

*На правах рукописи*

**КОЧНЕВА Алина Александровна**



**РАЗРАБОТКА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЦИФРОВЫХ  
МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ПО ДАННЫМ ВОЗДУШНОГО  
ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
АВТОДОРОГ**

*Специальность 25.00.32 - Геодезия*

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

**Санкт-Петербург - 2018**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт – Петербургский горный университет»

*Научный руководитель:*  
доктор технических наук

*Мустафин Мурат Газизович*

*Официальные оппоненты:*

*Столбов Юрий Викторович*  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет», кафедра «Проектирование дорог», профессор

*Середович Владимир Адольфович*  
кандидат технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра инженерной геодезии, профессор

*Ведущая организация - ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»*

Защита диссертации состоится 25 сентября 2018 г. в 17 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.08 при Санкт – Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. № 1171а.

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

Автореферат разослан 25 июля 2018 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



СКАЧКОВА  
Мария Евгеньевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы.**

При проектировании автомобильных дорог требуется обеспечить их рациональное расположение с учетом рельефа местности. Для этого необходимо иметь картографическую основу определенного масштаба, которую получают на современном этапе наиболее перспективным методом воздушного лазерного сканирования (ВЛС).

Особенностью ВЛС является высокая плотность точек лазерных отражений (ТЛО) на единицу площади, что приводит к необходимости обработки огромных массивов данных при построении цифровых моделей рельефа (ЦМР).

Избыточность ТЛО повышает трудоемкость и снижает эффективность работы с ЦМР на всех этапах проектирования автомобильных дорог.

Поэтому основной задачей, решаемой при построении ЦМР, является описание с необходимой для геодезических изысканий точностью деталей рельефа при минимизации количества ТЛО для характерных форм рельефа местности.

Изучению вопросов отображения земной поверхности с помощью дистанционных методов, в том числе лазерной локации, посвящены работы как отечественных ученых: Антипова А.В., Бойко Е.С., Григорьева А.В., Корнилова Ю.Н., Медведева Е.М., Мельникова С.Р., Науменко А.И., Павлова В.И., Середовича В.А., Слепченко А.Л., Сухова А.А., Черкесова Е.Н., Ессина А.С., Хамитова Э.Т., так и зарубежных: Питера Аксельсона, Иммануэля Балцавиаса, Анджея Борковского и др.

Интерполяцией (разрежением) данных, полученных в процессе воздушного лазерного сканирования, занимались такие ученые как: Горева А.Э., Горькавый И.Н., Мищенко С.А., Мищенко Ю.А.

Несмотря на широкий интерес научного сообщества к теме разрежения массивов данных для построения ЦМР, ряд вопросов остается нерешенным. Существующие алгоритмы интерполяции данных для ЦМР, построенных на регулярных сетках координат, не позволяют эффективно разрезать массивы данных при сохранении

детализации отдельных характерных участков рельефа. Среди существующих методов интерполяции данных воздушного лазерного сканирования приходится выбирать либо быстрые методы, однако приводящие к потерям детализации рельефа, либо методы, позволяющие эффективно разрезать массивы координат, однако требующие огромных вычислительных, либо временных ресурсов.

Отдельно следует отметить, что современное программное обеспечение, применяемое в геодезической отрасли и позволяющее производить разрежение массивов данных при построении ЦМР, основано на закрытом исходном коде. Таким образом, для пользователя алгоритмы интерполяции в данном программном обеспечении представляют собой «черный ящик»: возможность внести в них какие-либо изменения или проанализировать эффективность и быстродействие кода, реализующего интерполяцию данных, отсутствует.

С учетом вышесказанного, разработка алгоритма разрежения больших массивов точек лазерных отражений, который имеет низкую вычислительную сложность и одновременно позволяет формировать нерегулярную сетку координат, совместно с методикой автоматизированного построения ЦМР на основе разреженного массива данных, подходящей для проектирования автомобильных дорог, является актуальной научной задачей, имеющей практическое значение.

**Цель работы.** Повышение эффективности инженерно-геодезических изысканий при проектировании автомобильных дорог за счет использования модифицированных цифровых моделей рельефа, адаптированных для широкого спектра компьютерного программного обеспечения.

**Идея диссертационной работы** состоит в использовании модифицированных (разреженных) цифровых моделей рельефа, создаваемых по оригинальному алгоритму, в основе которого реализован принцип поточечного рассмотрения массива координат точек лазерных отражений и сравнение нормали от рассматриваемой точки до плоскости, характеризующей рельеф, с критериальным параметром, который соответствует точности построения модели.

### **Основные задачи исследований:**

1. Анализ состояния изученности вопроса проектирования автодорог с использованием технологии воздушного лазерного сканирования для построения цифровых моделей рельефа.
2. Разработка нормированных количественных параметров цифровых моделей рельефа для разных типов рельефов местности.
3. Разработка алгоритма интерполяции данных, полученных в процессе воздушного лазерного сканирования.
4. Разработка методики автоматизированного построения ЦМР для обеспечения геодезических работ при проектировании автомобильных дорог по данным воздушного лазерного сканирования и ее экспериментальная проверка.

### **Научная новизна:**

1. Обосновано необходимое количество точек лазерных отражений на 1 м<sup>2</sup> для построения цифровых моделей различных типов рельефа, обеспечивающее точность топографической съемки масштаба 1:1000.
2. Разработан алгоритм интерполяции массива данных воздушного лазерного сканирования, особенностью которого является низкая вычислительная сложность и высокая степень разрежения массивов точек, образующих плоские горизонтальные и наклонные участки поверхности.
3. Предложены критерии, соблюдение которых при интерполяции данных воздушного лазерного сканирования позволяет сохранить точность ЦМР, необходимую для построения топографических планов масштаба 1:1000.
4. Разработана методика автоматизированного построения ЦМР, позволяющая на основе предлагаемых критериев оценки избыточности данных ВЛС итерационным методом получить разреженный до определенной степени массив точек лазерных отражений таким образом, что точность ЦМР, построенной на его основе, соответствует требованиям, предъявляемым к точности топографических планов масштаба 1:1000.
5. Разработан алгоритм, который позволяет при обработке данных ВЛС выявить структурные линии и вывести в отдельный массив связанные с ними точки.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в научном обосновании подхода к построению оптимальных по количеству точек ЦМР и разработке алгоритма интерполяции данных, полученных в процессе воздушного лазерного сканирования.

**Методы исследования.**

В работе использован комплексный метод исследований, который включает: анализ литературных источников по применению технологии воздушного лазерного сканирования; ГИС-моделирование различного рельефа местности; интерполяцию данных и построение цифровых моделей рельефа.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Плотность точек лазерных отражений, полученных при воздушном лазерном сканировании, равная 0,20 - 1,99 на 1 м<sup>2</sup>, в зависимости от характера рельефа, обеспечивает построение цифровых моделей рельефа с точностью, удовлетворяющей топографической съемке масштаба 1:1000.

2. Применение разработанного алгоритма интерполяции, основанного на формировании нерегулярной координатной сетки без применения триангуляции, позволяет добиться повышения степени разрежения данных воздушного лазерного сканирования от 20% до 40% в зависимости от характера рельефа при сохранении точности, удовлетворяющей топографической съемке масштаба 1:1000.

**Апробация работы.**

Основные положения работы докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях, в том числе: на международной научно-практической конференции «Средства и технологии ДЗЗ из космоса в науке, образовании, бизнесе» (г. Санкт-Петербург, 2014 г.); на XI научно – практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.) и на заседаниях кафедры инженерной геодезии Горного университета (2013-2016 г.).

**Достоверность и обоснованность результатов работы** подтверждается согласованностью результатов построения ЦМР по разработанной методике с полученными данными лазерно-сканирующей съемки для различных типов рельефа.

### **Личный вклад автора состоит в:**

анализе состояния изученности вопроса о проектировании автомобильных дорог, а также технологии лазерного сканирования; формулировке научных положений и основных выводов диссертации; постановке основных задач исследования; моделировании рельефа с различной плотностью точек; определении минимального количества точек лазерных отражений на 1 м<sup>2</sup> для создания цифровых моделей рельефа для различных участков (рельеф местности с преобладающими углами наклона); оценке точности цифровых моделей рельефа, полученных по данным воздушного лазерного сканирования; разработке алгоритма интерполяции данных, полученных с помощью воздушного лазерного сканирования; разработке методики автоматизированного построения ЦМР для обеспечения геодезических работ при проектировании автомобильных дорог по данным воздушного лазерного сканирования.

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 4 статьи – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Объем и структура работы.**

Текст диссертации состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 144 страницах машинописного текста и содержит 63 рисунка, 25 таблицы и список литературы из 100 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и идея работы, определены основные задачи исследований, описаны научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

**В первой главе** проведен анализ существующей нормативной документации. Изучен вопрос проектирования автомобильных дорог. Проведен обзор литературы по технологии воздушного лазерного сканирования. Обоснована цель и поставлены задачи исследований.

**Во второй главе** проведен анализ данных воздушного лазерного сканирования для оптимизации процесса создания

цифровых моделей рельефа. Выполнено ГИС - моделирование различного рельефа местности по данным воздушного лазерного сканирования. Определено минимальное количество точек лазерных отражений на 1 м<sup>2</sup> для рельефа с максимально преобладающими углами наклона.

**В третьей главе** выполнен анализ существующих алгоритмов разрежения данных ВЛС. Представлен разработанный алгоритм интерполяции данных, полученных с помощью воздушного лазерного сканирования. Выполнено исследование эффективности разработанного алгоритма интерполяции данных ТЛО.

**В четвертой главе** представлена методика автоматизированного построения ЦМР для обеспечения геодезических работ при проектировании автомобильных дорог по данным воздушного лазерного сканирования и результаты ее апробирования при проектировании автомобильных дорог.

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

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Плотность точек лазерных отражений при воздушном лазерном сканировании, равная 0,20-1,99 на 1 м<sup>2</sup>, в зависимости от характера рельефа, обеспечивает построение цифровых моделей рельефа с точностью, удовлетворяющей топографической съемке масштаба 1:1000.**

Из всего многообразия различных классификаций рельефа были выделены участки согласно характеристикам рельефа и максимально преобладающим углам наклона (согласно Инструкции по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500):

- равнинные с углами наклона до 2°;
- всхолмленные с углами наклона до 4°;
- пересеченные с углами наклона до 6°;
- горные и предгорные с углами наклона более 6°.

В настоящее время популярность приобрел метод воздушного лазерного сканирования. Данные, полученные с помощью воздушного лазерного сканирования, представляют собой облако



точек лазерных отражений, которое используется для создания цифровых моделей рельефа. Совершенствование использования технологии ВЛС заключается в определении минимального количества точек лазерных отражений на 1 м<sup>2</sup> для различного рельефа местности. Сравнение моделей выполнено с различной плотностью ТЛО на 1 м<sup>2</sup> при создании регулярной сетки ячеек GRID и вычислении в узлах сетки высот.

В связи с этим ГИС - моделирование рельефа местности выполнялось в несколько этапов:

1. Первый этап моделирования – создание цифровой модели рельефа, которая включает в себя все точки, принадлежащие к земной поверхности. Эта ЦМР была условно принята за «идеальную» модель. С ней сравнивались цифровые модели рельефа с меньшей плотностью ТЛО.

2. Второй этап моделирования – создание цифровой модели рельефа по отметкам, полученным с учетом паспортной погрешности лазерного сканера ( $m = 0.1$  м). Аналогично, как и для первого этапа моделирования, полученная ЦМР включает в себя все точки, принадлежащие к земной поверхности. С ней сравнивались цифровые модели рельефа с меньшей плотностью точек лазерных отражений.

Сравнение моделей с различной плотностью ТЛО на 1 м<sup>2</sup> было выполнено в ГИС ArcGIS. На основе ТЛО с различной плотностью создавались GRID-поверхности, размер пикселя которой составил 0,10×0,10 м (для равнинного, всхолмленного, пересеченного рельефа местности с углами наклона до 6°), 0,05×0,05 м (для горного и предгорного рельефа местности с углами наклона порядка 6°). GRID – модель, представляет собой регулярную матрицу значений высот, полученную при интерполяции исходных данных. Для каждой ячейки матрицы высота вычисляется на основе интерполяции. Для каждой пары сравниваемых ЦМР создавался GRID-растр, пикселям которого присваивались значения разности высот.

Сравнивались цифровые модели рельефа, которые включают в себя все точки лазерных отражений класса «земля» и цифровые модели рельефа с уменьшенным количеством ТЛО.

В этом случае цифровая модель рельефа, созданная по классу «земля», принималась за идеальную без учета влияния паспортной погрешности лазерного сканера.

За границы максимальных отклонений результатов моделирования принимались нормативные значения точности, а именно, для топографического плана масштаба 1:1000 при высоте сечения 0,5 м средняя квадратическая погрешность не должна превышать 0,18 м и 0,26 м (для лесных участков). А средние погрешности съемки рельефа не должны превышать 0,13 м и 0,19 м (для лесных участков местности).

Таким же образом выполнено сравнение цифровой модели рельефа, которая включает в себя все точки лазерных отражений класса «земля» и цифровых моделей рельефа с наименьшим количеством точек лазерных отражений. Но, в этом случае при создании цифровой модели рельефа отметки были получены с учетом паспортной погрешности лазерного сканера ( $m = 0.1$  м). Выполнялись исследования с учетом влияния этой погрешности и результаты представлены в виде графиков (рисунок 1 – 3). На рисунках 2, 3 показана зависимость плотности точек лазерных отражений от углов наклона рельефа местности с учетом влияния паспортной погрешности лазерного сканера (рисунок 3) и без учета влияния этой погрешности (рисунок 2). На графиках представлено минимальное, максимальное и среднее значения количества точек лазерных отражений. На графиках прослеживается низкий разброс плотности ТЛО, что в дальнейшем позволит точно определить необходимое количество точек для создания точной ЦМР масштаба 1:1000 для рельефа местности с различными углами наклона.

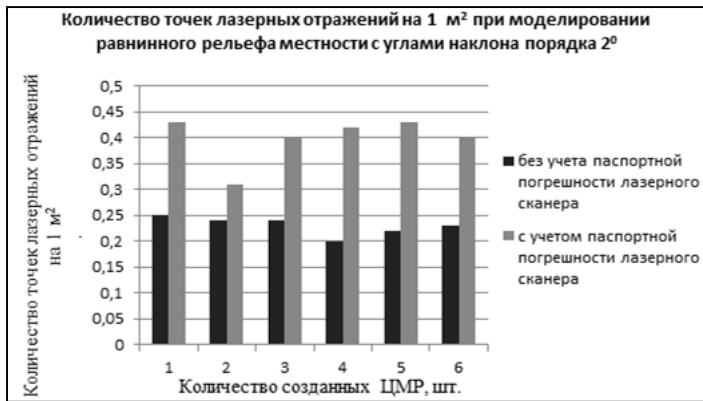


Рисунок 1 – Количество ТЛО на 1 м<sup>2</sup> для равнинного рельефа местности

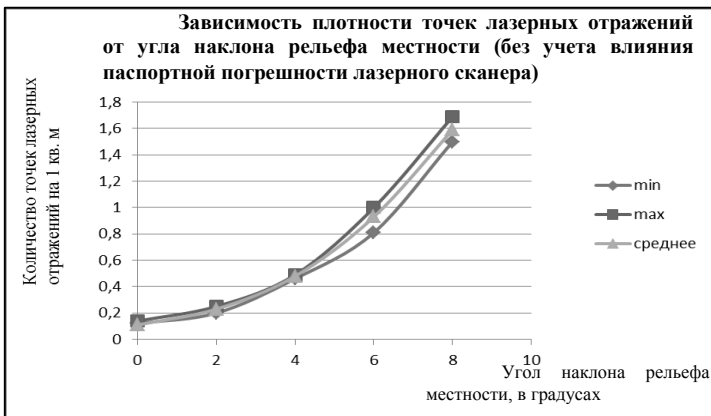


Рисунок 2 – График зависимости плотности точек лазерных отражений от угла наклона рельефа местности

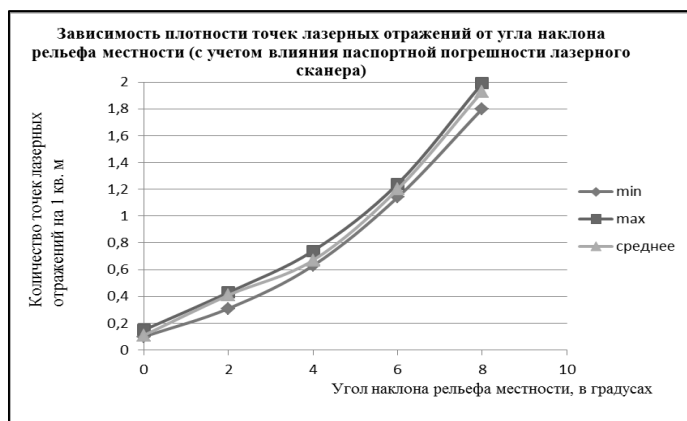


Рисунок 3 - График зависимости плотности точек лазерных отражений от угла наклона рельефа местности

**2. Применение разработанного алгоритма интерполяции, основанного на формировании нерегулярной координатной сетки без применения триангуляции, позволяет добиться повышения степени разрежения данных воздушного лазерного сканирования от 20% до 40% в зависимости от характера рельефа при сохранении точности, удовлетворяющей топографической съемке масштаба 1:1000.**

Для устранения избыточных ТЛО был разработан алгоритм интерполяции данных, реализация которого была выполнена на языке программирования Python версии 3.6. Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 4.

Существенным вопросом в оценке результатов интерполяции массивов ТЛО является сравнение точности исходных ЦМР и ЦМР, полученных на основе разреженного массива данных.

Наиболее простым способом оценить точность ЦМР, полученной после интерполяции массива ТЛО с помощью разработанного алгоритма, является оценка её на этапе выполнения каждой итерации алгоритма, если для каждой исключенной точки будет записываться её отклонение  $D_{xyz}$  от плоскости, образованной тремя соседними точками. В таком случае можно ввести величину

ошибки интерполяции через среднеквадратическое отклонение  $\delta_D$  всех исключенных точек следующим образом:

$$\delta_D = \sqrt{\frac{\sum_{n_D=1}^{N_D} D_{xyz}^2 [n_D]}{n_d}},$$

где  $N_D$  – количество всех исключенных в процессе интерполяции точек. Было проведено подтверждение оценки точности на основе  $\delta_D$  с величиной СКП, получаемой в системе ArcGIS Spatial Analyst.

В таблице 1 приведены результаты сравнения точности ЦМР полученной с помощью интерполяции предлагаемым алгоритмом.

Абсолютная ошибка между среднеквадратическим отклонением высот интерполированной ЦМР, вычисленным на основе величины  $\delta_D$  и с помощью ArcGIS, является пренебрежимо малым значением и для рассмотренных участков с варьированием  $\Delta D$  в пределах [0,1; 0,3] не превышает значения 0,008 м.

Таким образом, величина среднеквадратического отклонения  $\delta_D$  ЦМР по высоте, рассчитанная в процессе исключения точек разработанным алгоритмом, была использована как оценка точности ЦМР, построенной по интерполированному массиву ТЛЮ, относительно исходной ЦМР.

Таблица 1 - Сравнение оценки точности ЦМР, полученной с помощью интерполяции предлагаемым алгоритмом

Величина	$\Delta D$	Номер участка			
		Участок 1	Участок 2	Участок 3	Участок 4
СКП ArcGIS, м	0,1	0,072	0,074	0,075	0,085
$\delta_D$ , м		0,071	0,074	0,078	0,082

Таблица 1 - Сравнение оценки точности ЦМР, полученной с помощью интерполяции предлагаемым алгоритмом (продолжение)

Величина	$\Delta D$	Номер участка			
		Участок 1	Участок 2	Участок 3	Участок 4
$\delta_{AO}, \text{ м}$		0,001	0,000	0,003	0,003
СКП ArcGIS, м	0,2	0,142	0,178	0,181	0,182
$\delta_D, \text{ м}$		0,141	0,170	0,175	0,181
$\delta_{AO}, \text{ м}$		0,001	0,008	0,005	0,001
СКП ArcGIS, м	0,3	0,144	0,210	0,223	0,241
$\delta_D, \text{ м}$		0,142	0,212	0,220	0,243
$\delta_{AO}, \text{ м}$		0,002	0,002	0,003	0,002

Следует также отметить, что величина  $\delta_D$  отличается от изначально задаваемого  $\Delta D$ , что обусловлено особенностями рельефа, образованного рассматриваемым массивом ТЛЮ. Так, из таблицы 1 можно сделать вывод, что для более плоского участка 1 значение  $\delta_D$  имеет ограниченное значение, меньше задаваемого  $\Delta D$ .

Введя в алгоритм обратную связь по величине  $\delta_D$  и варьируя в зависимости от него  $\Delta D$  становится возможным автоматизированным способом получать ЦМР с СКО, не превышающим определённую величину. Из результатов интерполяции можно сделать следующие выводы: несмотря на то, что участки отличались по рельефу – в основном эффективность разработанного алгоритма сильно коррелирует только с задаваемым значением СКП. Это обусловлено тем, что даже при холмистом рельефе создаются относительно плоские наклонные поверхности, которые всё ещё могут быть успешно разрежены с помощью предлагаемого алгоритма.

Эффективность разработанного алгоритма относительно разрежения с помощью GRID-ов принимает наибольшее значение при малых значениях шага сетки, и уменьшается с увеличением шага сетки GRID-ов.

Было выполнено сравнение эффективности разработанного алгоритма с ближайшим аналогом: алгоритмом выделения ключевых точек модели (КТМ) – Model Key Points – из проприетарной программной среды Bentley Microstation (модуль TerraScan). Сравнение эффективности интерполяции с помощью разработанного алгоритма и с помощью выделения КТМ проводилось следующим образом. Для выделения КТМ было выбрано предельное отклонение по аппликату в 13 см. После выделения КТМ из исходного массива ТЛО, разрежение исходного массива ТЛО проводилось итерационно с увеличивающимся на каждой итерации значением  $\Delta D$ , пока в массиве ТЛО не оставалось количество точек, равное количеству КТМ. После чего в среде ArcGIS вычислялось значение СКО разреженных с помощью двух алгоритмов ЦМР относительно ЦМР, построенной по исходному облаку ТЛО.

Для исследования эффективности алгоритмов разрежения были выбраны два квадратных участка со сторонами 20 м:

Результаты разрежения участков 1 и 2 представлены в таблице 2. Трехмерная визуализация ЦМР, построенных по исходному и разреженным массивам ТЛО представлена на рисунке 5. Тепловая карта разницы высот ЦМР, построенных на основе исходного и разреженного массива ТЛО представлены на рисунках 6 и 7. Для исследования эффективности алгоритмов разрежения были выбраны два квадратных участка со сторонами 20 м:

- Участок 1: равнинный рельеф с уклоном, диапазон высот: 193.4-194.1 м.
- Участок 2: горный рельеф с оврагом, диапазон высот: 2300-2302.3 м.

Апробация реализованного алгоритма была проведена на массиве данных ВЛС, полученных на этапе проектирования трассы Москва – Санкт-Петербург.

Таблица 2. Сравнение эффективности интерполяции массива ТЛО разработанным алгоритмом и алгоритмом выделения КТМ в среде TerraScan

	<b>Участок 1</b>	<b>Участок 2</b>
Площадь, м <sup>2</sup>	399.2	392.7
Исходное к-во ТЛО	1266	841
Предельное отклонение аппликаты TerraScan, м	0.13	0.13
Предельное отклонение абсолютного расстояния для разраб. алгоритма, м	0.045	0.052
К-во ТЛО, после интерполяции	67	118
СКО, после интерполяции TerraScan, м	0.102	0.084
СКО, после интерполяции разраб. алгоритмом, м	0.081	0.053

Была разработана методика, которая предполагает автоматизированную обработку массива данных ВЛС, полученного после выделения точек класса «земля» в специализированном программном обеспечении, в соответствии со сформулированными критериями:

- Плотность ТЛО в построенной ЦМР должна быть минимальной, что повышает эффективность дальнейших этапов проектирования автодороги.

- Расстояние между двумя ближайшими точками не должно превышать 20 м, что регулируется требованиями к точности топопланов масштабов 1:500, 1:1000.

При этом должна обеспечиваться заданная точность ЦМР.

Совокупность сформулированных критериев позволяет сформировать на выходе ЦМР, наименее требовательную к вычислительным ресурсам при её обработке и построении, и в то же время топопланы, построенные по таким ЦМР будут отвечать требованиям по точности.

Разрезание исходного массива ТЛО класса «земля» производится с помощью разработанного алгоритма интерполяции. Было определено, что максимально допустимое абсолютное



расстояние  $\Delta D$  от исключаемой точки до плоскости, образованной тремя соседними точками, ограничивает минимально допустимую точность модели, построенной по разреженным данным.

Определено, что среднеквадратичное абсолютное расстояние  $\Delta D$  от всех точек, исключаемых из массива данных ВЛС, до плоскостей, образованных тремя соседними точками, коррелирует с рассчитанным в среде ArcGIS среднеквадратичным отклонением высот между ЦМР, построенной по разреженному и исходному массиву ТЛО. Таким образом, интерполяция массива ТЛО разработанным алгоритмом с заданным  $\Delta D$  на выходе сформирует разреженный массив ТЛО с  $\delta_D \leq \Delta D$ .

Величина  $\Delta D$  была принята как мера ожидаемой точности модели, построенной по разреженному массиву данных, относительно модели, построенной по исходным данным ВЛС; а величина  $\delta_D$  – как фактическая точность.

Автоматизация построения ЦМР заданной точности достигается с помощью итерационного применения разработанного в ходе диссертационного исследования алгоритма интерполяции данных ВЛС с изменением значения  $\Delta D$  на каждой итерации и подсчетом фактической точности  $\delta_D$  полученной ЦМР после каждой итерации, пока  $\delta_D$  не приблизится к заданию по отклонению.

Изменение шага  $\Delta D$  осуществляется с помощью функции пропорционально-интегрального регулирования, которая связана с  $\delta_D$ , посчитанным на предыдущем шаге следующим образом:

$$\Delta D = K_p (\delta_D - \delta_D^*) + K_I \int (\delta_D - \delta_D^*),$$

где  $\delta_D^*$  – предельная величина ошибки отклонения по высоте, которая в работе принята равной предельной величине СКП при съемке рельефа: 0,18 м;  $K_p$ ,  $K_I$  – коэффициенты пропорционального и интегрального изменения величины  $\Delta D$ , которые могут быть подобраны эмпирическим путем. Итерация, на которой следующее равенство будет выполняться, будет считаться итоговым разреженным массивом ТЛО, соответствующим заданной точности  $\delta_D^*$ :

$$|\delta_D - \delta_D^*| \leq \delta_y,$$

где  $\delta_D^*$  – уставка максимального отклонения фактической точности от требуемой.

Данная последовательность действий позволяет получить ЦМР, удовлетворяющую 1 и 3 критериям. Для удовлетворения второго критерия, весь массив ТЛЮ предварительно разделяется на секторы размеров 20 x 20 м, по углам которых расставляются ключевые точки, которые не подвергаются интерполяции.

Определение структурных линий – один из важных этапов при создании ЦМР. Исходные данные для построения ЦМР получают с помощью методов дистанционного зондирования и представляют собой наборы высотных отметок и структурных линий, задающих дополнительные ограничения на форму рельефа. При этом координаты высотных отметок и узлов некоторых структурных линий (границ оврагов, обрывов, береговых линий) задаются с высокой точностью, поэтому целесообразно использовать цифровую модель на основе треугольной сетки, узлами которой являются указанные точки.

Структурные линии чаще всего определяют области резкого изменения наклона поверхности рельефа. Резкое изменение наклона рельефа приводит к отклонению большим величинам абсолютного расстояния  $\delta_{xyz}$  от рассматриваемой точки до плоскости, образованной тремя ближайшими точками. Таким образом, для выявления структурных линий достаточно записывать все точки, у которых  $\delta_{xyz} \geq \Delta H$ , в отдельный массив, где  $\Delta H$  – заданный минимальный перепад высот, после которого считаем точку принадлежащей структурной линии.

На рисунке 8 представлена ЦМР, построенная по исходным данным ВЛС скалистого участка (рис. 8а), и ЦМР, построенная только по точкам, которые распознаны как структурные линии (рис. 8б). Из рисунка видно, что такая разреженная сетка, позволяет вынести структурные линии в отдельный слой. Этот слой будет использоваться при нанесении структурных линий, что гораздо менее затратно, чем определение структурных линий «вручную».

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основные научные и практические выводы по диссертационному исследованию:

1. Разработан автоматизированный метод построения цифровых моделей рельефа, обеспечивающий повышение эффективности инженерно-геодезических изысканий при проектировании автомобильных дорог за счет использования модифицированных цифровых моделей рельефа, адаптированных для широкого спектра компьютерного программного обеспечения.

2. Определена нормативная величина точек на 1 м<sup>2</sup> для различного рельефа местности на основе вариантного моделирования по разрежению точек массива лазерных отражений с использованием регулярной сетки, которая послужила ориентиром для дальнейших исследований по модификации ЦМР.

3. Разработан алгоритм интерполяции массивов точек лазерных отражений, основными особенностями которого являются низкая вычислительная сложность (не используется разбиение области на элементы, например, по алгоритму Делоне) и способность эффективно разрезать точки плоских участков рельефа (в том числе наклонных), сохраняя при необходимости детализацию в виде характерных точек и структурных линий.

4. Разработанный автоматизированный метод построения ЦМР успешно протестирован на участках трассы Москва - Санкт-Петербург.

**Публикации по теме диссертации:**

**В изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России:**

1. Кочнева, А.А. Методические аспекты проектирования протяженных объектов / А.А. Кочнева // Естественные и технические науки. – 2015. - №6 (84). - С. 240 – 243.

2. Кочнева, А.А. Создание цифровых моделей рельефа для проектирования автодорог на основе технологии воздушного лазерного сканирования / А.А. Кочнева, М.Г. Мустафин// Естественные и технические науки. – 2015. - №12 (90). - С. 91– 95.

3. Кочнева А. А., Методика построения цифровых моделей рельефа по данным воздушного лазерного сканирования / Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий), № 2, Т 22, 2017. С 44 - 54.

4. Кочнева А. А., Крыльцов С. Б., Алгоритм устранения избыточных данных воздушного лазерного сканирования для построения цифровых моделей рельефа / Геодезия и картография, № 9, 2017. С 50 - 54.

**В других изданиях:**

5. Кочнева, А.А. Использование космических снимков при инженерно - геодезических изысканиях при строительстве линейных объектов/Кочнева А.А.//Сборник тезисов по материалам международной научно-практической конференции «Средства и технологии ДЗЗ из космоса в науке, образовании, бизнесе, Санкт – Петербург, 10 – 11 апреля 2014 г.». – 2014.— С. 145 – 147.

6. Kochneva, A.A. Geodetic support in designing spatial linear structures based on laser scanning/A.A. Kochneva, M.G. Mustafin // Сборник научных трудов по материалам международной научно – практической конференции «International Scientific Conference. Property in the Space, Kalisz, 22 october 2015». – 2015. - С. 175 – 190.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017660810. Программа для интерполяции и устранения избыточных данных карты высот / А.А. Кочнева, А.Б. Маховиков, С.Б. Крыльцов // заявитель и патентообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский горный университет. – №2017617732; заявл. 01.08.2017; опубл. 26.09.2017.

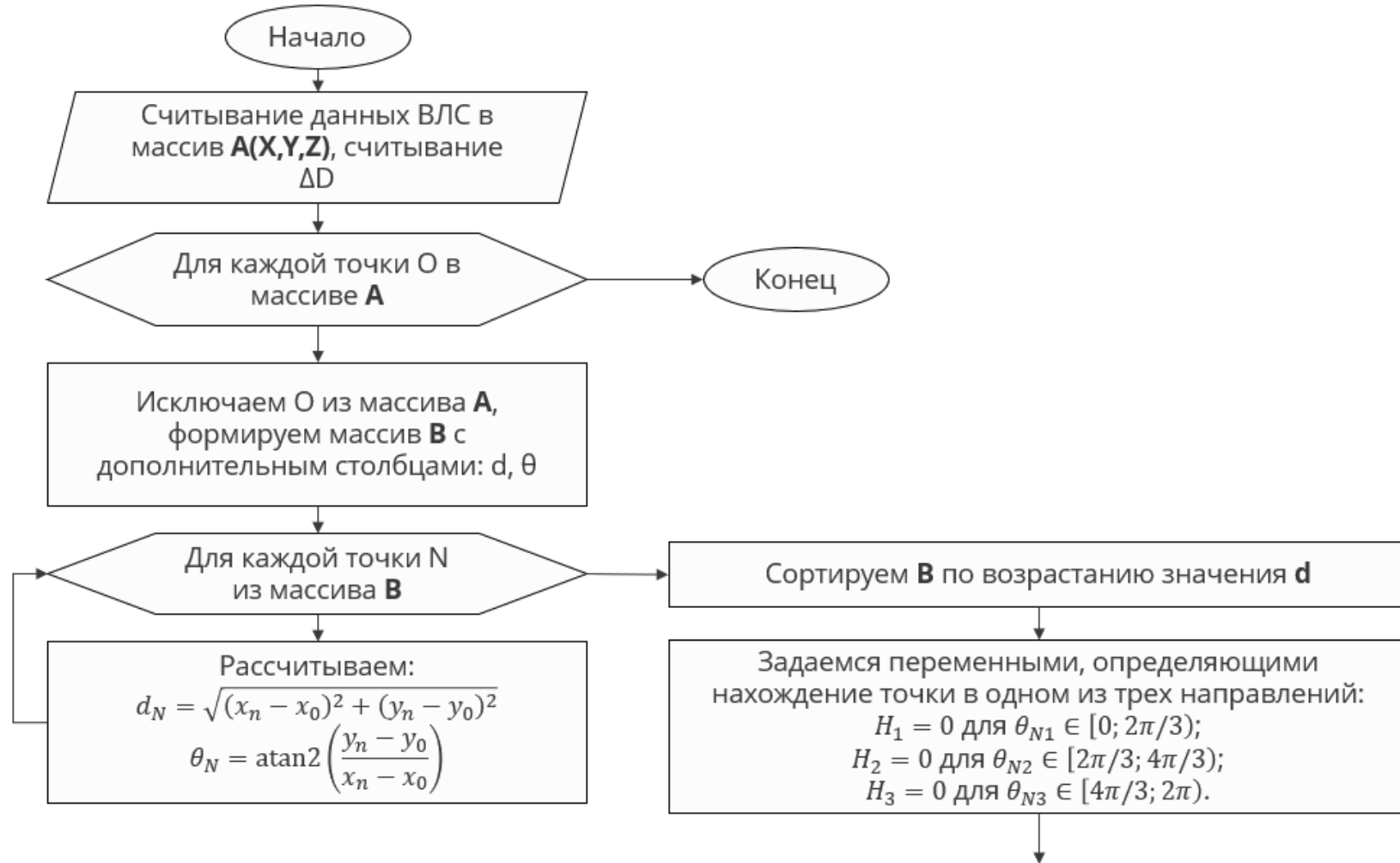


Рисунок 4 – Блок-схема разработанного алгоритма интерполяции

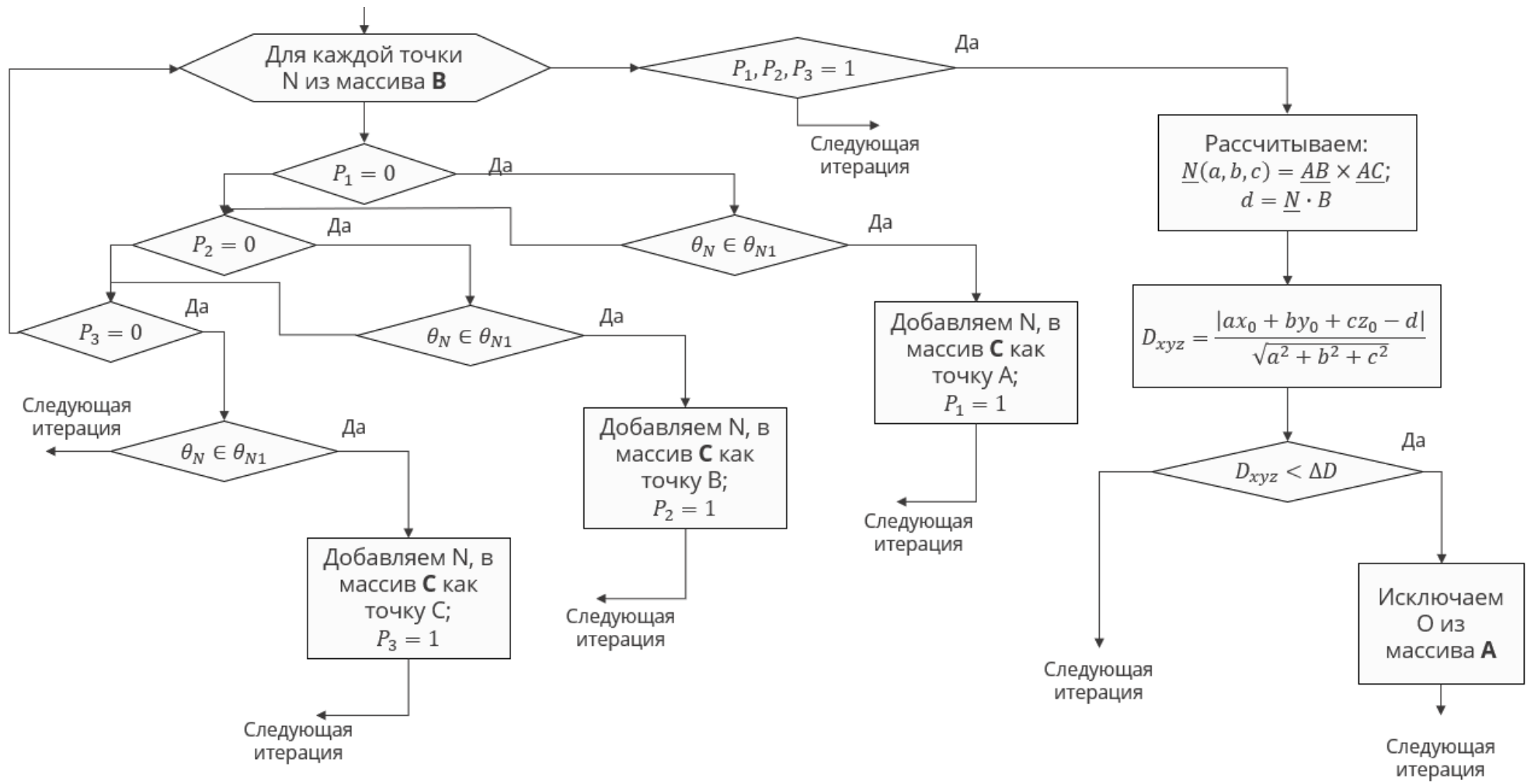


Рисунок 4 – Блок-схема разработанного алгоритма интерполяции (продолжение)

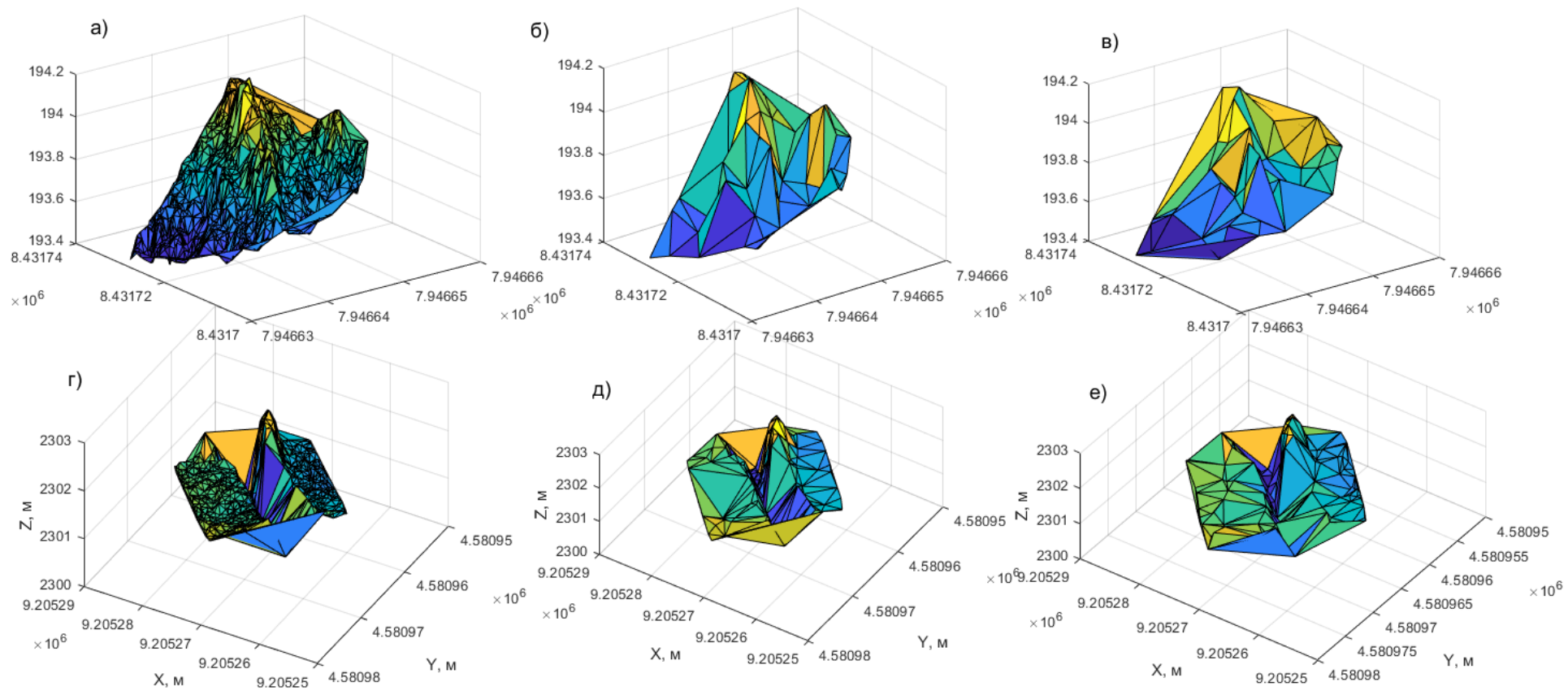


Рисунок 5 - Трехмерная визуализация ЦМР, построенных по исходным ТЛО участка 1 – а); исходным ТЛО участка 2 – б); разреженным в TerraScan ТЛО участка 1 – в); участка 2 – г); разреженным с помощью разработанного алгоритма ТЛО участка 1 – д); участка 2 – е).

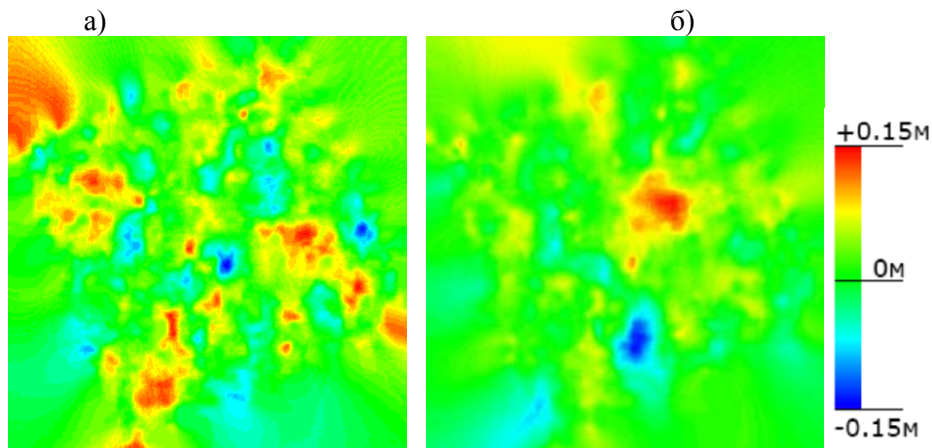


Рисунок 6 - Тепловая карта разницы высот между ЦМР, построенной на основе исходного массива ТЛО и ЦМР, построенной на основе разреженного массива ТЛО Участка 1 в TerraScan –а) и с помощью предлагаемого алгоритма – б).

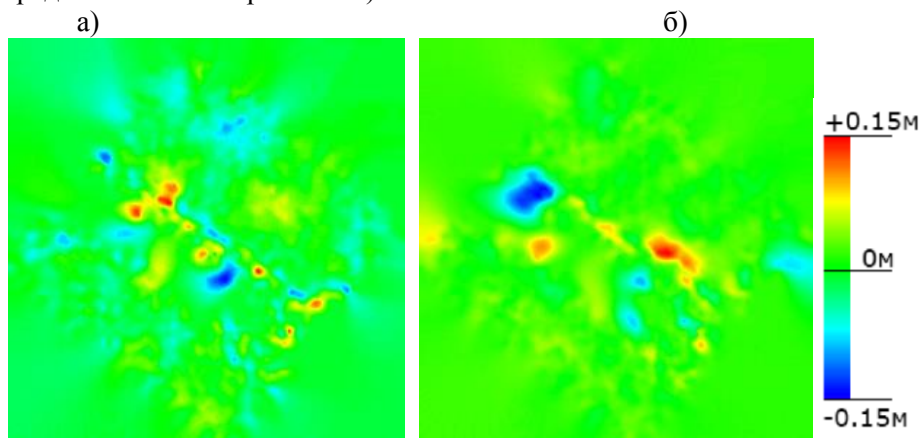


Рисунок 7 - Тепловая карта разницы высот между ЦМР, построенной на основе исходного массива ТЛО и ЦМР, построенной на основе разреженного массива ТЛО Участка 2 в TerraScan - а) и с помощью предлагаемого алгоритма – б).

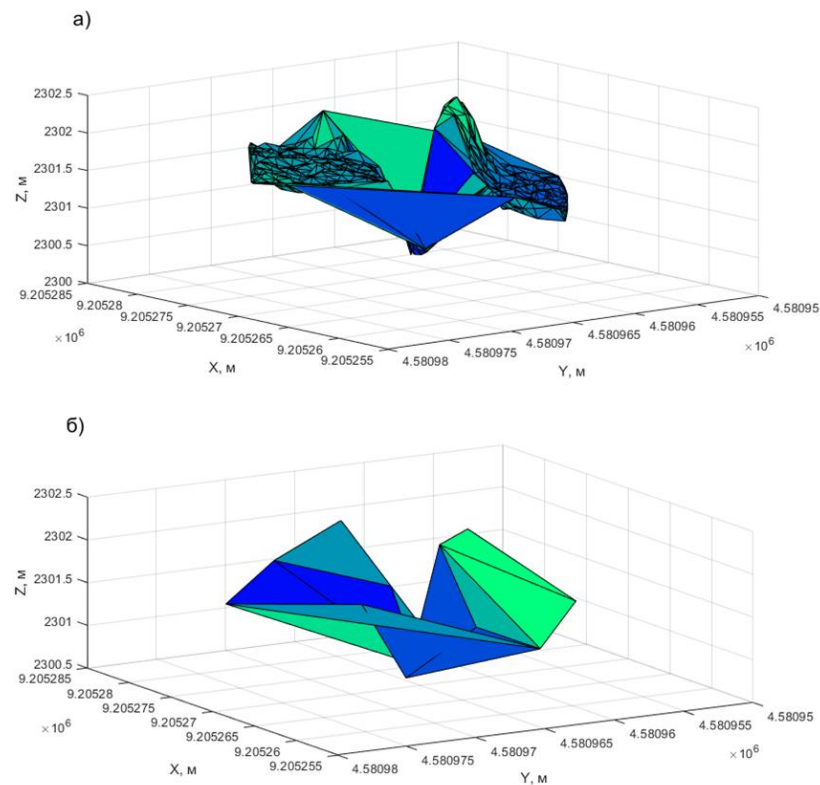


Рисунок 8- ЦМР, построенная по исходным данным ВЛС скалистого участка – а), и ЦМР, построенная только по точкам, которые распознаны как структурные линии – б).