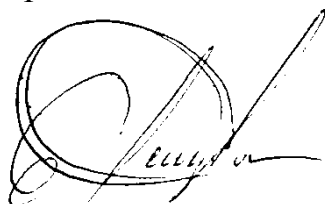


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Гусев В.Н.

Санкт-Петербург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| ГЛАВА 1 СПОСОБЫ СБОРА И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ СЪЕМКАХ | 11 |
| 1.1 Обзор общих методов сбора данных при фотограмметрической съемке | 13 |
| 1.2 Методология производства наблюдений | 16 |
| 1.3 Интерпретация результатов съемок | 17 |
| 1.4 Способы контроля точности дистанционных съемок..... | 20 |
| 1.5 Формирование цифровых моделей рельефа | 22 |
| 1.5.1 Триангуляция Делоне | 23 |
| 1.5.2 GRID-модели..... | 24 |
| 1.5.3 Идея воксельных моделей..... | 27 |
| 1.6 Формулирование проблемы формирования цифровых моделей открытых горных выработок..... | 29 |
| Разрежение облака точек | 31 |
| 1.7 Обзор нормативно-технических требований к горной графической документации..... | 34 |
| 1.8 Выводы по главе 1..... | 36 |
| ГЛАВА 2 ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК | 38 |
| 2.1 Идея деления облака на сегменты при дистанционной съемке | 38 |
| 2.2 Определение параметров аппроксимирующей плоскости внутри дискретного сегмента..... | 41 |
| 2.3 Способ оценки точности моделей..... | 44 |
| 2.4 Описание методов работы по предлагаемой методике GRID моделей..... | 47 |
| 2.5 Учёт разнородной информации при создании цифровых моделей местности | 48 |
| 2.6 Выводы по главе 2..... | 50 |
| ГЛАВА 3 АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ GRID-МОДЕЛЕЙ | 53 |
| 3.1 Описание процесса сбора первичных данных..... | 53 |
| 3.2 Применение предлагаемого метода формирования GRID-моделей..... | 55 |
| 3.3 Анализ предлагаемого метода формирования GRID-моделей для различных объектов фотограмметрической съемки | 62 |
| 3.4 Анализ распределения величин среднеквадратических погрешностей высот при аппроксимации полиномами первого порядка..... | 65 |
| 3.4.1 Проверка гипотезы о нормальном распределении..... | 67 |
| 3.4.2 Проверка с помощью теста Колмогорова-Смирнова | 69 |
| 3.5 Выводы по главе 3..... | 71 |
| ГЛАВА 4 ПЕРСПЕКТИВЫ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ GRID | 74 |
| 4.1 Разница предлагаемой методики формирования GRID и существующих подходов к созданию цифровых моделей | 74 |

| | |
|--|-----|
| 4.2 Анализ алгоритмов фильтрации с помощью предлагаемой методики формирования GRID моделей..... | 79 |
| 4.4 Расчёт высоты полета судна по прогнозируемой ошибке модели к исходным данным..... | 82 |
| 4.5 Принципиальная возможность использования предлагаемого метода формирования цифровых моделей к результатам съемки лазерными сканерами.. | 84 |
| 4.6 Соответствие формируемых моделей нормативным и техническим допускам..... | 86 |
| 4.7 Выводы по главе 4..... | 91 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 94 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 96 |
| СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА | 115 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А Распределение СКП исходных данных в зависимости от линейного размера сегмента | 118 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б Распределение СКП высот модели в зависимости от линейного размера сегмента | 120 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В Количество пикселей растрового изображения в сегменте | 123 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт о внедрении результатов кандидатской диссертации на предприятие | 125 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ | 127 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Фотограмметрическая съемка в маркшейдерском деле применяется для 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 неизбирательного разряжения с целью снизить количество обрабатываемой информации. Затем, формируемые модели проходят этап восполнения 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., Ступин В.П., 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 при формировании цифровых моделей открытых горных выработок.

Таким образом, тему формирования цифровых моделей открытых горных выработок, построенных 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., Приложение 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 Международная научно-практическая конференция «Российская наука в современном мире» (г. Москва, 2020 г.);
- Всероссийская конференция-форум «Актуальные проблемы недропользования 2021» (г. Санкт-Петербург, 2021г.);
- Конференция «Горное дело в XXI веке: инновации, наука, образование», (г. Санкт-Петербург, 2021г.);
- Первая междисциплинарная научно-практическая конференция «Человек в Арктике» (г. Санкт-Петербург, 2021г.);
- Международный этап научной конференции-форума «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2022г.).

Личный вклад автора заключается:

- в участии при формулировании и постановки 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, анализе и обобщении полученных экспериментальных результатов;
- написании и оформлении научных статей, апробации основных положений диссертационной работы на научных конференциях.

Публикации

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 7 печатных работах (пункты списка литературы № 2, 3, 5, 6, 9, 137, 138), 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, в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство на программу для ЭВМ (Приложение Д). 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 рисунка и 5 приложений.

Благодарности

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 «Карьерпроект», в частности главного маркшейдера А.А. Блищенко за помощь в организации и выполнении опытов на горных объектах.

ГЛАВА 1 СПОСОБЫ СБОРА И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ СЪЕМКАХ

В настоящее время открытыми способами добычи полезных ископаемых добывается большая часть всех полезных ископаемых России. Такой метод добычи популярен из-за своих преимуществ по сравнению с подземной добычей полезных ископаемых [1].

С развитием технического прогресса увеличиваются темпы роста горных предприятий, скорость процессов горных работ. Также закономерно возрастают требования и к маркшейдерскому обеспечению. Задачи, предъявляемые специалистам, сосредоточены на увеличении, главным образом, производительности и точности съемок [116].

Главными задачами маркшейдерских служб на открытых горных работах являются:

- обеспечение безопасности на карьере: контроль за выполнением правил и норм безопасности, предотвращение чрезвычайных ситуаций и аварий;
- контроль за горно-геологическими работами: обеспечение точности разработки месторождений, учет запасов полезных ископаемых, соблюдение технологических процессов [97];
- геодезические изыскания: проведение замеров и расчетов для определения геометрических параметров карьера;
- организация и ведение документации: составление отчетов, картографических материалов, учет технической документации [39];
- следствие и анализ аварийных ситуаций: выявление причин происшествий, разработка мер по предотвращению повторения.

Маркшейдеры составляют графические планы, контролируют выполнение работ в соответствии с проектами и правилами безопасности, ведут перманентный контроль за извлечением полезного ископаемого, наблюдают за сдвигами и деформациями горных пород, участвуют в планировании развития горных работ и учете запасов полезных ископаемых.

Результат выполняемой маркшейдерами съемки, а именно захват натуральных данных и последующее перенесение их на карту (план, схему) представляет собой графическое отображение данных координат объекта съемки.

Сам захват данных представляет собой избирательную съемку земной поверхности. Избирательность обуславливается невозможностью получения информации о сплошной поверхности объекта и отсутствием автоматизации процесса.

Исторически, подобные работы были трудозатратными, объемными по времени и большими по количеству вовлекаемых в процесс работы людей. Сами съемки выполнялись аналоговыми угломерными инструментами и приборами, угломерами, кипрегелями, затем теодолитами и тахеометрами [97]. При этом отдельно снимались горизонтальные и вертикальные углы, после чего выполнялось измерение расстояний между прибором и отдельными направлениями с помощью простейших измерительных инструментов, мерной лентой, а далее рулеткой.

В связи с этим, чтобы минимизировать трудозатратность, избирательные съемки выполнялись с соблюдением логики, когда захваченная глазом исполнителя наблюдений точка представляла из себя, как правило, лишь характерный структурный элемент какого-либо крупного объекта. Геометрическая информация между характерными точками восполнялась методами интерполяции с целью наполнения данных информацией о пространстве, не отснятым оборудованием.

В настоящее время среди маркшейдерских съемок актуально использование избирательного подхода к сбору информации для тех видов съемок, где исполнитель собирает дискретный набор данных: фиксирует информацию о каждой точке отдельным измерением. Например, съемка с электронными тахеометрами [24, 27, 98] или ГНСС-оборудованием [26, 34, 122, 129, 146] при наблюдении за горными выработками.

В таких видах съемок данные также собираются с учётом человеческого фактора: исполнитель сам решает, какая точка на его взгляд является характерной

в условиях открытых горных работ. Плотность съемки и выбор ключевых точек для последующего создания горно-графической документации, расчёту на их основе объемов горных работ зависит индивидуально от маркшейдера, выполняющего съемку.

Задача представления ключевой информации об объекте съемки с необходимой точностью остаётся: необходимо сохранить важные характеристики объекта с должной степенью упрощения, минимизирующей влияние подобной итерации на качество результата. Вместе с этим, степень упрощения результатов съемки должна существенно снижать нагрузку на вычислительные ресурсы компьютера, что необходимо для целей оперативного расчёта объемов горных работ, а также долговременного хранения информации.

Однако, с изобретением и повсеместным внедрением средств автоматизированного сбора данных, к которым относится фотограмметрическая съемка с беспилотными летательными аппаратами и лазерные сканирующие системы [28], прежний избирательный подход в работе с данными требует пересмотра [63]. При этом, результаты съемки характеризуются большим объемом дискретной информации, обеспечивающей избыточную наполняемость данными результатов измерений

1.1 Обзор общих методов сбора данных при фотограмметрической съемке

Фотограмметрическая съемка в маркшейдерском деле применяется для 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, а также в случаях, когда непосредственный контакт с объектом съемки отсутствует или труднодостижим (например, объект находится на заболоченной территории).

Такие средства предполагают массовый неизбирательный захват территории. Причём, сама съемка возможна как с наземных систем (специальные фотоаппараты, установленные на штативах), так и с помощью воздушного судна (самолёты, дроны) [17, 40, 92, 130].

Технология, которая в настоящее время стремительно развивается, связана с использованием цифровой фотограмметрии на беспилотных летательных аппаратах (БЛА). Фотограмметрия - наука, изучающая способы определения форм, размеров, пространственного положения и степени изменения во времени различных физических объектов по результатам измерений их фотографических изображений [23, 116, 140]. То есть, она использует серию фотографий объекта, которые затем собираются в единый набор данных, из которого получаются трёхмерные модели, а по ним создаются карты и планы объектов.

При этом, съёмка с использованием БЛА требует проведения подготовительных процедур: планирования миссии полёта [28, 144], а также установки и измерения контрольных точек [23, 56] - опознаков (рисунок 1.1) в полевых условиях с целью привязки и контроля результатов измерений.



Рисунок 1.1 - Опознак при фотограмметрической съёмке с квадрокоптером

Специализированные БЛА оснащены навигационными устройствами ГНСС и ИНС (рисунок 1.2), обеспечивающими позиционирование и ориентацию в пространстве, и, таким образом, эти системы обеспечивают режим автоматического полета (без участия оператора в процессе выполнения залёта) и сбор изображений.

Фотограмметрическая съёмка с помощью беспилотных летательных аппаратов (БЛА) имеет ряд преимуществ и недостатков в маркшейдерском деле.



Рисунок 1.2 - Геодезический квадрокоптер DJI 4 PRO с установленным GPS-приёмником

Основные преимущества [26, 116] :

1. БЛА могут достигать труднодоступных и опасных мест, где маркшейдерам сложно и даже невозможно получить прямой контакт с объектом;
2. возможность получения данных в высоком разрешении и в различных спектральных диапазонах, что позволяет проводить детальную интерпретацию полученных изображений;
3. БЛА типа «жесткое крыло» (на примере GeoScan 701) могут совершать длинные полеты до нескольких часов и охватывать удалённые от оператора территории, что позволяет проводить мониторинг изменений в рельефе местности на больших участках.

Основные недостатки [28, 117]:

1. ограничения в условиях погоды и освещения, которые могут повлиять на качество полученных данных;
2. ограничения в управлении БЛА, ограничение времени полета и дальности полета для квадрокоптеров и дронов;
3. проблемы с точностью определения координат, особенно в условиях низкой видимости, где съемка может стать невозможной [137];
4. проблемы с обработкой и анализом больших объемов данных, полученных при помощи БЛА.

1.2 Методология производства наблюдений

Для определения правильной методики проведения исследования первым делом необходимо проанализировать практический опыт в использовании цифровых моделей местности, получаемых по результатам дистанционных съемок.

Методология производства натуральных маркшейдерских измерений унифицирована для вида используемого оборудования. К примеру, существует устоявшаяся методика проведения фотограмметрической съемки с БЛА, рекомендованная GeoScan, фирмой-производителем беспилотного оборудования.

Последовательность выполнения работ при съемке следует тщательно спланировать заранее [27, 28, 144]. При планировании съемки рекомендуется следовать приведенным ниже правилам:

1. избыток снимков предпочтительнее, чем их недостаточное количество. Количество "слепых зон" должно быть сведено к минимуму;

2. в случае аэрофотосъемки рекомендованное перекрытие кадров по ходу движения БЛА (продольное перекрытие) и перекрытие между линиями съемки (поперечное перекрытие) должно составлять 80% и 60% соответственно [1, 2];

3. необходимо эффективно использовать пространство кадра: снимаемый объект должен занимать наибольшую часть кадра. В некоторых случаях оптимальна портретная ориентация кадра;

4. допускается съемка объекта по частям, при условии достаточного перекрытия кадров. Не обязательно помещать объект целиком в каждый кадр;

5. применение хорошего освещения повысит качество результата съемки. При этом источники освещения рекомендуется располагать за пределами кадра, не использовать вспышку и избегать бликов [116, 117];

6. для выполнения измерений на модели необходимо перед съемкой расположить на поверхности объекта по крайней мере два маркера и измерить расстояние между ними;

7. в случае аэросъемки: для наиболее точной географической привязки модели, необходимо равномерно распределить опорные точки (GCP - ground control points) на объекте съемки.

Создание модели в Agisoft Metashape и ее географическая привязка возможна как с использованием опорных точек, так и без. Однако их использование повысит точность геометрии будущей модели.

1.3 Интерпретация результатов съемок

В результате маркшейдерской съемки с применением технологий дискретного сбора данных образуется каталог координат точек. Данный каталог возможно рассматривать в качестве основы для создания и пополнения горнографической документации, основы для расчёта и планирования производства горных работ. Как отмечено выше, подобная дискретная информация использует алгоритмы интерполяции для восполнения данных [90, 148], принятых исполнителем съемок несущественными при выполнении работ (рисунок 1.3). К таким алгоритмам в классическом виде можно отнести интерполяцию «на глаз» и числовую интерполяцию.

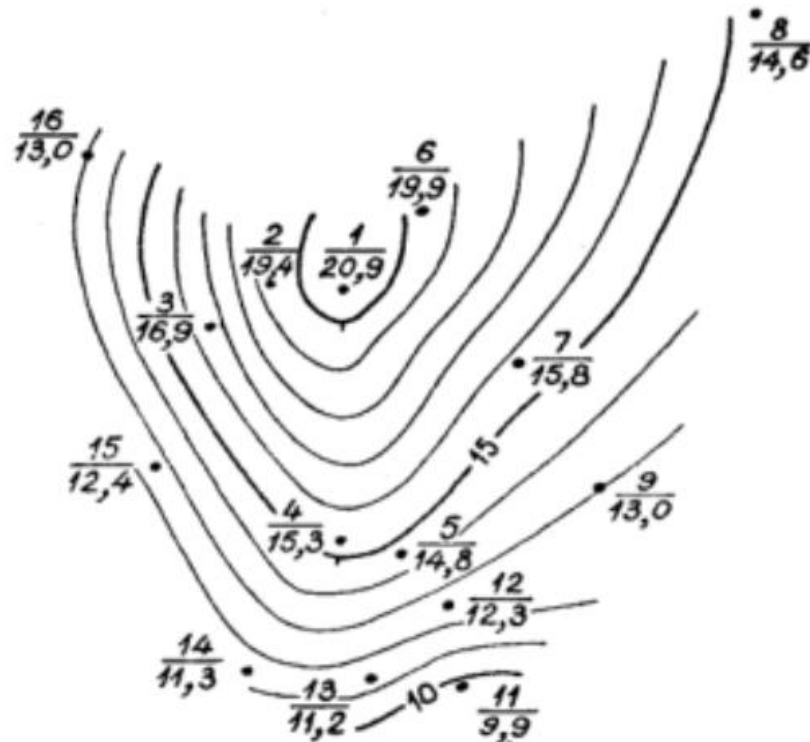


Рисунок 1.3 – Модель рельефа на основании тахеометрической съемки

По результатам работы данных алгоритмов строится модель объекта съемки, к которым относятся карты и планы местности, модели рельефа с отображением горизонталей и структурных линий [146], а также разрезы на произвольно-выбранных участках местности [52, 94], картограммы горных работ и пр.

После камеральной обработки маркшейдерской съемки с применением автоматизированных технологий дистанционного сбора данных образуется файл с набором координат точек - облаком точек (рисунок 1.4) [111].

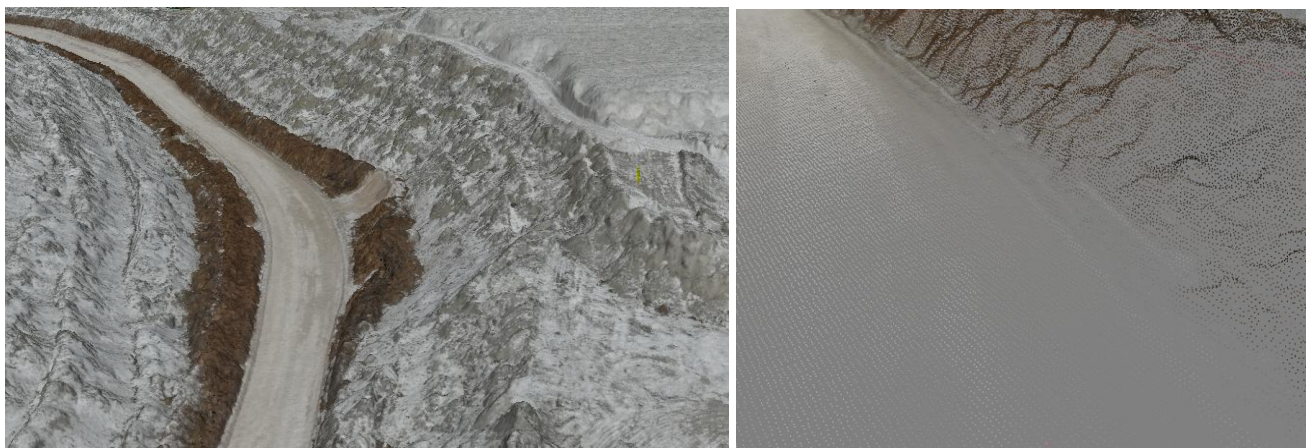


Рисунок 1.4 - Облако точек, полученное в результате съемки с квадрокоптером

По результатам подобной обработки составляется файл плотного облака точек, имеющий следующий вид:

1344122.53 489022.41 63.25 166 161 125 0.112301 -0.139574 0.983823

Здесь, первые три столбца-координаты точек X , Y и Z в заданной пользователем системе координат. Следующие три столбца - параметры цвета, преобразованные в RGB 8- или 16-бит. Последние три столбца показывают нормали для данной точки плотного облака.

Такой формат исходных данных является выходным для большинства видов дистанционного зондирования, будь то фотограмметрическая съемка с помощью БЛА, или же съемка лазерными сканирующими системами.

При этом количество дешифрованных точек в ходе камеральной обработки результатов фотограмметрической съемки много выше, нежели у других видов дистанционных съемок. Являясь самым приближенным к

фотограмметрии из видов дистанционного зондирования по объему получаемой информации [20], лазерное сканирование не обеспечивает ту же подробность об объекте съемки в получаемых данных: чем дальше объект съемки от прибора, выполняющего измерения – тем менее детальным будет информация о нём.

Разница при этом заключается в самой методике измерений. Фотограмметрия с БЛА использует наборы снимков, по которым составляется облако точек [11]. Снимки при этом полностью покрывают объект съемки, а программы по дешифрированию данных стараются найти максимально-возможное число соответствий между фотографиями (рисунок 1.5) [27, 83].

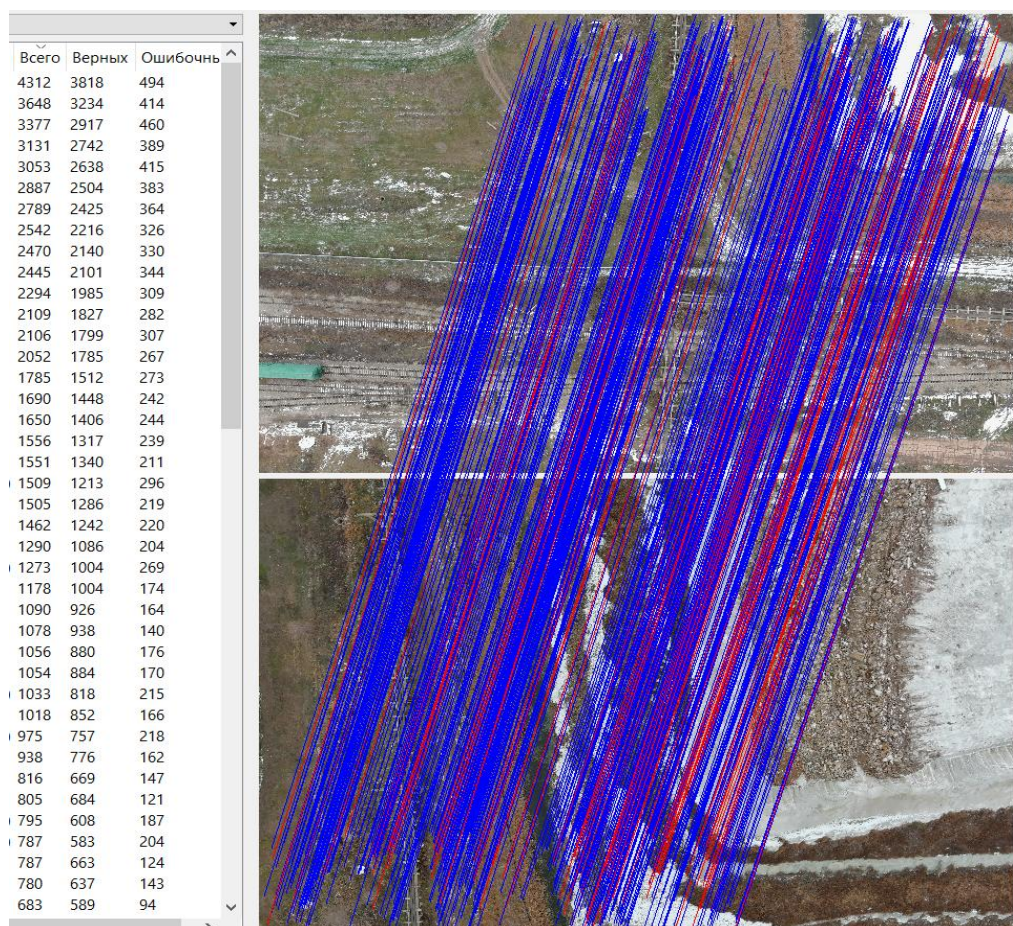


Рисунок 1.5 - Принцип построения облака точек фотограмметрическим способом на примере связующих точек в программе Agisoft Metashape

Лазерные сканирующие системы используют в системе дальномеры [111], импульсный [48] и фазовый [36], а также метод прямой угловой засечки [5].

Лазерные сканеры оснащены оптико-механическим блоком развертки. Он служит для изменения направления лазерного луча [5].

Блок развертки включает:

- сервопривод, который необходим для разворота в горизонтальной плоскости;

- зеркало или призму, производящую отклонение лазерного луча в вертикальной плоскости [5].

Рисунок, который при этом создается, представляет собой следы лазерных отражений радиально-выходящих из прибора лучей (рисунки 1.6, 1.7)



Рисунок 1.6 – Платформа NVIDIA Isaac с установленным лазерным сканером, технологическая конференция Nvidia, 2018

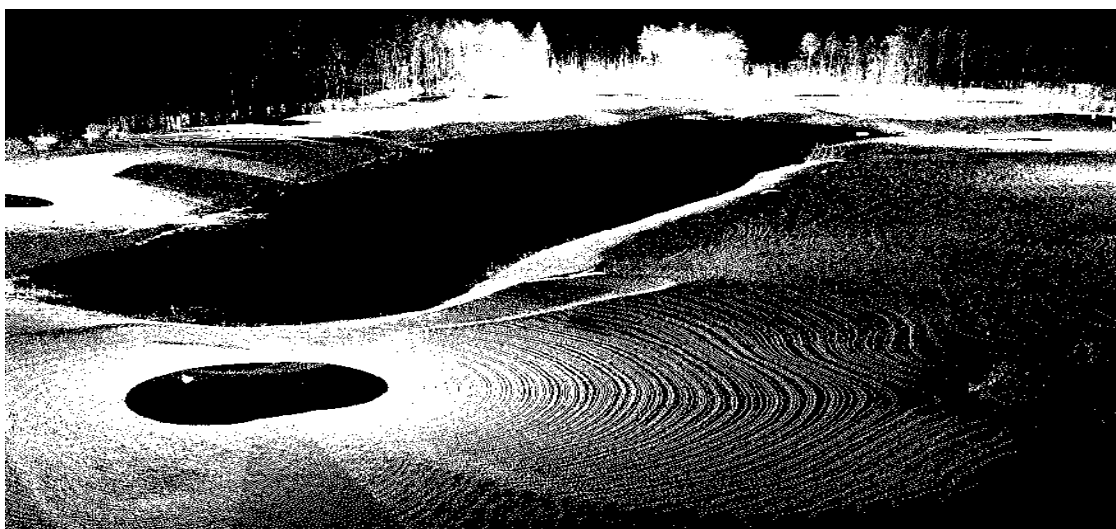


Рисунок 1.7 – Трехмерное облако точек, полученное с помощью ЛСС

1.4 Способы контроля точности дистанционных съемок

Как отмечено ранее, результатом маркшейдерской съемки с использованием дистанционной технологии является хаотически-распределенное множество точек, облако точек, впоследствии формирующих цифровую модель местности.

В связи с большой популярностью применения дистанционных технологий, увеличились и исследования по проверке точности результатов самих

дистанционных измерений [53, 56, 72, 116, 120, 129], а также точности цифровых моделей местности [21, 28, 38, 56, 83, 96, 116, 117, 132, 135].

Дистанционная съёмка в маркшейдерском деле подразумевает использование различных цифровых устройств, таких как лазерные дальномеры или цифровые фотоаппараты, установленные на беспилотных летательных аппаратах, которые позволяют получать данные о расстояниях, углах и других параметрах природных объектов и искусственных сооружений.

Оценка фактической точности произведенных съемок на данный момент контролируется двумя способами.

Первый заключается в сравнении с другими видами съемок: с тахеометрической, со съемкой наземными лазерными сканерами (для фотограмметрических работ) [111], спутниковым оборудованием [15, 68] и др.

Второй способ оценки точности строится на вычислении положения дискретной точки, соответствующей заранее закоординированным маркерам (маркам, опознакам, рисунок 1.8), расставленным по поверхности съемки — GCP (Ground Control Points) в английской литературе [32, 65, 69]. Их положение зависит от конфигурации местности [107], а также от размеров картографируемой территории.

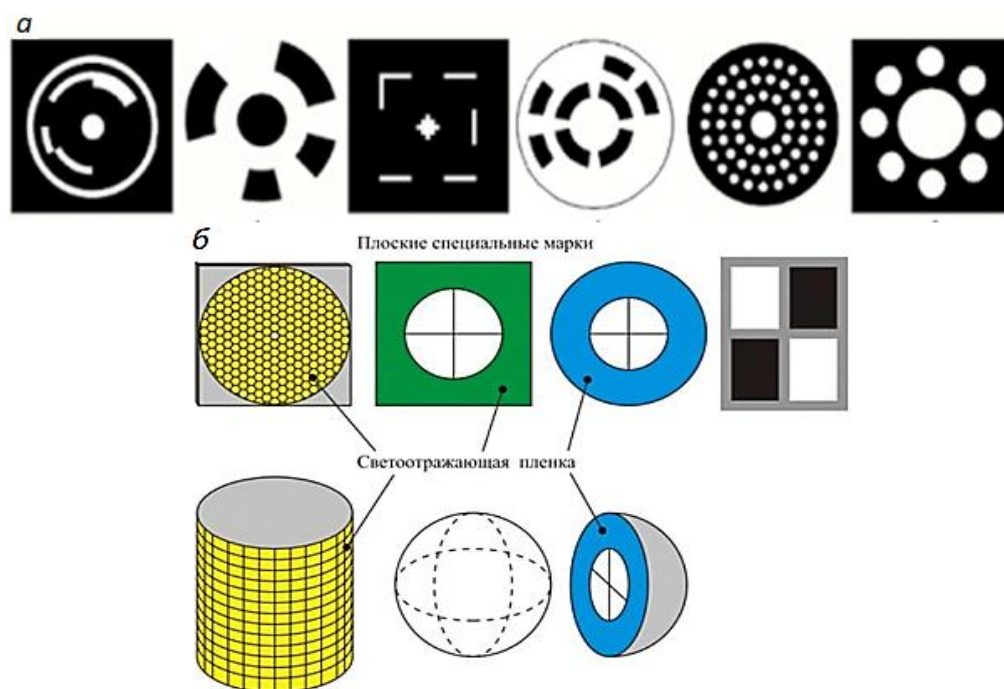


Рисунок 1.8 – а) виды марок при фотограмметрической съемке
б) виды марок при съемке лидаром

Некоторые результаты исследований [116, 121] показывают, что оптимальное количество составляет порядка 10 контрольных точек для небольших участков (до 10 га) и около 20 точек для более крупных участков (до 300 га) при фотограмметрической обработке.

При съемке дистанционными методами измерений, количество марок принимается не только для контроля снимаемых данных, но и для ориентации полученных данных, масштабирования [32, 38, 116, 121] и соединения облаков точек одного объекта, полученных с разных точек съемки.

1.5 Формирование цифровых моделей рельефа

На основании облаков точек формируются цифровые модели объекта съемки, которые позволяют получить сведения о распределении высоты местности и некоторых семантических характеристиках объекта в любой произвольной точке модели [13]. В маркшейдерском деле и геодезии их называют цифровые модели рельефа (ЦМР) [70, 106]. ЦМР обычно используются для выполнения таких задач, как планирование горных работ и проектирования дорог, различных этапов при строительстве горных предприятий, мониторинга изменений рельефа местности, оценки устойчивости бортов карьеров и отвалов и многих других [15, 42, 81, 106, 113, 131].

Исходя из этого требования, цифровые модели должны быть непрерывными с целью получить необходимую информацию во всех произвольно-выбранных дискретных участках модели. Данное свойство в настоящий момент обеспечивается с помощью восполнения информации о пространстве, не отснятом оборудованием, методами интерполяции или аппроксимации [90, 147].

Проблема представления трехмерных данных заключается в снижении сложности 3D-модели при сохранении ее существенных особенностей, основных характеристик исходного объекта.

В применяемых в маркшейдерской практике моделях данные отображаются и используются в виде сетки неправильных треугольников [24, 35, 123], регулярной сетки высот [76, 85, 118], изолиний [14, 61, 80, 134] и системы профилей [16, 87, 93].

Стоит отметить, что сетки неправильных треугольников, основанных на триангуляции Делоне, а также регулярная сеть высот не являются принятыми видами хранения и отображения информации в маркшейдерской горнографической документации. В свою очередь, они служат как основа для создания карт, планов и разрезов, обязательных для представления органам, регулирующим деятельность горных предприятий, и в частности, маркшейдерских служб.

1.5.1 Триангуляция Делоне

Наиболее часто используемый подход в моделировании основан на триангуляции Делоне [38, 125], названной в честь Бориса Николаевича Делоне, российского математика. Аналогичное название такого вида моделей – **TIN**- (с англ. «нерегулярная треугольная сеть» - Triangulated Irregular Network).

Для восполнения в модели пропущенной информации о распределении высоты, соединяются три смежные точки жёсткими ребрами [127]. На ребрах полигонов для каждой точки строится локальный полином первой степени, и посредством триангуляции эти локальные полиномы «склеиваются» в одну неразрывную поверхность [62, 115]. При этом должно выполняться условие Делоне – внутри окружности, описанной вокруг любого построенного треугольника, не должна попадать ни одна из заданных точек триангуляции (рисунок 1.9) [10].

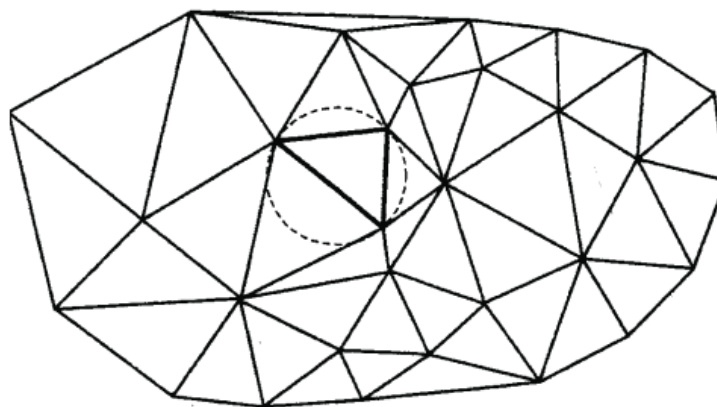


Рисунок 1.9 - Условие триангуляции Делоне [10]

В TIN-моделях поверхности представляются набором плоскостей, заключенных в треугольниках между смежными вершинами, основанием для

которых являются точки облака. Поскольку поверхность каждого треугольника задается высотами трех его вершин, применение треугольных полигонов обеспечивает каждому участку мозаичной поверхности точное прилегание к смежным участкам. Это позволяет обеспечивать непрерывность модели при нерегулярном расположении точек облака.

Одной из важнейших операций, выполняемых при построении триангуляции, является проверка условия Делоне для заданных пар треугольников. На основе определения триангуляции Делоне на практике обычно используют несколько способов проверки [10]:

1. через уравнение описанной окружности.
2. суммы противолежащих углов.

Такие проверки позволяют достичь наиболее подробного описания модели и проверить адекватность построений. Последнее проверяется итеративным алгоритмом, сложнейшей частью которого является перестроение цепочки связанных треугольников в случае, когда составленный этим методом полином не удовлетворяет условию Делоне.

В связи с этим, большая часть времени по формированию триангуляционной модели затрачивается именно на соответствие построенных треугольников условию Делоне, переформированию и реконструкцию результирующей модели.

1.5.2 GRID-модели

GRID («сетка» – в переводе с английского) – цифровая модель рельефа, которая представляет регулярную матрицу значений высот, полученную путем интерполяции первичных данных [151]. Фактически это сеть высот, размеры которой задаются согласно требованиям точности исследований [13]. GRID – геореляционная модель, сочетающая в себе растровую структуру (плоское цифровое изображение местности, цифровой план) и значение атрибута высоты, хранимой в каждом пикселе цифрового изображения (рисунок 1.10) [89, 128].

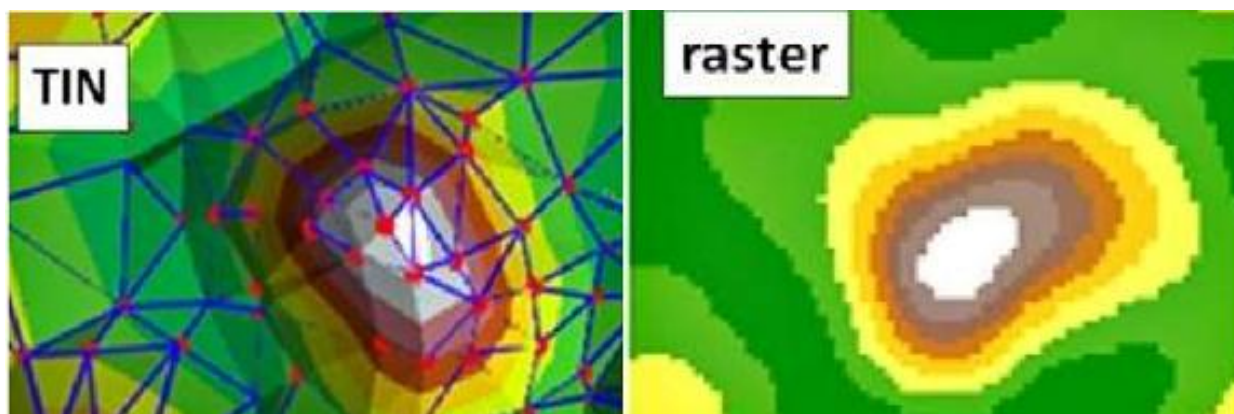


Рисунок 1.10 - Отличие TIN и GRID для результатов съемки

На всем участке пикселя значение высоты считается постоянным, а значит, точность определения высоты напрямую зависит от разрешения GRID, то есть от отношения линейного размера пикселя к линейному размеру участка земной поверхности, ему соответствующего. GRID-модели в маркшейдерском деле используются для создания цифровых карт высот, оценки геометрических параметров поверхности земли и в геоинформационных системах (ГИС) [29, 41, 46, 98, 139, 141].

GRID-модель представляет собой матрицу значений различных семантических свойств рассматриваемого объекта моделирования, где каждый пиксель имеет свое значение. То есть, этот вид моделей может использоваться не только для представления высотной информации, но и для других типов геопространственных данных, таких как температура в той или иной точке модели, влажность, давление и так далее [13, 59, 50, 75, 141, 148].

При создании регулярной сети очень важно учитывать шаг сетки, что определяет её пространственное разрешение [20]. В GRID чем меньше выбранный шаг, тем точнее цифровая модель рельефа, но тем больше количество узлов сетки. Следовательно, требуется больше времени на расчет ЦМР и больше места на диске для хранения такого рода информации.

Преимуществом GRID-моделей является возможность оперативного определения координат любой точки земной поверхности. Кроме того, GRID могут быть созданы на основе данных, полученных с помощью БЛА,

спутниковых снимков и других современных технологий, что обеспечивает высокую информативность результатам моделирования [70].

Тем не менее, GRID имеют некоторые ограничения в своих возможностях по сравнению с другими методами моделирования, которые делают его менее предпочтительным в некоторых случаях:

1. Такие типы моделей могут представлять поверхность земли, но в таких моделях отсутствует дифференциация изменения высоты в пикселе растрового изображения, наименьшей ячейки подобной модели;

2. GRID ограничены в своей разрешающей способности. Разрешение ЦМР определяется размером ячеек моделирования, а именно пикселей растрового изображения. Чем меньше размер ячеек, тем более детализированная модель получается в результате обработки. Вместе с этим, также увеличивается и объем данных и требования к вычислительной мощности для обработки и анализа [20];

Являясь моделями, чьи плоскости ориентированы параллельно плоскости X-Y, GRID не может представлять с достаточной точностью для ряда целевых задач объекты с неоднородными структурами, такие как неровные поверхности открытых горных работ [116].

Информацию о распределении высоты между смежными ячейками получают путём прямой интерполяции разности высот центров смежных пикселей.

Вертикальная точность GRID-моделей зависит от ряда факторов, включающих как точность исходных данных, методы обработки, программное обеспечение, так и выходное разрешение модели при её создании [14]. Обычно, вертикальная точность GRID-моделей измеряется метрами, и может варьироваться от первых метров для высококачественных моделей, до десятков метров для менее точных моделей [73, 84, 114]. Однако, для высокоточных GRID-моделей, полученных, например, с помощью лазерного сканирования, вертикальная точность может быть на уровне дециметра, а иногда и первых сантиметров [21].

1.5.3 Идея воксельных моделей

Альтернативным типом представления графической информации является объемная тесселяция (рисунок 1.11), использующая, например, воксели (с англ. voxel – volume element) [11].

Воксельная модель представляет собой трехмерную сетку, состоящую из объемных элементов данных, называемых вокселями. Каждый воксель имеет координаты центров тяжести и может содержать информацию о физических свойствах объекта или местности в данной точке.

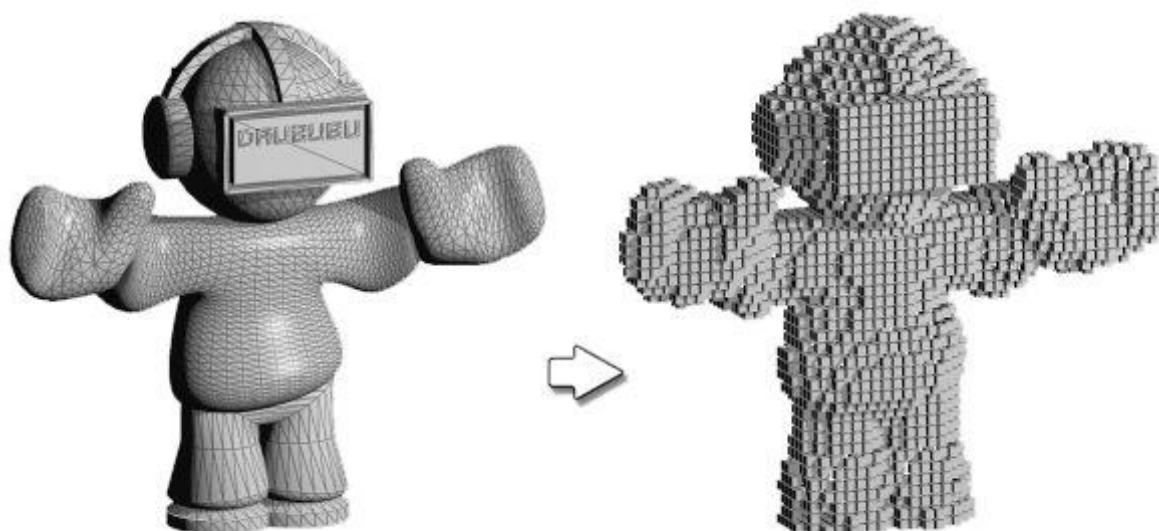


Рисунок 1.11 – Отличие полигональной TIN-модели (слева) и воксельной модели (справа)

Воксельные модели разбивают весь объем трехмерного пространства модели на ячейки - воксели, которые являются объемной областью, ограниченной 6 полигонами (гранями) заданных размеров [66, 99].

Воксели при этом играют лишь роль элементов объема. Такого рода модели удобны тем, что все грани элементарных кубов ориентированы относительно главных осей (рисунок 1.12) [30, 64].

Применение воксельных моделей позволяет:

- анализировать поверхность: с помощью воксельных моделей можно проводить анализ геометрических параметров поверхности, оценивать объемы земляных работ, запасов полезных ископаемых, объемы горных пород;

- моделировать объекты: воксельные модели используются для создания трехмерных моделей объектов, земельных участков, карьеров и других объектов;
- проводить интерполяцию данных: воксельные модели позволяют интерполировать данные между существующими точками измерений, что полезно при построении цифровых моделей открытых горных.

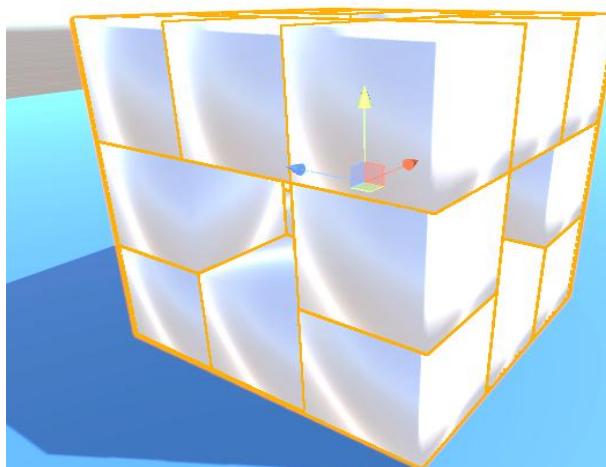


Рисунок 1.12 – Ориентация граней вокселей совпадает с ориентацией главных осей координат

Продемонстрировано использование воксельного подхода для различных целей [3, 29, 69]. Навигационная система автомобилей была изучена с использованием вокселей [44, 109]. Реконструкция зданий с использованием вокселей была проведена для данных наземного лазерного сканера [53] и фотограмметрии [83]. Методы, разработанные для восстановления поверхностей и форм для наземных лазерных данных, также справедливо используются и для данных, полученных с воздуха.

Воксельные модели традиционно использовались в приложениях виртуальной реальности [19] и компьютерной графике, например, в игровой индустрии или кинематографе. Одна из причин этого заключается в смежности и связности частиц воксельной модели. Однако во многих из этих примеров моделируемая среда является виртуальной.

Воксельные структуры применяются в геопространственных программных комплексах уже около двух десятилетий, поскольку анализ 3D-процессов и изучение объемных областей представляют интерес для многих научных

отраслей. Приложения включают моделирование окружающей среды для таких целей, как геология [103], археология и мониторинг геометрических изменений объекта съемки [22, 27, 74, 101]. Воксельные модели обычно используются для целей визуализации. В настоящее время также некоторые пакеты программного обеспечения для ГИС с открытым исходным кодом поддерживают воксельные структуры [95, 103, 105].

Модели вокселей, полученные с помощью лазерных сканирующих систем, использовались для изучения структуры леса [82]. Например, путем распределения точек лазерного сканирования в различных слоях внутри каждого вокселя, была проведена реконструкция формы, протестированы операции математической морфологии, введенные для двумерной (плоской) сетки. Съемка с воздушного судна предоставила полное сканирование леса, при этом воксельные модели были применены лишь для целей визуализации и представления полога деревьев.

В представленном исследовании [107] воксельная модель основана на воздушном лазерном сканировании реального ландшафта. Таким образом, модель обеспечивает входные данные для превалирующего большинства геопространственного анализа ландшафта. Также возможна реализация метода воксельного моделирования для застроенных территорий [132, 142]

Преимуществами использования такого вида моделирования является то, что аналогичный объем информации у воксельной модели много меньше, чем у триангуляционной [107]. Значит, хранение и извлечение, сопоставление и работа в целом с такого рода информацией будет происходить быстрее, не нагружая аппаратную мощность компьютера.

1.6 Формулирование проблемы формирования цифровых моделей открытых горных выработок

Стандартные алгоритмы восполнения данных о пространстве работают эффективно для точечных, избирательных съемок, например, для съемки теодолитом, тахеометром, нивелиром, спутниковым оборудованием, то есть для тех видов съемок, где результат — это набор определенных точек на местности,

выбранных маркшейдером в процессе проведения съемочных работ. Выбранные человеком точки формируют массив характерных точек рельефа, позволяющих выбрать структурные линии, формирующие модель с целью решения текущих задач по определению объемов горных работ и пополнению горно-графической маркшейдерской документации. Но подобной процедуре подвергаются и результаты массовых, неизбирательных дистанционных съемок, дающие большую информативность при создании облака.

В облаке, по которому будет строиться модель, необходимо снизить результирующее количество дискретных точек чтобы ускорить процесс аппаратной обработки и снизить нагрузку на вычислительную технику. Таким образом, необходимо обеспечивать TIN и GRID достаточным количеством данных, избегая при этом перенасыщения информацией результата моделирования, что должно облегчить дальнейшую работу.

Для маркшейдера основная задача при работе с таким количеством избыточной информации, состоит в том, чтобы уменьшить количество полигонов или вершин в 3D-сетке без существенного ухудшения ее визуального качества или влияния на ее функциональность. Тем не менее, вопрос о качестве отбрасываемой и сохраняемой информации остаётся нерешённым в виду того, что контроль точности результатов измерений основывается лишь на дискретных данных.

Для получения полной и точной модели объекта, правильным подходом было бы учитывать все реконструированные точки по результатам дистанционных съемок. Однако, полигонизация таких данных, характеризующихся большой плотностью, приводит к появлению большого количества отдельных полигонов, усложняющих форму и утяжеляющих использование результирующей модели.

В литературе имеется большое количество исследований [44, 47, 65, 80, 90, 108, 117], предлагающих эффективные схемы упрощения облака точек, которые можно в целом разделить на две категории: сжатие без потерь и сжатие с потерями.

Сжатие без потерь — это метод сжатия, который не приводит к изменению исходных данных облака точек, в то время как сжатие с потерями, также называемое разрежением, пытается уменьшить объем данных исходного облака точек за счет удаления менее важной информации.

Эти два метода в некотором смысле дополняют друг друга и могут быть объединены в маркшейдерско-геодезической практике. То есть сжатие с потерями сначала используется для получения разреженного облака точек, а затем выполняется программное сжатие, чтобы дополнительно уменьшить ресурсы вычислительных машин на хранение, передачу и обработку данных.

Низкие вычислительные затраты требуют, чтобы сложность алгоритма упрощения во время выполнения была достаточно эффективной, чтобы обеспечить его пригодность для использования в реальных программных продуктах при конкретных производственных условиях.

Разрежение облака точек

Разрежение облака точек означает удаление из него некоторого количества данных, что в свою очередь приводит к уменьшению точности модели [135]. Результирующую модель составляют только те точки, которые были отобраны программой на основании алгоритмов автоматической фильтрации.

Алгоритмы проводят разрежение точек по методу ближайшего соседа (англ. Nearest Neighbor) [35, 86, 77, 110]. Метод ближайшего соседа — это метод разрежения облака точек, основанный на выборе наименьшего расстояния между точками.

Такой метод производит выборку точек по алгоритму (рисунок 1.13):

1. программой формируется начальное облако точек, которое нужно разрядить;
2. выбирается точка из облака точек в качестве начальной;
3. происходит поиск точки ближайшей к начальной точке в облаке;
4. если расстояние между начальной точкой и найденной ближайшей больше заданного порогового значения, то последняя выделяется как новый

кластер точек, от которого производится дальнейший расчет. В противном случае, ближайшая точка добавляется в кластер начальной точки и удаляется;

5. полученные кластеры точек будут представлять результат разрежения облака точек методом ближайшего соседа.

Также разрежение может происходить путём непосредственного указания количества точек результирующего облака [147]. Оно основывается на предположительном задании оператором камеральной обработки количества результирующих точек, в результате чего программа подбирает оптимальный размер кластера для разрежения по методу ближайшего соседа.

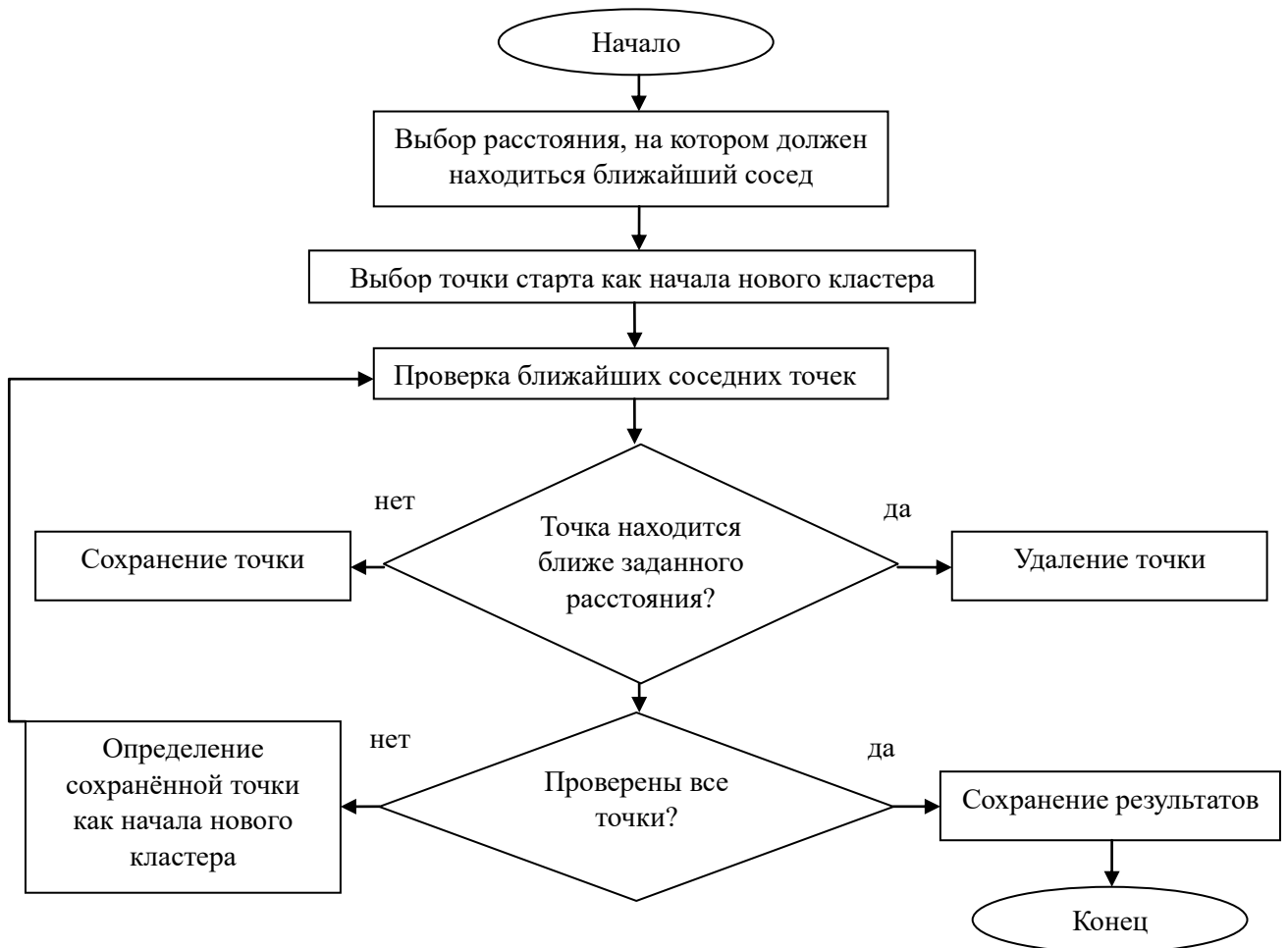


Рисунок 1.13 – Блок-схема алгоритма разрежения облака точек по методу ближайшего соседа

Например, это реализовано в Agisoft Metashape, в CloudCompare (рисунок 1.13) и других программных продуктах, предназначенных для работы с облаками точек.

Во всех вышеописанных способах происходит процесс не избирательного разрезания, где всем точкам облака присваивается равный вес, а также отсутствует дифференцирование шумов в исходных данных [37, 79, 104, 145].

При съемке лазерными сканерами и фотограмметрическим оборудованием, каждая точка в облаке представляет собой информацию о глубине или расстоянии до поверхности объекта. Если некоторые точки удаляются, то в модель попадает меньше информации о поверхности, что закономерно приводит к потере деталей и точности.

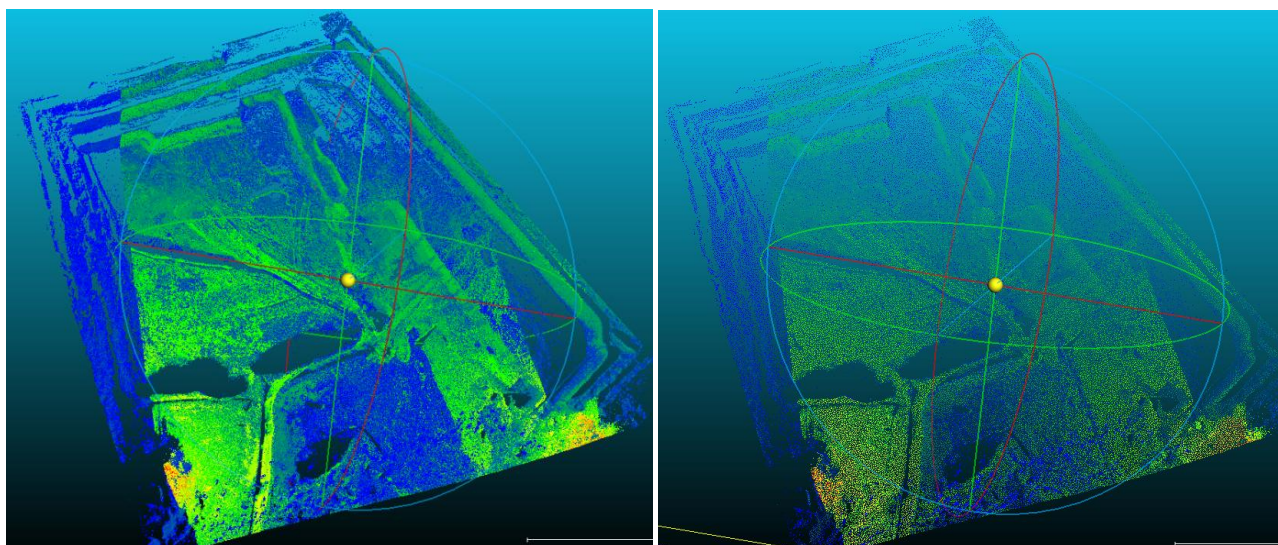


Рисунок 1.14 – Разрезание облака точек по методу ближайшего соседа в программе Cloud Compare

При этом, оценка качества результатов формирования моделей TIN и GRID производится только на сравнении результатов моделирования с координатами пунктов, измеренными другими способами съемок [55, 78, 133, 151]. То есть, оператором камеральных работ на цифровой модели выбирается точка, которая оценивается на предмет совпадения с пунктом визуально. Далее, для такой точки рассчитываются значения среднеквадратических погрешностей (как высотных, так и плановых).

В то же время, на любом произвольно-выбранном участке оценка формируемых моделей отсутствует. Подобную проблему исполнители съемок игнорируют, либо минимизируют, вводя дополнительные пункты для измерений перед полётом, что является редким случаем, так как повышает затраты труда и времени на подготовительные операции [12, 31, 49, 50]. Однако, подобный анализ

качества данных всё же остается дискретным, и его нельзя принимать справедливым для насыщающей модель информации между измеренными пунктами.

1.7 Обзор нормативно-технических требований к горной графической документации

1 сентября 2023 года Федеральная служба по экологическому технологическому и атомному надзору издала приказ 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.

Требования, предъявляемые к горно-графической маркшейдерской документации, становятся более размытыми, поскольку в настоящий момент, согласно пункту 109 данных правил, ведение маркшейдерской документации осуществляется на бумажном носителе и (или) в электронном виде. Это принципиально отличается от действовавшей ранее «Инструкции по производству маркшейдерских работ» РД-07-603-03, где форматом маркшейдерской графической документации является исключительно бумажный носитель [8].

В современном цифровом мире такое требование интуитивно логично и закономерно, ведь нынешний приборный парк маркшейдера составляют цифровые и электронные устройства: тахеометры, GNSS-оборудование, БВС с АФА, лазерные сканирующие системы. Все типы цифровых приборов позволяют маркшейдеру использовать программные средства для создания чертежей и планов с помощью векторной графики [57, 60, 71, 132]. Векторная графика позволяет маркшейдеру не зависеть от требований к погрешности определения координат объекта на бумажном носителе [44].

Но в купе с вышесказанным, «Правила...» не устанавливают требуемые форматы электронного вида маркшейдерской документации. Здесь нет комментариев относительно возможных допустимых погрешностей на

определение координат по цифровым моделям рельефа, цифровым картам и планам. Отсутствуют допустимые расхождения векторных и растровых моделей с результатами маркшейдерских измерений, а также способы их определения.

В главе 5 настоящих правил, посвящённых требованиям к учёту и обоснованию объёмов горных разработок обозначены допустимые значения в расхождении объёмов из двух и более независимых способов его определения (2%). Но сам способ подсчета объёмов ни коим образом не обозначен.

В то время, как классическими методами определения объёмов являются способы горизонтальных и вертикальных сечений, метод палетки, в настоящей инструкции отсутствует регламентация подобных подходов за исключением приложения №3 таблицы №1, где среди прочих наименований графической документации в пунктах 4.1.4 и 4.2.4 встречаются разрезы по направлениям подвигания фронта работ при подсчёте объёмов способом вертикальных сечений.

То есть цифровизация предполагается, но метод трёхгранных призм при определении объёмов горных работ, которые используются в современных САПР и горных геоинформационных системах при сравнении двух триангуляционных поверхностей, не учтён (поверхности здесь – цифровые модели объекта съёмки, разнесённые во времени).

Согласно инструкции по безопасному ведению работ и охране недр при разработке месторождений солей растворением через скважины с поверхности РД 03-243-98 (утв. Постановлением Госгортехнадзора РФ от 26.11.1998 N 68), пункту 3, маркшейдерская графическая документация на каждый интересующий момент времени деятельности промысла должна отражать полные и достоверные данные о состоянии земной поверхности территории экономической заинтересованности промысла, о геологических и гидрогеологических условиях месторождения, о расположении горных выработок (скважин), о планировании развития горных работ, о контроле за правильностью и безопасностью их ведения и за сохранностью объектов, находящихся на поверхности [7].

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

1.8 Выводы по главе 1

На данный момент, наиболее распространенные способы представления геометрической информации о горных объектах сводятся к построению трёхмерных полигональных моделей TIN или плоских растровых моделей GRID, являющихся совокупностью плоскостей, построенных между отснятыми точками облака. К недостаткам TIN относятся высокий объем результатов моделирования, сравнительно медленная скорость формирования модели, обязательное разрежение исходных данных перед созданием модели. К недостаткам GRID относят отсутствие дифференциации высот внутри пикселей растровой модели.

В купе с вышесказанным, оценка точности распределения высоты в интерполируемых данных на результирующей модели фактически отсутствует.

Несколько причин могут объяснить и отсутствие регламентов на методы создания цифровых моделей местности и цифровых моделей рельефа на открытых горных работах, составленные по результатам съемок с ЛСС или с БЛА с применением фотограмметрии в маркшейдерских работах.

Во-первых, использование БЛА, оснащенных лидарами или фотокамерами в маркшейдерской практике — это относительно новая технология, к которой применяется практика точечной съемки с набором дискретной интерполируемой информации аналогично стандартным видам маркшейдерских съемок: теодолитной, тахеометрической, спутниковой с ГНСС-оборудованием.

Во-вторых, маркшейдерская съемка с использованием ЛСС и фотограмметрии в настоящий момент контролируется дискретно. Контроль точности исходных данных моделирования, а именно облака точек, основывается на сравнении:

- отдельных точек, полученных в результате моделирования по облаку точек, по отношению к измеренным ранее опорным пунктам;
- с другими методами съемок.

В-третьих, формируемые модели для корректного использования проходят процесс неизбирательного разрежения, где каждой точке облака присваивается одинаковый вес. При использовании лазерных сканеров и фотограмметрического оборудования каждая точка в облаке содержит информацию о глубине или расстоянии до поверхности объекта. Если некоторые точки убираются, в модель попадает меньше информации о поверхности, что в конечном итоге приводит к потере деталей и точности. В купе со всем перечисленным, информация о точности насыщающих цифровую модель местности интерполируемых значениях между измеренными пунктами отсутствует.

В-четвертых, отсутствует нормативно-правовая база, позволяющая определить однозначные подходы к интерпретированию облаков точек и последующему созданию на их основе цифровых моделей для оперативного решения с их помощью текущих задач по определению объемов и пополнению горно-графической документации.

Приведенный анализ существующих по данной теме работ, в совокупности с личным опытом организации и проведения фотограмметрических съемок, позволил сформулировать наиболее актуальные задачи, требующие дополнительного исследования:

1. создание методики формирования цифровых моделей открытых горных выработок по результатам дистанционных маркшейдерских съемок;

2. нахождение способа оценки качества итоговой модели, получаемой по результатам дистанционных съемок;

3. разработка и исследование возможных методических решений, позволяющих оптимизировать хранение и работу с цифровыми моделями открытых горных выработок с минимальной потерей точности;

4. разработка методики камеральной обработки результатов дистанционных съемок для последующей оптимизации и создания итоговой модели.

ГЛАВА 2 ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Как правило, в трехмерных базах данных используются векторные или растровые структуры. Объекты в векторной модели данных представлены координатами x , y и z , в то время как в растровых моделях z -координата хранится как атрибут каждого пикселя.

Сформулированные в разделе 1 выводы позволяют определить общие требования, которые должны выдвигаться к цифровым моделям открытых горных выработок, полученным на основании фотограмметрических маркшейдерских съемок.

Это приводит к необходимости нахождения консенсусного решения в построении моделей, одновременно учитывающих все точки облака, полученного по результатам обработки дистанционных измерений, и позволяющих выполнить аппроксимацию исходных данных с допустимым от них отклонением.

2.1 Идея деления облака на сегменты при дистанционной съемке

Идея предлагаемого метода заключается в последовательном создании по результатам дистанционной съемки модели в виде элементарных сегментов, аналогичной вокселям и традиционным GRID, при этом содержащих в себе ограниченное множество попавших в одну единицу точек исходного облака (рисунок 2.1).

Принципиально, форма сегментов, как и в GRID, может быть произвольной – прямоугольной, гексагональной, октогональной, при условии полного покрытия всей площади исходной модели [112, 125, 145]. Самый простой выбор при плоском делении – сетка квадратной формы.

Выбор такой формы 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 [101].

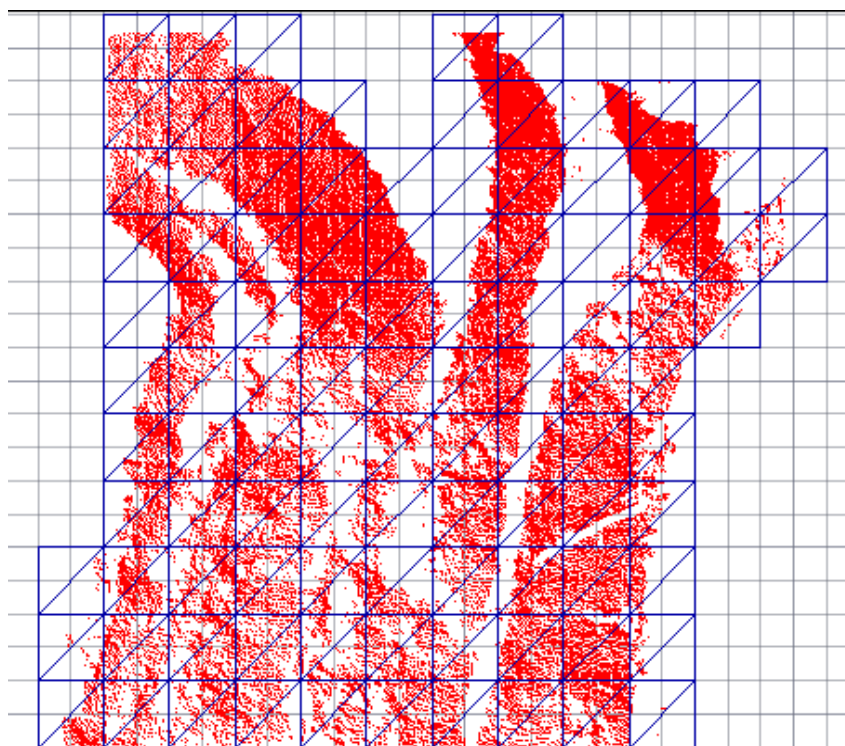


Рисунок 2.1 – Принцип разбиения облака точек по сегментам

В каждый сегмент, при этом, попадает определенное количество точек, отснятых оборудованием. То есть деление пространства по плоской сетке (плоскость X-Y) необходимо для разбиения облака точек, получаемого посредством фотограмметрических съемок.

Следующим этапом предполагается наполнение получившихся сегментов множеством снятых или дешифрованных в ходе камеральной обработки точек.

Избыточность данных по результатам дистанционных съемок открывает большое пространство для математического анализа. Конечно, точность проведения самих съемок предлагаемый метод не меняет. Однако количество избыточных точек внутри сегментов позволит вычислить математическое ожидание положения аппроксимирующей поверхности.

Это значит, что плоскость, построенная как аппроксимация облака точек внутри сегментов на основании лидарных или фотограмметрических съемок, будет иметь статистический характер. Это позволит приблизить пространственное значение аппроксимации к «истинному» для каждого отдельного сегмента, что, в свою очередь, является показателем, позволяющим оценить и повысить точность результирующей модели.

При построении плоскости, которая является аппроксимацией по множеству точек, используется математический алгоритм, который позволяет определить наилучшее геометрическое положение плоскости, проходящей через данные точки.

Этот алгоритм может использоваться для минимизации ошибки описания рельефа примитивами, такими как полином первого порядка, которым, по сути, и является плоскость.

В результате такой аппроксимации, результаты моделирования – набор плоскостей, могут быть представлены более компактно и удобно для использования, чем исходное облако точек, особенно в случае, когда требуется вычислить некоторые характеристики, такие как нормали к поверхности, кривизну и другие. Эти характеристики могут быть использованы для различных задач маркшейдерского дела, таких как определение объемов горных работ по результатам моделирования, информация о распределении высоты на местности для различных целей, например, планирования горных и строительных работ.

Таким образом, плоскость, построенная как аппроксимация по множеству точек, становится более предпочтительной, чем исходные данные, по которым она была построена, в том смысле, что она может представлять данные с определённой ошибкой и в более компактном формате, что облегчает их использование в дальнейшем анализе. Однако важно понимать, что это лишь аппроксимация, и она не полностью передает все детали исходных данных, поэтому некоторые задачи могут потребовать иного представления данных.

Также, необходимая точность результирующей модели может зависеть от целевой задачи, для которой она применяется. Поэтому необходимо для каждой целевой задачи устанавливать свои допуски (рисунок 2.2).

В перспективе, такой метод моделирования позволит использовать статистические данные съёмки, признанных недостаточно точными, для решения более точных задач.

Предлагаемый подход позволяет нормировать объем данных, представляя его как функцию от количества обрабатываемых сегментов, аналогично пикселям

в растровых DEM-моделях [119]. Унифицированная стандартная структура моделей позволит одновременно обрабатывать данные, полученные различными методиками и из разных источников. Создаваемые модели также позволят оценить точность проведенных измерений и применить их для решения маркшейдерско-геодезических задач.

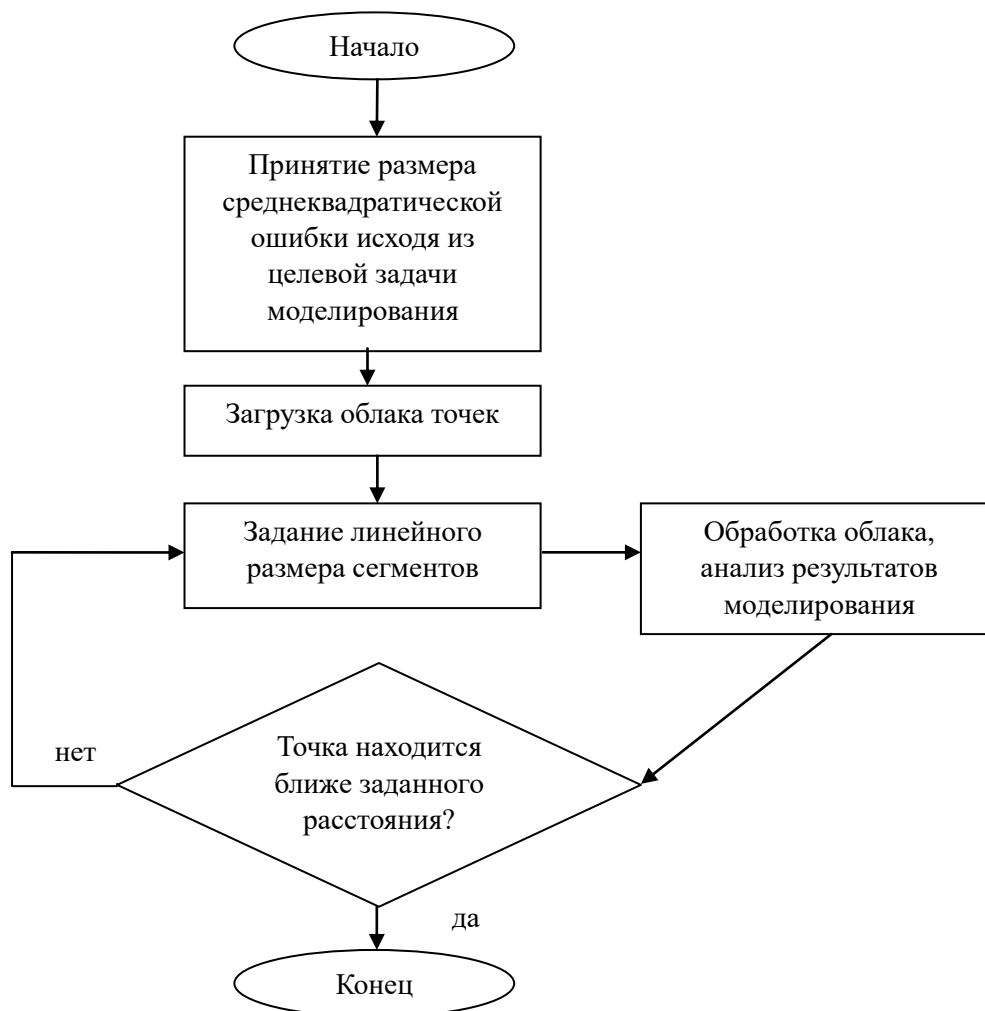


Рисунок 2.2 - Блок-схема моделирования по предлагаемой методике

2.2 Определение параметров аппроксимирующей плоскости внутри дискретного сегмента

Внутри каждого сегмента облака точек возможно вписать аппроксимирующую поверхность через полином первого порядка. Положение каждой такой плоскости можно найти с помощью метода наименьших квадратов (МНК) [91, 126], пользуясь общим уравнением плоскости в трёхмерном пространстве, проходящей через точку с известными координатами (формула 1):

$$a * x + b * y + c * z + d = 0, \quad (1)$$

где x, y, z – координаты точки;

a, b, c – коэффициенты, являющиеся координатами вектора-нормали к определяемой плоскости $\bar{N} = (A, B, C)$;

d - число, равное расстоянию от начала координат до плоскости. При этом, если d - положительный, то плоскость находится выше начала координат, если отрицательный - ниже.

Часто, форма записи формулы 1 принимает вид (формула 2):

$$x * \cos\alpha + y * \cos\beta + z * \cos\gamma - p = 0, \quad (2)$$

где $\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma$ - направляющие косинусы нормального вектора данной плоскости единичной длины, отвечающие за поворот плоскости относительно главных осей координат oX, oY и oZ , соответственно;

p - неотрицательное число, равное расстоянию от начала координат до плоскости.

Здесь x, y и z обозначают координаты точек облака в трехмерном пространстве. При этом, x и y — это независимые переменные, определенные во всем сегменте исходного облака, а z - зависимая переменная, значение которой описывается предлагаемым методом.

Таким образом, зная значения коэффициентов a, b и c , можно определить наклон и положение плоскости в трехмерном пространстве.

Набор данных должен содержать значения переменных x, y и z для каждого сегмента облака.

Задача сводится к нахождению такого положения плоскости, в которой (формула 3):

$$\sum_{i=1}^n (a * x_i + b * y_i + c * z_i + d)^2 = \min \quad (3)$$

Для решения этой задачи можно воспользоваться методом Гаусса или методом наименьших квадратов (МНК) через матричные операции (формула 4).

$$A * X = B * L, (4)$$

где A – это матрица, состоящая из набора плоских координат x_i и y_i аппроксимированного сегмента;

X – это матрица-столбец коэффициентов a , b и c ;

B – матрица-столбец координат z_i каждой точки сегмента облака.

Для вычисления коэффициентов по МНК необходимо использовать формулы 5-7:

$$A = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_i & y_i & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$X = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$B = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_i \end{pmatrix} \quad (7)$$

То есть матрица X — это вектор-столбец, содержащий лишь значения коэффициентов аппроксимирующей плоскости.

B - матрица, содержащая координаты высот z облака точек или его части в сегмент.

Для нахождения коэффициентов a , b и c можно воспользоваться формулой 8:

$$X = (A^T * A)^{-1} * A^T, \quad (8)$$

где A - матрица, содержащая координаты x и y облака точек или его части в сегменте;

В результате выполнения этих шагов получаем уравнение аппроксимации (1), которое можно использовать для поиска значения z на плоскости на основе значений x и y .

Так как точек с известными координатами в сегмент содержится достаточно объемное множество для разных сегмент (от трёх до нескольких сотен, и даже тысяч), то по методу наименьших квадратов необходимо подобрать такую плоскость, расстояние от которой будет минимально до каждой точки внутри

сегмента (формула 3). Практически, при решении задачи поиска (подбора) такой плоскости, вычисление примет вид, отраженный в формуле 9:

$$dis = \frac{|aX+bY+cZ+d|}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}}, \quad (9)$$

где **dis** – кратчайшее расстояние от плоскости до точки, также именуемое в статистике **v**;

a, b, c и **d** — это коэффициенты плоскости;

X, Y и **Z** – координаты точки.

Таким образом, получив угловые коэффициенты разворота плоскости внутри сегмента и её отстояния от начала координат, становится возможным определение положения плоскости. Это приводит к определению значений распределения высоты как внутри индивидуальном сегменте, так и модели в целом, представляющей из себя совокупность сегментов.

Однако, так как координаты x, y для полинома первого порядка определены во всем сегменте, задача вычисления кратчайшего расстояния от аппроксимирующей плоскости до множества точек сводится к тому, что необходимо подобрать параметры, при котором описание высоты будет наиболее достоверным, то есть, близким к полученным в облаке высотам (формула 10):

$$\sum_{i=1}^n (a * x_i + b * y_i + c) - z_i)^2 = \min \quad (10)$$

2.3 Способ оценки точности моделей

Проверка точности реализуемого метода моделирования заключается в нахождении средних квадратических отклонений точек от описывающих их плоскостей.

Сделать это возможно с помощью формулы Гаусса (формула 11):

$$m = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n}}, \quad (11)$$

где **m** – среднее квадратическое отклонение;

[vv] – сумма квадратов отклонений исходной величины;

n – количество измерений.

В этом случае производится вычисление отклонений v для каждой точки участка относительно положения плоскости внутри самого сегмента модели. Так как предлагаемая модель определена на всей плоскости X - Y , значением отклонения v , оперируемым в данном случае, является значение разницы высот между плоскостью и конкретной точкой, вовлеченной в аппроксимацию.

Формула Бесселя (12) используется для расчета выборочной дисперсии или стандартного отклонения в статистике. Она включает поправку на степени свободы выборки и заменяет n в формуле Гаусса в знаменателе на $n-1$.

$$m = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}} \quad (12)$$

При использовании выборки вместо полного набора исходных данных существует неопределенность, так как оцениваются параметры на основе ограниченного числа наблюдений.

Замена n на $n - 1$ компенсирует потерю степеней свободы, связанную с использованием выборки, и учитывает, что при оценке на основе выборки имеются потери информации.

Таким образом, формула Бесселя с заменой n на $n - 1$ в знаменателе обеспечивает более точную оценку дисперсии или стандартного отклонения на основе выборки, учитывая неопределенность и ограниченность данных выборки [54].

Принципиально, формулу 13 можно привести к общему виду расчета погрешности высоты в отдельной плоскости сегмента (формула 13):

$$m_k = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_k} (\hat{Z}_k - z_i)^2}{r_k}}, \quad (13)$$

где \hat{Z}_k – высотная отметка, вычисленная по аппроксимирующей функции k -ой сегмент в точке i (с плоскими координатами x_i, y_i);

z_i – высотная отметка точки i ;

r_k – количество степеней свободы k -ого сегмента, определяемое в зависимости от типа аппроксимирующей поверхности. Это значение может быть вычислено как:

$r_k = n_k - 1$ - для средней отметки;

$r_k = n_k - 1$ - для плоскости;

где n_k – количество точек k -ого сегмента.

Общая среднеквадратическая погрешность модели может быть вычислена на основе среднеквадратических погрешностей аппроксимации отдельных сегментов (14) с учетом количества степеней свободы участвующих в их определении как:

$$M = \pm \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (m_k^2 \cdot r_k)}{\sum_{k=1}^N r_k}}, \quad (14)$$

где m_k – среднеквадратическая погрешность аппроксимации в k -ом сегменте;

N – количество присутствующих в модели ячеек.

Подставив в формулу 14 m_k из формулы 13, общая погрешность моделирования будет выглядеть следующим образом (формула 15):

$$M = \pm \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (\hat{z}_k - z_i)^2}{\sum_{k=1}^N r_k}}, \quad (15)$$

Таким образом, в результате вычислений получаем значение СКП для модели.

Для обоснования выбора процента точек, удовлетворяющих заданному допуску квадратного отклонения, необходимо учитывать конкретную задачу, которую решает модель, и требования к точности ее результата.

В общем случае, можно использовать статистические методы для определения допустимого процента точек. Например, можно построить гистограмму распределения квадратных отклонений точек от плоскости и определить процент точек, у которых отклонение не превышает заданный допуск. Также можно использовать стандартные критерии, такие как доверительный

интервал или дисперсионный анализ, для определения допустимого процента точек.

Однако, следует учитывать, что заданный допуск должен соответствовать требованиям конкретной задачи и не должен быть выбран произвольно. Например, если точность модели важна для выполнения определенной функции, то допуск должен быть установлен строго, чтобы минимизировать ошибки в результатах работы модели. Если же точность не является критичной, то можно использовать более широкий допуск и допустить большее количество точек, не соответствующих этому допуску.

Таким образом, выбор процента точек, удовлетворяющих заданному допуску, должен основываться на конкретных требованиях к точности модели и проводиться с использованием статистических методов.

2.4 Описание методов работы по предлагаемой методике GRID моделей

Для обоснования предлагаемой методики предлагается использовать статистический метод, используемый для численного решения математических задач с колоссальным набором исходных данных (сотни тысяч и миллионы точек облака). Подобную методику возможно реализовать для решения ряда задач, включая оценку точности и надежности измерений, построений трехмерных моделей поверхностей и т.д.

При адаптации данного метода исследования исходных данных к предлагаемой методике разделения облака точек на сегменты алгоритм работы примет следующий вид:

1. Предварительная обработка данных:

- Создание по результатам съемки облака точек;
- Отсев ошибочных точек (исключение грубых ошибок реконструкции);
- Разбиение данных на блоки (сегментация облака точек на ячейки равной дискретности).

2. Генерация сегментов:

- Генерация плоскостей, построенных по операционно-территориальным единицам облака (которыми являются сегменты облака);

- Определение взаимного расположения сегментов и исходного облака точек (проверка данных);

3. Анализ точности измерений:

- Оценка точности аппроксимации для каждой точки облака;
- Вычисление среднего значения точности аппроксимации для всего облака точек;

4. Построение трехмерных моделей:

- Построение моделей как совокупности плоскостей, аппроксимирующих внутри сегментов подмножество облака точек;

5. Интерпретация результатов:

- Анализ полученных данных и оценка их значимости для поставленных задач (статистический анализ результатов и определение их применимости к текущим задачам);

- Формулирование выводов и рекомендаций для дальнейшей работы.

2.5 Учёт разнородной информации при создании цифровых моделей местности

Одним из важных вопросов, обозначенных в исследовании, становится теоретическая возможность использования разного по генезису набора исходных данных. Это связано, в первую очередь с тем, что метод, описанный выше, является универсальным при работе с набором данных, называемый облаком точек.

Таким образом, необходимо определить коррелируемость результата предлагаемой методики моделирования у фотограмметрической съемки с аналогичными результатами лазерного сканирования.

Теоретически, установить взаимосвязь возможно путем статистического анализа разных наборов облаков точек одного и того же объекта.

Для установления общих закономерностей в рамках эксперимента также возможно использовать один и тот же набор данных для последующего моделирования (облако точек) с разной степенью исходного разрежения (децимации).

Помимо сравнения общего показателя «стандартное отклонение точек от описывающей плоскости» необходимо принять во внимание наполняемость каждого сегмента модели достаточным количеством исходных данных.

Минимальное количество точек, участвующих в построении плоскости – 3. Однако, нельзя быть уверенным в достоверности моделирования такого сегмента. В таком случае аппроксимация зоны не будет отличаться от аналогичного метода моделирования TIN, описанного в разделе 1.

Рекомендация для составления цифровых моделей местности указана в ГОСТ Р 59562-2021 «Съемка аэрофототопографическая. Технические требования», и она не превышает 2.7 точки на 1м² площади.

На основании вышесказанного, напрашивается вывод о необходимости насыщения сегментов определенным количеством точек, которых в каждом сегменте будет **больше трёх**.

Особое внимание необходимо уделить качеству вписывания плоскости. Корреляцию результатов подобного моделирования следует обеспечить путём прямого сравнения, по разнице положения аппроксимирующей плоскости в сегменте с положением каждой индивидуальной точки в него входящей.

Качество вписывания следует оценить статистически. Для этого необходимо произвести расчет стандартного отклонения исходного облака точек от набора поверхностей, описывающих изменение высоты внутри сегмента, построенных после разрежения. Эталонным значением, с которым в данном случае необходимо сравнить результаты построения по разреженному облаку будет наиболее плотное облако (не прошедшее этап разрежения или фильтрации точек).

Следует сказать, что набором данных в результате обработки облака, полученного фотограмметрическим путём, являются и цветовые характеристики каждой *i*-ой точки облака.

Однако, использование такого набора данных в общем случае не обязательно (рисунок 2.3): произвести расчет возможно и без применения цветовой раскраски облака точек [3].

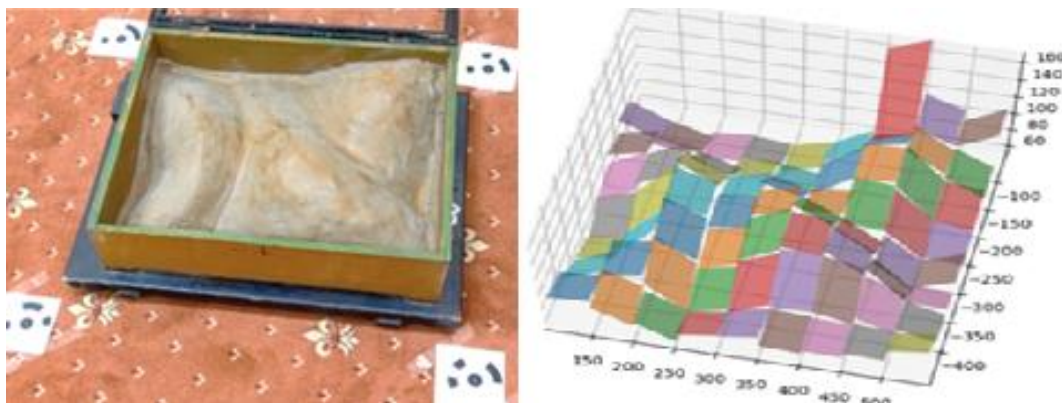


Рисунок 2.3 – Моделирование по сегментам без текстурирования модели

Однако, цветовые характеристики значительно упрощают визуальное восприятие модели, а также позволяют визуальнo оценить качество вписывания наборов плоскостей в сегменты, провести соответствие подробности модели для выявления структурных характеристик и определения особенностей в локализованных участках объекта моделирования.

2.6 Выводы по главе 2

Предлагаемая методика создания цифровых моделей по данным дистанционных маркшейдерских съемок с применением геодезического квадрокоптера и лазерных сканирующих систем заключается в разделении на сегменты получаемого по результатам таких съемок облака точек. Процесс разделения происходит по плоской квадратной сетке заданного размера, аналогично вокселям и классическим GRID-моделям.

Сегменты облака содержат в себе множество точек, которое описывается с помощью полинома первого порядка по методу наименьших квадратов.

Для программного определения положения плоскости достаточно знать координаты центра плоскости и рассчитать коэффициенты, отвечающие за разворот этой плоскости, а также коэффициент, показывающий отстояние плоскости по высоте относительно начала координат.

Так как исходными данными являются облака точек, достаточным условием для расчета сегментов в цифровой модели местности являются координаты X, Y и Z каждой полученной в ходе съемки точки.

Одним из пунктов, обозначенных в исследовании, на которое стоит уделить особое внимание, становится наполняемость каждого сегмента достаточным количеством точек для определения плоскости.

Это открывает принципиальную возможность использования подхода разделения на сегменты моделей не только для результатов аэрофотосъемки, но и для использования результатов съемок лазерными сканирующими системами.

Для оценки результата аппроксимации используется формула Бесселя. Это позволяет использовать избыточные данные в рамках каждого индивидуального сегмента, произвести оценку точности высоты между точками в сегменте облака и построенной по методу наименьших квадратов плоскостью.

Для визуализации результатов моделирования возможно использовать атрибуты цвета, определяемые в программных продуктах, в RGB-формате, однако, в общем случае такой подход не обязателен.

Предлагаемый алгоритм работы метода формирования моделей отображен на блок-схеме рисунка 2.4.

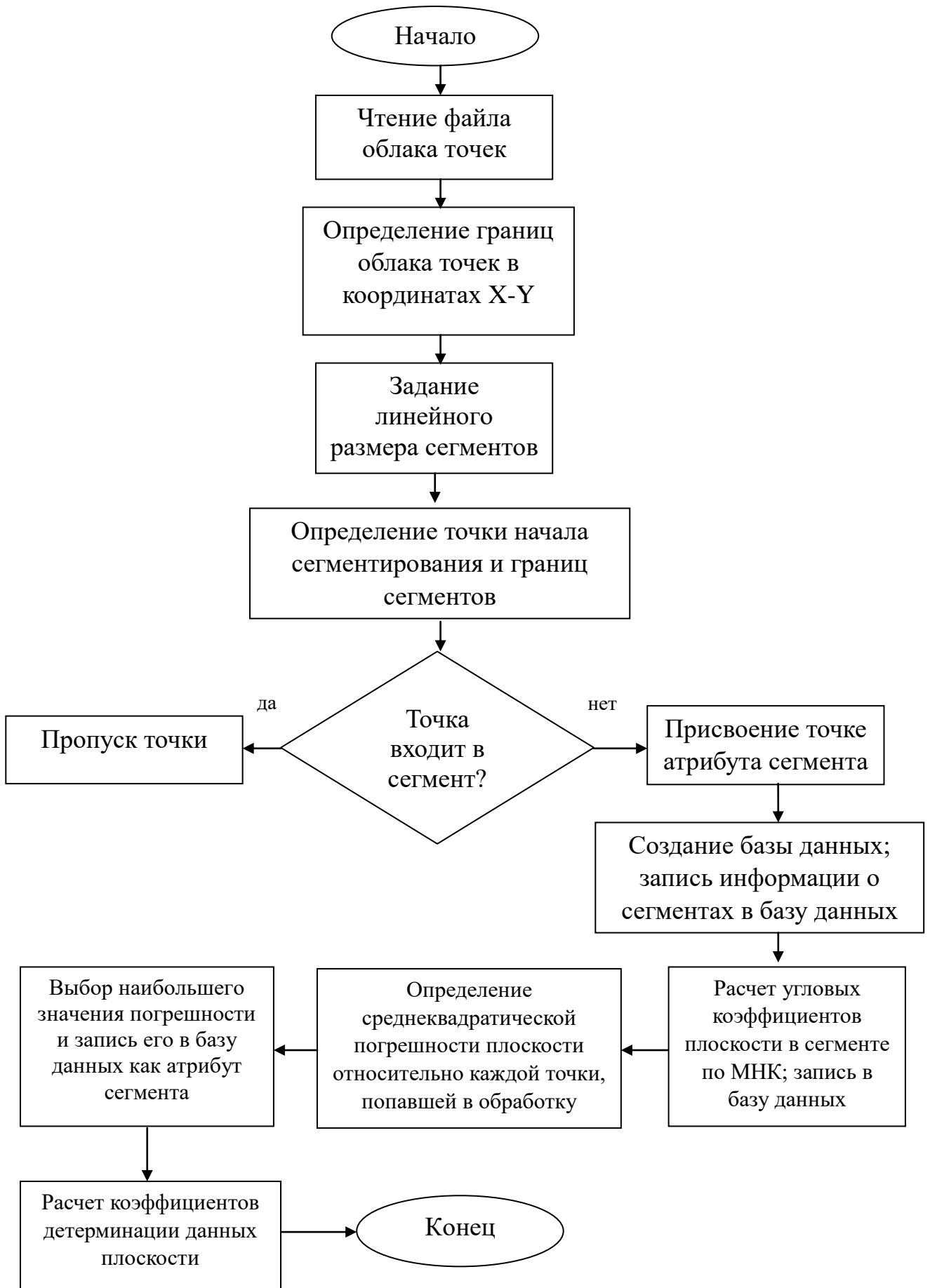


Рисунок 2.4 - Блок-схема работы программы

ГЛАВА 3 АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ GRID-МОДЕЛЕЙ

3.1 Описание процесса сбора первичных данных

Перед выполнением съемочных работ, в районе объекта съемки были расположены опознавательные знаки, чьи координаты были зафиксированы с помощью спутникового приемника, работающего в режиме RTK-съемки.

В программе **Pix 4D** был задан маршрут, который занимает минимальное время съемки, уровень перекрытия между снимками и параметры съемки.

Ввод этих параметров обуславливается некоторыми причинами:

- время работы аккумулятора, установленного на беспилотном судне;
- достаточное перекрытие обеспечивает лучшую сходимость результатов измерений;
- высота полета предполагает соответствие размера пикселя выходного изображения к его горизонтальному проложению на поверхности земли.

После запуска БЛА также необходимо следить за следованием квадрокоптера заданному маршруту, что может быть нарушено по различным техническим и технологическим причинам, таким как внезапная смена погодных условий (порывы ветра, изменение облачности и др.), программные сбои в работе беспилотного аппарата.

Следуя установленной методике выполнения съемки, процент перекрытия соседних фотографий составлял 80% для продольного перекрытия и 60% для поперечного перекрытия.

Батареи конкретного БЛА хватает на полёт от 20 до 30 минут, поэтому при больших размерах объекта съемки работ может потребоваться замена аккумулятора. Когда уровень заряда опускается ниже установленного минимума, квадрокоптер возвращается на место запуска, где специалист выполняет замену батареи. После, квадрокоптер с помощью GPS/INS-систем, установленных на борту, возвращается на место, где был снят последний кадр, и продолжает съемку.

В таком случае файлов съемки будет столько, сколько раз были заменены элементы питания или прерывалась последовательность съемки.

После завершения съемки БЛА возвращается на место старта, после чего съемку можно считать завершенной.

Далее, проводится камеральная обработка полученных данных. Для этого использованы программные продукты TeoBox и Agisoft Metashape.

TeoBox производится координатная привязка фотографий. А именно, по данным, полученным со спутникового оборудования в режиме RTK в момент выполнения съемки, а также спутникового приёмника, установленного на борту беспилотника, для каждой фотографии вычисляются координаты центра фотографирования.

Затем, эти фотографии импортируются в программу Agisoft Metashape для построения облака точек.

В момент выполнения аэрофототопографических работ использовались следующие параметры:

- 25 м для продольного базиса фотографирования B_x ;
- 50 м для поперечного базиса фотографирования B_y ;
- 150 м - высота фотографирования H , также называемая специалистами высотой Баро.

Эллипсы ошибок, с которыми получено облако точек на примере объекта съемки представлены на рисунке 3.1. Значения ошибок по высоте для удобства отображаются градиентной раскраской эллипсов. Так, видно, что ошибки по высоте полученного облака относительно опорных точек составляют 11 см, 8.8 см и 2.2 см в абсолютном выражении.

Методика проведения съемки с БЛА Geoscan 101 россыпного месторождения фактически аналогична съемке с коптера. Разница заключается в используемом программном обеспечении при планировании полёта воздушного судна (вместо TeoBox используется MagnetTools), а также в высоте проведения самой аэрофотосъемки: за счёт лучшей матрицы фотоаппарата, крыло при одинаковом разрешении GSD имеет лучшее разрешение фотоснимка, и, как

следствие, может летать на большей высоте Баро. Рекомендуемые значения для базисов фотографирования от фирмы-производителя также сохранены: 80% для продольного перекрытия и 60% для поперечного.



Рисунок 3.1 – Точность полученного облака точек относительно опорных пунктов

3.2 Применение предлагаемого метода формирования GRID-моделей

Предлагаемый метод моделирования реализован в виде пакета классов на языке программирования Python. На основе облаков точек из предыдущего пункта были построены модели с одинаковой дискретностью по разным линейным размерам сегментов, от 0,5 м до 10,0 м. Пример визуализации такого типа моделей представлен на рисунке 3.2.

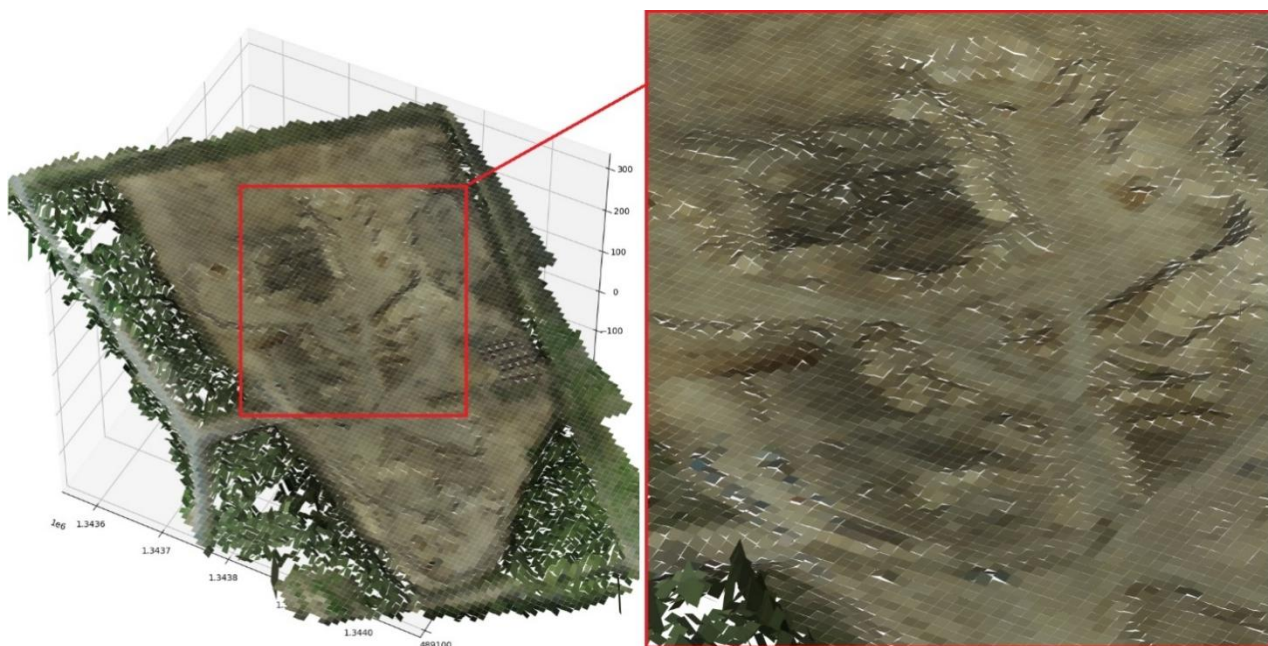


Рисунок 3.2 – GRID-модель месторождения «Плоское»

Для оценки описания облака, разделённого на сегменты и аппроксимированного плоскостями, предлагается использовать коэффициент детерминации R^2 . R^2 используется в статистике для оценки того, насколько хорошо модель соответствует исходным данным.

Коэффициент детерминации R^2 измеряет долю изменчивости зависимой переменной, объясняемую независимыми переменными в модели. R^2 принимает значения от 0 до 1, где значение 0 означает, что модель аппроксимации не объясняет изменчивость зависимой переменной, а значение 1 означает, что модель объясняет всю изменчивость зависимой переменной.

Для оценки валидности результатов моделирования предлагается посчитать коэффициенты детерминации R^2 для каждого сегмент. Однако, следует отметить, что высокое значение R^2 не означает, что модель является абсолютно точной или идеальной. Модель может быть хорошо подогнана к имеющимся данным, но может не работать хорошо на новых данных или в других условиях. Поэтому необходимо проводить анализ качества модели на разных участках и проверять ее работоспособность на новых данных.

Во избежание этого, карты распределения показателей коэффициентов детерминации построены для каждого из размеров сегментов цифровой модели рельефа (рисунок 3.3).

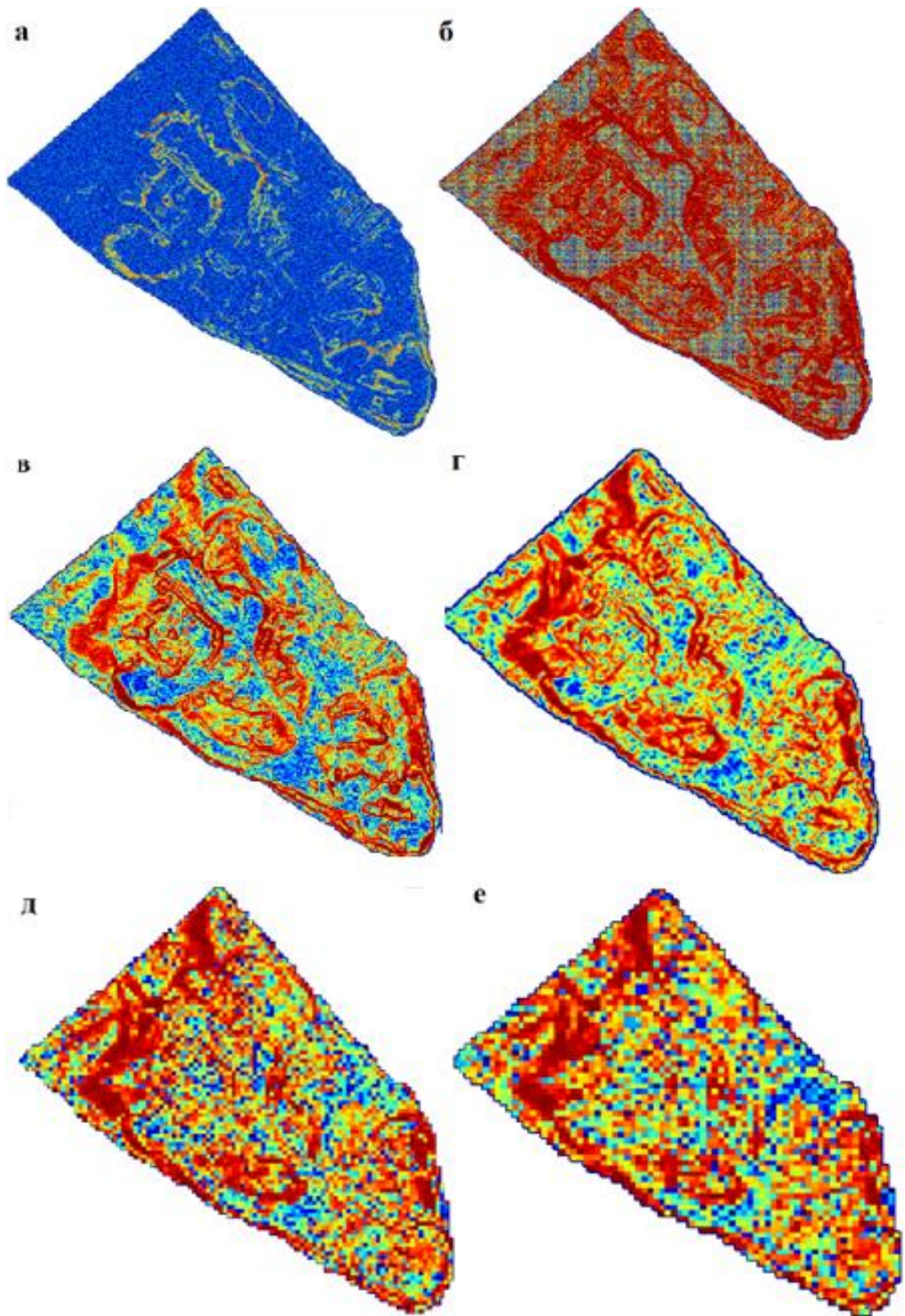


Рисунок 3.3 – Распределение коэффициентов детерминации для сегментов:
а) 0,5 м; б) 1м; в) 2м; г) 5м; д) 7,5м; е) 10м.

Отражённые на рисунке 3.3 примеры распределения коэффициентов детерминации для сегментов с различными размерами позволяют сделать общие выводы, касающиеся описания исходных данных набором плоскостей.

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

Высокое значение R^2 означает, что модель объясняет большую часть изменения высоты и может быть использована для прогнозирования значений высот в каждой из сегментов.

Плоские участки модели имеют коэффициент детерминации близкий к 0, даже если среднеквадратическое отклонение от плоскости модели очень близко к минимальному, если на этом участке вариация зависимой переменной сильно меняется в пределах небольшого диапазона значений независимых переменных.

Другими словами, если изменение значения независимой переменной на плоском участке модели не приводит к значительному изменению значения зависимой переменной, то модель не будет хорошо объяснять вариацию зависимой переменной на этом участке, и коэффициент детерминации будет близок к 0.

Например, если модель линейной регрессии была построена на основе данных, где зависимая переменная изменяется линейно в зависимости от одной независимой переменной, то плоский участок модели, где изменение значения независимой переменной не приводит к значительному изменению значения зависимой переменной, может иметь коэффициент детерминации близкий к 0.

Это и объясняет, почему в сегментах, где разброс точек по высоте минимален и практически принимает значение аппроксимирующей плоскости, коэффициент детерминации будет стремиться к нулю. 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.

Следующим шагом следует посчитать значения средних квадратических ошибок результатов исходных данных и моделирования (рисунок 3.4) для каждого из размеров сегментов.

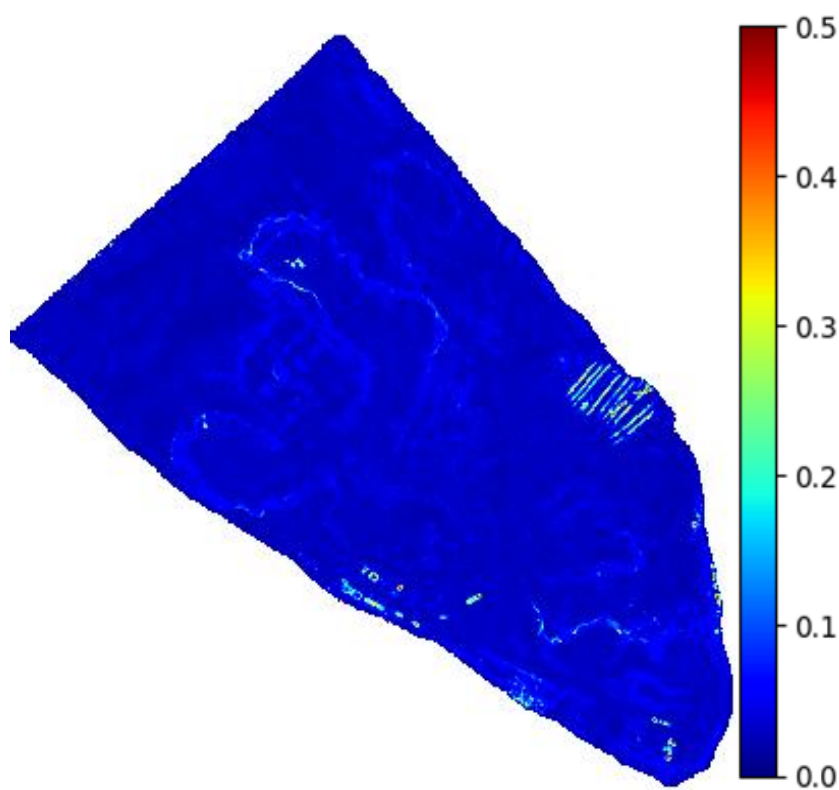


Рисунок 3.4 – Распределение значений СКП в модели с сегментами 1 м

Знание распределения ошибок внутри сегментов цифровой модели рельефа приводит к следующим позитивным выводам:

- оптимизация работы с моделью: знание распределения ошибки может помочь определить наиболее критичные участки модели, где следует обратить особое внимание на точность и качество данных;

- улучшение точности и качества модели: распределение ошибки может помочь определить области, где данные несут наибольшую погрешность, и улучшить точность и качество модели в этих областях;

- оптимизация планирования измерений: знание распределения ошибки может помочь определить, какие области модели требуют более высокой плотности измерений и какие инструменты измерений следует использовать для улучшения точности и качества данных;

- улучшение доверия к модели: знание распределения ошибки и улучшение точности и качества модели могут увеличить доверие к модели и повысить ее практическую ценность.

Построенные карты распределения ошибок по результатам подобного моделирования позволяет визуально локализовать участки, характеризующиеся большим значением СКП по отношению к описываемой поверхности.

Проведя визуальный анализ результатов предлагаемого способа построения моделей, видно, что наибольшие свои значения СКП достигает на участках:

- скопления поваленного леса (рисунок 3.5 - 1);
- на границе борта карьера (рисунок 3.5 - 2);
- скопления транспорта (рисунок 3.5 - 3).

Причина возникновения подобных отклонений обуславливается наличием больших перепадов высот, то есть резким изменением линейности рельефа внутри самих сегментов для скопления валежника и транспорта.

Возникновение больших по отношению к остальной модели погрешностей на границе борта карьера обуславливается тем, что операционно-территориальная единица облака захватывает как поверхность площадки, так и сам откос карьера. Это может приводить к ошибкам в объеме оценки запасов полезных ископаемых, поскольку поверхность площадки и откос карьера имеют различную высоту и наклон, что приводит к различным геометрическим и топографическим условиям для формирования облака точек. Перепады высот и неравномерности распределения точек, в свою очередь, влияют на точность вычислений объема, а также на точность моделирования рельефа и топографии местности. Поэтому необходимы дополнительные алгоритмы обработки данных, либо перераспределения сегментов облака, чтобы получить более точные результаты. Как вариант решения такой проблемы, можно приложить локализованное деление сегмента на подсегменты меньшей площади, что является фактором, позволяющим уточнить положение плоскости в сегменте.

Также, конкретизируя причины возникновения отклонений, можно сказать, что они вызваны не только перепадами высот, но и особенностями самих

исходных данных: некоторые участки земли находятся в тени, что затрудняет обнаружение объектов на этих участках в рамках фотограмметрической съемки с БЛА.

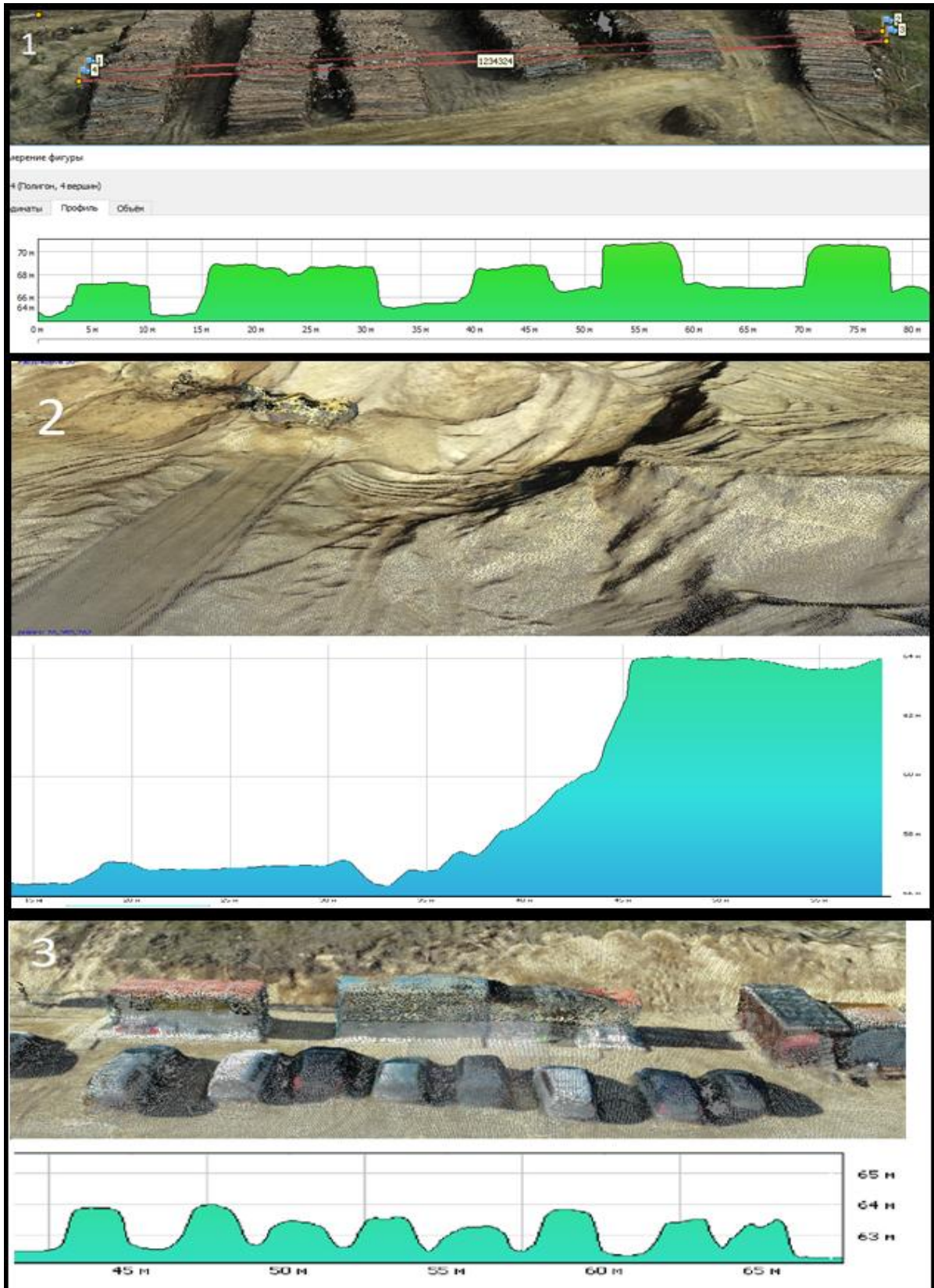


Рисунок 3.5 – Локализация участков с большим СКП с построением профилей в Agisoft Metashape

Вычисляя СКП точек относительно описывающей плоскости, можно сказать, что точки, СКП которых превосходит допустимое значение можно приравнять к категории шумных точек, а соответственно, и данный вид моделирования при этом будет учитывать такие точки облака, являющиеся, по сути, случайными погрешностями, вызванными некорректным распознаванием при обработке фотоснимков.

При этом, стоит отметить, что методика замены облака точек внутри каждого индивидуального сегмента плоскостью подразумевает под собой вычисление наиболее вероятного положения данной плоскости. Это обеспечивает учёт абсолютно всех точек облака в предлагаемой методике, избегая проблемы неконтролируемого разряжения исходного облака.

В преобладающем количестве сегментов, принятых в обработку, размер ошибки едва достигает значения 0,1 м. Для подробного изучения подхода к формированию цифровых моделей равной дискретности произведен статистический анализ полученных результатов для ряда объектов фотограмметрической съемки.

3.3 Анализ предлагаемого метода формирования GRID-моделей для различных объектов фотограмметрической съемки

Рассмотрен ряд объектов открытых горных работ, различных по своему генезису, расположению и геометрическим условиям. К таким объектам относятся: торфяное месторождение Псковской области, имеющее пересеченный рельеф; угольные склады, характеризующиеся правильной геометрической формой; месторождение россыпного золота, имеющее относительно ровный рельеф, но большое насаждение растительности.

Для каждого объекта фотограмметрической съемки сформированы GRID модели предлагаемого способа аппроксимации исходных данных [3]. Выполнен анализ результатов моделирования: рассчитаны средние квадратические погрешности определения высоты в сегменте модели для разных размеров сегментов. Систематизировав данные, возможно найти вероятность появления

ошибки определенных величин для каждого из размеров сегментов, отражённые на рисунке 3.6 и таблице в приложении А.

Возможно определить модальное значение ошибки, то есть наиболее встречающееся и вероятное событие. Подробные графики распределений СКП высоты в предлагаемом способе создания моделей отражены в приложении Б для примера данных, полученных с помощью фотограмметрии на БЛА и наземных ЛСС.

Рассмотрев данные графики и изучив значения вероятностей по приведенным в приложении А таблиц, можно сделать выводы:

- большее количество ошибок приходится на первые 20 см;
- разница при обработке ячеек с шагом 0,5 и 1,0 м незначительна;
- с увеличением шага ячейки происходит «выползание» графика частоты и смещение модального значения ошибки в сторону увеличения.

Также, для каждого из размеров сегментов для каждой модели были посчитаны значения стандартных отклонений (σ), медианы (Me) и математического ожидания (μ) размера ошибки аппроксимации, отражённые в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – 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 |

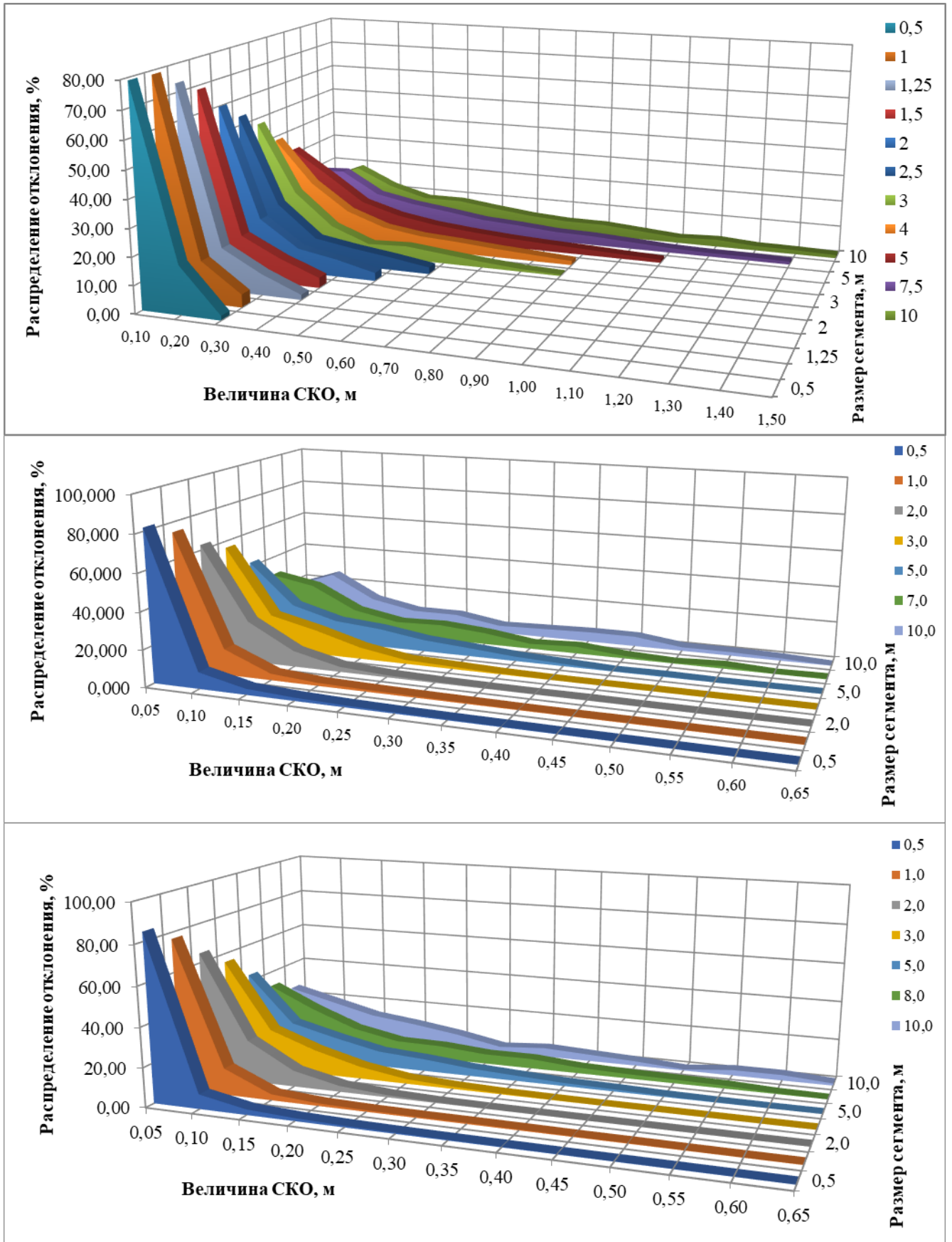


Рисунок 3.6 – СКО высоты GRID-моделей с разным размером сегментов:
 а) торфяного месторождения; б) угольного склада; в) месторождения россыпного золота.

Полученные данные отражены на графиках, приведенных на рисунке 3.7. На горизонтальной оси отображены размеры рёбер сегмент, принятых в обработку. На вертикальной оси расположены значения средней квадратической погрешности высоты.

Анализируя характер распределения погрешностей внутри сегментов модели видно, что высокие значения погрешности плоскости модели при малых размерах сегментов вызваны присутствием в выборке малочисленных сегментов с грубыми ошибками, превышающими в отдельных случаях метр. Конечно, фактический перепад высот внутри модели много меньше численного значения данных ошибок.

В то же время, сегменты с таким значением СКП при больших размерах сетки деления отсутствуют. Это объясняется тем, что большая площадь внутри аппроксимируемого облака внутри сегментов содержит помимо вертикально распределенных точек участки местности с более плоским рельефом, «выполаживающую» результирующую поверхность.

По рисунку 3.7 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 соответствие с точностью, линейно изменяющейся с увеличением размера самих сегментов.

3.4 Анализ распределения величин среднеквадритических погрешностей высот при аппроксимации полиномами первого порядка

С целью определить характер распределения СКП высот предлагаемого метода формирования моделей, написан программный код в виде класса на языке программирования Python.

Так как форма графика распределения ошибок (рисунок 3.8) каждой модели визуально похожа и внешне согласуется с рядом видов распределений, была произведена проверка статистических параметров.

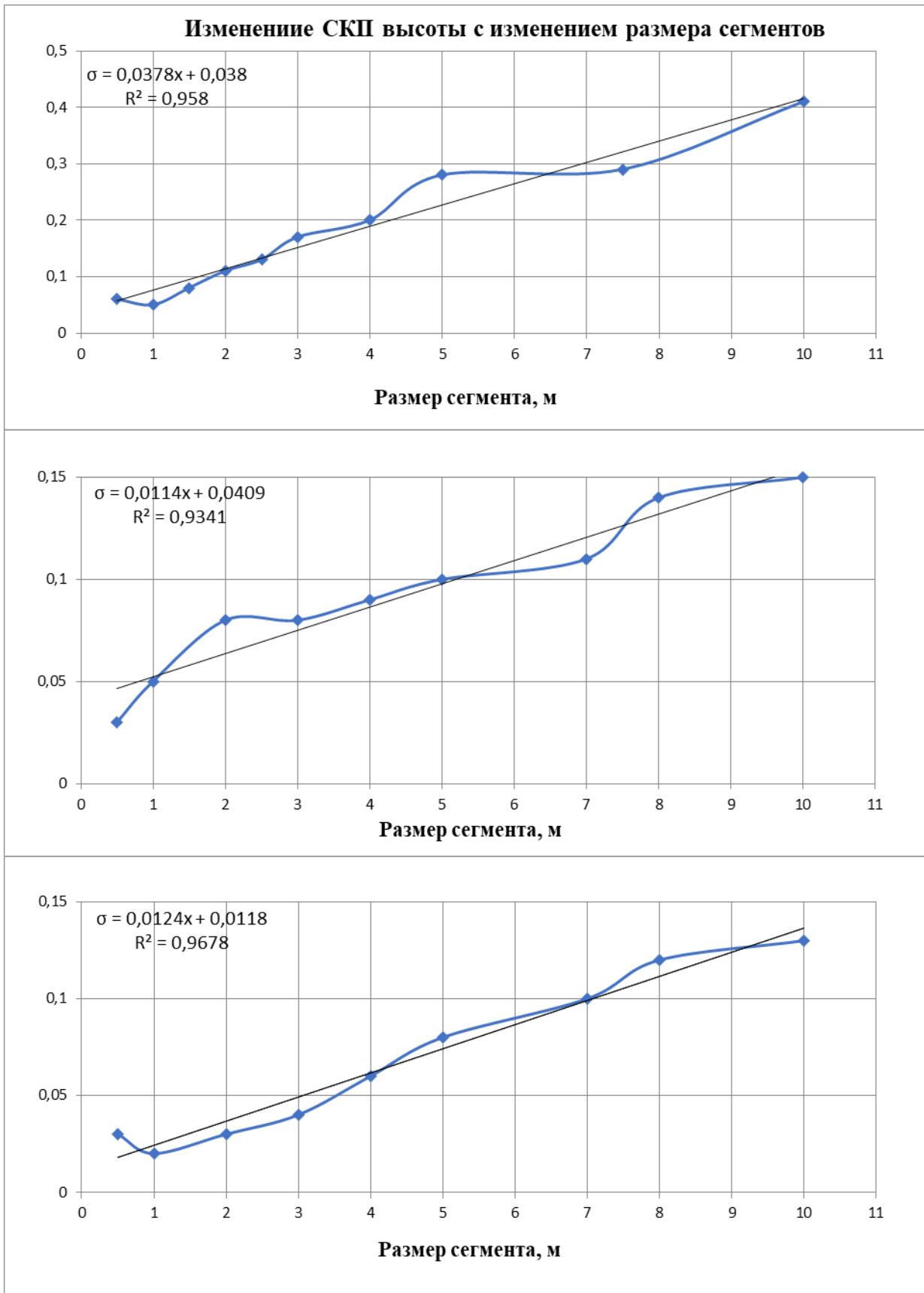


Рисунок 3.7 – Зависимость среднеквадратической погрешности высоты результатов моделирования от размера обрабатываемых сегментов (сверху-вниз): торфяного месторождения, угольного склада, россыпного месторождения золота

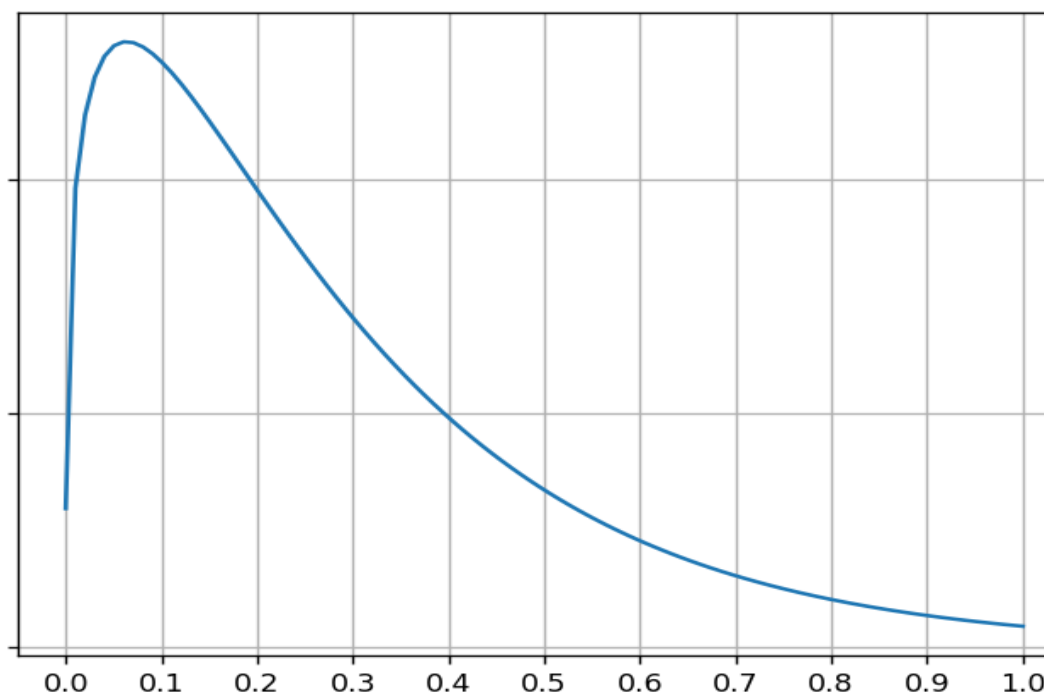


Рисунок 3.8 – Распределение СКП высоты для сегментов 5 м торфяного месторождения

Исходные данные были проверены на предмет соответствия:

- нормальному закону распределения;
- равномерному закону распределения;
- закону об экспоненциальном распределении;
- закону о β -распределении;
- закону о γ -распределении;
- закону о χ^2 -распределении.

3.4.1 Проверка гипотезы о нормальном распределении

Тест Шапиро-Уилка является тестом на проверку данных о гипотезе соответствия выборки нормальному закону распределения. Такое предположение является наиболее распространённым и используется во многих статистических тестах, включая регрессию, дисперсионный анализ, t-тесты и многие другие.

Однако, тест Шапиро-Уилка подходит для ограниченной выборки, размер которой не превышает 5000 значений. Так как большая часть моделей, построенных с размерами сегментов от 0,5 м до 5 м превосходит это значение, необходимо использовать другой метод статистического анализа данных.

В этом случае, предлагается использовать тест Андерсона-Дарлинга для подтверждения нулевой гипотезы о нормальном распределении. Тест Андерсона-Дарлинга заключается в сравнении критических значений, полученных в ходе проверки с полученным значением «статистика». Если критические значения превосходят полученные критерии – нулевую гипотезу отвергнуть нельзя. В противном случае, нулевая гипотеза отвергается.

Алгоритм работы теста Андерсона-Дарлинга для проверки гипотезы о принадлежности выборки к нормальному распределению:

- подготовка данных: формируется выборка данных, которую необходимо проверить на соответствие нормальному распределению;
- сортировка данных;
- вычисление «статистики» Андерсона-Дарлинга: для каждого элемента выборки вычисляются промежуточные значения и их накопленная сумма;
- вычисление р-значения (в тестах – «p-value»): статистики сравнивается с табличными значениями критической области при уровне значимости α ;
- вывод: если значение статистики теста превышает критическое значение, то нулевая гипотеза о нормальном законе распределения отвергается, и данные не подчиняются заданному закону распределения, в противном случае, нулевая гипотеза не отвергается.

Результаты, полученные в ходе проверки гипотезы отражены в таблице 3.2. Тест проводился в среде Python с использованием библиотеки SciPy.

Таблица 3.2 – Результаты теста Андерсона-Дарлинга для проверки гипотезы о нормальном распределении для моделей торфяного месторождения

| Значения α (уровни значимости) | 0,150 | 0,100 | 0,050 | 0,025 | 0,010 |
|---------------------------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Критические значения | 0,576 | 0,656 | 0,787 | 0,918 | 1,092 |
| Размер сегмента | Полученный критерий(статистика) | | | | |
| 1,0 | 28731,243930 | | | | |
| 2,5 | 3640,9728950 | | | | |
| 5,0 | 634,5191100 | | | | |
| 7,5 | 179,9117557 | | | | |

Продолжение таблицы 3.2

| | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Значения α (уровни значимости) | 0,150 | 0,100 | 0,050 | 0,025 | 0,010 |
| Критические значения | 0,576 | 0,656 | 0,787 | 0,918 | 1,092 |
| Размер сегмента | Полученный критерий(статистика) | | | | |
| 10,0 | 126,7838493 | | | | |

На основании таблицы 3.2 сделан вывод: для сформированных моделей гипотеза о соответствии СКП высот в сегментах нормальному закону распределения отвергается.

3.4.2 Проверка с помощью теста Колмогорова-Смирнова

Тест Колмогорова-Смирнова предназначен для проверки на распределение совокупностей количественных данных.

Алгоритм работы теста Колмогорова-Смирнова для проверки гипотезы о принадлежности выборки к определенному распределению:

- подготовка данных: формирование выборки данных, которую необходимо проверить на соответствие определенному теоретическому распределению;
- сортировка выборки;
- вычисление эмпирической функции распределения;
- построение функции распределения для заданного теоретического распределения;
- вычисление «статистики» Колмогорова-Смирнова: вычисляется максимальное отклонение между эмпирической и теоретической функциями распределения;
- вычисление p -значения: после вычисления статистики теста, сравниваем ее с табличными значениями критической области при уровне значимости α , чтобы определить, отвергаем ли нулевую гипотезу;
- вывод: если значение статистики теста превышает критическое значение, то нулевая гипотеза отвергается, и исходные данные не подчиняются заданному закону распределения.

Для достижения достоверности полученных данных объемы рассматриваемых выборок должен быть достаточно большим.

Тест проводился в среде Python с использованием библиотеки SciPy. В данном тесте, значением, с которым необходимо сравнить полученные в таблице 3.3 «p-value» является 0,05. Само значение p-value означает долю совпадения рассматриваемой нулевой гипотезы и сравнение его со значением, выше которого отвергать нулевую гипотезу нельзя (в конкретном данном случае – это 0,05). Другими словами, p-value – вероятность наступления события, которым является соответствие одной и выдвинутых гипотез распределения. Чем выше значение p-value – тем вероятнее соответствие исходных данных нулевой гипотезе.

Таблица 3.3 – Результаты теста Колмогорова-Смирнова для проверки гипотез о соответствии распределения СКП для моделей торфяного месторождения

| Размер сегмента | 1,0 | 2,5 | 5,0 | 7,5 | 10,0 |
|-------------------------------------|------------------|-----|-----------|----------|----------|
| Проверка гипотезы: | Значение p-value | | | | |
| - о равномерном распределении | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| - об экспоненциальном распределении | 0,0 | 0,0 | 2.73e-197 | 8.69e-71 | 5.07e-23 |
| - о бета-распределении | 0,0 | 0,0 | 4.90e-155 | 1.92e-46 | 5.07e-23 |
| - о гамма-распределении | 0,0 | 0,0 | 1.02e-83 | 1.16e-21 | 9.93e-10 |
| - о χ^2 -распределении | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |

На основании проведенного анализа СКП высот, значения «p-value» для всех размеров сегментов моделей:

- при проверке гипотезы о равномерном распределении равны нулю, что закономерно позволяет отвергнуть данную гипотезу;
- для проверки гипотезы об экспоненциальном распределении не превышают 0,05, что закономерно позволяет отвергнуть данную гипотезу;
- для проверки гипотезы о бета-распределении не превышают 0,05, что закономерно позволяет отвергнуть данную гипотезу;
- для проверки гипотезы о гамма-распределении не превышают 0,05, что закономерно позволяет отвергнуть данную гипотезу;
- для проверки гипотезы о χ^2 -распределении равны 1.

Таким образом, единственной гипотезой, с которой согласуются результаты распределений СКП высот в полученных сегментах модели, является гипотеза о χ^2 -распределении. Вероятность соответствия анализируемых данных нулевой гипотезе равна 1,0.

3.5 Выводы по главе 3

Метод оценки точности моделей, используемый при сравнении данных реальных измерений с результатами моделирования, основывается на формуле Бесселя, которая обеспечивает оценку дисперсии или стандартного отклонения на основе выборки, учитывая неопределенность и ограниченность данных выборки.

В конечном итоге, общая среднеквадратическая погрешность модели может быть вычислена на основе среднеквадратических погрешностей аппроксимации отдельных ячеек с учетом количества степеней свободы участвующих в их определении. Определяющие степени свободы рассчитываются как разность количества точек, попавших в сегменты, с количеством степеней свободы, участвующих в определении координат.

Таким образом, в результате вычислений получается значение СКП для каждого индивидуального сегмента и модели в целом.

Представленный метод моделирования, реализованный в виде пакета классов на языке программирования Python, использует сегменты цифровых моделей рельефа для описания облака точек с различными размерами, участвующими в обработке.

Представлены результаты моделирования ряда объектов фотограмметрической съемки, отличающихся по генезису, размеру, пересечённости рельефа.

Для оценки описания сегментов облака обозначенным методом создания цифровых моделей, предлагается использовать коэффициент детерминации R^2 . Карты распределения показателей коэффициентов детерминации и значений средних квадратических ошибок позволяют оптимизировать работу с моделью, улучшить точность и качество модели, оптимизировать планирование измерений и повысить доверие к модели. Высокие значения распределения R^2 означают, что

модель объясняет большую часть изменений высот в сегментах, а значит, модель подходит для прогнозирования значений высот в каждом из сегментов.

Визуальный анализ результатов распределения среднеквадратических отклонений показал, что большие значения СКО достигаются в участках с большими перепадами высот или резким изменением линейности рельефа, к которым, в частности, относятся нетипичные для общей модели структуры: автотранспорт, скопление поваленного леса, кустарники, что закономерно возможно исключить из цифровой модели горных выработок.

Таким образом, использование моделей с аппроксимацией полиномами первого порядка позволяет более точно описывать облако точек и проводить анализ качества аппроксимации облака модели на разных участках.

Методика замены сегмента облака точек плоскостью позволяет учитывать все точки облака в модели. Статистический анализ позволяет определить вероятность появления ошибок для каждого из размеров сегментов. Распределение ошибок модели объясняется присутствием малочисленных сегментов с грубыми ошибками в исходных данных, являющихся, по сути, случайными погрешностями, вызванными некорректным распознаванием точек облака при обработке фотоснимков.

Показано, что изменение СКП высоты модели линейно зависит от размера вовлекаемых в обработку сегментов. В пользу подобного вывода говорит высокое значения коэффициентов детерминации R^2 , варьирующихся от 0,93 до 0,97, полученные для всех типов рассматриваемых в эксперименте облаков точек.

Проведен ряд тестов для полученных значений СКП высот в моделях с целью определить, с каким законом распределения согласуются вычисленные значения. По результату анализов, отвергнуты гипотезы о нормальном, равномерно, экспоненциальном, бета- и гамма-распределении.

Результаты моделирования показывают, что:

- ошибка аппроксимации высоты стремится к минимальному своему значению;
- разница при обработке ячеек с шагом 0,5 и 1,0 м незначительна;

- с увеличением шага ячейки происходит «выполаживание» графика частоты и смещение модального значения ошибки в сторону увеличения;
- общее СКП высоты изменяется линейно с увеличением размера сегментов;
- распределение ошибок согласуется с χ^2 -распределением.

ГЛАВА 4 ПЕРСПЕКТИВЫ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ GRID

4.1 Разница предлагаемой методики формирования GRID и существующих подходов к созданию цифровых моделей

Как отмечено в главе 1, основная проблема применимости GRID для решения маркшейдерских задач состоит в отсутствии дифференциации изменения высоты в рассматриваемом сегменте, пикселе.

Для поиска преимуществ и недостатков в предлагаемой сегментированной модели в сравнении с его прямыми аналогами понадобится построить данные виды моделей по одному облаку точек (рисунки 4.1 и 4.2) с одинаковой степенью децимации, или в отсутствие таковой.

Оценку фактической точности результатов моделирования по трём видам построения моделей предлагается вести в соответствие с упомянутой в третьей главе методикой (таблица 4.1).

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.

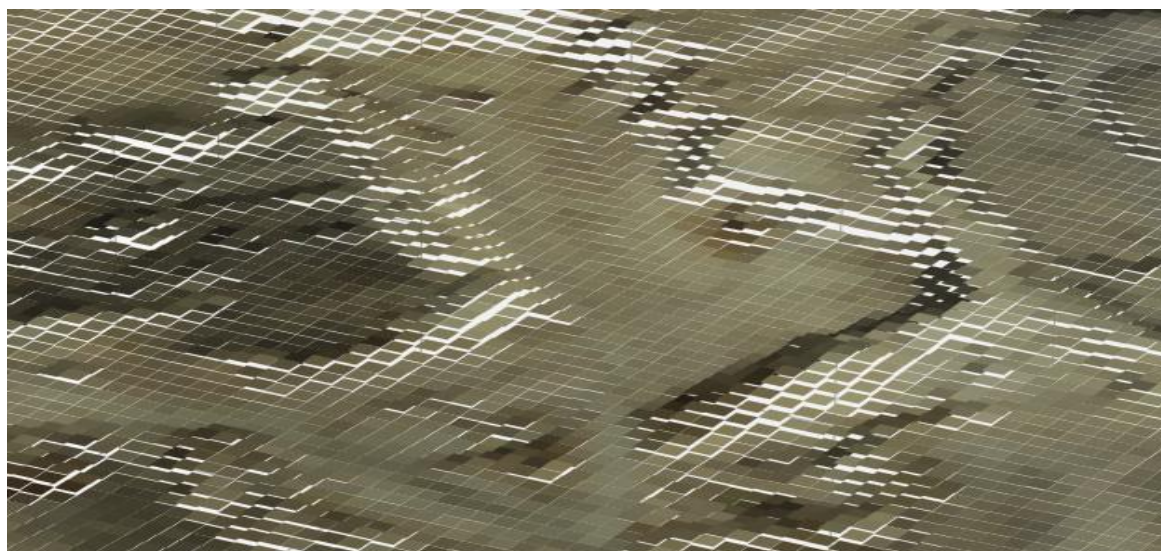


Рисунок 4.1 – Набор плоскостей GRID



Рисунок 4.2 – Набор плоскостей в предлагаемых GRID

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 4.1 - Сравнение предлагаемого способа формирования GRID и существующих способов создания моделей

| Сравниваемый параметр | TIN | GRID | GRID (предл.) |
|---|------------|------------|---------------|
| Исходное количество точек | 69 248 684 | | |
| Количество точек, участвующих в формировании модели | 231 032 | 69 248 684 | 69 248 684 |
| Количество сегментов сформированной модели (1м) | 454 947 | 278 449 | 278 449 |
| Объем модели, Мб | 35,2 | 22,3 | 31,2 |
| 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 4.3) 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.

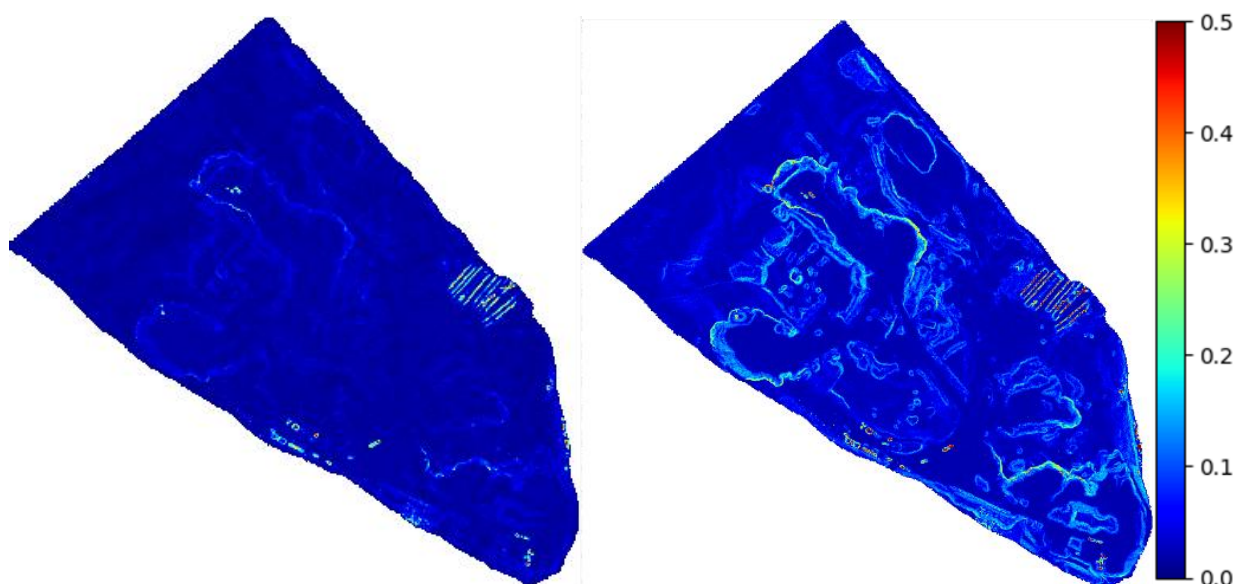


Рисунок 4.3 – Распределение СКП высоты в предлагаемом методе формирования GRID (слева) и классической GRID (справа)

Участки, в которых наблюдаются максимальные значения СКП точек от описывающей поверхности, совпадают для двух видов моделирования. При этом причина возникновения подобных отклонений обуславливается наличием больших перепадов высот, то есть резким изменением линейности рельефа внутри самих сегментов. 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. Исключив выбросы из построения цифровых моделей, значения СКП высоты по предлагаемой методике доходят до 0,22 м, в традиционных GRID описания высот доходят до 0,58 м.

Для иллюстрации предлагаемого способа формирования моделей, помимо месторождения «Плоское» целиком, подобные модели были рассчитаны и построены на основании локализованных данных участков россыпного месторождения золота Республики Саха (Якутия).

Первый участок представляет из себя склад золотоносных песков россыпного месторождения, подготовленных к промывке. Размеры участка моделирования составляют 110х100м (рисунок 4.4).

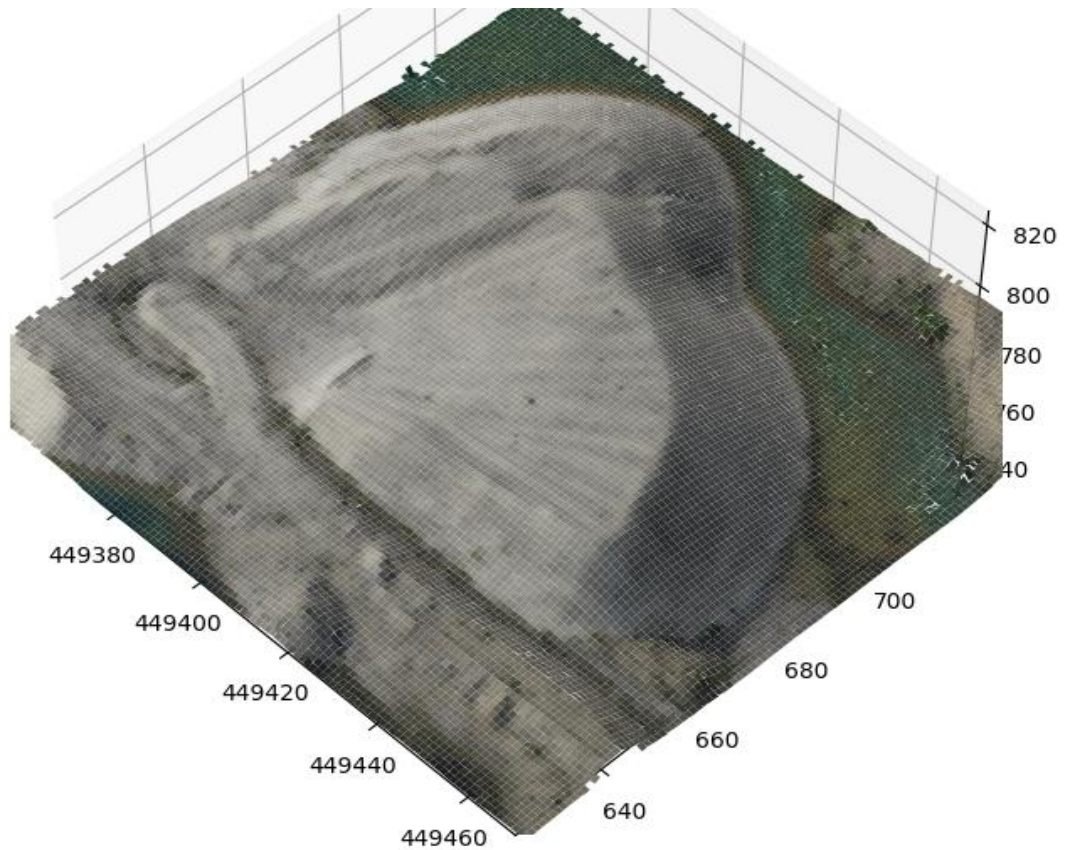


Рисунок 4.4 – Цифровая модель рельефа с сегментами 1м участка россыпного месторождения золота

Построенная гистограмма распределения ошибок (рисунок 4.5) показывает, что суммарно 96,0% всех ошибок не превышают пороговое значение 0,2м, а 99,9% всех ошибок не превышают значение 0,3 м.

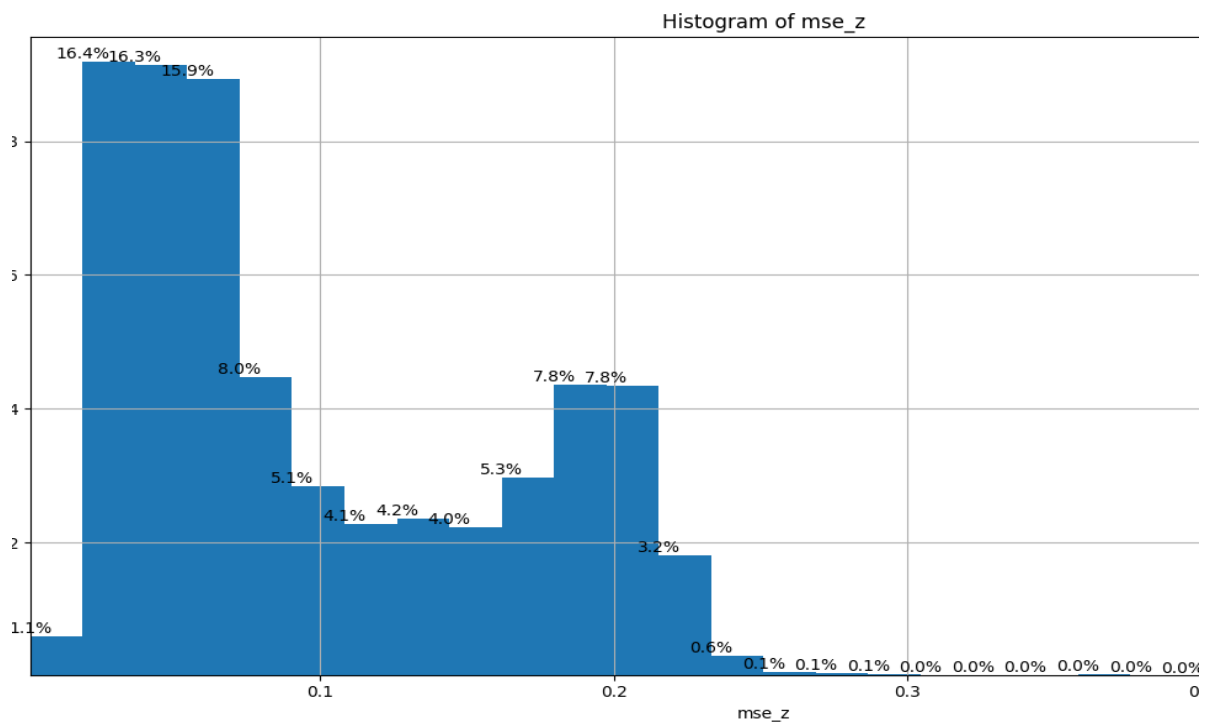


Рисунок 4.5 – Гистограмма распределения СКП высот модели

В то же время, наглядно показано, что большая часть ошибок аналогичного моделирования в традиционных GRID приходится на значения уклонов, даже с учётом линейного характера изменения высоты, что является, в целом, благоприятной средой для моделирования (рисунок 4.6).

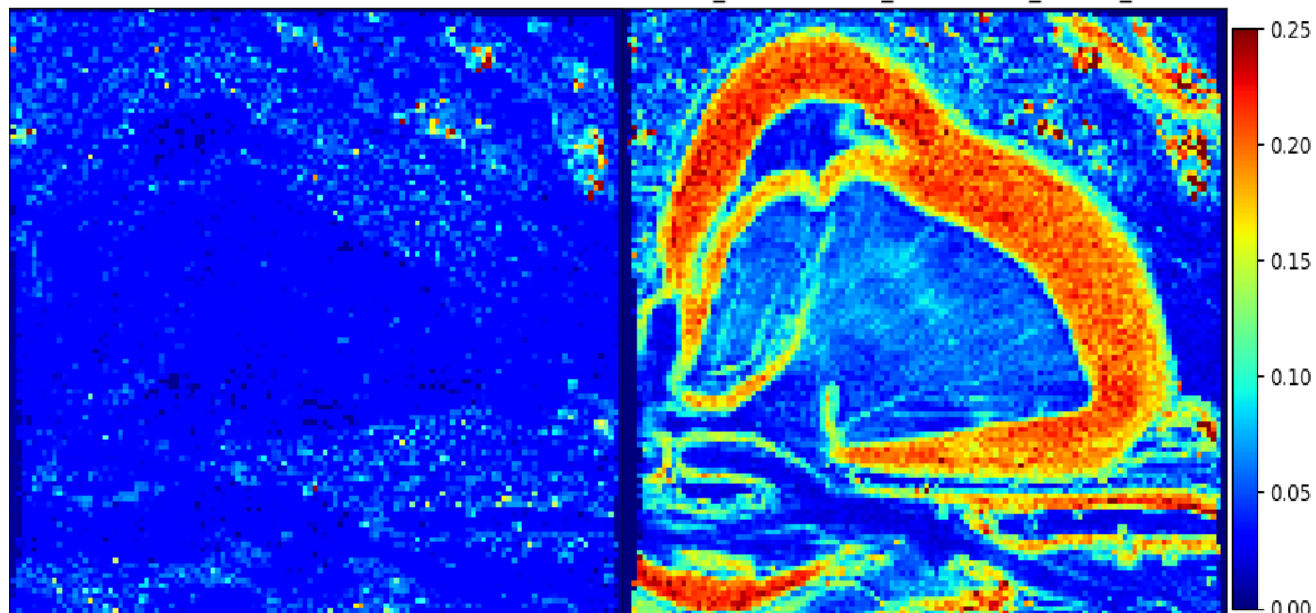


Рисунок 4.6 – Распределение СКП высоты в предлагаемом методе формирования GRID (слева) и классической GRID (справа)

Значение СКП высоты в предлагаемой методике на интересующих участках меньше и намного ближе к описывающей поверхности, нежели аналогичные в GRID.

Как было отмечено в предыдущей главе, высокие значения погрешности плоскости модели при малых размерах сегментов вызваны присутствием в выборке малочисленных сегментов с грубыми ошибками, достигающими в отдельных случаях до метра. При этом, сегменты с таким значением СКП при больших размерах сетки деления отсутствуют.

Это объясняется тем, что большая площадь внутри аппроксимируемого сегмента содержит помимо вертикально распределенных точек участки местности с более плоским рельефом, «выполаживающим» результирующую поверхность.

Внутри сегментов классических GRID-моделей наблюдается постоянство значений высот. Это приводит к тому, что СКП высоты внутри сегмента не может превышать определенного порогового значения. Это пороговое значение является

постоянным для конкретного размера сегмента модели и определяется разницей в высотах внутри сегмента в исходном облаке точек.

4.2 Анализ алгоритмов фильтрации с помощью предлагаемой методики формирования GRID моделей

Другим перспективным значением использования моделирования по сегментам с использованием полиномов первого порядка является оценка исходных данных.

В первой главе показано, что существующие алгоритмы упрощения облака точек, такие как фильтрация и разряжение, применяются программой вслепую, и не всегда могут давать адекватные, соответствующие действительности результаты после своего использования.

Вполне вероятным также становится наличие выбросов, полученных в ходе переотражения лазерных лучей или неправильного дешифрирования фотоснимков.

Предлагаемым методом моделирования становится возможным оценить работу фильтрации облака точек в сторонних программах, применяющихся для обработки. Как пример – облако после фильтрации на основе встроенного классификатора в Agisoft Metashape.

Данное облако (рисунок 4.7-а) было получено фотограмметрическим способом для участка месторождения, подготавливаемого к выемке. Как видно из рисунка, участок содержит большое количество «лишней» информации, например, кустарники, мелкие деревья, растительность. В то время, как маркшейдер должен получать необходимую информацию о поверхности земли, большое количество точек относятся именно к растительности. Фильтры-классификаторы в Metashape отбрасывают множество точек, приравненных к классам низкой и средней растительности (в программе – low и medium) и оставляют значения, приравненные к классам «дорога» и «земля» (рисунок 4.7-б).

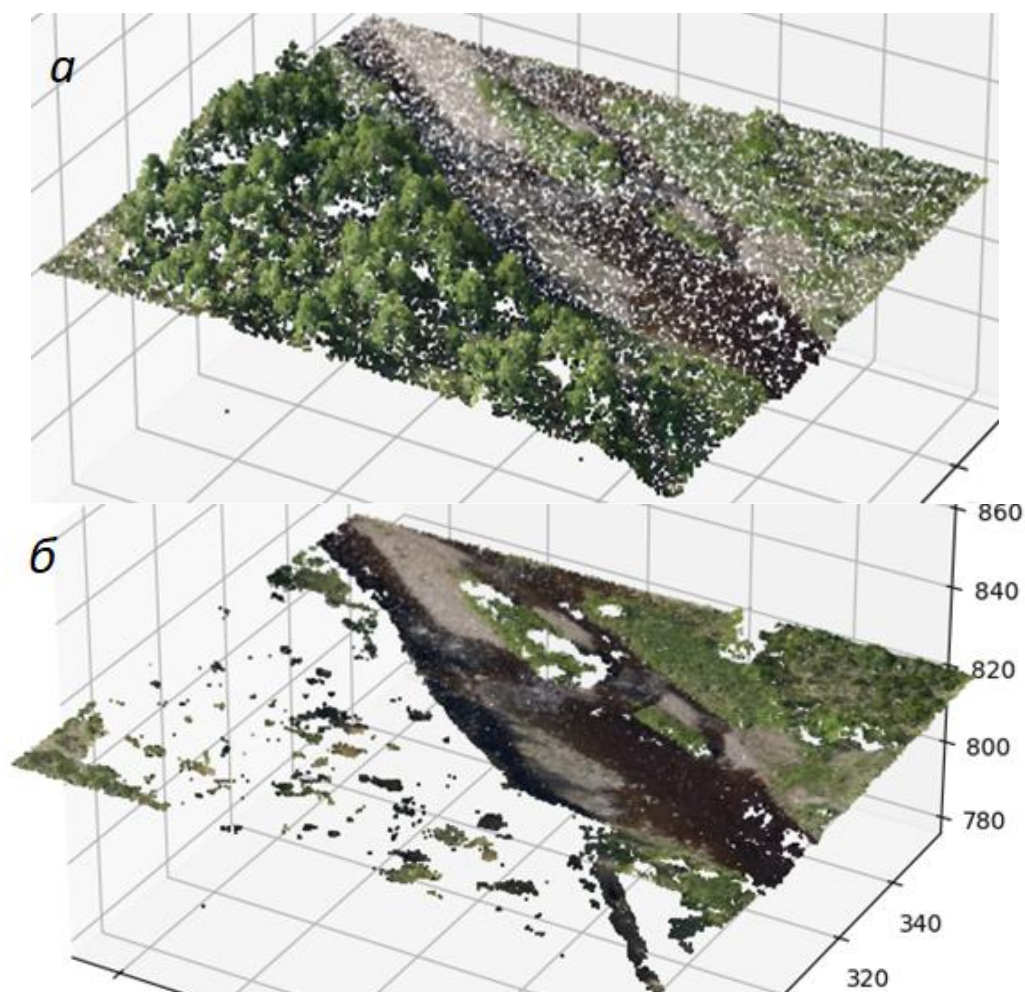


Рисунок 4.7 – а) исходное облако точек;
б) отфильтрованное по классам облако точек

Построение моделей по сегментам с использованием полиномов первого порядка выполнено для облака, не прошедшего фильтрацию (рисунок 4.8), а также прошедшего этот этап (рисунок 4.9).

Первая модель позволяет сделать общий вывод о том, что точки, относящиеся к деревьям, «перетягивают» на себя значение средней высоты в плоскости и резко увеличивают значение среднеквадратической погрешности аппроксимации.

Фильтрация и последующая сегментация позволяет выявить аномальные точки. Как следствие, полиномы первого порядка, которыми, по сути, и являются данные плоскости, ярко и наглядно выражают подобные выбросы.

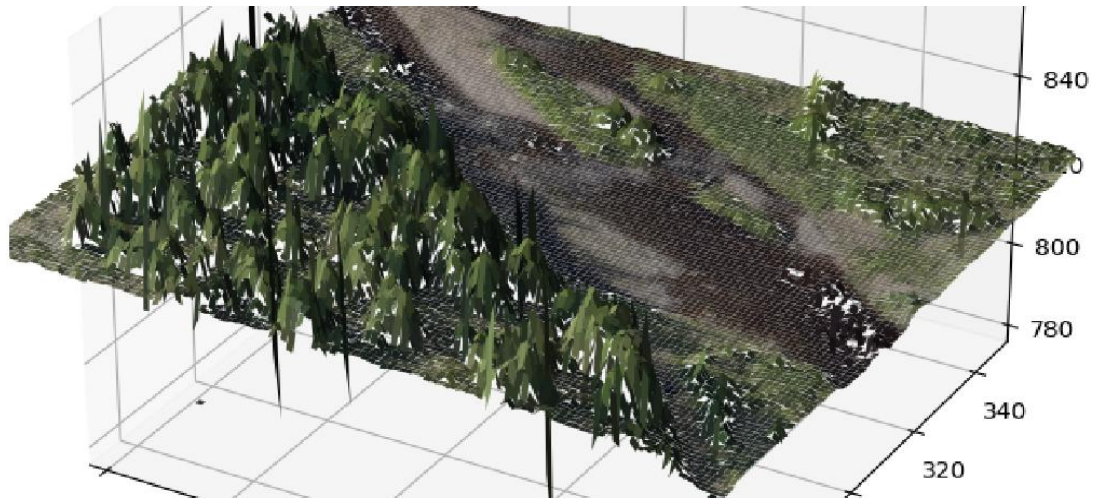


Рисунок 4.8 – Сегментированная модель исходного облака

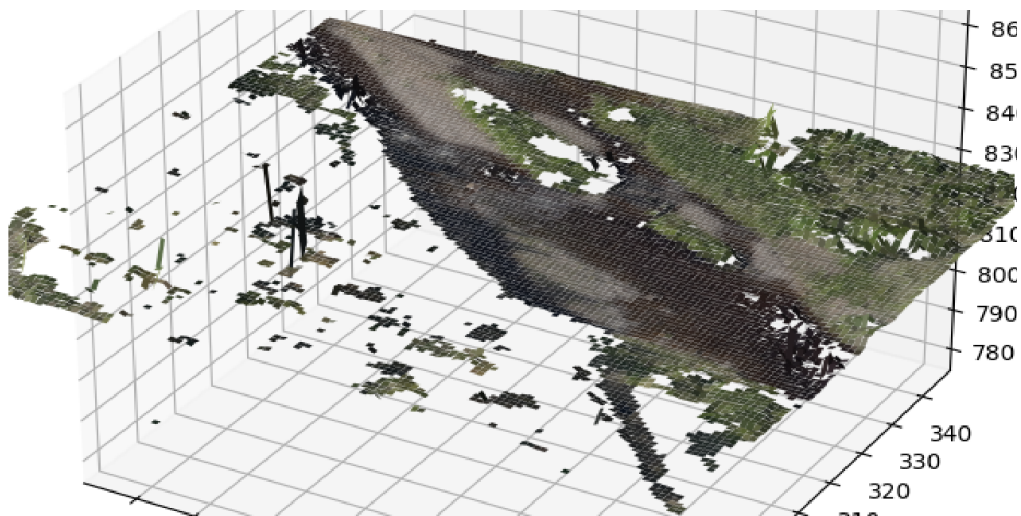


Рисунок 4.9 – Сегментированная модель отфильтрованного облака

Таким образом становится возможным найти и локализовать участки модели и исходного облака, где алгоритмы фильтрации проявили некорректную свою работу (рис. 4.10).

| id | name | x0 | y0 | step | avg_z | mse_z ^{^1} | n |
|-------|---------------------------------|----------|-----------|-------|-----------|---------------------|----|
| Фи... | Фильтр | Фильтр | Фильтр | Фи... | Фильтр | Фильтр | Фи |
| 5247 | VXL_VM1_s1_X449120.0_Y6410285.0 | 449120.0 | 6410285.0 | 1.0 | 820.69622 | 6.48225 | |
| 9722 | VXL_VM1_s1_X449131.0_Y6410321.0 | 449131.0 | 6410321.0 | 1.0 | 818.97891 | 1.84345 | |

Рисунок 4.10 – Сегменты, характеризующиеся большим выбросом в значении СКП отфильтрованного облака

Таким образом, данный метод может быть полезным инструментом для повышения качества обработки данных и получения более точных результатов.

Дальнейшие возможности применения метода моделирования по сегментам с использованием полиномов первого порядка могут включать разработку новых алгоритмов обработки облаков точек, которые будут учитывать специфику данных участков исходного облака. Например, можно разработать алгоритм, который будет автоматически выделять участки с растительностью или другими объектами, которые необходимо удалить из облака точек, чтобы получить более точные данные о поверхности земли.

Также возможно дальнейшее улучшение метода моделирования по сегментам с использованием полиномов первого порядка путем увеличения порядка полиномов, что позволит уточнить результаты аппроксимации и получить более точные модели.

4.4 Расчёт высоты полета судна по прогнозируемой ошибке модели к исходным данным

GSD (ground sampling distance) – отношение размера 1 метра на фотоснимке к соответствующему этому размеру одного пикселя матрицы фотоаппарата.

Фактически, этот размер является эквивалентом масштаба аэрофотосъемки классической фотограмметрии с аналоговыми приборами. GSD зависит от размеров матрицы фотокамеры, а также напрямую связан с высотой полёта воздушного судна (формула 16):

$$H = \text{GSD} * l_x, \quad (16)$$

где H – высота полёта;

l_x – линейный размер матрицы фотоаппарата, пкс;

GSD - отношение 1 метра на фотоснимке к пикселю матрицы фотоаппарата.

В случае аэрофотосъемки одной и той же камерой, l_x является постоянным значением. Тогда высота, на которой должно летать воздушное судно напрямую зависит от разрешения аэрофотосъемки.

Для того, чтобы понять, на какой высоте необходимо произвести аэрофотосъемку, выбрав в качестве целевой задачи – погрешность определения высоты в сегменте результирующей модели, а также размер этого сегмента,

нужно найти соотношение между разрешением аэрофотосъемки (GSD) и линейным размером сегментов (S). То есть первоначально нужно узнать, сколько пикселей растрового изображения укладываются в один сегмент будущей модели (формула 17):

$$M = \frac{S}{GSD}, \quad (17)$$

где M – количество пикселей растрового изображения в сегменте;

S – линейный размер одного сегмента.

Так, для камеры 1”CMOS, установленной на DJI Phantom 4 Pro рассчитаны эквивалентные значения M для разной высоты полёта воздушного судна:

Объединив (16) и (17), получим предположение о значении высоты (формула 18), на которой должно летать воздушное судно (приложение В).

$$H = \frac{S \cdot l_x}{M} \quad (18)$$

В случае, если специалист по проведению аэрофотосъемочных работ не владеет информацией по размеру матрицы фотоаппарата в пикселях, возможно использовать формулу для расчёта размера пикселя на местности, используя паспортные характеристики фотоаппарата (19):

$$GSD = \frac{H/f}{I.w/S.w}, \quad (19)$$

где H -высота полёта воздушного судна, мм;

f – фокусное расстояние фотокамеры, мм;

$I.w$ – ширина цифрового изображения, пкс;

$S.w$ – ширина матрицы фотоаппарата, мм.

Тогда формула 18 примет вид (формула 20):

$$H = \frac{S \cdot f \cdot I.w}{M \cdot S.w} \quad (20)$$

Подбираемый линейный размер сегментов GRID для цифровой модели открытых горных работ напрямую зависит от размера СКП определения высоты дискретной точки в сегменте модели.

Таким образом, становится возможным дать рекомендации по планированию аэрофотосъемочных работ (а конкретно – высоты полёта воздушного судна) в зависимости от среднеквадратической погрешности определения высоты по цифровой модели рельефа.

Также, в пользу увеличения порядка полиномов по предлагаемой методике формирования моделей играет факт существующих разрывов между полиномами первых порядков для смежных сегментов.

Несмотря на то, что получаемые модели аппроксимированы в соответствие с необходимыми допусками в значениях СКП высот, сплошность моделей нарушается за счёт природы подсчета положения дискретной плоскости. Подобную проблему возможно решить, произведя интерполяцию значений высот в узлах смежных сегментов, однако описание изменения высоты полиномами более высоких порядков в перспективе может исключить подобный недочёт.

4.5 Принципиальная возможность использования предлагаемого метода формирования цифровых моделей к результатам съемки лазерными сканерами

Проведён статистический анализ наполняемости моделей, построенных по аппроксимации облака. Рисунки 4.11 и 4.12 отражают распределение наполняемости данными сегментов для примера данных, полученных с помощью фотограмметрии (рисунок 4.11), и полученных с помощью наземных ЛСС (рисунок 4.12). Примеры графиков распределений СКП высоты в предлагаемом способе создания моделей отражены в приложении Б для примера данных, полученных с помощью ЛСС.

Используя наземные системы в качестве основы для создания облака точек, возможны возникновения разрывов в получаемой информации, что может дискретно ухудшить наполняемость данными будущих сегментов, что отражено на рисунке 4.13. А соответственно, некоторые из сегментов будет невозможно построить, так как аппроксимация плоскостью проходит минимум по трём точкам в сегменте.

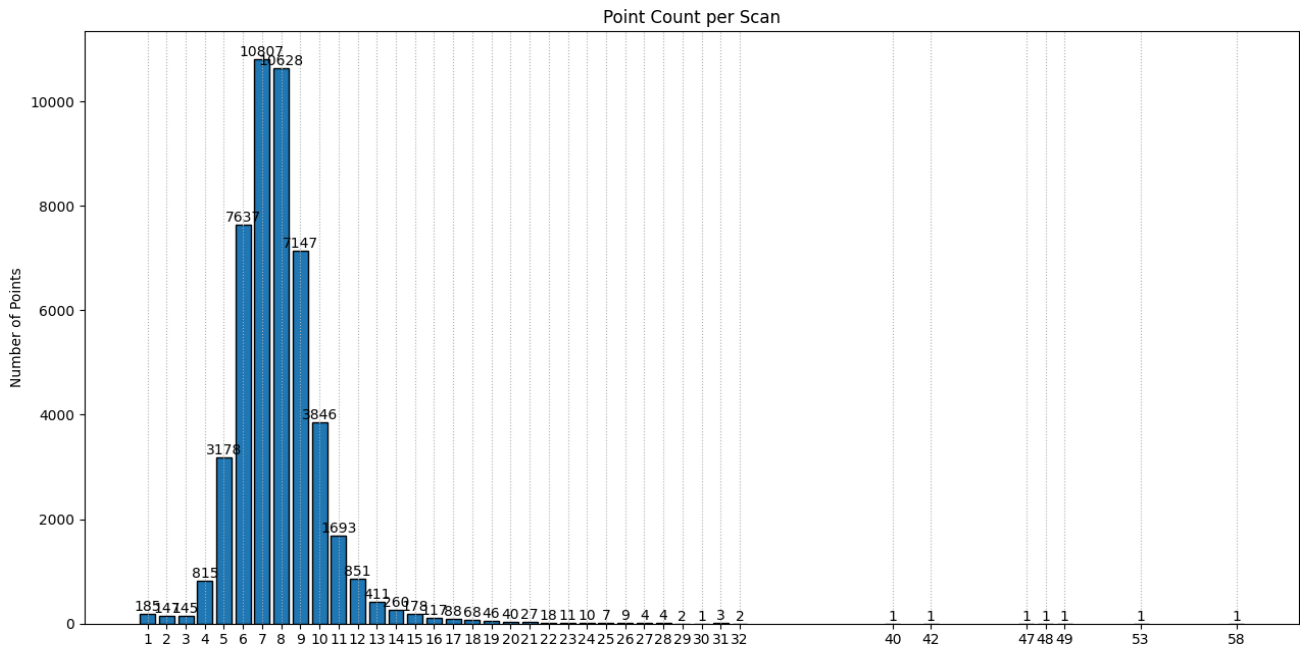


Рисунок 4.11 – Наполняемость сегментов точками для данных съемки с фотограмметрией с БЛА

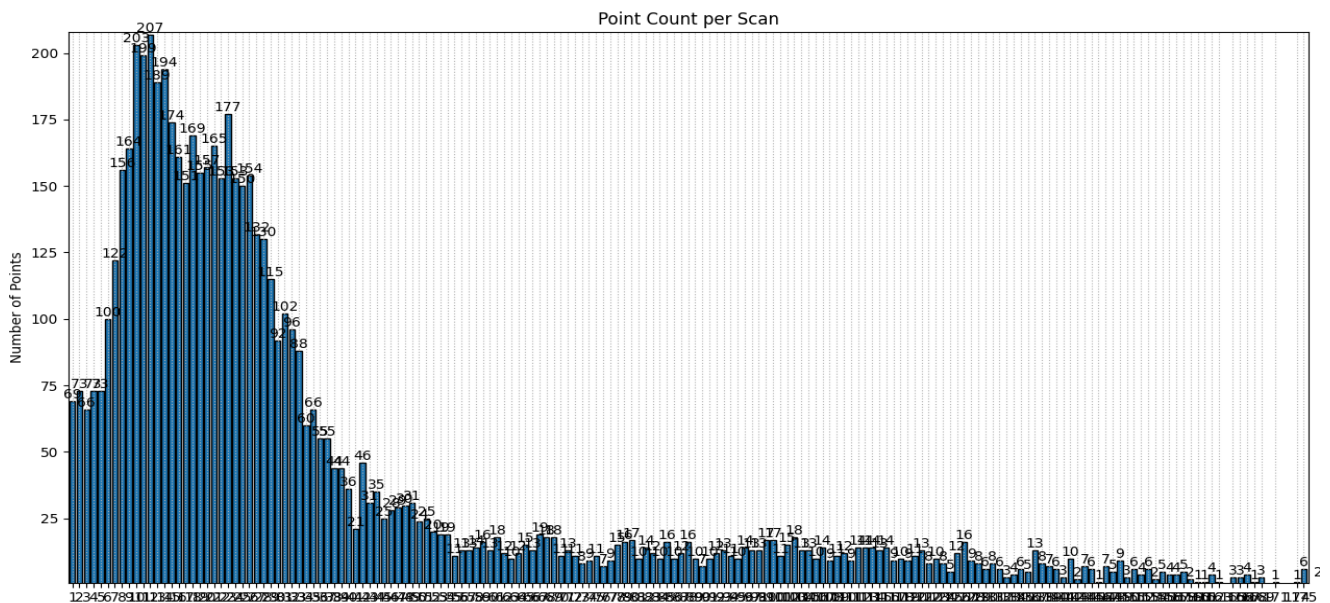


Рисунок 4.12 – Наполняемость сегментов точками для данных съемки ЛСС

Обойти данную проблему для наземной съемки с ЛСС возможно с помощью введения дополнительных точек стояния прибора и получив более плотное сканирование территории. Как следствие, это позволит насытить будущие сегменты достаточной информацией для построения плоскости и формирования моделей. В съемках с ЛСС, установленных на воздушных летательных аппаратах соответствующей проблемы не будет в силу природы сканирования: при съемке с БЛА плотность воздушного сканирования

приближена к постоянному значению. Оптимальное значение плотности точек задается на этапе планирования работ, из чего подбираются требуемые параметры полёта: высота, перекрытие между соседними линиями съемки и пр.

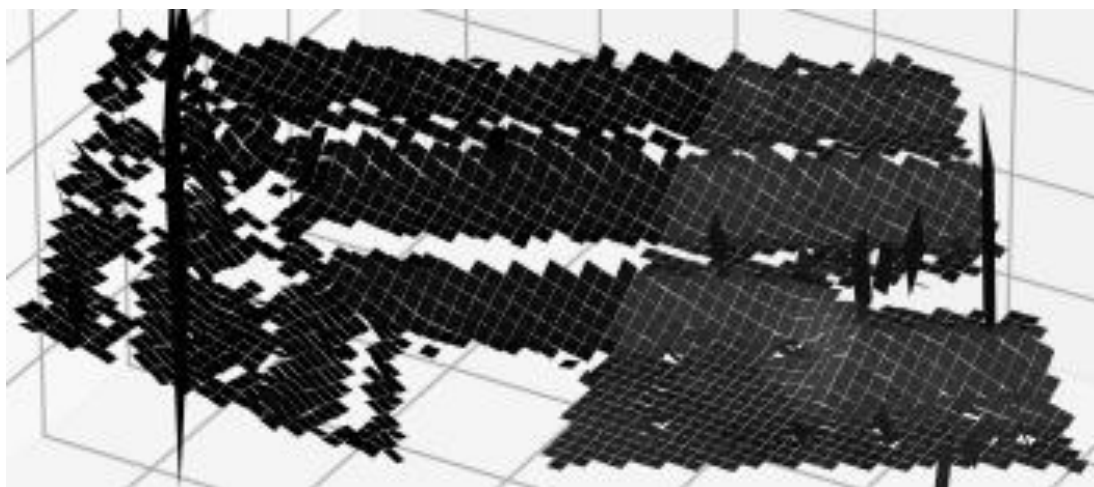


Рисунок 4.13 – Разрывы в цифровой модели рельефа, построенной по облаку точек, полученному с помощью ЛСС

4.6 Соответствие формируемых моделей нормативным и техническим допускам

1 сентября 2023г вступил в силу приказ Ростехнадзора «Об утверждении правил осуществления маркшейдерской деятельности» (далее – «Правила...»).

Контроль маркшейдерских дистанционных съемок с фотограмметрическим оборудованием, лидарами и дистанционным зондированием зависит от конкретного типа решаемых задач.

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 (пункт 101 «Правил...»).

В геодезии, допуск на вертикальную точность результатов съемки может составлять 0,2 метра и более, в соответствии с требованиями ГОСТ Р 59562-2021 «Съемка аэрофототопографическая. Технические требования»:

«9.2.17 Если ЦМР используется для отображения рельефа на топографической карте или плане, СКП высот ее точек не должна превышать

значений, указанных в таблице В.1 приложения В, а плотность – значений, указанных в таблице Г.1 приложения Г.»

Приложению Г данного ГОСТа соответствуют все цифровые модели рельефа в силу наполняемости сегментов дешифрованными точками: самое строгое значение в 2.7 точки на 1 м^2 площади рельефа легко достигается алгоритмами распознавания точек при фотограмметрической съемке с БЛА.

Вычленив из таблицы В.1 приложения В значения допустимых СКП высоты для планов с различным сечением рельефа, получим значения (таблица 4.2):

Таблица 4.2 – Допустимые значения СКП высот в зависимости от сечения рельефа создаваемого плана.

| Высота сечения рельефа - h, м | Допустимые СКП, м | | | |
|-------------------------------|-------------------|--------|--------|--------|
| | 0,31 h | 0,41 h | 0,48 h | 0,63 h |
| 0,5 | 0,16 | 0,21 | 0,24 | 0,32 |
| 1,0 | 0,31 | 0,41 | 0,48 | 0,63 |
| 2,0 | 0,62 | 0,82 | 0,96 | 1,26 |
| 2,5 | 0,78 | 1,03 | 1,20 | 1,58 |
| 5,0 | 1,55 | 2,05 | 2,40 | 3,15 |
| 10,0 | 3,10 | 4,10 | 4,80 | 6,30 |

Исходя из пункта 101 приказа Ростехнадзора «Об утверждении Правил осуществления маркшейдерской деятельности» для участвующих в моделировании размеры сегментов удовлетворяют:

Таблица 4.3 – Размеры сегментов модели торфяного месторождения, удовлетворяющие точности по высоте 0,4 м.

| Размер сегментов, м | σ , м | $3*\sigma$, м | Удовлетворяет $f_{\text{дон}} = 0,4 \text{ м}$ |
|---------------------|--------------|----------------|--|
| 0,5 | 0,06 | 0,18 | + |
| 1,0 | 0,06 | 0,18 | + |
| 1,5 | 0,08 | 0,24 | + |
| 2,0 | 0,11 | 0,33 | + |
| 2,5 | 0,13 | 0,39 | + |
| 3,0 | 0,17 | 0,51 | - |
| 4,0 | 0,20 | 0,6 | - |
| 5,0 | 0,28 | 0,84 | - |

Продолжение таблицы 4.3

| Размер сегментов, м | σ , м | $3*\sigma$, м | Удовлетворяет $f_{доп} = 0,4$ м |
|---------------------|--------------|----------------|---------------------------------|
| 7,5 | 0,29 | 0,87 | - |
| 10,0 | 0,41 | 1,23 | - |

Таблица 4.4 – Размеры сегментов модели угольного склада, удовлетворяющие точности по высоте 0,4 м.

| Размер сегментов, м | σ , м | $3*\sigma$, м | Удовлетворяет $f_{доп} = 0,4$ м |
|---------------------|--------------|----------------|---------------------------------|
| 0,5 | 0,03 | 0,09 | + |
| 1,0 | 0,05 | 0,15 | + |
| 2,0 | 0,08 | 0,24 | + |
| 3,0 | 0,08 | 0,24 | + |
| 4,0 | 0,09 | 0,27 | + |
| 5,0 | 0,1 | 0,3 | + |
| 7,0 | 0,11 | 0,33 | + |
| 8,0 | 0,14 | 0,42 | - |
| 10,0 | 0,15 | 0,45 | - |

Таблица 4.5 – Размеры сегментов модели россыпного месторождения, удовлетворяющие точности по высоте 0,4 м.

| Размер сегментов, м | σ , м | $3*\sigma$, м | Удовлетворяет $f_{доп} = 0,4$ м |
|---------------------|--------------|----------------|---------------------------------|
| 0,5 | 0,02 | 0,06 | + |
| 1,0 | 0,05 | 0,15 | + |
| 2,0 | 0,04 | 0,12 | + |
| 3,0 | 0,04 | 0,12 | + |
| 4,0 | 0,06 | 0,18 | + |
| 5,0 | 0,09 | 0,27 | + |
| 7,0 | 0,11 | 0,33 | + |
| 8,0 | 0,18 | 0,54 | - |
| 10,0 | 0,19 | 0,57 | - |

Таблица 4.6 – Размеры сегментов, удовлетворяющие требованиям ГОСТ Р 59562-2021.

| Размер сегментов | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 7,5 | 10,0 |
|------------------------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Допустимые СКП высоты | Удовлетворяет допускам: | | | | | | | | |
| | Значение $3*\sigma$ | | | | | | | | |
| Торфяное месторождение | 0,18 | 0,18 | 0,33 | 0,39 | 0,51 | 0,60 | 0,84 | 0,87 | 1,23 |
| 0,16 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 0,21 | + | + | - | - | - | - | - | - | - |

Продолжение таблицы 4.6

| Размер сегментов | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 7,5 | 10,0 |
|-------------------------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Допустимые СКП высоты | Удовлетворяет допускам: | | | | | | | | |
| | Значение $3*\sigma$ | | | | | | | | |
| Россыпное месторождение | 0,06 | 0,15 | 0,12 | 0,12 | 0,18 | 0,27 | 0,33 | 0,54 | 0,57 |
| 4,1 | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 4,8 | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| 6,3 | + | + | + | + | + | + | + | + | + |

Таким образом, на основании таблиц 4.3 – 4.5 сделан вывод о возможном применении предлагаемого способа формирования цифровых моделей к определению высотного положения бровок уступов на открытых горных работах. Причем, чем более пересечённой является местность – тем меньше должны быть сегменты для моделирования, что отражается на примере сравнения модели торфяного месторождения с россыпным, характеризующимся более плоским рельефом. На основании таблицы 4.6 сделан вывод о потенциальном применении предлагаемых моделей в качестве основы для создания топографических карт и планов с отображением на них рельефа местности.

4.7 Выводы по главе 4

Описаны результаты моделирования по облаку точек, который использует сегментированные модели. Для проверки пригодности результатов моделирования необходимо соблюдать установленные допуски на точность цифровых моделей открытых горных выработок, а также исходить из целевой задачи, для которой такая модель применяется.

Таким образом, показано, что методика аппроксимации части исходного облака в сегментах модели соответствует требованиям маркшейдерских задач, а результаты моделирования могут быть использованы для достижения более точного и эффективного результата при маркшейдерском обеспечении открытых горных работ.

Представлены преимущества предлагаемого способа описания высоты GRID-моделей при сравнении с существующими способами описания высот в

модели. В частности, продемонстрированы положительные моменты в части использования самих исходных данных (полный учёт исходного облака точек), экономии объема получаемой информации, необходимой для хранения по сравнению с TIN, более точное описание высоты по сравнению с классическими GRID-моделями.

Для поиска преимуществ и недостатков проведено сравнение методик создания цифровых моделей – по предлагаемой методике аппроксимации сегментов модели и традиционных, построенных по одному исходному облаку точек.

Анализ карт распределения ошибок построенных моделей показывает, что преобладающая часть модели определена с значениями СКП, не превышающими 10 см, и в некоторых случаях доходит до 22 см.

Исследование наполняемости данных позволяет сделать вывод о том, что с уменьшением размера сегмента, меньшее количество точек будет попадать в каждый из них. При этом, такой вывод не является проблемой для съемки с помощью фотограмметрических устройств или лазерных сканирующих систем, установленных на БЛА в силу большой подробности получаемых данных и «площадного» покрытия объекта съемки облаком точек.

Однако, если говорить о наземной съемке такими системами, возможны большие пробелы в информации о снимаемом объекте в силу наличия слепых зон для съемочного оборудования в момент проведения работ. Как следствие, это может привести к потере информативности и достоверности в создаваемых моделях равной дискретности.

Представлено преимущество использования предлагаемого способа в части описания исходных данных: возможно оценить результат алгоритмов фильтрации исходного облака. Так, сохраненные точки облака, незаметные человеческому глазу при работе на вычислительной технике, не попадающие под разряжение по алгоритму ближайших соседей, становятся видны на формируемых моделях. В силу природы предлагаемого способа, становится возможным локализовать участки моделирования и найти подобные аномальные выбросы. Этот факт

позволяет использовать предлагаемую методику для оценки эффективности алгоритмов фильтрации и повысить достоверность облаков точек.

Представлена возможность применения предлагаемого способа формирования цифровых моделей к определению высотного положения бровок уступов на открытых горных работах, а также к использованию предлагаемых моделей в качестве основы для создания топографических карт и планов с отображением на них рельефа местности.

Приведены рекомендации по планированию аэрофотосъемочных маркшейдерских работ на открытых горных работах. Так, при выполнении съемок с БЛА необходимо задаваться ошибкой определения высоты в сегменте для прогнозирования высоты полёта воздушного судна. Величину прогнозируемой ошибки следует подбирать исходя из размера сегментов моделирования.

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 отнесённые 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 аэрофотосъёмочных 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блищенко, А.А., Формирование и обоснование методики применения геодезического квадрокоптера для маркшейдерских съемок на карьерах : дис. ... канд. тех. наук: 25.00.16 / Блищенко А.А. – СПб., 2022. – 125 с.
2. Блищенко, А.А. Оценка точности измерения складов на горных объектах с помощью беспилотной технологии / Блищенко А.А., Лобынцев А.К., **Сухов А.К.**// Маркшейдерский вестник. – 2020. № 4 (137). – с. 23-27.
3. 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
4. Выстрчил, М.Г. Обоснование способов внешнего ориентирования цифровых моделей горных выработок, получаемых по результатам съемок лазерно-сканирующими системами: дис.... канд. тех. наук : 25.00.16 / Выстрчил М. Г. - Санкт-Петербург, 2014. - 167 с.
5. Выстрчил, М.Г. Повышение качества фотограмметрической съемки на близких дистанциях/ Выстрчил М.Г., **Сухов А.К.**, Попов А.В., Губа С.А. // Сборник тезисов XVI международного форум-конкурса “АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ” под эгидой ЮНЕСКО 17-19 июня 2020 г. – с.363
6. Выстрчил, М.Г. Подходы к упрощенному представлению трехмерных данных для решения задач горного дела и геомеханики / Выстрчил М.Г., Гусев В.Н., **Сухов А.К.** // 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.
7. РД 03-243-98. Инструкция по безопасному ведению работ и охране недр при разработке месторождений солей растворением через скважины с поверхности // Госгортехнадзор России . Москва, 2004.

8. РД 07-603-03. Инструкция по производству маркшейдерских работ // Госгортехнадзор России. Москва, 2004.

9. 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.

10. Чермошенцев, А.Ю. Применение наземной фотограмметрической съемки для анализа деформаций сооружений / А.Ю. Чермошенцев, Л. Кутилова // Intereхро GEO-Siberia 6(1):200-204 , DOI: 10.33764/2618-981X-2020-6-1-200-204

11. Agrawal, P. et al. Pixels to voxels: modeling visual representation in the human brain / P. Agrawal, D. Stansbury, J. Malik, J. L. Gallant //arXiv preprint arXiv:1407.5104. – 2014.

12. Agüera-Vega, F. ENHANCING UAV-SfM 3D MODELS ACCURACY OF UNIQUE HERITAGE INFRASTRUCTURES. CASE OF ISABEL II DAM, ALMERIA, SPAIN / F. Agüera-Vega, P. Martínez-Carricondo, F. Carvajal-Ramírez //The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2023. – Т. 48. – С. 51-57.

13. Al-Eryani, O. K. F. A. et al. Merging Grid Technology with Oil Fields Power Distribution: A Smart Grid Approach / O. K. F. A. Al-Eryani, G. Kayakutlu, Z. Bektas , M. Ö. Kayalica, //European Conference on Artificial Intelligence. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. – С. 187-193.

14. Ananenko E., Bakhaeva S. The reason analysis of the overburden rock dumps deformation //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2021. – Т. 315. – С. 01001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131501001>

15. Barrera, D., Horizontal accuracy assessment of a novel algorithm for approximate a surface to a DEM / D. Barrera Rosillo, M. J. Ibáñez Pérez, S. Eddargani, R. C. Romero Zaliz //Proceedings of the ICA. – Copernicus GmbH, 2021. – Т. 4. – С. 1-5.

16. Bakhaeva, S.P., Ananenko E.V. Conditions of dry-placed filling in footwall / Bakhaeva S.P., Ananenko E.V.// MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. - 2020. -№ 9. - C. 55-64. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-55-64.

17. Benton, D. J., Close-range photogrammetry in underground mining ground control / D. J. Benton, A. J. Chambers, M. J. Raffaldi, S. A. Finley, M. J. Powers //Remote Sensing System Engineering VI. – SPIE, 2016. – T. 9977. – C. 14-26.

18. Bernatowicz, K., Robust imaging habitat computation using voxel-wise radiomics features / K Bernatowicz, F Grussu, M Ligerio, A Garcia //Scientific reports. – 2021. – T. 11. – №. 1. – C. 20133.

19. Błaszczak-Bąk, W. Optimization algorithm and filtration using the adaptive TIN model at the stage of initial processing of the ALS point cloud / W. Błaszczak-Bąk, A. Janowski, W. Kamiński // Canadian journal of remote sensing. – 2011. – T. 37. – №. 6. – C. 583-589.DOI: 10.5589/m12-001

20. Bookhagen, B., Beyond vertical point accuracy: Assessing inter-pixel consistency in 30 m global DEMs for the arid Central Andes / B. Bookhagen, B. Purinton //Frontiers in Earth Science. – 2021. – T. 9. – C. 758606.

21. Borisov, M., Analiza kvaliteta 3D modela zasnovanih na digitalnoj fotogrametriji/ M. Borisov, R. Simić, V.M. Petrović, M. Milinčić //Geodetski glasnik. – 2021. – T. 55. – №. 52. – C. 5-26.

22. Braslavs'ka, O., ROL' GEODEZIÏ U ROZVITKU DRON-TEKHOLOGIJ DLYA VIMIRYUVANNYA, KARTOGRAFUVANNYA TA MONITORINGU TERITORIJ / O. Braslavs'ka, T. Dec', T. Rozhi //Prostorovij rozvitok. – 2023. – №. 5. – C. 268-285.

23. Bryson, M. Kite aerial photography for low-cost, ultra-high spatial resolution multi-spectral mapping of intertidal landscapes/ M. Bryson, M. Johnson-Roberson, R.J. Murphy //PloS one. – 2013. – T. 8. – №. 9. – C. e73550.

24. Bui, L.K. Rigorous propagation of LiDAR point cloud uncertainties to spatially regular grids by a TIN linear interpolation / L.K. Bui, C.L. Glennie, P.J. Hartzell //IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2021. – T. 19. – C. 1-5. doi: 10.1109/LGRS.2021.3134587.

25. Burman, D. D. Topography of hippocampal connectivity with sensorimotor cortex revealed by optimizing smoothing kernel and voxel size / D. D. Burman //Plos one. – 2021. – T. 16. – №. 12. – C. e0260245.

26. Canto, L. F. C. Geodetic monitoring on onshore wind towers: Analysis of vertical and horizontal movements and tower tilt / L. F. C. Canto, A. de Seixas //Structural Monitoring and Maintenance. – 2021. – T. 8. – №. 4. – C. 309-328.

27. Carnevali, L. Colourimetric Calibration for Photography, Photogrammetry, and Photomodelling Within Architectural Survey / L. Carnevali, F. Lanfranchi, L. Martelli, M. Martelli //The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2021. – T. 46. – C. 151-158.

28. Cawood, A. J. LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models / A. J. Cawood, C. E. Bond, J. A. Howell, R. W. Butler, Y. Totake //Journal of structural geology. – 2017. – T. 98. – C. 67-82.

29. Che, H. A novel semi-resolved CFD-DEM method with two-grid mapping: Methodology and verification / H. Che, C. Windows-Yule, C. O'Sullivan, J. Seville //AIChE Journal. – 2024. – T. 70. – №. 2. – C. e18321.

30. Chen, X. Computed tomography simulation projection acquisition method of artistic relics based on voxel model / X. Chen, L. Wang, F. Ding //Multimedia Tools and Applications. – 2023. – C. 1-17.

31. Choi, Y. GCP-Based Automated Fine Alignment Method for Improving the Accuracy of Coordinate Information on UAV Point Cloud Data / Y. Choi, S. Park, S. Kim //Sensors. – 2022. – T. 22. – №. 22. – C. 8735.

32. Di Angelo, L. A Photogrammetry Reconstruction of Emissario Romano in Capistrello / Di Angelo L., Di Stefano P., Guardiani E.A - DOI: 10.1007/978-3-030-91234-5_93 // International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange. – Cham: Springer International Publishing, 2021. – C. 920-929.

33. Dong, Z. Real-time voxelization for complex polygonal models / Z. Dong, W. Chen, H. Bao, H. Zhang // 12th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, 2004. PG 2004. Proceedings. – IEEE, 2004. – C. 43-50. URL: <https://www.researchgate.net/publication/252533918> (дата обращения: 28.05.2023)

34. Donnellan, A. Improving access to geodetic imaging crustal deformation data using GeoGateway / A. Donnellan, J. Parker, M. Heflin, M. Glasscoe //Earth Science Informatics. – 2021. – C. 1-13.

35. Donovan, E. A Cloud Update of the DeLone and McLean Model of Information Systems Success / E. Donovan, I.R. Guzman, M. Adya, W. Wang//J. Inf. Technol. Manag. – 2018. – T. 29. – №. 3. – C. 23-34.

36. Duvanov, S. Algorithms for converting voxel 3D models into polygonal ones / S. Duvanov, I. Baranova // Visnyk of Zaporizhzhya National University Physical and Mathematical Sciences. 14-21. 10.26661/2786-6254-2023-2-02.

37. Erdélyi, J. DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR POINT CLOUD FILTRATION / J. Erdélyi - DOI:10.5593/sgem2022/2.1/s10.37. // International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. – 2022. – T. 22. – №. 2.1. – C. 323-330.

38. Ferrara, G. Adaptation of the Global Geoid Model EGM2008 on Campania Region (Italy) based on geodetic network points / G. Ferrara, C. Parente //The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2021. – T. 46. – C. 145-150.

39. Fonstad, M. A. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement / M.A. Fonstad, J.T. Dietrich, B.C. Courville // Earth surface processes and Landforms. – 2013. – T. 38. – №. 4. – C. 421-430.

40. França, R. M. THE INFLUENCE OF THE DEFLECTION OF THE VERTICAL ON GEODETIC SURVEYS IN BRAZIL / R. M. França, I. Klein, L. A. K. Veiga //Boletim de Ciências Geodésicas. – 2021. – T. 27.

41. Fu, S. Effects of DEM grid size on predicting soil loss from small watersheds in China / S. Fu, L. Cao, B. Liu, Z. Wu, M.R. Savabi//Environmental Earth Sciences. – 2015. – T. 73. – C. 2141-2151.

42. Fukunaga, A. Underwater photogrammetry captures the initial recovery of a coral reef at Lalo Atoll / A. Fukunaga, K.H. Pascoe, A.R. Pugh, R.K. Kosaki //Diversity. – 2022. – T. 14. – №. 1. – C. 39.

43. Gao, X. Stability analysis of grid-following and grid-forming converters based on state-space model / X. Gao, D. Zhou, A. Anvari-Moghaddam // 2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022-ECCE Asia). – IEEE, 2022. – C. 422-428. doi: 10.1109/TIA.2024.3353158.

44. Gezawa, A. S. A voxelized point clouds representation for object classification and segmentation on 3D data / A.S. Gezawa, Z.A. Bello, Q. Wang, L. Yunqi // The Journal of Supercomputing. – 2022. – T. 78. – №. 1. – C. 1479-1500.

45. Gorte, B. NAVIGATION in INDOOR VOXEL MODELS / B. Gorte, S. Zlatanova, F. Fadli // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 4(2/W5), 2019, C. 279–283. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-279-2019>

46. Grabowski, J. Comparison of sub-grid drag laws for modeling fluidized beds with the coarse grain DEM–CFD approach / J. Grabowski, N. Jurtz, V. Brandt // Computational Particle Mechanics. – 2023. – C. 1-20. <https://doi.org/10.1007/s40571-023-00671-1>

47. Guan, B. et al. Voxel-based quadrilateral mesh generation from point cloud // Multimedia Tools and Applications. – 2020. – T. 79. – C. 20561-20578. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-08923-5>

48. Guo, J. Application of Satellite Altimetry in Marine Geodesy and Geophysics / J. Guo, C. Hwang, X. Deng // Frontiers in Earth Science. – 2022. – T. 10. – C. 910562.. doi: 10.3389/feart.2022.910562

49. Halim, A. E. A. Assessment of Difference in Structure from Motion for Stockpile Volume Estimation using UAV Approach / A.E.A. Halim, A.A. Ab Rahman, K.N.A. Maulud // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2023. – T. 1240. – №. 1. – C. 012002. DOI: 10.1109/ITIS50118.2020.9321065.

50. Hastaoglu, K.O. Investigation of the effect of height difference and geometry of GCP on position accuracy of point cloud in UAV photogrammetry / K.O. Hastaoglu, H.S. Kapicioglu, Y. Gül, F. Poyraz // Survey Review. – 2023. – T. 55. – №. 391. – C. 325-337. DOI: 10.1080/00396265.2022.2097998

51. He, C. Voxel set transformer: A set-to-set approach to 3d object detection from point clouds / C. He, R. Li, S. Li, L. Zhang//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2022. – C. 8417-8427.

52. He, L. Three-dimensional hydrogeological modeling method and application based on TIN-GTP-TEN / L. He, J. Zhang, S. Chen, M. Hou, J. Chen //Earth Science Informatics. – 2022. – C. 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00727-x>

53. Hideghéty, A. Real-Time Deformation Measurements Using Single Image Photogrammetry / A. Hideghéty – DOI: 10.1088/1757-899x/1203/2/022027 //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021. – T. 1203. – №. 2. – C. 022027.

54. Hosseini-Saber, S. M. A. Bessel light beam for a surgical laser focusing telescope—a novel approach / S.M.A. Hosseini-Saber, E. A. Akhlaghi, A. Saber //Lasers in Medical Science. – 2024. – T. 39. – №. 1. – C. 33. <https://doi.org/10.1007/s10103-023-03968-y>

55. Ilyushin, P.Y. Investigation of the digital elevation model creating accuracy depending on the terrestrial laser scanning density / P. Y. Ilyushin, M. S. Kraev, N. S. Malinina //Geodesy and Cartography. – 2023. – T. 991. – №. 1. – C. 15-19. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-991-1-15-19

56. James, M.R. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application / M.R. James, S. Robson //Journal of Geophysical Research: Earth Surface. – 2012. – T. 117. – №. F3. doi:10.1029/2011JF002289

57. Jasienski, J.P. On the Development of Timber Structures Based on 3D Interactive Vector-Based Graphic Statics (VGS) / J. P. Jasienski, D. Zastavni, S. Rasneur - DOI:10.1007/978-981-99-8405-3_6 // The International Conference on Computational Design and Robotic Fabrication. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. – C. 65-77.

58. Jeng, U.L. A new redefinition of geodetic and plane coordinates on UTM geodetic markers/ U.L. Jeng, A.H. Md Din, K.M. Idris, M.H. Hamden //Built Environment Journal (BEJ). – 2020. – T. 17. – №. 3. – C. 9-23. <https://doi.org/10.24191/bej.v17isi.11741>

59. Jeon, G. Impacts of Urban Morphology on Seasonal Land Surface Temperatures: Comparing Grid-and Block-Based Approaches / G. Jeon, Y. Park, J.M. Guldman // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2023. – T. 12. – №. 12. – C. 482. <https://doi.org/10.3390/ijgi12120482>

60. Jiang, X. Recognizing vector graphics without rasterization / X. Jiang, L. Liu, C. Shan, Y. Shen//Advances in Neural Information Processing Systems. – 2021. – T. 34. – C. 24569-24580. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.03281>

61. Jiang, Z. TopologyFormer: structure transformer assisted topology reconstruction for point cloud completion / Z. Jiang, C. Gao, P. Li, C. Liu, F. Liu, L. Zhu //Multimedia Tools and Applications. – 2024. – C. 1-29. <https://doi.org/10.1007/s11042-024-18136-9>

62. Joswig, M. DELONE TRIANGULATIONS / M. Joswig, T. Theobald //Polyhedral and Algebraic Methods in Computational Geometry. – 2013. – C. 99-116. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4817-3_7

63. Kadaj, R. The method of detection and localization of configuration defects in geodetic networks by means of Tikhonov regularization / Kadaj R. //Reports on Geodesy and Geoinformatics. – 2021. – T. 112. – №. 1. – C. 19-25. <https://doi.org/10.2478/rgg-2021-0004>

64. Karavaev, A.S. Generation of adaptive hexahedral meshes from surface and voxel geometric models / A.S. Karavaev, S.P. Kopysov //Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye Nauki. – 2023. – T. 33. – №. 3. – C. 534-547. DOI: 10.35634/vm230310.

65. Kasi, V. A novel method to improve vertical accuracy of CARTOSAT DEM using machine learning models / V. Kasi, P.K. Yeditha, M. Rathinasamy, R. Pinninti // Earth Science Informatics. – 2020. – T. 13. – C. 1139-1150., <https://doi.org/10.1007/s12145-020-00494-1>

66. KC, S. Advancements of Geodetic Activities in Nepal: A Review on Pre-and Post-2015 Gorkha Earthquake Eras with Future Directions / S. KC, T.D. Acharya //Remote Sensing. – 2022. – T. 14. – №. 7. – C. 1586. <https://doi.org/10.3390/rs14071586>

67. Kikon, N. Quantitative assessment of land surface temperature and vegetation indices on a kilometer grid scale / N. Kikon, D. Kumar, S.A. Ahmed //Environmental Science and Pollution Research. – 2023. – C. 1-23.<https://doi.org/10.1007/s11356-023-27418-y>

68. Kim, D.P. Analysis of Mine Change Using 3D Spatial Information Based on Drone Image / D.P. Kim, S.B. Kim., K.S. Back //Sustainability. – 2022. – T. 14. – №. 6. – C. 3433. DOI: 10.3390/ SU14063433

69. Kladochnyi, B. Analysis of Seasonal Changes of Zenith Tropospheric Delay Components Determined by Data of Two Pairs of Aerological and GNSS Stations / B. Kladochnyi, F. Zablotskyi, O. Serant //International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2022». – European Association of Geoscientists & Engineers, 2022. – T. 2022. – №. 1. – C. 1-5.

70. Kurkov., V.M. DEM accuracy research based on unmanned aerial survey data / V.M. Kurkov., A.S. Kiseleva // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2020. – T. 43. – C. 1347-1352. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-1347-2020>

71. Kurniawati, N. T. Application of Data Mining to Design MNH Graphic & Art Product Sales Composition / N.T. Kurniawati, T.H. Hilman, A.S. Pramudita //Antivirus: Jurnal Ilmiah Teknik Informatika. – 2023. – T. 17. – №. 2. – C. 239-251. DOI: 10.35457/antivirus.v17i2.3029

72. Kuzin, A.A. Coordinate method for determining position in geodetic monitoring of cracks / Kuzin A. A., Palkin P. O. – DOI:10.1088/1742-6596/1728/1/012010 //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – T. 1728. – №. 1. – C. 012010.

73. Ladivanov, F. Accuracy Analysis of Indonesian Geoid Model Based On Grids / Ladivanov F., Munthaha R. I. S., Aryadi Y. - DOI 10.1088/1755-1315/731/1/012037 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2021. – T. 731. – №. 1. – C. 012037.

74. LaMore, T. et al. Validation of high resolution subcortical MRI signal using voxel to voxel histology to neuroimaging correlation in AD continuum: advancing neuroimaging biomarker tools for early AD staging //Alzheimer's & Dementia. – 2023. – T. 19. – C. e080106. <https://doi.org/10.1002/alz.080106>

75. Lemieux, J. F. et al. CICE on a C-grid: new momentum, stress, and transport schemes for CICEv6. 5 //Geoscientific Model Development Discussions. – 2024. – T. 2024. – C. 1-42. <https://doi.org/10.5194/gmd-2023-239>, in review, 2024.

76. Li, D. Three-dimensional Visualization of Overhead Transmission Lines with UAV-LiDAR Point Cloud Data / D. Li, T. Wang, Y. Jing, S. Li, J. Li, R. Niu - DOI: 10.1088/1742-6596/2310/1/012015 // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2023. – T. 2661. – №. 1. – C. 012034.

77. Li, H. An Improved Conditional Euclidean Clustering Point Cloud Segmentation Method / H. Li //International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. – C. 655-662. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2730-2_62

78. Li, J. Three-Dimensional Reconstruction of Railway Bridges Based on Unmanned Aerial Vehicle–Terrestrial Laser Scanner Point Cloud Fusion / J. Li, Y. Peng, Z. Tang, Z. Li // Buildings. – 2023. – T. 13. – №. 11. – C. 2841. <https://doi.org/10.3390/buildings13112841>

79. Li, Q. Sequential isolation of microplastics and nanoplastics in environmental waters by membrane filtration, followed by cloud-point extraction / Q. Li, Y. Lai, S. Yu, P. Li, X. Zhou, L. Dong, X. Liu //Analytical Chemistry. – 2021. – T. 93. – №. 10. – C. 4559-4566. DOI: 10.1021/acs.analchem.0c04996

80. Li, W. A Method for Optimal Estimation of Shoreline in Cliff Zones Based on Point Cloud Segmentation and Centroid Calculation / W. Li, H. Liu, C. Qin //Applied Sciences. – 2022. – T. 12. – №. 21. – C. 10810. <https://doi.org/10.3390/app122110810>

81. Li, Y. DEM modelling of granular materials with real shape morphology / Y. Li, M. Otsubo, R. Kuwano, S. Nadimi //SEISAN KENKYU. – 2021. – T. 73. – №. 5. – C. 355-358. DOI: 10.11188/seisankenkyu.73.355

82. Li, Y. Point cloud classification algorithm based on the fusion of the local binary pattern features and structural features of voxels / Y. Li, Y. Luo, X. Gu, D. Chen, F. Gao, F. Shuang // Remote Sensing. – 2021. – T. 13. – №. 16. – C. 3156. <https://doi.org/10.3390/rs13163156>

83. Lin, L. UAV based estimation of forest leaf area index (LAI) through oblique photogrammetry / L. Lin, K. Yu, X. Yao, Y. Deng, Z. Hao, Y. Chen, N. Wu //Remote Sensing. – 2021. – T. 13. – №. 4. – C. 803. <https://doi.org/10.3390/rs13040803>

84. Liu X. The Influence of Load Model on the Accuracy of Power Grid Simulation / X. Liu, H. Li, X. Li, S. Li, N. Gong, S. Yang - DOI 10.1007/978-981-19-1528-4_109 // The proceedings of the 16th Annual Conference of China Electrotechnical Society: Volume I. – Singapore : Springer Singapore, 2022. – C. 1063-1075.

85. Liu, C. A Method for Generating Occupancy Grid Maps Based on 4D Millimeter-Wave Radar Point Cloud Characteristics. / C. Liu, X. Lu, D. Xue, L. Wu // SAE Technical Paper, 2023. – №. 2023-01-7047. DOI: 10.5220/0006667300700081

86. Long, J. 3D point cloud denoising method based on K nearest neighbor and absolute phase recovery / J. Long, Z. Du, J. Zhang, Y. Ding - DOI: 10.1117/12.2688747 //Third International Computing Imaging Conference (CITA 2023). – SPIE, 2023. – T. 12921. – C. 540-547.

87. Lu, H. Extraction of Elemental Information of Slope Steps in Open Pit Mine Based on UAV / H. Lu, P. Liang, X. Yao, L. Zhang - DOI: 10.1088/1742-6596/2651/1/012119 //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2023. – T. 2651. – №. 1. – C. 012119.

88. Lv, C. Approximate intrinsic voxel structure for point cloud simplification / C. Lv, W. Lin, B. Zhao // IEEE Transactions on Image Processing. – 2021. – T. 30. – C. 7241-7255. <https://doi.org/10.1109/TIP.2021.3104174>

89. Malkin, Z. A new equal-area isolatitudinal grid on a spherical surface / Z. Malkin // The Astronomical Journal. – 2019. – T. 158. – №. 4. – C. 158.

90. Mancini, F. Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments / F. Mancini, M. Dubbini, M. Gattelli, F. Stecchi, S. Fabbri // Remote sensing. – 2013. – T. 5. – №. 12. – C. 6880-6898. DOI: 10.3390/rs5126880

91. Marchenko, S. SIMULATION MODEL OF AN ADAPTIVE DIGITAL FILTER BASED ON THE LEAST SQUARES METHOD / S. Marchenko, O. Sotnyk, O. Syanov, V. Lytvynenko // Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences) - 2. – 2023- C. 140-148. DOI 10.31319/2519-2884.43.2023.15.

92. Marinier, J. Earthquake recurrence model for the Colombia–Ecuador subduction zone constrained from seismic and geodetic data, implication for PSHA / J. Marinier, C. Beauval, J.M. Nocquet // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2021. – T. 111. – №. 3. – C. 1508-1528. <https://doi.org/10.1785/0120200338>

93. Marra, R. Examining quasar absorption-line analysis methods: the tension between simulations and observational assumptions key to modelling clouds / R. Marra, C.W. Churchill, G.G. Kacprzak // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2024. – T. 527. – №. 4. – C. 10522-10537. <https://doi.org/10.1093/mnras/stad3735>

94. Matsui, T. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique / T. Matsui, K.C. San // Soils and foundations. – 1992. – T. 32. – №. 1. – C. 59-70. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.32.59>

95. Meyer, T. 3D Point Clouds in PostgreSQL/PostGIS for Applications in GIS and Geodesy / T. Meyer, A. Brunn // GISTAM. – 2019. – C. 154-163. DOI: 10.5220/0007840901540163

96. Miers, J.C. Voxel-based modeling of transient material removal in machining / J.C. Miers, T. Tucker, T. Kurfess, C. Saldana //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – T. 116. – №. 5-6. – C. 1575-1589. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07545-x>/Published

97. Mrówczyńska, M. The model identification of buildings horizontal displacements with the use of a free geodetic network / M. Mrówczyńska, J. Sztubecki, Z. Zięba - DOI 10.1088/1755-1315/906/1/012056 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2021. – T. 906. – №. 1. – C. 012056.

98. Mukherjee, S. Evaluation of topographic index in relation to terrain roughness and DEM grid spacing / S. Mukherjee, R.D. Garg //Journal of Earth System Science. – 2013. – T. 122. – C. 869-886. <https://doi.org/10.1007/s12040-013-0292-0>

99. Munasinghe, N. Voxel-based sensor placement for additive manufacturing applications / N. Munasinghe, T. Romeijn, G. Paul // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2023. – T. 34. – №. 2. – C. 739-751. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01823-x>

100. Nishikawa, N. Adaptive Topological Feature via Persistent Homology: Filtration Learning for Point Clouds / N. Nishikawa, Y. Ike, K. Yamanishi //Advances in Neural Information Processing Systems. – 2024. – T. 36.

101. Nonogaki, S. Voxel modeling of geotechnical characteristics in an urban area by natural neighbor interpolation using a large number of borehole logs / S. Nonogaki, S. Masumoto, T. Nemoto // Earth Science Informatics. – 2021. – T. 14. – №. 2. – C. 871-882. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00600-x>/Published

102. Petras, V. Generalized 3D fragmentation index derived from lidar point clouds / V. Petras, D.J. Newcomb, H. Mitsova //Open Geospatial Data, Software and Standards. – 2017. – T. 2. – №. 1. – C. 1-14. <https://doi.org/10.1186/s40965-017-0021-8>

103. Piris, G. 3DHIP-calculator—A new tool to stochastically assess deep geothermal potential using the heat-in-place method from voxel-based 3D geological models / G. Piris, I. Herms, A. Griera, M. Colomer, G. Arnó //Energies. – 2021. – T. 14. – №. 21. – C. 7338. <https://doi.org/10.3390/en14217338>

104. Prio, M.H. Implementation of dynamic radius outlier removal (dror) algorithm on lidar point cloud data with arbitrary white noise addition / M. H. Prio, S. Patel, G. Koley - doi: 10.1109/VTC2022-Spring54318.2022.9860643 //2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference:(VTC2022-Spring). – IEEE, 2022. – C. 1-7.
105. Pružinec, F. A Point-Cloud Solar Radiation Tool / F. Pružinec, R. Ďuračiová // Energies. – 2022. – T. 15. – №. 19. – C. 7018. <https://doi.org/10.3390/en15197018>
106. Purinton, B. Beyond vertical point accuracy: Assessing inter-pixel consistency in 30 m global DEMs for the arid Central Andes / B. Purinton, B. Bookhagen //Frontiers in Earth Science. – 2021. – T. 9. – C. 758606.<https://doi.org/10.3389/feart.2021.758606> ISSN 2296-6463
107. Pyysalo, U. Voxel approach to landscape modelling / U. Pyysalo, T. Sarjakoski //The International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing, Beijing, China. – 2008. – T. 37. – C. 563-568. <https://www.researchgate.net/publication/228885576>
108. Qi, J. Feature preserving and uniformity-controllable point cloud simplification on graph / J. Qi, W. Hu, Z. Guo – DOI: 10.48550/arXiv.1812.11383 //2019 IEEE International conference on multimedia and expo (ICME). – IEEE, 2019. – C. 284-289.
109. Qin, P. GVnet: Gaussian model with voxel-based 3D detection network for autonomous driving / P. Qin, C. Zhang, M. Dang //Neural Computing and Applications. – 2022. – T. 34. – №. 9. – C. 6637-6645. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06061-z>
110. Rajendiran, N. Cloud Segmentation, Validation of Weather Data, and Precipitation Prediction Using Machine Learning Algorithms. / N. Rajendiran, S. Sebastian, L.S. Kumar //Arab. J. Sci Eng (2024). <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08611-0>
111. Razali, A.F. POINT CLOUD REGISTRATION AND ACCURACY FOR 3D MODELLING-A REVIEW / A. F. Razali, M. F. M. Ariff, Z. Majid //Management. – T. 6. – №. 24. – C. 131-138. DOI: 10.35631/JISTM.624014

112. Ríos-Castro, D. Grid-Connected Converter With Grid-Forming and Grid-Following Modes Presenting Symmetrical and Asymmetrical Fault Ride-Through Capability / D. Ríos-Castro, D. Pérez-Estévez, J. Doval-Gandoy // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2024. DOI: 10.23919/EPE23ECCEurope58414.2023.10264403

113. Rodríguez-Avi, J. Finite Mixture Models in the Evaluation of Positional Accuracy of Geospatial Data / J. Rodríguez-Avi, F.J. Ariza-López // Remote Sensing. – 2022. – T. 14. – №. 9. – C. 2062. <https://doi.org/10.3390/rs14092062>

114. Roh, M. Comparative Analysis of Forecasting Accuracy and Model Performance for Development of Coastal Wave Forecasting System Based on Unstructured Grid / M. Roh, S.M. Oh, P.H. Chang, H.S. Kang // Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers. – 2022. – T. 34. – №. 6. – C. 188-197. <https://doi.org/10.9765/KSCOE.2022.34.6.188>

115. Romero, N. Delaunay Triangulation Validation Using Conformal Geometric Algebra / N. Romero, R. Barrón-Fernández // Computación y Sistemas. – 2016. – T. 20. – №. 4. – C. 789-798. DOI: 10.13053/cys-20-4-2387

116. Rosnell, T. Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadcopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera / T. Rosnell, E. Honkavaara // Sensors. – 2012. – T. 12. – №. 1. – C. 453-480. DOI: 10.3390/s120100453

117. Rupnik, E. Oblique multi-camera systems-orientation and dense matching issues / E. Rupnik, F. Nex, F. Remondino // EuroCOW. – 2014. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W1-107-2014>.

118. Sa, J. Depth grid-based local description for 3D point clouds / J. Sa, X. Zhang, C. Zhang, Y. Song, L. Ding // Signal, Image and Video Processing. – 2024. – C. 1-18. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3614172/v1>

119. Sadeghi, S.H. Accuracy of sedimentgraph modeling from topography map scale and DEM mesh size / S.H. Sadeghi, M.M. Dashtpajardi // International Soil and Water Conservation Research. – 2019. – T. 7. – №. 2. – C. 138-149. DOI: 10.1016/j.iswcr.2019.01.002

120. Saif, W. Smartphone-based photogrammetry assessment in comparison with a compact camera for construction management applications / W. Saif, A. Alshibani // *Applied Sciences*. – 2022. – T. 12. – №. 3. – C. 1053. <https://doi.org/10.3390/app12031053>

121. Sanz-Ablanedo, E. Accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used / E. Sanz-Ablanedo, J.H. Chandler, J.R. Rodríguez-Pérez // *Remote Sensing*. – 2018. – T. 10. – №. 10. – C. 1606. <https://doi.org/10.3390/RS10101606>

122. Sawires, R. Seismic and geodetic crustal moment-rates comparison: new insights on the seismic hazard of Egypt / R. Sawires, J.A. Peláez, F. Sparacino, A.M. Radwan // *Applied Sciences*. – 2021. – T. 11. – №. 17. – C. 7836. <https://doi.org/10.3390/app11177836>

123. Schulte, E. Bounds for the Regularity Radius of Delone Sets / Schulte E. // *2023 Fall Southeastern Sectional Meeting*. – AMS.

124. Sehnal, M. GGOS's Geodetic Information Portal: Linking Geodesy and Society / M. Sehnal, L. Sánchez, D. Angermann // *EGU General Assembly Conference Abstracts*. – 2023. – C. EGU-1281. DOI: 10.13140/RG.2.2.13135.36004

125. Setiawan, R.D. High-Level Modeling of Building Structure Using Octagonal Castellated Beam and Steel Plate Shear Wall System (SPSW) / R.D. Setiawan, K. Koespiadi // *IJTI International Journal of Transportation and Infrastructure* eISSN 2597-4769 pISSN 2597-4734. – 2020. – T. 3. – №. 2. – C. 68-78. <https://doi.org/10.29138/ijti.v3i2.1059>

126. Shi, H. Robust Total Least Squares Estimation Method for Uncertain Linear Regression Model / H. Shi, X. Zhang, Y. Gao, S. Wang, Y. Ning // *Mathematics*. – 2023. – T. 11. – №. 20. – C. 4354. DOI: 10.3390/math11204354

127. Skvortsov, A.V. Construction of a delone triangulation in linear time / Skvortsov A.V. // *Russian physics journal*. – 1999. – T. 42. – №. 3. – C. 346-350. <https://doi.org/10.1007/BF02508321>

128. Soja, B. Advancing Geodesy with Artificial Intelligence: Opportunities, Challenges, and Perspectives within GGOS / B. Soja, M. Kaselimi, M. Asgarimehr // AGU Fall Meeting 2023. – ETH Zurich, Institute of Geodesy and Photogrammetry, 2023. DOI: 10.3929/ethz-b-000648046.

129. Sokoła-Szewioła, V. Validation of the accuracy of geodetic automated measurement system based on GNSS platform for continuous monitoring of surface movements in post-mining areas / V. Sokoła-Szewioła, Z. Siejka // Reports on Geodesy and Geoinformatics. – 2021. – T. 112. – №. 1. – C. 47-57. <https://doi.org/10.2478/rgg-2021-0007>

130. Spyranis, A. Accuracy of robotic and frame-based stereotactic neurosurgery in a phantom model / A. Spyranis, T. Wobbecke, D. Rueß // Frontiers in Neurorobotics. – 2022. – T. 16. – C. 762317. doi: 10.3389/fnbot.2022.762317

131. Suhr, B. et al. DEM modelling of railway ballast using the Conical Damage Model: a comprehensive parametrisation strategy / B. Suhr, W.A. Skipper, R. Lewis, K. Six // Granular Matter. – 2022. – T. 24. – №. 1. – C. 40. <https://doi.org/10.1007/s10035-021-01198-z>

132. Tahir, R. Voxel-based 3D object reconstruction from single 2D image using variational autoencoders / R. Tahir, A.B. Sargano, Z. Habib // Mathematics. – 2021. – T. 9. – №. 18. – C. 2288. <https://doi.org/10.3390/math9182288>

133. Tang, Q. A Classification Method of Point Clouds of Transmission Line Corridor Based on Improved Random Forest and Multi-Scale Features / Q. Tang, L. Zhang, G. Lan, X. Shi, X. Duanmu, K. Chen // Sensors. – 2023. – T. 23. – №. 3. – C. 1320. <https://doi.org/10.3390/s23031320>

134. Trevoho, I. The study of local terrain modeling methods for vertical planning of the territory / I. Trevoho, A. Ostrovskiy, I. Kolb, O. Ostrovska // Geodesy and Cartography. – 2021. – C. article no. e09-article no. e09.. <https://doi.org/10.24425/gac.2021.136684>

135. Tesema, K.W. Point Cloud Completion: A Survey / K.W. Tesema, L. Hill, M.W. Jones // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2023. doi: 10.1109/TVCG.2023.3344935.

136. Vivat, A. Development methods of large-equipment installation in design position using electronic total stations / A. Vivat, S. Petrov, V. Volkova // *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography*. – 2022. – T. 95. – C. 22-30.

137. 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 - DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012089 // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2020. – T. 1661. – №. 1. – C. 012089.

138. 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 - DOI: 10.1051/e3sconf/202337804002 // *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2023. – T. 378. – C. 04002.

139. Wang, L. The comparison of drainage network extraction between square and hexagonal grid-based DEM / L. Wang, T. Ai // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2018. – T. 42. – C. 687-692. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-687-2018>, 2018.

140. Wang, L. Semantic segmentation of large-scale point clouds based on dilated nearest neighbors graph / L. Wang, J. Wu, X. Liu, X. Ma, J. Cheng // *Complex & Intelligent Systems*. – 2022. – T. 8. – №. 5. – C. 3833-3845. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00618-0>

141. Wang, Y. J. Review on algorithms of dealing with depressions in grid DEM / Y.J. Wang, C.Z. Qin, A.X. Zhu // *Annals of GIS*. – 2019. – T. 25. – №. 2. – C. 83-97. DOI: 10.1080/19475683.2019.1604571

142. Wu, H. A Voxel-Based Multiview Point Cloud Refinement Method via Factor Graph Optimization / H. Wu, L. Yan, H. Xie, P. Wei, J. Dai, Z. Gao - DOI 10.1007/978-981-99-8432-9_19 // *Chinese Conference on Pattern Recognition and Computer Vision (PRCV)*. – Singapore : Springer Nature Singapore, 2023. – C. 234-245.

143. Wu, Y. An assessment of recently released high-degree global geopotential models based on heterogeneous geodetic and ocean data / Y. Wu, X. He, Z. Luo, H. Shi // *Frontiers in Earth Science*. – 2021. – Т. 9. – С. 749611. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.749611>

144. Xingyu, C. Point cloud registration algorithm based on NPFC neighborhood feature descriptor – 2023. / C. Xingyu, X. Le, Z. Mingde. URL: <https://doi.org/10.1364/opticaopen.22683406.v1> (дата обращения: 28.05.2023)

145. Xu, Y. Voxel-based representation of 3D point clouds: Methods, applications, and its potential use in the construction industry / Y. Xu, X. Tong, U. Stilla // *Automation in Construction*. – 2021. – Т. 126. – С. 103675. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103675>.

146. Younis, G. 3D Modelling of Earth Kinematics in Palestine for GNSS and Geodetic Time-Dependent Positioning. – 2019. / G. Younis - DOI 10.35940/ijrte.C5577.098319 // URI: <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/8172> (дата обращения: 28.05.2023)

147. Zeybek, M. Point cloud filtering on UAV based point cloud / M. Zeybek, İ. Şanlıoğlu // *Measurement*. – 2019. – Т. 133. – С. 99-111. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.013>.

148. Zhao, L. Effect of DEM GRID-size on microrelief indexes estimation for sloping lands after reservoir tillage / L. Zhao, R. Hou, F. Wu // *Soil and Tillage Research*. – 2020. – Т. 196. – С. 104451.

СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА

ИЛЛЮСТРАЦИИ:

Рисунок 1.1 - Опознак при фотограмметрической съемке с квадрокоптером;

Рисунок 1.2 - Геодезический квадрокоптер DJI 4 PRO с установленным GPS-приёмником;

Рисунок 1.3 – Модель рельефа на основании тахеометрической съемки;

Рисунок 1.4 - Облако точек, полученное в результате съемки с квадрокоптером;

Рисунок 1.5 - Принцип построения облака точек фотограмметрическим способом на примере связующих точек в программе Agisoft Metashape;

Рисунок 1.6 – Платформа NVIDIA Isaac с установленным лазерным сканером, технологическая конференция Nvidia, 2018;

Рисунок 1.7 – Трехмерное облако точек, полученное с помощью ЛСС;

Рисунок 1.8 – а) виды марок при фотограмметрической съемке; б) виды марок при съемке лидаром;

Рисунок 1.9 - Условие триангуляции Делоне;

Рисунок 1.10 - Отличие TIN и GRID для результатов съемки;

Рисунок 1.11 – Отличие полигональной TIN-модели (слева) и воксельной модели (справа);

Рисунок 1.12 – Ориентация граней вокселей совпадает с ориентацией главных осей координат;

Рисунок 1.13 – Блок-схема алгоритма разрежения облака точек по методу ближайшего соседа;

Рисунок 1.14 – Разрежение облака точек по методу ближайшего соседа в программе Cloud Compare;

Рисунок 2.1 – Принцип разбиения облака точек по сегментам;

Рисунок 2.2 - Блок-схема моделирования по предлагаемой методике;

Рисунок 2.3 – Моделирование по сегментам без текстурирования модели;

Рисунок 2.4 - Блок-схема работы программы;

Рисунок 3.1 – Точность полученного облака точек относительно опорных пунктов;

Рисунок 3.2 – GRID-модель месторождения «Плоское»;

Рисунок 3.3 – Распределение коэффициентов детерминации для сегментов:
а) 0,5 м; б) 1м; в) 2м; г) 5м; д) 7,5м; е) 10м;

Рисунок 3.4 – Распределение значений СКП в модели с сегментами 1 м;

Рисунок 3.5 – Локализация участков с большим СКП с построением профилей в Agisoft Metashape ;

Рисунок 3.6 – СКО высоты GRID-моделей с разным размером сегментов:
а) торфяного месторождения; б) угольного склада; в) месторождения россыпного золота;

Рисунок 3.7 – Зависимость среднеквадратической погрешности высоты результатов моделирования от размера обрабатываемых сегментов (сверху-вниз): торфяного месторождения, угольного склада, россыпного месторождения золота;

Рисунок 3.8 – Распределение СКП высоты для сегментов 5 м торфяного месторождения;

Рисунок 4.1 – Набор плоскостей GRID;

Рисунок 4.2 – Набор плоскостей в предлагаемых GRID;

Рисунок 4.3 – Распределение СКП высоты в предлагаемом методе формирования GRID (слева) и классической GRID (справа);

Рисунок 4.4 – Цифровая модель рельефа с сегментами 1м участка россыпного месторождения золота;

Рисунок 4.5 – Гистограмма распределения СКП высот модели;

Рисунок 4.6 – Распределение СКП высоты в предлагаемом методе формирования GRID (слева) и классической GRID (справа);

Рисунок 4.7 – а) исходное облако точек; б) отфильтрованное по классам облако точек;

Рисунок 4.8 – Сегментированная модель исходного облака;

Рисунок 4.9 – Сегментированная модель отфильтрованного облака;

Рисунок 4.10 – Сегменты, характеризующиеся большим выбросом в значении СКП отфильтрованного облака;

Рисунок 4.11 – Наполняемость сегментов точками для данных съемки с фотограмметрией с БЛА;

Рисунок 4.12 – Наполняемость сегментов точками для данных съемки ЛСС;

Рисунок 4.13 – Разрывы в цифровой модели рельефа, построенной по облаку точек, полученному с помощью ЛСС.

ТАБЛИЦЫ:

Таблица 3.1 – Вычисленные статистические параметры определения высоты для каждого из размеров сегментов;

Таблица 3.2 – Результаты теста Андерсона-Дарлинга для проверки гипотезы о нормальном распределении для моделей торфяного месторождения;

Таблица 3.3 – Результаты теста Колмогорова-Смирнова для проверки гипотез о соответствии распределения СКП для моделей торфяного месторождения;

Таблица 4.1 - Сравнение предлагаемого способа формирования GRID и существующих способов создания моделей;

Таблица 4.2 – Допустимые значения СКП высот в зависимости от сечения рельефа создаваемого плана;

Таблица 4.3 – Размеры сегментов модели торфяного месторождения, удовлетворяющие точности по высоте 0,4 м;

Таблица 4.4 – Размеры сегментов модели угольного склада, удовлетворяющие точности по высоте 0,4 м;

Таблица 4.5 – Размеры сегментов модели россыпного месторождения, удовлетворяющие точности по высоте 0,4 м;

Таблица 4.6 – Размеры сегментов, удовлетворяющие требованиям ГОСТ Р 59562-2021.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Распределение СКП исходных данных в зависимости от линейного размера сегмента

Таблица А.1 – Распределение СКП исходных данных в зависимости от линейного размера сегмента на торфяном месторождении

| Размер сегмента, м | Ошибки, до (м) | | | | | | | | | | | | Сумма вероятностей, % |
|--------------------|---------------------------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------------|
| | 0,10 | 0,20 | 0,30 | 0,40 | 0,50 | 0,60 | 0,70 | 0,80 | 0,90 | 1,00 | 1,10 | 1,20 | |
| | Распределение ошибок (вероятность), % | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 79,05 | 17,66 | 1,67 | 0,12 | 0,07 | ...* | ... | ... | ... | ... | ... | ... | 98,57 |
| 1,0 | 78,65 | 15,04 | 4,69 | 0,75 | 0,27 | 0,15 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | 99,55 |
| 1,5 | 73,28 | 15,61 | 7,81 | 1,86 | 0,90 | 0,35 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | 99,81 |
| 2,0 | 68,56 | 16,33 | 9,27 | 3,74 | 2,99 | 0,96 | 0,41 | ... | ... | ... | ... | ... | 98,80 |
| 2,5 | 53,38 | 20,89 | 9,08 | 6,71 | 4,78 | 2,54 | 1,03 | 0,46 | 0,33 | 0,24 | 0,19 | 0,12 | 99,75 |
| 3,0 | 47,69 | 21,99 | 10,00 | 4,49 | 5,14 | 3,64 | 2,17 | 1,04 | 0,53 | 0,33 | 0,22 | 0,22 | 97,46 |
| 4,0 | 38,48 | 22,34 | 12,34 | 7,29 | 5,25 | 4,42 | 3,30 | 2,44 | 1,59 | 0,92 | 0,48 | 0,41 | 99,26 |
| 5,0 | 31,71 | 22,37 | 12,55 | 8,44 | 6,10 | 4,71 | 3,63 | 2,90 | 2,39 | 1,76 | 1,20 | 0,75 | 98,51 |
| 7,5 | 19,96 | 20,71 | 12,45 | 9,70 | 7,87 | 5,82 | 4,95 | 3,78 | 3,47 | 2,65 | 1,83 | 1,44 | 94,63 |
| 10,0 | 12,81 | 19,01 | 12,47 | 8,66 | 8,70 | 6,92 | 5,31 | 4,42 | 4,38 | 3,25 | 2,12 | 2,77 | 90,82 |

*Многоточием обозначены значения вероятностей ошибок, распределенных в значении несоизмеримо малом по отношению к исходной выборке

Таблица А.2 – Распределение СКП исходных данных в зависимости от линейного размера сегмента для угольного склада

| Размер сегмента, м | Ошибки, до (м) | | | | | | | | | | | | | Сумма вероятностей, % |
|--------------------|---------------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|
| | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 | |
| | Распределение ошибок (вероятность), % | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 81,932 | 8,958 | 3,256 | 1,781 | 1,061 | 0,665 | 0,442 | 0,341 | 0,218 | 0,155 | 0,148 | 0,108 | 0,097 | 99,162 |
| 1,0 | 74,731 | 14,138 | 3,591 | 1,637 | 1,094 | 0,735 | 0,501 | 0,284 | 0,234 | 0,301 | 0,234 | 0,209 | 0,167 | 97,854 |
| 2,0 | 62,944 | 22,566 | 8,727 | 2,800 | 1,172 | 0,586 | 0,261 | 0,130 | 0,228 | 0,033 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 99,446 |
| 3,0 | 56,286 | 19,571 | 13,643 | 6,429 | 2,143 | 1,286 | 0,429 | 0,071 | 0,000 | 0,071 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 99,929 |
| 5,0 | 42,366 | 19,275 | 12,405 | 10,305 | 6,489 | 4,580 | 2,481 | 1,336 | 0,191 | 0,382 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 99,809 |
| 7,0 | 29,537 | 24,911 | 12,456 | 7,829 | 8,541 | 6,406 | 2,847 | 3,915 | 1,423 | 0,356 | 1,423 | 0,000 | 0,356 | 100,000 |
| 10,0 | 17,241 | 26,207 | 13,103 | 8,276 | 8,276 | 4,138 | 4,828 | 5,517 | 5,517 | 2,069 | 2,069 | 1,379 | 0,000 | 98,621 |

Таблица А.3 – Распределение СКП исходных данных в зависимости от линейного размера сегмента для россыпного месторождения

| Размер сегмента, м | Ошибки, до (м) | | | | | | | | | | | | | Сумма вероятностей, % |
|--------------------|---------------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|
| | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 | |
| | Распределение ошибок (вероятность), % | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 84,77 | 7,42 | 2,82 | 1,50 | 0,83 | 0,55 | 0,37 | 0,26 | 0,19 | 0,16 | 0,16 | 0,11 | 0,08 | 99,22 |
| 1,0 | 76,794 | 13,600 | 3,134 | 1,362 | 0,805 | 0,593 | 0,558 | 0,466 | 0,296 | 0,275 | 0,169 | 0,120 | 0,141 | 98,31 |
| 2,0 | 64,928 | 21,551 | 8,278 | 3,035 | 1,159 | 0,386 | 0,138 | 0,055 | 0,055 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,028 | 99,61 |
| 3,0 | 55,529 | 21,081 | 12,576 | 6,318 | 2,491 | 1,154 | 0,425 | 0,182 | 0,000 | 0,061 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 99,82 |
| 5,0 | 43,485 | 18,893 | 13,029 | 7,980 | 6,352 | 4,072 | 2,769 | 1,629 | 1,140 | 0,489 | 0,163 | 0,000 | 0,000 | 100,00 |
| 7,0 | 32,157 | 21,176 | 12,157 | 7,451 | 7,059 | 5,098 | 5,098 | 3,137 | 2,353 | 1,961 | 1,569 | 0,392 | 0,000 | 99,61 |
| 10,0 | 25,581 | 19,767 | 13,953 | 11,047 | 7,558 | 2,907 | 4,651 | 3,488 | 2,326 | 0,581 | 2,907 | 2,907 | 1,163 | 98,84 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Распределение СКП высот модели в зависимости от линейного размера сегмента

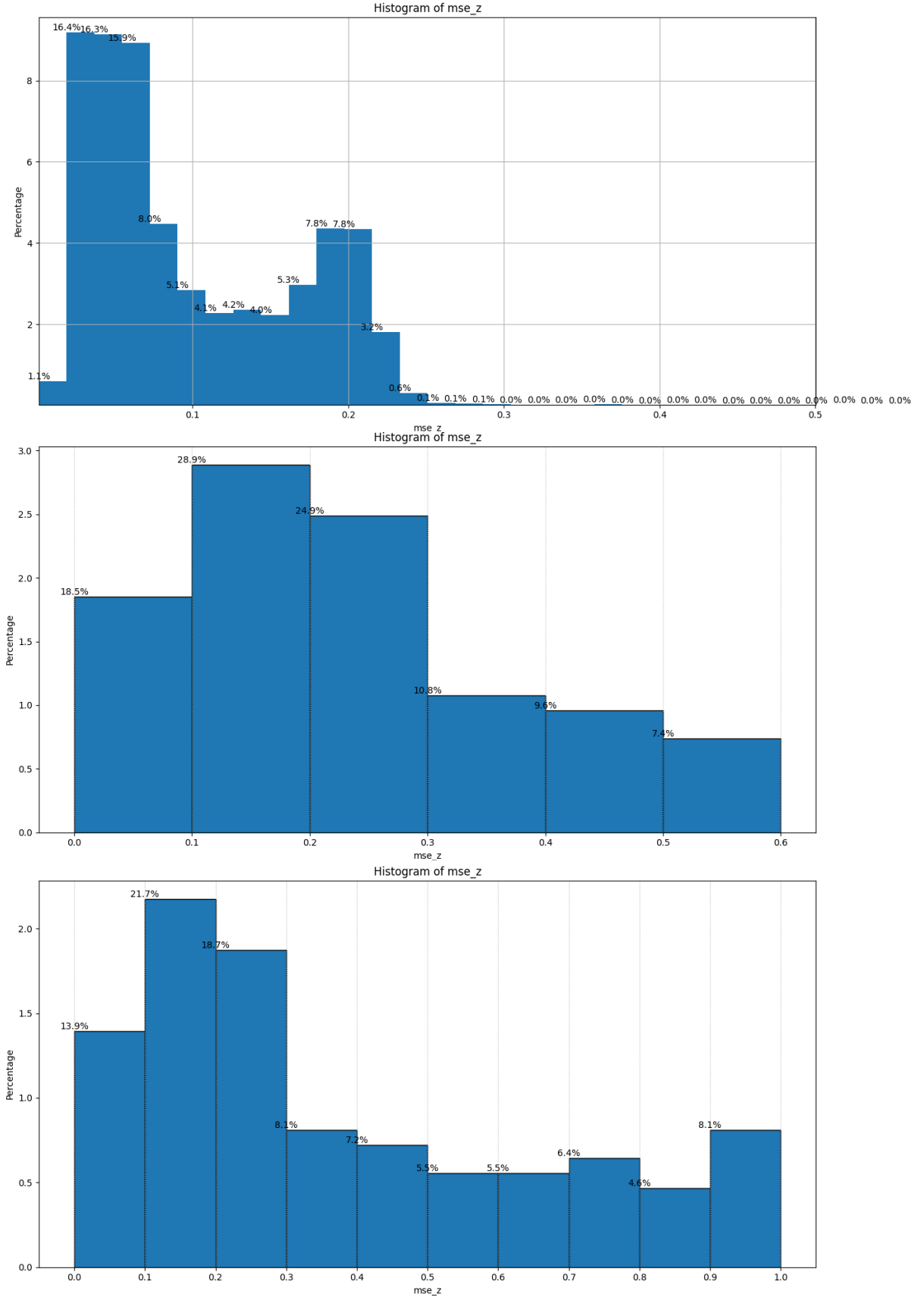


Рисунок Б.1 - Распределение СКП высот модели в зависимости от линейного размера сегмента при съёмке с БЛА типа дрон (сверху вниз – 1 м, 2,5 м, 5 м)

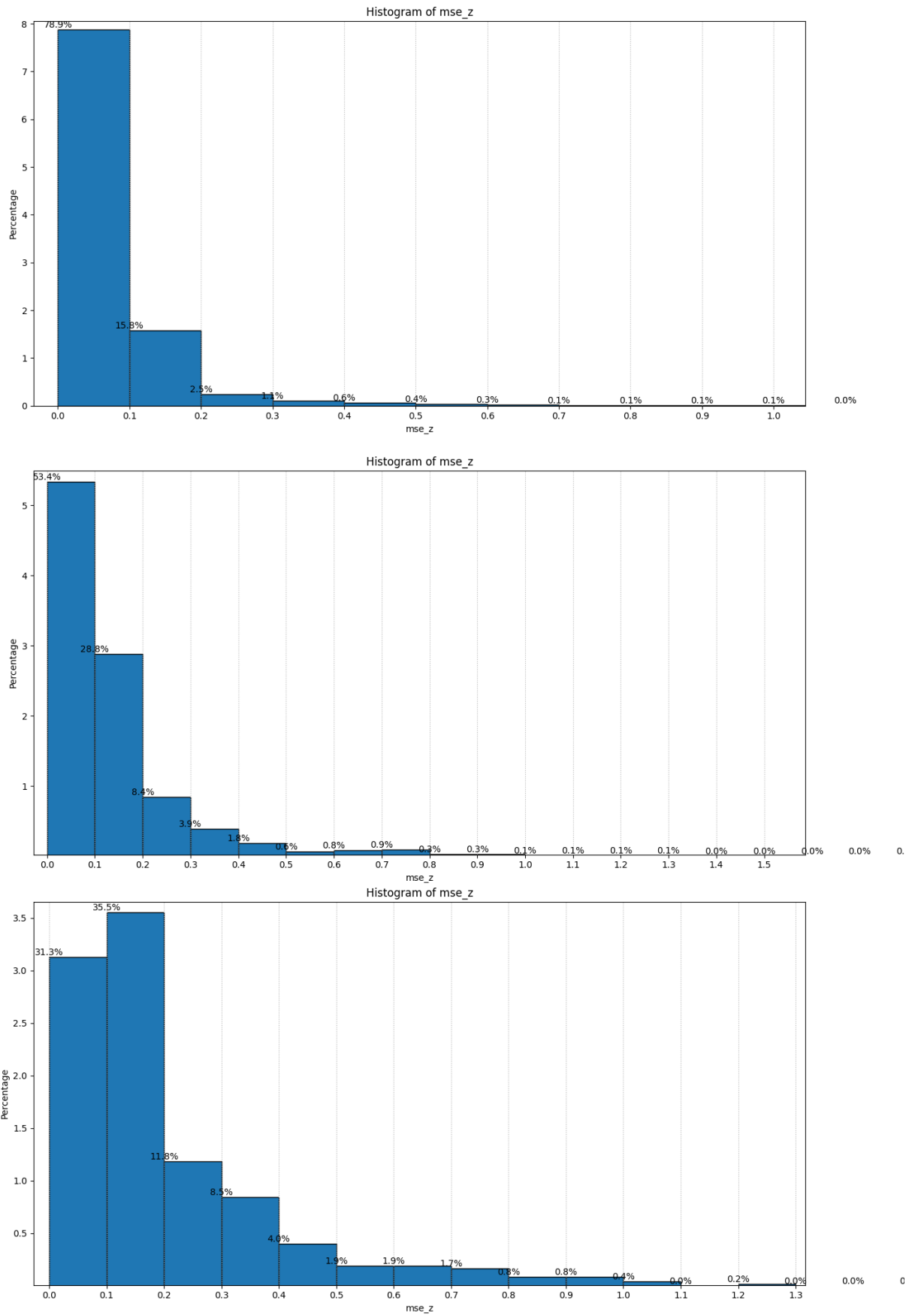


Рисунок Б.2 - Распределение СКП высот модели в зависимости от линейного размера сегмента при съемке с БЛА типа воздушное крыло (сверху вниз – 1 м, 2,5 м, 5 м)

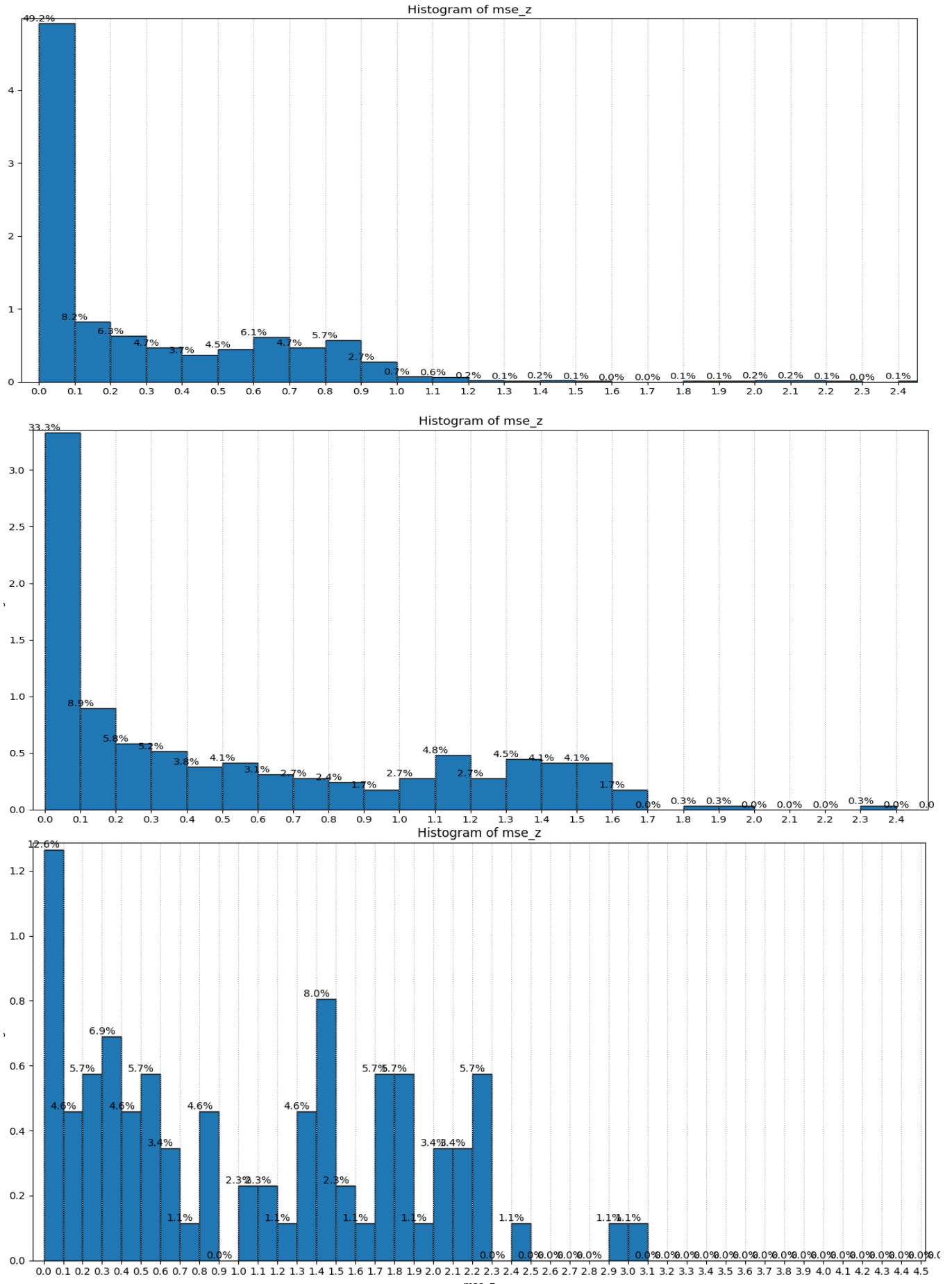


Рисунок Б.3 - Распределение СКП высот модели в зависимости от линейного размера сегмента при съемке с наземными ЛСС (сверху вниз – 1 м, 5 м, 10 м)

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Количество пикселей растрового изображения в сегменте

Таблица В.1 - Количество пикселей растрового изображения в сегменте для съемки с БЛА

| | Н, м | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 275 | 300 |
| GSD, мм/пикс | 13,7 | 20,6 | 27,4 | 34,3 | 41,1 | 48,0 | 54,9 | 61,7 | 68,6 | 75,4 | 82,3 |
| Лин. разм. сегмента S, м | M, пикс/сегм | | | | | | | | | | |
| | 0,50 | 36,46 | 24,31 | 18,23 | 14,58 | 12,15 | 10,42 | 9,11 | 8,10 | 7,29 | 6,63 |
| 0,75 | 54,69 | 36,46 | 27,34 | 21,88 | 18,23 | 15,63 | 13,67 | 12,15 | 10,94 | 9,94 | 9,11 |
| 1,00 | 72,92 | 48,61 | 36,46 | 29,17 | 24,31 | 20,83 | 18,23 | 16,20 | 14,58 | 13,26 | 12,15 |
| 1,25 | 91,15 | 60,76 | 45,57 | 36,46 | 30,38 | 26,04 | 22,79 | 20,25 | 18,23 | 16,57 | 15,19 |
| 1,50 | 109,38 | 72,92 | 54,69 | 43,75 | 36,46 | 31,25 | 27,34 | 24,31 | 21,88 | 19,89 | 18,23 |
| 1,75 | 127,60 | 85,07 | 63,80 | 51,04 | 42,53 | 36,46 | 31,90 | 28,36 | 25,52 | 23,20 | 21,27 |
| 2,00 | 145,83 | 97,22 | 72,92 | 58,33 | 48,61 | 41,67 | 36,46 | 32,41 | 29,17 | 26,52 | 24,31 |
| 2,25 | 164,06 | 109,38 | 82,03 | 65,63 | 54,69 | 46,88 | 41,02 | 36,46 | 32,81 | 29,83 | 27,34 |
| 2,50 | 182,29 | 121,53 | 91,15 | 72,92 | 60,76 | 52,08 | 45,57 | 40,51 | 36,46 | 33,14 | 30,38 |
| 2,75 | 200,52 | 133,68 | 100,26 | 80,21 | 66,84 | 57,29 | 50,13 | 44,56 | 40,10 | 36,46 | 33,42 |
| 3,00 | 218,75 | 145,83 | 109,38 | 87,50 | 72,92 | 62,50 | 54,69 | 48,61 | 43,75 | 39,77 | 36,46 |
| 3,25 | 236,98 | 157,99 | 118,49 | 94,79 | 78,99 | 67,71 | 59,24 | 52,66 | 47,40 | 43,09 | 39,50 |
| 3,50 | 255,21 | 170,14 | 127,60 | 102,08 | 85,07 | 72,92 | 63,80 | 56,71 | 51,04 | 46,40 | 42,53 |
| 3,75 | 273,44 | 182,29 | 136,72 | 109,38 | 91,15 | 78,13 | 68,36 | 60,76 | 54,69 | 49,72 | 45,57 |
| 4,00 | 291,67 | 194,44 | 145,83 | 116,67 | 97,22 | 83,33 | 72,92 | 64,81 | 58,33 | 53,03 | 48,61 |
| 4,25 | 309,90 | 206,60 | 154,95 | 123,96 | 103,30 | 88,54 | 77,47 | 68,87 | 61,98 | 56,34 | 51,65 |
| 4,50 | 328,13 | 218,75 | 164,06 | 131,25 | 109,38 | 93,75 | 82,03 | 72,92 | 65,63 | 59,66 | 54,69 |
| 4,75 | 346,35 | 230,90 | 173,18 | 138,54 | 115,45 | 98,96 | 86,59 | 76,97 | 69,27 | 62,97 | 57,73 |
| 5,00 | 364,58 | 243,06 | 182,29 | 145,83 | 121,53 | 104,17 | 91,15 | 81,02 | 72,92 | 66,29 | 60,76 |
| 5,25 | 382,81 | 255,21 | 191,41 | 153,13 | 127,60 | 109,38 | 95,70 | 85,07 | 76,56 | 69,60 | 63,80 |
| 5,50 | 401,04 | 267,36 | 200,52 | 160,42 | 133,68 | 114,58 | 100,26 | 89,12 | 80,21 | 72,92 | 66,84 |

Продолжение таблицы В.1

| | H, м | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 275 | 300 |
| GSD, мм/пикс | 13,7 | 20,6 | 27,4 | 34,3 | 41,1 | 48,0 | 54,9 | 61,7 | 68,6 | 75,4 | 82,3 |
| Лин. разм. сегмента S, м | M, пикс/сегм | | | | | | | | | | |
| | 5,75 | 419,27 | 279,51 | 209,64 | 167,71 | 139,76 | 119,79 | 104,82 | 93,17 | 83,85 | 76,23 |
| 6,00 | 437,50 | 291,67 | 218,75 | 175,00 | 145,83 | 125,00 | 109,38 | 97,22 | 87,50 | 79,55 | 72,92 |
| 6,25 | 455,73 | 303,82 | 227,86 | 182,29 | 151,91 | 130,21 | 113,93 | 101,27 | 91,15 | 82,86 | 75,95 |
| 6,50 | 473,96 | 315,97 | 236,98 | 189,58 | 157,99 | 135,42 | 118,49 | 105,32 | 94,79 | 86,17 | 78,99 |
| 6,75 | 492,19 | 328,13 | 246,09 | 196,88 | 164,06 | 140,63 | 123,05 | 109,38 | 98,44 | 89,49 | 82,03 |
| 7,00 | 510,42 | 340,28 | 255,21 | 204,17 | 170,14 | 145,83 | 127,60 | 113,43 | 102,08 | 92,80 | 85,07 |
| 7,25 | 528,65 | 352,43 | 264,32 | 211,46 | 176,22 | 151,04 | 132,16 | 117,48 | 105,73 | 96,12 | 88,11 |
| 7,50 | 546,88 | 364,58 | 273,44 | 218,75 | 182,29 | 156,25 | 136,72 | 121,53 | 109,38 | 99,43 | 91,15 |
| 7,75 | 565,10 | 376,74 | 282,55 | 226,04 | 188,37 | 161,46 | 141,28 | 125,58 | 113,02 | 102,75 | 94,18 |
| 8,00 | 583,33 | 388,89 | 291,67 | 233,33 | 194,44 | 166,67 | 145,83 | 129,63 | 116,67 | 106,06 | 97,22 |
| 8,25 | 601,56 | 401,04 | 300,78 | 240,63 | 200,52 | 171,88 | 150,39 | 133,68 | 120,31 | 109,38 | 100,26 |
| 8,50 | 619,79 | 413,19 | 309,90 | 247,92 | 206,60 | 177,08 | 154,95 | 137,73 | 123,96 | 112,69 | 103,30 |
| 8,75 | 638,02 | 425,35 | 319,01 | 255,21 | 212,67 | 182,29 | 159,51 | 141,78 | 127,60 | 116,00 | 106,34 |
| 9,00 | 656,25 | 437,50 | 328,13 | 262,50 | 218,75 | 187,50 | 164,06 | 145,83 | 131,25 | 119,32 | 109,38 |
| 9,25 | 674,48 | 449,65 | 337,24 | 269,79 | 224,83 | 192,71 | 168,62 | 149,88 | 134,90 | 122,63 | 112,41 |
| 9,50 | 692,71 | 461,81 | 346,35 | 277,08 | 230,90 | 197,92 | 173,18 | 153,94 | 138,54 | 125,95 | 115,45 |
| 9,75 | 710,94 | 473,96 | 355,47 | 284,38 | 236,98 | 203,13 | 177,73 | 157,99 | 142,19 | 129,26 | 118,49 |
| 10,00 | 729,17 | 486,11 | 364,58 | 291,67 | 243,06 | 208,33 | 182,29 | 162,04 | 145,83 | 132,58 | 121,53 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Г**Акт о внедрении результатов кандидатской диссертации на предприятие****Утверждаю**Генеральный директор
ООО «Карьерпроект»

Музыкин М.Г.

2023 г.

АКТ

о внедрении результатов
кандидатской диссертации
Сухова Арсения Константиновича
по научной специальности

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

Комиссия в составе:

Председатель: генеральный директор ООО «Карьерпроект» Музыкин М.Г.

Члены комиссии: главный инженер проекта Виноградов И.П.;
главный маркшейдер Блищенко А.А.;
главный геолог Бирин М.В.

составили настоящий акт (справку) о том, что результаты диссертации на тему «Метод составления цифровых моделей открытых горных выработок по данным дистанционных маркшейдерских съемок с использованием полинома первого порядка», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в деятельности маркшейдерского отдела ООО «Карьерпроект» при осуществлении горно-геометрического обеспечения в виде:

- технических предложений по выполнению маркшейдерской деятельности при обеспечении горнодобывающего процесса;
- методики составления цифровых моделей рельефа для составления и пополнения горно-графической документации;
- математической модели расчета точности цифровых моделей рельефа;
- графической модели распределения погрешностей результатов моделирования.

Применение результатов диссертации в рабочем процессе маркшейдерского отдела ООО «Карьерпроект» привело к следующим показателям:

- повысилось качество предоставляемых услуг недропользователям;

- сократились затраты на проведение работ по составлению цифровых моделей рельефа и обеспечению достоверности результатов;
- поднялась производительность труда при маркшейдерском обеспечении месторождении;
- вырос уровень подготовки кадров специалистов маркшейдерского отдела ООО «Карьерпроект».

Председатель комиссии

Генеральный директор ООО «Карьерпроект» _____ /Музыкин М.Г./



Члены комиссии:

Главный инженер проекта _____ /Виноградов И.П./

Главный маркшейдер _____ /Блищенко А.А./

Главный геолог _____ /Бирин М.В./

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023664593

**Программа для построения аппроксимированных
плоскостей и расчета средней квадратической
погрешности по данным дистанционного зондирования**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Гусев Владимир Николаевич (RU), Выстрчил
Михаил Георгиевич (RU), Сухов Арсений
Константинович (RU)*

Заявка № 2023663738

Дата поступления 30 июня 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 05 июля 2023 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2023664593**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
2023664593

Дата регистрации: 05.07.2023

Номер и дата поступления заявки:
2023663738 30.06.2023

Дата публикации и номер бюллетеня:
05.07.2023 Бюл. № 7

Автор(ы):

Гусев Владимир Николаевич (RU),
Выстрчил Михаил Георгиевич (RU),
Сухов Арсений Константинович (RU)

Правообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский горный
университет» (RU)

Название программы для ЭВМ:

Программа для построения аппроксимированных плоскостей и расчета средней квадратической погрешности по данным дистанционного зондирования

Реферат:

Программа предназначена для работы с облаком точек, получаемым по данным лазерных сканирующих систем и фотограмметрических съемок. Включает в себя расчет сегментов облака точек и построение по ним модели, состоящей из набора аппроксимирующих плоскостей, расчет средней квадратической ошибки результатов моделирования, создание базы данных для математического анализа результатов моделирования. Программа может быть использована и внедрена в учебную дисциплину «Дистанционные методы съемки в маркшейдерском обеспечении» специальности «21.05.04 Горное дело», специализации «Маркшейдерское дело». Программа обеспечивает выполнение следующих функций: построение дискретной точечной модели (облака точек); моделирование сегментированной модели; моделирование DEM – модели; определение средних квадратических ошибок по результатам моделирования.

Язык программирования: Python

Объем программы для ЭВМ: 180 КБ