы доценту, к.т.н. Виноградову Ю.И. Особую благодарность автор выражает руководству АО «Полюс Алдан» за помощь в организации уникальных промышленных экспериментов.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен краткий анализ проблем учета показателей извлечения в ходе взрывных работ. Рассмотрены существующие подходы к оценке смещения. Выявлено, что общепринятого представления о процессе перемещения рудных контуров при формировании развала взорванной горной массы для сложно-структурных пород не существует.

**Во второй главе** дано описание применимости прямого метода измерения пассивными маркерами, описаны подходы косвенного метода (моделирования) для определения смещения контуров рудных тел. Предложен алгоритм расчета перемещения рудных контуров. Разработанная модель позволяет оценить величину смещения каждого ряда (блока) в зависимости от исходных параметров буровзрывных работ и горно-геологических условий.

**В третьей главе** представлено описание численного моделирования разлета взорванной горной массы в программном комплексе Rosku. Детально описаны два подхода к формированию развала. Рассмотрены модели с разными начальными условиями, проанализированы результаты.

**В четвертой главе** приведены результаты апробации предложенной математической модели в реальных условиях производства. Проведен экономический анализ.

**В заключении** приведены основные результаты и выводы, полученные при проведении исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Значение угла наклона вектора начальной скорости центра тяжести отбиваемого блока возрастает с каждым последующим рядом по зависимости вида  $\alpha = 0,45 \cdot n + 40,8$ .**

Из литературных источников известно, что угол наклона вектора начальной скорости к горизонту является величиной вероятностной и возрастает с ростом номера ряда. Данный факт

объясняется столкновением кусков породы о развал, созданный взрывом предыдущего ряда скважин.

Для определения угла наклона вектора начальной скорости каждого ряда взрываемых скважин воспользуемся данными эксперимента, состоящего из 8 серий, в которых в нарастающем порядке взрывалось от одного до 8 рядов скважин. В каждую скважину закладывалось одинаковое количество взрывчатого вещества, взрывание рядов проводилось с одинаковыми интервалами замедлений 50 мс. После взрыва проводилась маркшейдерская съемка развала взорванной горной породы, и определялось положение центра тяжести развала в каждой из серий эксперимента.

Для описания траектории движения центра тяжести блока были применены формулы баллистики. Траектория тела, брошенного под углом  $\alpha$  к горизонту, описывается системой уравнений (1, 2):

$$x_1 = x_0 + V_0 * \cos \alpha * t; \quad (1)$$

$$y_1 = y_0 + V_0 * \sin \alpha * t - \frac{gt^2}{2}, \quad (2)$$

где  $x_1, y_1$  – текущие координаты тела, м;

$x_0=0$  начальное положение центра тяжести взрываемого блока, м;

$V_0$  – начальная скорость, м/с;

$t$  – текущее время полета, с;

$y_0$  – начальное положение центра тяжести взрываемого блока, м;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Если величина зарядов ВВ, закладываемых в скважины, одинакова для всех рядов, то энергия, сообщаемая горным породам каждого взрываемого ряда, также одинакова. Исходя из этого, при одинаковых граничных условиях (наличие свободной поверхности) справедливо предположение, что при взрывании горных пород, суммы взрываемых рядов или каждого ряда в отдельности приобретают равную начальную скорость и

угол наклона вектора начальной скорости. Для решения задачи возможны следующие допущения:

1) В результате взрывания центр тяжести блока приобретает наиболее благоприятный угол наклона вектора начальной скорости, равный  $45^{\circ}$ . При этом начальная скорость вылета уменьшается с увеличением ряда.

2) Начальная скорость вылета постоянна для каждого ряда, угол наклона вектора начальной скорости возрастает с увеличением ряда.

Для описания процесса перемещения взорванной горной массы в данной работе рассмотрено второе допущение, так как тип применяемого взрывчатого вещества не изменялся, следовательно, начальное давление ударной волны и скорость движения частиц остаются постоянными.

Для определения дальности перемещения (компонент  $x$ ) использованы уравнения баллистики (1, 2). По расчетным значениям начальной скорости вылета каждого последующего ряда, из условия равенства скоростей вылета и дальности перемещения, определен угол вектора начальной скорости центра тяжести каждого последующего ряда.

Пусть центр тяжести ряда скважин сместился на расстояние  $D$ , тогда дальность перемещения (3, 4):

$$D = V_n * \cos 45 * t, \quad (3)$$

где  $V_n$  – начальная скорость движения центра тяжести  $n$  – го ряда скважин, м/с.

$$D = V_0 * \cos \alpha * t. \quad (4)$$

При равенстве  $D$  имеет вид (5):

$$V_n * \cos 45 * t = V_0 * \cos \alpha * t. \quad (5)$$

Считая, что время перемещения одинаково (6):

$$\cos \alpha = \cos 45 * \frac{V_n}{V_0}. \quad (6)$$

Таким образом, зная начальную скорость вылета центра тяжести каждого ряда скважин и начальную скорость вылета центра тяжести одного (первого) ряда скважин, был определен

угол наклона вектора начальной скорости для каждого ряда скважин. На рисунке 1 показаны полученные данные и проведена линия тренда.

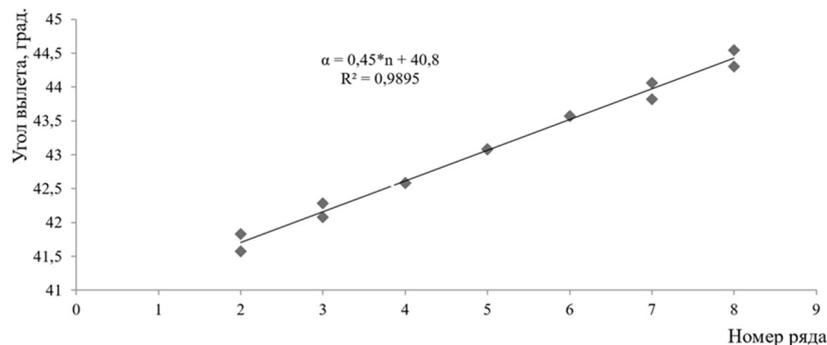


Рисунок 1 – Зависимость угла вылета от номера ряда

Полученные данные о величине угла наклона вектора начальной скорости для каждого ряда скважин в зависимости от номера ряда аппроксимируются зависимостью вида (7):

$$\alpha = 0,45 * n + 40,8, \quad (7)$$

при этом коэффициент детерминации  $R^2 = 0,9895$  говорит о совпадении расчетной прямой и исходных данных.

**2. Смещение рудных контуров необходимо определять косвенными методами, которые состоят из решения системы уравнений, описывающих движение взорванной горной массы при различных условиях.**

Анализ существующих методов исследования перемещения взорванной горной массы и релевантности использования данных методов для оценки смещения контуров рудных тел показал, что существуют два метода: прямой и косвенный методы оценки перемещения.

При прямом измерении движения горной массы используются специальные маркеры, устанавливаемые в массив горных пород до проведения взрывных работ. В качестве таких

маркеров используются полые трубки, мешки, заполненные каменной пылью, магнитные шары и пр. При этом все используемые маркеры можно поделить на пассивные и активные. Пассивные маркеры могут быть обнаружены только визуально. Перемещение активных маркеров можно отследить с помощью обнаружения специального сигнала, которые они генерируют.

Основная проблема использования маркеров связана с необходимостью измерения смещения при производстве каждого взрыва для каждого взрываемого блока, что влечет дополнительные финансовые издержки. Обработка полученных данных о смещениях происходит в специальном программном комплексе. Это означает, что фактически прямой метод измерения становится косвенным за счет заложенных в программный комплекс алгоритмов. Расположение специальных технологических скважин не всегда возможно по контуру рудного тела, что приводит к интерполяции данных. Еще одним важным недостатком использования маркеров является справедливость идентичности перемещения горной массы и маркера, которая лежит в основе использования данного подхода. К тому же, как указывается в ряде работ, маркеры, расположенные на разной высоте технологической скважины, перемещаются на разные расстояния (разброс составляет 3 – 7 метров). Данный факт необходимо учитывать в случае, когда контур рудного тела формируется с ровной вертикальной границей.

Для подтверждения достоинств и недостатков прямого и косвенного метода оценки перемещения были проведены натурные эксперименты в условиях Куранахского рудного поля.

Результат первого эксперимента подтвердил, что низкий процент нахождения маркеров является закономерным, как и было выявлено предыдущими исследователями. Основным преимуществом данного способа является дешевизна и доступность материалов для создания маркеров, но использование

способа для оценки смещения нерационально. Поэтому для оценки смещения рудных контуров предлагается использовать косвенный метод, который состоит из решения системы уравнений, описывающих движение взорванной горной массы при различных условиях. Прямые методы при этом можно использовать только для настройки коэффициентов, используемых в уравнениях.

Проведенные исследования серии массовых взрывов показали, что для горно-геологических условий Куранахского рудного поля достаточно использовать упрощенную модель расчета движения взорванной горной массы с учетом некоторых уточнений. В модели применялся расчет движения единичного блока, ограниченного по периметру скважинами, взрывааемыми за одну ступень. Обобщенная схема определения перемещения единичных блоков представлена на рисунке 2.

Алгоритм расчета:

1) Рассчитывается начальная скорость центра тяжести блока формула (8):

$$V = K \cdot \sqrt{q} , \quad (8)$$

где  $V$  – средний модуль вектора начальной скорости, м/с;

$q$  – удельный расход ВВ, кг/м<sup>3</sup>;

$K$  – эмпирический коэффициент.

2) Определяется угол вектора начальной скорости  $\alpha_1$  для центра тяжести первого ряда скважин формула (9):

$$\alpha_1 = 0,45 \cdot n + 40,8, \quad (9)$$

где  $n$  – номер ряда.

3) Рассчитывается дальность перемещения центра тяжести первого ряда скважин, исходя из уравнения баллистики формула (10):

$$D = K \sqrt{q} \cdot \cos(\alpha_1) \cdot t, \text{ м.} \quad (10)$$

4) Рассчитывается ограничение на перемещение для второго ряда скважин.

5) Определяется угол вылета для второго ряда  $\alpha_2$  центра тяжести второго ряда скважин (11):

$$\alpha_2 = 0,45 * n + 40,8. \quad (11)$$

6) Производится расчет перемещения центра тяжести второго ряда скважин формула (12):

$$D = K \sqrt{q} * \cos(\alpha_2) * t, \text{ м.} \quad (12)$$

7) Далее по аналогии определяется смещение для следующих рядов и общее смещение контуров рудных тел.

Описанный выше алгоритм расчета был реализован в программном комплексе Micromine. Для расчета эмпирического коэффициента (формула 8) была проведена серия экспериментов (рисунок 3). Скорость вылета кусков взорванной горной массы и траектория движения была определена в программном обеспечении ProAnalyst по результатам съемки высокоскоростной камерой массового взрыва.

Верификация модели производилась по данным промышленного эксперимента, при этом границы рудного тела после взрыва определялись при помощи опробования взорванной горной массы (отбор горстевых проб) во время отгрузки забоя экскаватором (рисунки 4, 5). Полученные данные в ходе экспериментального взрыва на 80 % соответствовали расчетным.

При решении задач в горном деле ввиду: большого числа неизвестных; значительного влияния различных параметров, которые невозможно учесть; материальных затрат, необходимых для осуществления эксперимента, следует считать, что модель является работоспособной.

**3. Для песчано-глинистых пород формирование развала следует рассматривать как последовательное перемещение единых объемов, которые рассыпаются на отдельные фрагменты в момент приземления.**

В программном комплексе Rocky было выполнено моделирование развала горной массы при скважинной взрывной от-

бойке. Исходная модель представляла собой откос уступа взрываемого блока (до первого ряда скважин). Параметры уступа представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры моделируемого уступа

Параметр	Значение
Высота уступа, м	10
Угол откоса, град	70
Линия сопротивления по подошве, м	5,6
Расстояние от первого ряда скважин до бровки уступа, м	2

Сформированные модели представляют собой уступ, сложенный из частиц (кубов) следующих размеров: 0,05×0,05×0,05 м; 0,1×0,1×0,1 м; 0,2×0,2×0,2 м; 0,3×0,3×0,3 м; 0,5×0,5×0,5 м. Физико-механические свойства материала частиц представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Физико-механические свойства частиц

Параметр	Значение
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2500/1800
Модуль упругости, ГПа	1
Коэффициент Пуассона	0,24
Коэффициент трения	0,8
Динамический коэффициент трения	0,7

Массив из кубиков генерировался на поверхности, имитирующей нижнюю площадку уступа. Процесс формирования развала производился двумя способами:

1) разлет частиц с определением координат частицы в любой момент времени и учетом их соударения (классическое представление о разлете частиц при формировании развала взорванной горной массы);

2) перемещение уступа как единого куска с последующим рассыпанием в момент приземления (единый кусок, предполагаемое допущение).

Задачей моделирования было определить насколько разным получится развал взорванной горной массы при различных

постановках задачи для блоков, сформированных из частиц разного размера и плотности.

На рисунках 6, 7 представлены результаты моделирования по 1 и 2 задаче для частиц размером 100 мм и 500 мм соответственно и плотностью  $1800 \text{ кг/м}^3$ . Контур полученных сформированных развалов обводился в AutoCAD, координаты центра тяжести определялись в Space Claim. На рисунках 8, 9 представлены полученные результаты моделирования для частиц размером 100 мм и 500 мм. Основные параметры сведены в таблице 3.

Основным критерием для сравнения формы развалов при различных условиях была принята разница между центрами масс развалов. Результат моделирования показал, что с уменьшением размера куска уменьшается разница между центрами масс развалов (рисунок 10). Наименьшее отклонение 0,1 м наблюдается при размерах частиц 50 мм, 100 мм и плотности  $1800 \text{ кг/м}^3$ , при этом остальные параметры развала для данных частиц отличаются не более чем на 5 %.

Учитывая, что Куранахское рудное поле представлено относительно мягкими породами и принимая, что для горных пород с крепостью меньше 4 по шкале М.М. Протодьяконова средний размер куска горной массы составляет менее 100 мм, сделан вывод, что для упрощения расчетов для песчано-глинистых пород формирование развала следует рассматривать как перемещение единого объема, который рассыпается на отдельные фрагменты в момент приземления.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе предлагается решение научной задачи – прогнозирование смещения рудных контуров при формировании развала взорванной горной массы для горнодобывающей отрасли. В работе предлагаются новые решения для развития страны.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1) Для оценки смещения контуров рудных тел необходимо использовать прогнозный метод оценки перемещения. Проведенный промышленный эксперимент подтвердил низкий процент нахождения маркера, как и было, выявлено предыдущими исследователями. К тому же применение маркеров имеет ряд существенных недостатков, основные из которых: невозможность бурения технологических скважин по всему контуру рудного тела, что приводит к интерполяции результатов; недоказанность идентичности перемещения маркера и горной массы.

2) Применение численного моделирования в условиях производства, является трудозатратным процессом и применение его на производстве остается в настоящее время малореализуемым, что связано с непрерывностью производства, в то время как затрачиваемые временные ресурсы являются длительными, а расчет необходимо производить для каждого взрываемого блока.

3) Большим недостатком всех использованных в мире методик, алгоритмов, подходов к прогнозированию контуров рудных тел является их неподтвержденность практикой и связано это с тем, что проведение промышленных экспериментов — это очень затратный для производства процесс. Для производства необходим простой в реализации способ прогнозирования смещения контуров рудных тел с минимальным количеством входных параметров, обеспечивающий приемлемый уровень точности.

4) В результате моделирования, реализованного в программном комплексе Rocky было доказано, что для песчано-глинистых пород формирование развала следует рассматривать как перемещение единого объема, который рассыпается на отдельные фрагменты, при этом выявлено, что необходимость

выполнения сложных расчетов по взаимному влиянию (соударению) отдельных частиц в процессе их разлета отсутствует.

5) Предложен упрощенный алгоритм расчета перемещения рудных контуров, обеспечивающий приемлемый уровень точности. Разработанная модель позволяет оценить величину смещения каждого ряда (блока) в зависимости от исходных параметров БВР и горно-геологических условий. Значения перемещения, полученные в ходе экспериментальных взрывов, на 80% соответствуют расчетным, что доказывает правильность принятых допущений и работоспособность предложенной модели.

Предложенная математическая модель апробирована в условиях Куранахского рудного поля, акт внедрения представлен в диссертации. Получено два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Перспективы развития темы диссертации связаны с реализацией предложенного подхода в трехмерной постановке.

### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Виноградов, Ю.И. Методические принципы измерения кусковатости горной массы / Ю.И. Виноградов, С.Т. Соколов, С.В. Хохлов, **А.В. Баженова**. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2020. — № 1. — С. 112-123.

2. Хохлов, С.В. Исследование вопроса управления и контроля за смещением взорванной рудной массы / С.В. Хохлов, **А.В. Баженова**, В. А. Маккоев [и др.]. // Взрывное дело. — 2021. — № 132-89. — С. 59-76.

*Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

3. Khokhlov, S.V. Predicting displacements of ore body boundaries in generation of blasted rock pile / Khokhlov S.V.,

Vinogradov Yu.I., Noskov A.P., **Bazhenova A.V.** // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2023; (3): 40-56.

DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_3\_0\_40.

4. Moldovan, D.V. Design concepts for explosion products locking in chamber / Moldovan D.V., Chernobay V.I., Sokolov S.T., Bazhenova A.V. // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2022; (6-2): 5—17. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_5.

*Свидетельства:*

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020613990 / Программа для расчета содержания полезного компонента и выхода товарной руды (металла) в условиях волатильных параметров БВР. № 2020612926: заявл. 16.03.2020: опубл. 25.03.2020 / С.В. Хохлов, О.А. Маринина, **А.В. Баженова**; заявитель Горный университет». – 1 с.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020613932 / Программа для расчета параметров развала взорванной горной массы № 2020612872: заявл. 16.03.2020: опубл. 24.03.2020 / С.В. Хохлов, Ю.И. Виноградов, **А.В. Баженова**; заявитель Горный университет». – 1 с.

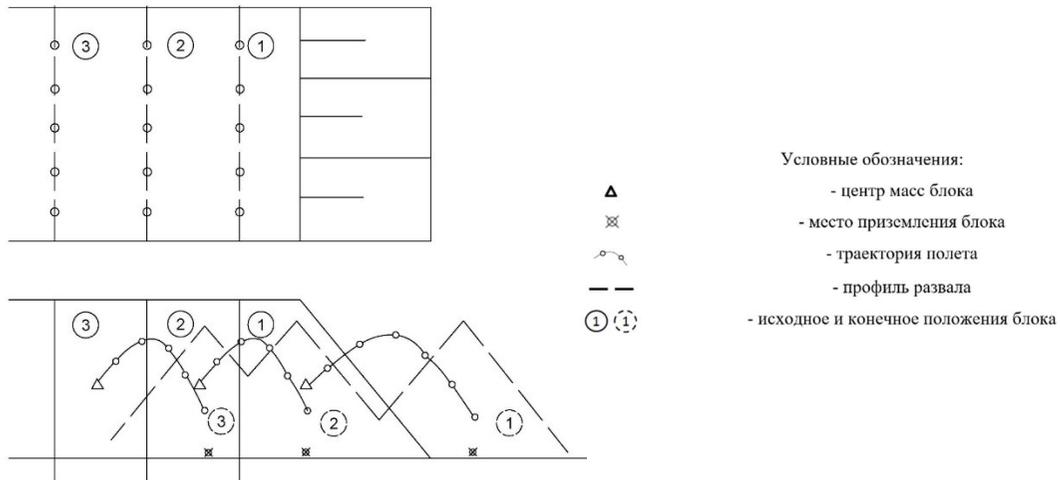


Рисунок 2 – Обобщенная схема определения перемещения единичных блоков

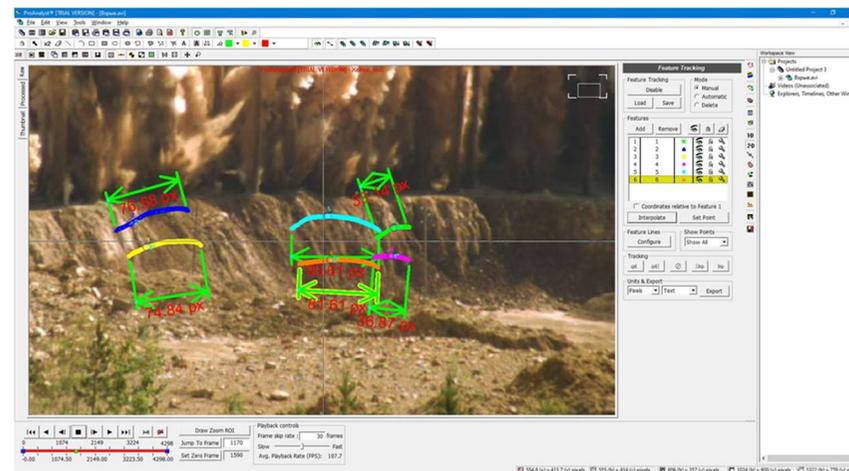


Рисунок 3 – Расстояния пределов траекторий исследуемых позиций

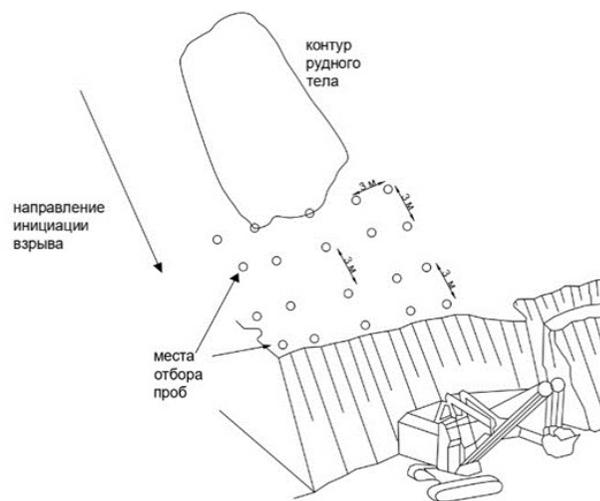


Рисунок 4 – Схема опробования

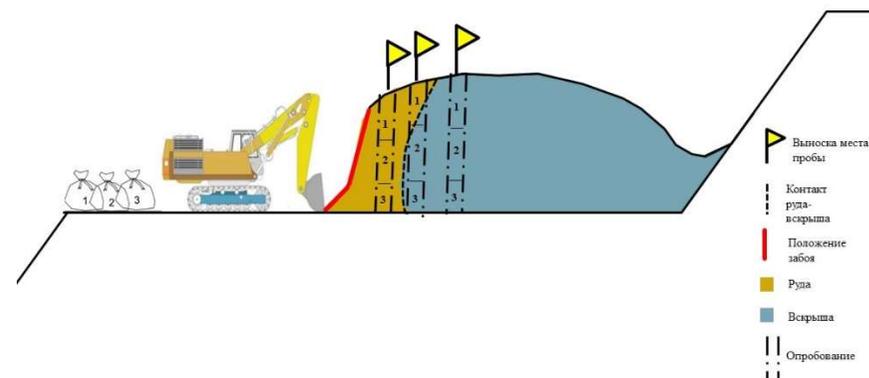


Рисунок 5 – Схема опробования экскаватором

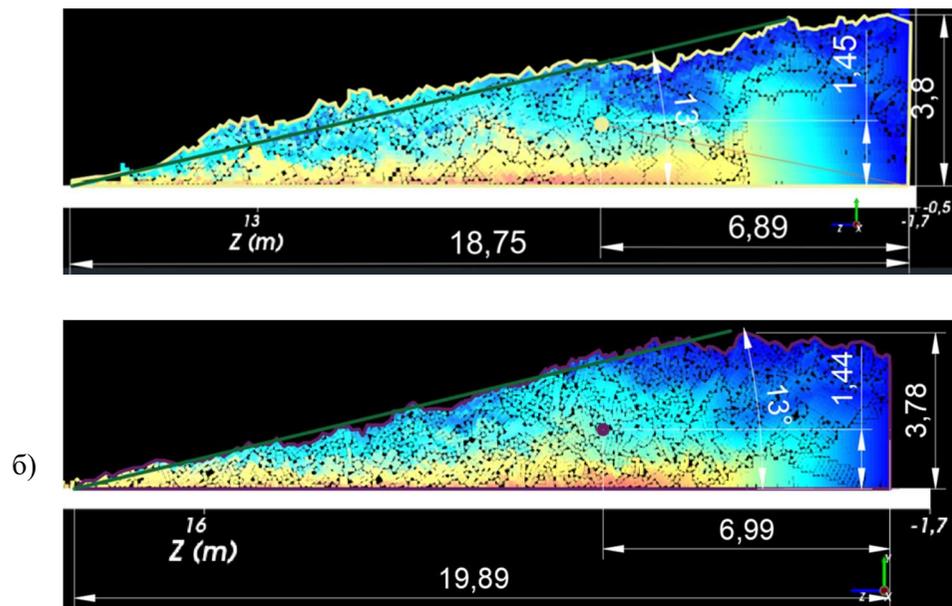


Рисунок 6 – Развал блока из частиц 100 мм: а) Задача 1, плотность частиц 1800 кг/м<sup>3</sup>; б) Задача 2, плотность частиц 1800 кг/м<sup>3</sup>

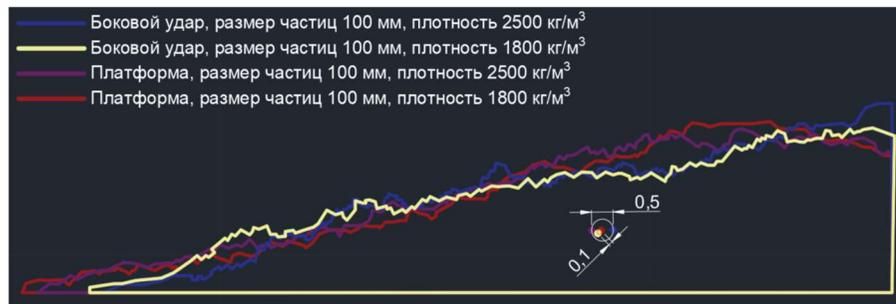


Рисунок 8 – Сопоставление контуров развала и центров масс (частицы 100 мм)

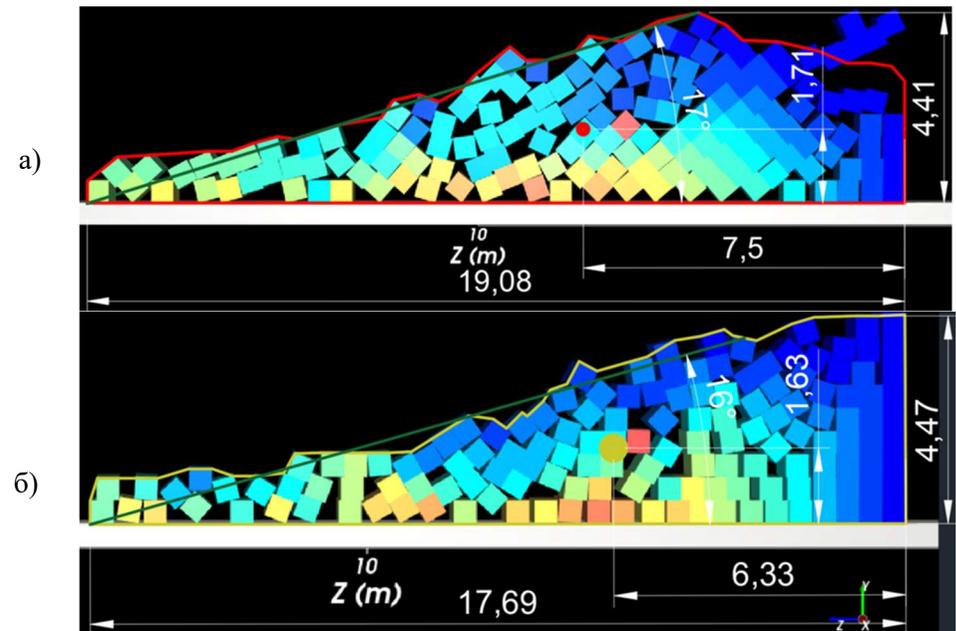


Рисунок 7 – Развал блока из частиц 500 мм: а) Задача 1, плотность частиц 1800 кг/м<sup>3</sup>; б) Задача 2, плотность частиц 1800 кг/м<sup>3</sup>

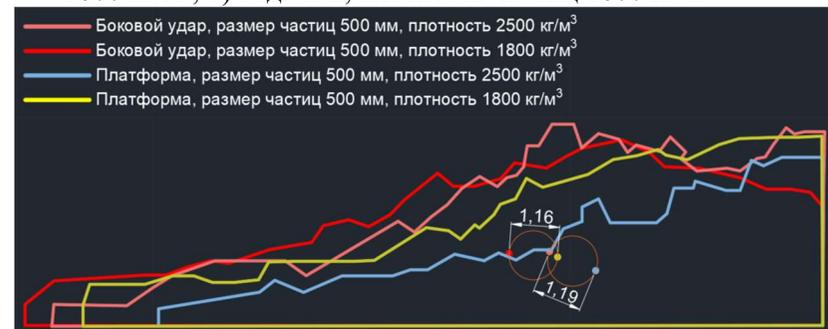


Рисунок 9 – Сопоставление контуров развала и центров масс (частицы 500 мм)

Таблица 3 – Результаты моделирования

Задача	Размер частиц, мм	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Разница между центрами масс, Δ, м	Ширина развала, м	Высота развала, м	Угол, °	Ширина до центра масс, м	Высота до центра масс, м
1	50	1800	0,1	21,96	3,12	9	7,9	1,17
2		1800		23,11	3,11	9	8,04	1,13
1	100	2500	0,5	18,4	3,9	13	6,5	1,45
2		2500		20,25	3,95	13	6,78	1,44
1	100	1800	0,1	18,75	3,8	13	6,89	1,45
2		1800		19,89	3,78	13	6,99	1,44
1	200	2500	0,78	20,58	3,87	12	7,09	1,35
2		2500		18	4,71	17	6,19	1,73
1	200	1800	1,69	23,15	3,6	10	7,82	1,26
2		1800		17,66	4,41	18	6,36	1,64
1	300	2500	0,81	20,02	3,79	13	7,47	1,34
2		2500		20,17	4,31	14	6,73	1,57
1	300	1800	1,73	21,29	3,79	13	8,08	1,31
2		1800		19,19	4,16	14	6,37	1,57
1	500	2500	1,19	18,46	4,78	17	6,55	1,76
2		2500		15,89	3,99	13	5,43	1,3
1	500	1800	1,16	19,08	4,41	17	4,41	1,71
2		1800		17,69	4,47	16	6,33	1,63

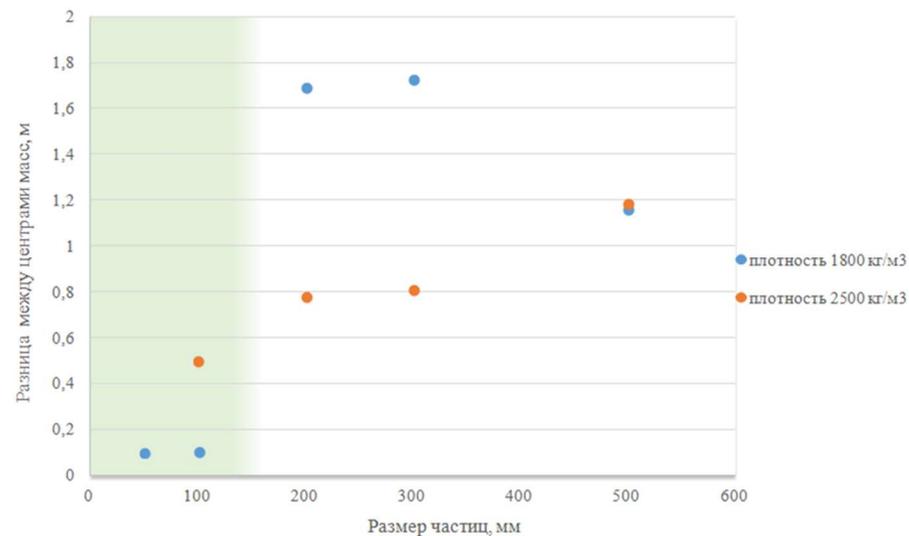


Рисунок 10 – График зависимости разницы между центрами масс развала от размера частиц