

На правах рукописи

Сухов Арсений Константинович



**ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ GRID-МОДЕЛЕЙ
ДЛЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ
СЪЕМОК ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

*Специальность 2.8.3. Горнопромышленная и
нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское
дело и геометрия недр*

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

Санкт-Петербург – 2024

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, кафедра маркшейдерского дела, профессор
Гусев Владимир Николаевич

Официальные оппоненты:

Бахаева Светлана Петровна
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», кафедра маркшейдерского дела и геологии, профессор;

Афонин Дмитрий Андреевич
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Инженерная геодезия», доцент

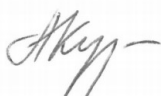
Ведущая организация - федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва.

Защита диссертации состоится **26 июня 2024 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета ГУ.8 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 26 апреля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КУЗИН
Антон Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Фотограмметрическая съемка в маркшейдерском деле применяется для оперативного получения цифровых данных о геометрии и топографии природных объектов, зданий и сооружений с минимальными затратами времени и ресурсов, ограниченным числом персонала, требующегося для выполнения работ.

По результатам камеральной обработки данных съемки составляется файл с набором координат точек, облаком точек, на основании которого формируются цифровые модели открытых горных выработок.

Существующие подходы к формированию цифровых моделей открытых горных выработок заточены под работу с малыми объемами данных. Те же подходы применяются и к результатам фотограмметрических съемок открытых горных выработок, характеризующихся избыточностью получаемой информации. Всем точкам облака присваивается равный вес, после чего начинается этап неизбежного разряжения с целью снизить количество обрабатываемой информации. Затем, формируемые модели проходят этап выполнения данных.

Применяемые схемы создания цифровых моделей рельефа стремятся уменьшить объем данных исходного облака точек за счет удаления менее важной информации, что в свою очередь приводит к уменьшению точности модели.

В то же время, контроль точности результирующей модели основывается на сравнении точек, участвующих в формировании модели с дискретными точками, определёнными с помощью других методов съемок. Контроль построения цифровых моделей открытых горных выработок на любом произвольно-выбранном участке модели отсутствует.

1 сентября 2023 года опубликован приказ Федеральной службы по экологическому технологическому и атомному надзору от 19 мая 2023 г. N 186 "Об утверждении Правил осуществления маркшейдерской деятельности", в котором сформированы требования к учёту и обоснованию объёмов горных разработок при разработке месторождений твёрдых полезных ископаемых, а также требования

к ведению маркшейдерской документации. Согласно пункту 109, ведение маркшейдерской документации осуществляется на бумажном носителе и (или) в электронном виде.

Однако, «Правила...» не устанавливают требуемые форматы электронного вида маркшейдерской документации; отсутствуют комментарии относительно возможных допустимых погрешностей на определение координат по цифровым моделям рельефа, цифровым картам и планам. Также не регламентированы допустимые расхождения векторных и растровых моделей с результатами маркшейдерских измерений, а также способы их определения.

То есть, с одной стороны, маркшейдерская графическая документация должна быть достоверной и наиболее полной. С другой стороны, степень достоверности передаваемых ей данных никак не регламентирована.

Всё вышесказанное приводит к тому, что необходимо найти подход, позволяющий упростить создание цифровых моделей методом контролируемого снижения информации с возможностью оценки качества результирующей модели.

Степень разработанности темы исследования

Вопросам учета результатов дистанционных съемок в качестве основы цифровых моделей местности при решении маркшейдерских и геодезических задач посвящены многие труды таких отечественных и зарубежных ученых, как Науменко А.И., Мустафин М.Г., Выстрчил М.Г., Илюхин Д.А., Коробейников А.В., Крапивный Д.Н., Кочнева А.А., Нёхтер А., Керивен Р., Бозм Ж. и др. Данные научные труды описывают принципиальную возможность применения дистанционных съемок в ряде маркшейдерских задач, например, при формировании цифровых моделей открытых горных выработок, при подсчёте объемов горных пород и др. Однако, они не дают математического обоснования параметров и способов разряжения исходного облака точек, которое участвует в последующем создании цифровых моделей открытых горных выработок.

Таким образом, тему формирования цифровых моделей открытых горных выработок по результатам фотограмметрических маркшейдерских съемок на открытых горных работах следует считать недостаточно исследованной и проработанной.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр по п.1. «Технические средства, технологии и методики производства геометрических измерений пространственно-временных характеристик состояния земной поверхности, недр, подземного пространства городов и графического отображения информации в различных видах», п.9. «Методы и системы обработки геологической, маркшейдерской и геофизической информации, а также методы моделирования месторождений, прогнозирования горно-геологических условий, явлений и процессов».

Цель диссертационной работы: поиск оптимального способа формирования цифровых моделей открытых горных выработок.

Идея диссертационной работы: обоснование формирования GRID-моделей открытых горных выработок по неразрезанному облаку точек за счёт аппроксимации полиномами первого порядка.

Предмет исследования – цифровые модели открытых горных выработок, построенных по результатам маркшейдерских фотограмметрических съемок с беспилотных летательных аппаратов.

Объект исследования – результаты маркшейдерских фотограмметрических съемок.

Основные задачи исследований:

- анализ существующих подходов к формированию цифровых моделей открытых горных выработок;
- анализ существующих методов оценки точности цифровых моделей;
- сбор, анализ и обработка данных натурных исследований по результатам фотограмметрических съемок;
- обоснование подхода к формированию цифровых моделей открытых горных выработок;
- изучение цифровых моделей открытых горных выработок, построенных на основании маркшейдерских фотограмметрических съемок;
- верификация полученных моделей и выявление закономерностей для обоснования инженерной методики.

Научная новизна работы:

– при аппроксимации сегмента модели выявлена линейная зависимость среднеквадратической погрешности определения высоты в сегменте от размера сетки деления;

– для цифровых моделей рельефа определена форма распределения ошибки аппроксимации полиномом первого порядка, согласующаяся с законом χ^2 -распределения.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– разработан алгоритм построения цифровой модели, основанный на разделении исходного облака точек на сегменты и описания сегментов облака полиномами первого порядка;

– определены оптимальные размеры сегментов, соответствующие точности технологических задач;

– сформулированы рекомендации по высоте полёта беспилотного летательного аппарата во время фотограмметрических работ в зависимости от прогнозируемой ошибки модели.

Результаты исследований внедрены в маркшейдерском отделе ООО «Карьерпроект», г. Санкт-Петербург, что подтверждается актом внедрения результатов кандидатской диссертации (утвержден генеральным директором ООО «Карьерпроект» Музыкиным М.Г. от 23.05.2023 г.).

Методология и методы исследования. Методологической и теоретической основой диссертационного исследования послужили труды зарубежных и отечественных ученых в вопросе создания цифровых моделей местности на основании дистанционных маркшейдерских и геодезических съемок открытых горных выработок. При выполнении исследований применялся системный подход, базирующийся на: анализе результатов ранее опубликованных исследований, построении расчетных схем и моделей, сравнении полученных результатов с другими методами создания цифровых моделей местности, создании программных алгоритмов и их реализации посредством написания специальных программных модулей на языке программирования Python, апробации предложенных рекомендаций и их применение при решении маркшейдерских задач по определению объемов открытых горных выработок.

Положения, выносимые на защиту:

1. Для формирования цифровых моделей открытых горных выработок, получаемых из облаков точек при фотограмметрической съемке, следует в качестве аппроксимирующей функции использовать уравнение плоскости, с определением ее наклона и положения в трехмерном пространстве по методу наименьших квадратов.

2. Соответствие сегментированной модели исходным данным облака точек следует определять на основе геопространственного анализа взаимосвязи высот точек облака относительно вписанной в каждый сегмент плоскости.

3. Выбор оптимального размера сегмента модели следует производить с учетом полученной закономерности линейного возрастания среднеквадратической погрешности модели от размера сегмента модели в соответствии с техническими (технологическими, нормативными) требованиями точности решаемой задачи.

Обоснованность и достоверность результатов исследования подтверждается объемами обработанной информации в результате исследования, использованием ее для разработки методики создания цифровых моделей открытых горных выработок и статистическими результатами их анализа. Полученные результаты согласуются с оценками специалистов маркшейдерских служб карьеров.

Апробация результатов. Основное содержание диссертации докладывалось на следующих конференциях: XXX Международной научно-практической конференции «Российская наука в современном мире», 31 мая 2020 г.; Всероссийской конференции-форуме «Актуальные проблемы недропользования 2021», 14-16 апреля 2021г.; конференции «Горное дело в XXI веке: инновации, наука, образование», 26 октября 2021г.-28 октября 2021г.; первой междисциплинарной научно-практической конференции «Человек в Арктике», 17-19 ноября 2021г.; международном этапе научной конференции-форума «Актуальные проблемы недропользования», апрель-май 2022г.

Личный вклад автора состоит в участии при формулировании и постановке цели, задач диссертационной работы, разработке метода создания цифровых моделей по облакам точек, полученных в ходе маркшейдерских дистанционных съемок открытых горных выработок, создании программы по расчету аппроксимации сегментов

облака точек на основе полинома первого порядка с использованием языка программирования Python, выполнении вычислительных экспериментов для определения корректности работы применяемых методов, анализ и обобщение полученных экспериментальных результатов, написание и оформление научных статей, апробация основных положений диссертационной работы на научных конференциях.

Публикации по работе. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 7 печатных работах, в том числе в 1 статье - в издании из перечня рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство на программу для ЭВМ. Номер свидетельства (регистрации): 2023663738 б. №7. Дата публикации: 05.07.2023.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка, включающего 148 литературных источников, списка иллюстративного материала, изложена на 128 страницах машинописного текста, содержит 13 таблиц, 42 рисунков и 5 приложений.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю профессору В.Н. Гусеву и доценту кафедры маркшейдерского дела М.Г. Выстрчил за помощь в определении идеи работы, создании и обосновании методики исследования, ценные замечания и внимание к работе. Автор благодарит руководство ООО «Карьер-проект», в частности главного маркшейдера А.А. Блищенко за помощь в организации и выполнении опытов на горных объектах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования; сформулированы цель, идея, задачи и научная новизна работы; определены объект и предмет исследований; раскрыты теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования; изложены положения, выносимые на защиту; приведены степень достоверности результатов исследования, их апробация, а так-

же личный вклад соискателя, данные о публикациях, структура работы и благодарности.

В первой главе описываются методы сбора и представления данных при аэрофотосъемке с использованием беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Представлены методы формирования цифровых моделей открытых горных выработок на основе регулярной сети (GRID), и нерегулярной триангуляционной сети (TIN), а также их преимущества и недостатки. Приведен обзор нормативно-технических требований, предъявляемых к горно-графической документации в маркшейдерском деле.

Обозначена проблема формирования цифровых моделей открытых горных выработок, получаемых посредством фотограмметрической маркшейдерской съемки открытых горных выработок.

Во второй главе описан предлагаемый метод создания цифровых моделей. Главным отличием предлагаемого способа создания моделей от существующих обозначен подход к описанию высоты: вместо применяемых в традиционных GRID алгоритмов интерполяции данных используются алгоритмы аппроксимации сегментов облака плоскостью, аналогично TIN. В сравнении с TIN, предлагаемый способ моделирования позволяет получить высотные характеристики, не создавая трудностей при отображении данных, а также одновременно учесть все точки исходного облака, избегая этапа его неконтролируемого разряжения.

Продемонстрировано, что предлагаемый метод формирования цифровых моделей открытых горных выработок является компромиссным решением в вопросе учёта исходных данных, оперативного отображения графической информации, описания изменения высот в модели, оптимизации количества информации, обязательной для хранения маркшейдерскими службами предприятий.

В третьей главе описан полевой сбор данных с использованием дистанционной технологии на примере съемки с квадрокоптера DJI Phantom 4 и воздушного крыла Geoscan 101. Представлен предлагаемый метод формирования цифровых моделей, реализованный в виде пакета классов на языке программирования Python.

В главе произведен статистический анализ, который позволяет определить вероятность появления ошибок для каждого из разме-

ров сегментов. Распределение ошибок внутри сегментов модели объясняется присутствием малочисленных сегментов с грубыми ошибками или более плоским рельефом внутри больших сегментов.

Анализ результатов моделирования показал, что большие значения среднеквадратичного отклонения достигаются в участках с большими перепадами высот или резким изменением линейности рельефа. Представлены карты распределения показателей коэффициентов детерминации и значений средних квадратических ошибок. Таким образом становится возможным оптимизировать планирование измерений и количество хранимой информации.

В четвертой главе описаны результаты моделирования по облаку точек, который использует сегментированные модели.

Представлено преимущество использования предлагаемого способа в части описания исходных данных: возможно оценить результат алгоритмов фильтрации исходного облака. Приведены рекомендации по планированию аэрофотосъемочных маркшейдерских работ: необходимо задаваться ошибкой определения высоты в сегменте для прогнозирования высоты полёта воздушного судна. Величину прогнозируемой ошибки следует подбирать исходя из размера сегментов моделирования.

В заключении изложены основные результаты и выводы, полученные в ходе исследований. Предлагаемый метод позволяет определять границы зон, в которых происходит изменение геометрических параметров снимаемых объектов. Аппроксимация методом наименьших квадратов подходит для выделения участков, где наблюдается большое количество выбросов или искажений в исходных данных.

Аппроксимацию множества точек полиномами первого порядка следует использовать для создания цифровых моделей рельефа и определения объемов горных работ при маркшейдерском обеспечении.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях.

1. Для формирования цифровых моделей открытых горных выработок, получаемых из облаков точек при фотограмметрической съемке, следует в качестве аппроксимирующей

функции использовать уравнение плоскости, с определением ее наклона и положения в трехмерном пространстве по методу наименьших квадратов.

Цифровые модели открытых горных выработок представляются в виде регулярной сети высот (GRID) и нерегулярной сетки треугольников (TIN). GRID подходит для описания рельефа местности в тех случаях, когда объект съемки представляет из себя поверхность, сложенную естественным образом, и не имеет резких перегибов и большой разницы высот в смежных узлах сетки. TIN за счет неравномерности узлов сетки может наиболее полно описывать структуры с неоднородным рельефом, например, в условиях городской застройки.

TIN-модели дают подробное описание объекта съемки, но также предполагают разряжение исходных данных, что не обеспечивает достоверность моделирования на произвольно-выбранных участках. Высота сегментов TIN рассчитывается как значение плоскости, заключенной между вершинами нерегулярной сетки. GRID-модели одновременно учитывают все точки облака, но такой тип модели относится к геореляционным моделям, представляющим из себя совокупность растровой структуры с информацией о распределении высот в каждом сегменте. Высота в сегментах моделей GRID определяется как интерполяция множества точек, относящаяся к геометрическому центру регулярной сети.

Приведенные недостатки требуют поиска консенсусного решения, позволяющего выполнить расчет и формирование цифровых моделей открытых горных выработок одновременно с учётом всех точек исходного облака и иметь математически-обоснованное описание изменения высоты между узлами сетки.

Идея предлагаемого метода заключается в последовательном формировании по результатам фотограмметрической съемки модели по регулярной сети. При этом, предлагается заменить интерполяцию значений высот сегментов GRID аппроксимацией полиномами первого порядка. Такой подход предоставляет возможность найти наиболее вероятное положение плоскости и приблизить её значение к «истинному» для каждого сегмента.

Форма сегментов квадратной формы при плоском делении

обуславливается тем, что квадрат может быть программно описан размером только одной стороны и координатой одной точки (к примеру, центра квадрата), а также легко разбит на подобные фигуры, что позволяет легче выполнять генерализацию модели и применять иерархические алгоритмы при их обработке.

Для реализации предлагаемого способа формирования моделей открытых горных выработок по регулярной сети был написан программный продукт в виде пакета классов на языке программирования Python: свидетельство на программу для ЭВМ (номер свидетельства: 2023663738).

Проведено сравнение результатов моделирования для одного объекта с целью выяснить преимущества и недостатки каждого из них (таблица 1). Исходными материалами послужили результаты аэрофотосъемки с использованием БЛА DJI Phantom 4 PRO. Количество фотографий составило 536, высота полета – 150 м. Модель фотокамеры, использовавшейся в процессе съемки – FC6310S. Объект съемки имеет размеры порядка 32 Га.

С целью обеспечить одинаковую дискретность модели, исходное облако точек при формировании TIN было разрежено до 1 м. При сравнении объема информации использовалась кодировка 16 бит.

Таблица 1 - Сравнение предлагаемого способа формирования GRID и существующих способов создания моделей

Сравниваемый параметр	TIN	GRID	GRID (предл.)
Исходное количество точек	69248684		
Количество точек, участвующих в формировании модели	231032	69248684	69248684
Количество сегментов сформированной модели (1м)	454 947	278 449	278 449
Объем модели, Мб	32,9	22,3	28,2
Требует предварительного разрежения	+	-	-

Предлагаемый способ формирования цифровых моделей одновременно предполагает отсутствие разрежения исходных данных,

снижает затраты на хранение информации и позволяет рассчитывать СКП высоты на любом произвольно-выбранном участке модели.

На примере сегментов с линейным размером 1 м (рисунок 1) в GRID-моделях наблюдается сходимость облака точек и модели до 0,8 м. В то же время в моделях, построенных по аппроксимации облака в сегментах, точность описания высот с учётом выбросов доходит до 0,5 м.

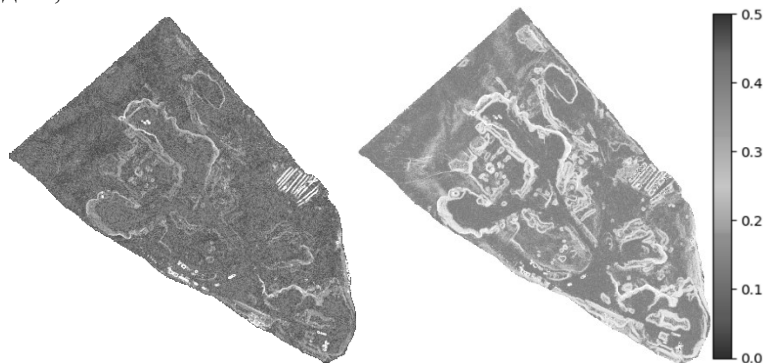


Рисунок 1 – Распределение СКП высоты в предлагаемом методе формирования GRID (слева) и классической GRID (справа)

Дифференцировав конкретные сегменты, становится заметно, что большим значениям СКП соответствуют сегменты, включающие скопления поваленного леса и автотранспорт, что закономерно можно исключить из построения цифровой модели самих горных выработок. Для оценки валидности моделей посчитаны коэффициенты детерминации R^2 для каждого сегмента (рисунок 2).

Так, на участках модели, которые меняются по высоте (границы бортов карьера и отвалов), коэффициент детерминации R^2 равен или близок к 1. Это указывает на то, что модель хорошо объясняет вариацию зависимой переменной, а именно высоты z .

Анализ моделей показывает, что предположение о линейном изменении высоты в пределах заданного сегмента справедливо: значение $R^2=0,9$ и выше. Значит, модель объясняет большую часть изменения высоты и может быть использована для прогнозирования значений высот в каждом из сегментов.

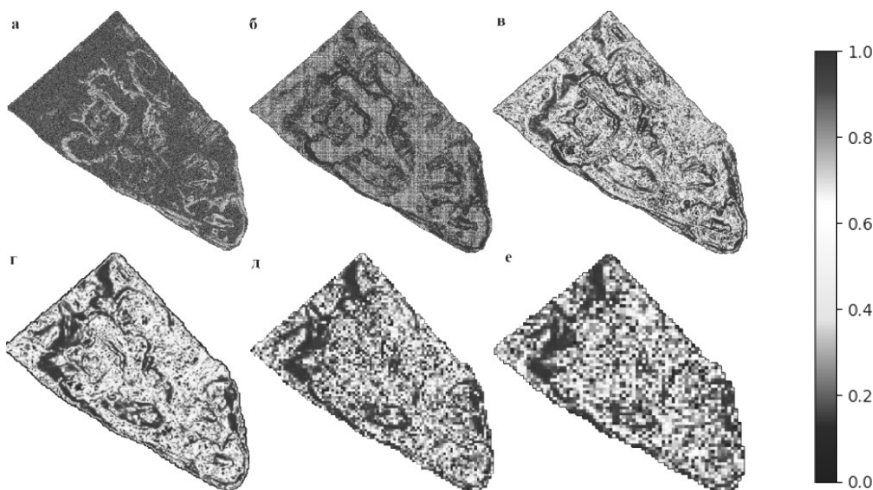


Рисунок 2 – Распределение коэффициентов детерминации для сегментов: а) 0,5 м; б) 1м; в) 2м; г) 5м; д) 7,5м; е) 10м.

Горизонтальные участки модели имеют коэффициент детерминации близкий к 0, даже если среднеквадратическое отклонение от плоскости модели близко к минимальному, поскольку на этом участке вариация зависимой переменной меняется в пределах небольшого диапазона значений независимых переменных. Такое значение коэффициента детерминации для различного размера сегментов модели вариативно: чем меньше сегмент - тем больше локализованных областей с R^2 близким к 0. Это может говорить о наличии большого количества пологих участков, совпадающих с принятой поверхностью в пределах сегмента.

Таким образом, предлагаемый способ формирования моделей становится более предпочтительным в том смысле, что может представлять данные с меньшей ошибкой в сравнении с классическими GRID, и в более компактном формате, что облегчает их использование в дальнейшем анализе.

2. Соответствие сегментированной модели исходным данным облака точек следует определять на основе геопространственного анализа взаимосвязи высот точек облака относительно вписанной в каждый сегмент плоскости

Рассмотрен ряд объектов открытых горных работ, различных

по своему генезису, расположению и геометрическим условиям. Проведено сравнение высот предлагаемого способа формирования GRID-моделей открытых горных выработок, построенных по результатам аэрофотосъемки с классическими GRID, в которых высота описывается как среднее значение множества точек, входящих в пиксель растрового изображения. Выполнен анализ результатов моделирования: рассчитаны среднеквадратические погрешности определения высоты в сегменте модели для разных размеров сегментов (рисунок 3).

Систематизировав данные, найдены вероятности появления ошибки определенных величин для каждого из размеров вовлекаемых в обработку сегментов. Также, для каждого из размеров сегментов для каждой модели посчитаны значения стандартных отклонений (σ), медианы (Me) и математического ожидания (μ) размера ошибки аппроксимации, отражённые в таблице 2.

Таблица 2 – Вычисленные статистические параметры определения высоты для каждого из размеров сегментов.

Размер сегментов	Торфяное месторождение			Склад угля			Россыпное месторождение		
	μ , м	Me , м	σ , м	μ , м	Me , м	σ , м	μ , м	Me , м	σ , м
0,5	0,02	0,00	0,06	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02
1,0	0,07	0,05	0,06	0,06	0,04	0,05	0,04	0,02	0,05
2,0	0,12	0,07	0,11	0,09	0,06	0,08	0,05	0,03	0,04
2,5	0,15	0,09	0,13	0,11	0,08	0,08	0,06	0,04	0,04
3,0	0,18	0,11	0,17	0,13	0,10	0,09	0,08	0,06	0,06
4,0	0,22	0,13	0,20	0,15	0,12	0,10	0,11	0,08	0,09
5,0	0,29	0,17	0,28	0,17	0,14	0,11	0,14	0,10	0,11
7,5	0,35	0,25	0,29	0,20	0,17	0,14	0,18	0,12	0,18
10,0	0,48	0,35	0,41	0,21	0,18	0,15	0,20	0,13	0,19

Полученные данные отражены на графиках, приведенных на рисунке 4. На горизонтальной оси отображены размеры рёбер сегментов, принятых в обработку. На вертикальной оси расположены значения среднеквадратической погрешности высоты.

По рисунку 4 можно определить линейный характер зависимости значения СКП от размера сегментов, принятых в обработку.

Высокое значение коэффициентов детерминации R^2 от 0,93 до 0,97, означает, что модели объясняют большую часть изменений высот и могут быть использованы для прогнозирования значений высот цифровой модели открытых горных выработок в соответствии с точностью, линейно изменяющейся с увеличением размера самих сегментов.

3. Выбор оптимального размера сегмента модели следует производить с учетом полученной закономерности линейного возрастания среднеквадратической погрешности модели от размера сегмента модели в соответствии с техническими (технологическими, нормативными) требованиями точности решаемой задачи.

На основании положения 2 становится возможным определить линейный характер возрастания СКП высоты от размера вовлекаемого в обработку сегмента модели.

Построив график, на котором изображена функция $\sigma(s)$ возможно вписать на основании полученных данных аппроксимирующую прямую, определяя закон изменения ошибки высоты в модели и величину коэффициентов, отвечающих за наклон этой прямой. Таким образом, для прогнозирования значений ошибок можно задать предельное значение СКП моделирования, которое на практике отвечает условию (формула 1):

$$3 * \sigma \leq f_{\text{доп}} \quad (1)$$

где σ – СКП случайной величины;

$f_{\text{доп}}$ – допуск на установленные работы.

Таблица 3 – Значения тройной СКП высоты модели для различных объектов фотограмметрических съемок

Размер сегментов, м	3σ , м		
	Торфяное месторождение	Склад угля	Россыпное месторождение
0,5	0,18	0,09	0,09
1,0	0,15	0,15	0,06
2,0	0,33	0,24	0,09
3,0	0,51	0,24	0,12

Продолжение таблицы 3

Размер сегментов, м	3σ, м		
	Торфяное месторождение	Склад угля	Россыпное месторождение
4,0	0,60	0,27	0,18
5,0	0,84	0,30	0,24
7,0	0,87	0,33	0,30
8,0	0,96	0,42	0,36
10,0	1,23	0,45	0,39

По п.568 Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых", утвержденных приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 N 505, установлено, что маркшейдерские работы должны выполняться в соответствии с проектом производства маркшейдерских работ и требованиями к производству маркшейдерских работ, установленными нормативными правовыми актами.

1 сентября 2023 года был принят приказ Федеральной службы по экологическому технологическому и атомному надзору от 19 мая 2023 г. N 186 «Об утверждении Правил осуществления маркшейдерской деятельности». В случае, когда необходимо определить положения бровок уступов, отклонение бровки на плане горных выработок допускается не более чем 1 м при случайном характере отклонений. При этом, разность между отметкой бровки, определенной по плану открытых горных выработок и рассчитанными значениями допускается не более 0,4 м. Основываясь на таблице 3, данному пункту «Правил...» удовлетворяют (таблица 4):

Таблица 4 – Значения тройной СКП высоты моделей, удовлетворяющих пункту 101 «Правил...»

Размер сегментов, м	3σ ≤ f _{дон} = 0,4 м		
	Торфяное месторождение	Склад угля	Россыпное месторождение
0,5	+	+	+
1,0	+	+	+
2,0	+	+	+

Продолжение таблицы 4

Размер сегментов, м	$3\sigma \leq f_{доп} = 0,4$ м		
	Торфяное месторождение	Склад угля	Россыпное месторождение
3,0	-	+	+
4,0	-	+	+
5,0	-	+	+
7,0	-	+	+
8,0	-	-	-
10,0	-	-	-

Если ЦМР используется для отображения рельефа на топографической карте или плане, допуск на вертикальную точность должен определяться в соответствии с требованиями ГОСТ Р 59562-2021 «Съемка аэрофототопографическая. Технические требования».

На основании линейного возрастания СКП высоты предлагаемого способа формирования модели, данному пункту ГОСТ Р 59562-2021 удовлетворяют размеры сегментов из таблицы 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится новое решение актуальной научно-производственной задачи: формирование и обоснование методики создания цифровых моделей с использованием полиномов первого порядка на основании маркшейдерских дистанционных съемок для осуществления маркшейдерского обеспечения открытых горных работ.

Основные научные и практические результаты, полученные в процессе выполнения работы, заключаются в следующем:

1. Разработан алгоритм построения цифровых моделей, основанных на разделении исходного облака точек на сегменты и вписывании в них полиномов первого порядка.
2. Природа и механизм разделения на сегменты отфильтрованного по рельефу облака точек позволяет выявлять участки, содержащие точки, ошибочно отнесенные алгоритмами фильтрации к рельефу.
3. Определена зависимость среднеквадратической погрешности высоты сегмента от его размера.
4. Дана рекомендация по высоте полёта воздушного судна в

момент проведения аэрофотосъемочных работ.

5. Написана программа для ЭВМ, в которой создаётся база данных с параметрами сегментов, а также рассчитываются их среднеквадратические погрешности.

В перспективе дальнейших разработок темы диссертационного исследования стоит отметить применение статистических данных фотограмметрических съемок к решению задач геомеханики: участок между закреплёнными на местности реперами для проведения геомеханических наблюдений сегментировать на подобласти. Исследование геомеханических свойств сегментов с использованием координат их центров тяжести позволяет определить изменения положения аппроксимирующих плоскостей во времени. Анализ изменений вектора нормали также позволяет вычислить дифференциальные характеристики смещения в данном сегменте.

Таким образом, благодаря предложенному методу формирования GRID-моделей, облака точек, полученные с фотограмметрического оборудования, могут быть использованы в геомеханике.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Сухов, А.К.** Изучение качества фотограмметрических моделей, получаемых в условиях слабой освещенности / **А.К. Сухов**, М.Г. Выстрчил, В.Н. Гусев, А.А. Блищенко, А.В. Данько // Известия Уральского государственного горного университета. – 2020. – № 3 (59). – С. 140-148. – DOI: 10.21440/2307-2091-2020-3-140-148.

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

2. Vystrchil, M.G. Quality analysis of digital photogrammetric models obtained in low light conditions/ M.G. Vystrchil, **A.K. Sukhov**, S.U. Novozhenin, A.V. Popov, S.A. Guba // Journal of Physics Conf. Series - November 2020 - 1661(1):012089. – DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012089.

3. Vystrchil, M.G. Quality analysis of voxel models obtained with remote sensing / M.G. Vystrchil, **A.K. Sukhov**, A.U. Rybakov, M.N. Chura, G.I. Artemova // E3S Web Conf. - The First International Interdis-

ciplinary Scientific and Practical Conference Man in the Arctic – April 2023 - Volume 378 – DOI: 10.1051/e3sconf/202337804002.

4. Выстрчил, М.Г. Методика определения погрешностей сегментированных GRID моделей открытых горных выработок, построенных по результатам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна/ М.Г. Выстрчил, В.Н. Гусев, **А.К. Сухов** // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С.562-570. EDN: SZOFVD.

Публикации в прочих изданиях:

5. Блищенко, А.А. Оценка точности измерения складов на горных объектах с помощью беспилотной технологии / А.А. Блищенко, А.К. Лобынцев, **А.К. Сухов** // Маркшейдерский вестник. – 2020. № 4 (137). – с. 23-27.

6. Выстрчил, М.Г. Повышение качества фотограмметрической съемки на близких дистанциях / М.Г. Выстрчил, **А.К. Сухов**, А.В. Попов, С.А. Губа // Сборник тезисов XVI международного форум-конкурса “АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ” под эгидой ЮНЕСКО 17-19 июня 2020 г. – С.363.

7. Выстрчил, М.Г. Подходы к упрощенному представлению трехмерных данных для решения задач горного дела и геомеханики / М.Г. Выстрчил, В.Н. Гусев, **А.К. Сухов** // Сборник тезисов IV международной научно-практической конференции «ГОРНОЕ ДЕЛО В XXI ВЕКЕ: ТЕХНОЛОГИИ, НАУКА, ОБРАЗОВАНИЕ». – Санкт-Петербургский горный университет. – 26-28 октября 2021 г. – С.43.

Свидетельство:

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663738. Программа для построения аппроксимированных плоскостей и расчета средней квадратической погрешности по данным дистанционного зондирования. Авторы: Выстрчил М.Г., Гусев В.Н., **Сухов А.К.** Опубликовано 05.07.2023 Бюл. № 7. Заявитель СПГУ.

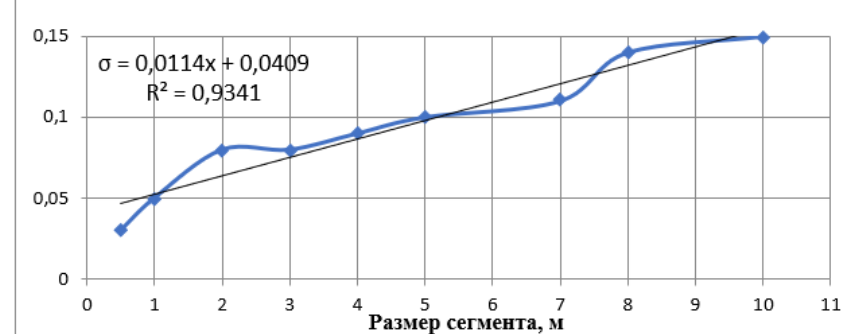
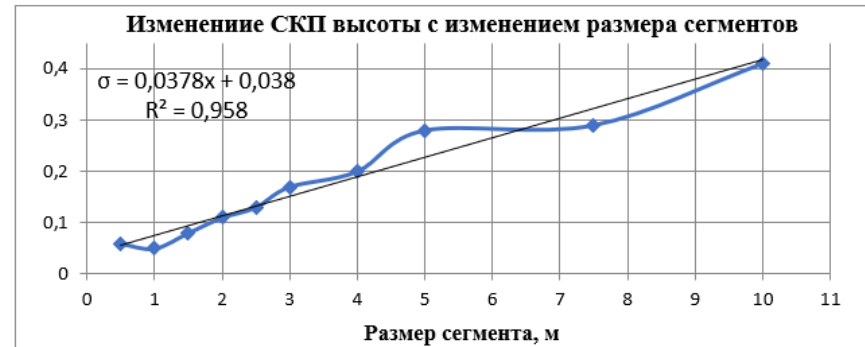
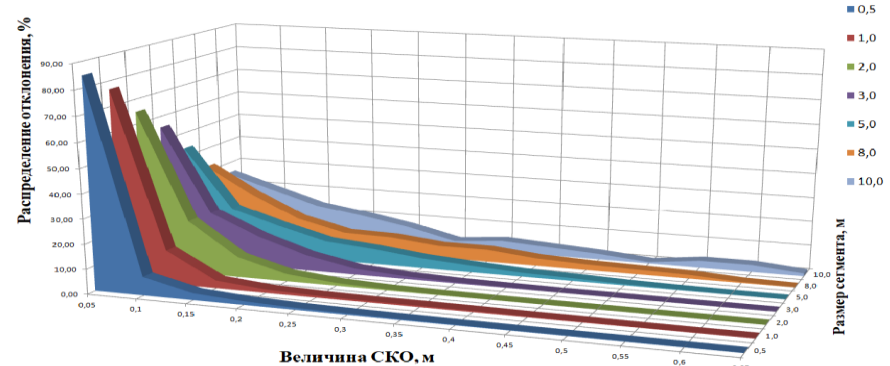
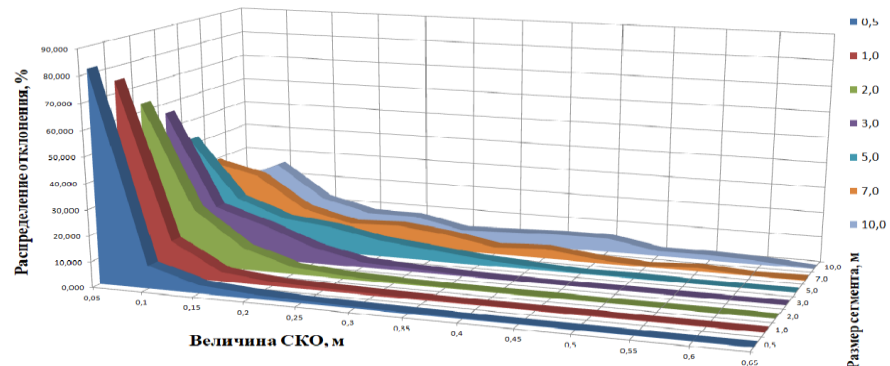
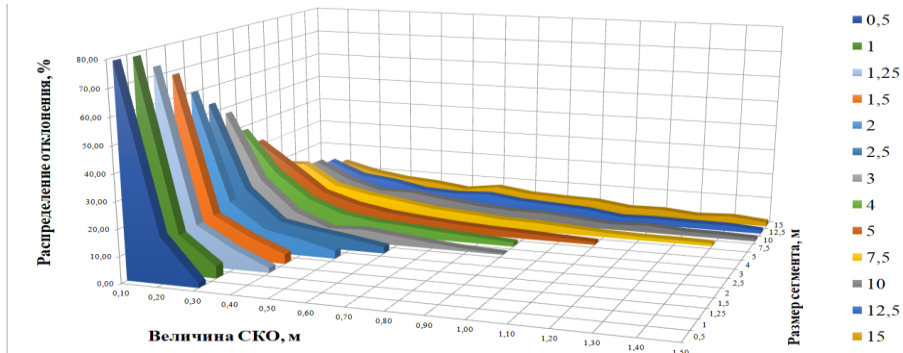


Рисунок 3 – СКО высоты GRID-моделей с разным размером сегментов: а) торфяного карьера; б) угольного склада; в) месторождения россыпного золота

Рисунок 4 – Зависимость среднеквадратической погрешности высоты результатов моделирования от размера обрабатываемых сегментов

