

На правах рукописи

Шокер Хуссейн Мухаммад



**ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБМЕРНОЙ
ФИКСАЦИИ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ
НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНО-СКАНИРУЮЩЕЙ
СЪЕМКИ**

Специальность 25.00.32 – Геодезия

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

Санкт-Петербург – 2022

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Мустафин Мурат Газизович

Официальные оппоненты:

Щербаков Владимир Васильевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», кафедра инженерной геодезии, заведующий кафедрой;

Никитчин Андрей Андреевич

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

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 26 мая 2022 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.08 Горного университета по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 25 марта 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



КУЗИН

Антон Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Сохранение объектов культурного наследия связано с их фиксацией путем выполнения обмерных работ, при этом, как правило, применяется тахеометрическая съемка электронными приборами. В настоящее время в практике геодезических работ находят все большее применение лазерные сканеры, которые можно весьма эффективно использовать как средства получения наиболее полной и достоверной информации о геометрии объекта на конкретный момент времени.

Однако, ввиду своего относительно недавнего внедрения в геодезическую практику, в том числе для целей фиксации памятников, метод лазерного сканирования еще недостаточно разработан и описан в технической литературе. Среди главных достоинств лазерного сканера можно выделить возможность получения большого количества точек при сканировании, что выгодно отличает технологию от точечных способов, таких как, спутниковые определения или тахеометрическая съемка. Данное свойство лазерного метода позволяет перейти к усовершенствованию существующих подходов фиксации памятников культуры. Однако применение НЛС сталкивается с трудностями, которые состоят в сложности определения как опорной, так и съемочной сети при сканировании для обеспечения требуемой точности. Кроме того, известную сложность представляет определение диапазона углов сканирования с одной точки, которое отвечало бы заданной точности и позволило бы найти размеры зон покрытия ТЛЮ всего объекта и обеспечить построение модели объекта. Безусловно, необходим практический опыт и применение методики на конкретном объекте культурного наследия. Эти вопросы составляют задачи актуального диссертационного исследования по совершенствованию методики фиксации ПКН.

Степень проработанности исследуемого направления. Предпосылки к разработке технологии лазерного сканирования для фиксации памятников культурного наследия заложены в ряде

научно-исследовательских работ, как отечественных, так и зарубежных специалистов. К отечественным работам, внесшим значительный вклад, следует отнести труды таких ученых, как Вальков В. А., Варламова Л. Д., Виноградов К. П., Галахов В. П., Галахов В. П., Иванов А. В., Канашин Н. В., Комиссаров А. В., Комиссаров Д. В., Могильный С. Г., Середович А. В., Середович В. А., Чибуничев А. Г., Широкова Т. А., Шоломицкий А. А., Ямбаев Х. К. и др. В этих работах созданы принципы адаптации новой технологии в геодезическое делопроизводство, которые во многом могут быть использованы для фиксации памятников культурного наследия. В зарубежной литературе можно выделить работы таких специалистов как Lichti D. D., Licht M. G., Soudarissanane S. Кроме того, имеются многочисленные разработки в применении лазерного сканирования для решения различных инженерно-геодезических задач.

Цель работы. Повышение информативности и точности фиксации памятников культурного наследия на основе разработки методики обмера с использованием технологии лазерного сканирования.

Идея работы состоит в обосновании применения технологии лазерного сканирования для фиксации памятников культурного наследия, включающая комплексное рассмотрение всех стадий наземной лазерно-сканирующей съемки: анализ объекта и его территории, масштаб чертежа (модели), оптимизация построения опорной и съемочной сети с использованием моделирования и метода наименьших квадратов; оценка точности съемки с использованием тахеометрических контрольных точек и определение единичного сектора охвата для обеспечения требуемой точности построения модели объекта.

Задачи исследования:

1. Анализ состояния изученности вопроса о методах фиксации объектов культурного наследия и обоснование задач исследований.

2. Проектирование геодезической сети для съемки объектов культурного наследия и проведение математического моделирования с оценкой точности координат съёмочных пунктов.

3. Разработка линейно-угловых параметров лазерно-сканирующей съемки для обмеров памятников культурного наследия.

4. Разработка методики лазерно-сканирующей съемки памятников культурного наследия и ее практическое применение.

Научная новизна работы:

1. Обосновано геодезическое проектирования лазерно-сканирующей съёмочной сети для объекта культурного наследия замка Баальбек.

2. Приведены зависимости точности построения модели объекта культурного наследия лазерно-сканирующей съёмкой от количества съёмочных станций, линейно-угловых параметров съемки и среднеквадратической точности измерений сканера.

3. Построена трехмерная модель фрагмента объекта мирового культурного наследия замка Баальбек с точностью, соответствующей нормативной для обмерных чертежей планов, разрезов и фасадов.

Теоретическая и практическая значимость исследований состоит в разработке численных показателей технологии лазерного сканирования, обеспечивающих ее точность и информативность для подготовки документов по сохранению текущего состояния памятников культурного наследия. Дополнена методика обмера памятников культурного наследия, обеспечивающая установленные нормы их фиксации.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. При применении лазерно-сканирующей съемки для фиксации памятников культурного наследия целесообразно построение съёмочной сети выполнять на основе предварительного моделирования ее конфигурации и точности, а также использования контрольных точек, размещаемых непосредственно на изучаемом объекте и определяемых по тахеометрическим измерениям.

2. Проектирование мест расположения съемочных точек и оптимального их количества при наземном лазерном сканировании эффективно выполнять с использованием разработанных параметров единичного сектора охвата сканирования, учитывающих угловую и линейную точность измерений.

Методология и методы исследований. Анализ и обобщение теоретических и практических результатов исследований при обосновании актуальности темы работы и решаемых задач; Выбор объекта исследований. Геодезический метод определения координат; Планирование измерений. Натурные измерения, включающие экспериментальные геодезические наблюдения тахеометра; технология лазерного сканирования измерений; Обработка результатов измерений; Методы математической статистики и теории вероятностей; Метод наименьших квадратов для обработки результатов измерений; Анализ точности лазерно-сканирующей съемки; Моделирование объектов; Анализ результатов исследований.

Апробация работы. Результаты исследований и основные положения диссертации докладывались на международных и всероссийских конференциях, в том числе: на международном форуме «Геострой-2019» (Новосибирск, март 2019г.); на международной научно-технической конференции «САТРИД-2019» (Кисловодск, октябрь 2019г.); на международной научно-практической конференции “Современные проблемы инженерной геодезии” (Петербургский государственный университет путей сообщения, ноябрь 2019г.).

Предполагаемые объекты внедрения результатов исследований. Теоретические выводы и практические рекомендации работы рекомендуется использовать в геодезических организациях и в учебном процессе при обучении студентов геодезических направлений, в том числе в Горном университете; внедрение результатов работы предполагается в геодезических

фирмах Ливана и России (ООО «БЕНТА», ООО «Геодезические приборы» и других).

Степень достоверности результатов исследования подтверждается большим объемом фактических измерений на объекте мирового культурного наследия (замок Баальбек), обоснованностью теоретических расчетов по обоснованию использования наземной лазерной съемки, удовлетворительной сходимостью полученных результатов с данными других авторов, независимо исследующих вопросы данной тематики.

Личный вклад автора заключается в обсуждении и выборе темы диссертации, решении задач исследования, анализе и обобщении полученных результатов и выводов. В частности, им разработан способ корректировки и оценки точности точек лазерного сканирования по контрольным точкам; проведены натурные исследования с измерениями по технологии наземного лазерного сканирования в Ливане в замке Баальбек; проведено моделирование точности лазерно-сканирующей съемки; разработаны рекомендации по оптимальному построению съемочной сети при лазерно-сканирующей съемке.

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 6 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложений, изложенных на 130 страницах машинописного текста. Диссертация содержит 79 рисунков, 13 таблицы, список литературы из 126 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы. Поставлены цели и задачи исследования, описаны научная новизна работы, а также практическая ценность результатов исследований и показаны объекты их внедрения.

В первой главе проведен обзор традиционных и современных методов фиксации памятников культурного наследия, который показывает тенденцию их развития, направленную на широкое использование технологии наземного лазерного сканирования. Проанализирован опыт использования наземного лазерного сканирования- технологий при фиксации памятников культурного наследия в Российской Федерации, Ливане и других странах. Обоснованы и сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе. Проведено математическое моделирование возможных геодезических сетей для производства обмерных работ памятников культурного наследия. Особое внимание уделено построению опорных и съемочных сетей. Приведен алгоритм оценки точности наземного лазерного сканирования на основе контрольных точек, закоординированных тахеометрическими измерениями.

Третья глава посвящена анализу результатов наземного лазерного сканирования. Проведена оценка влияния угла падения луча сканера на снимаемую поверхность и расстояния до нее. Получены искомые зависимости, позволившие классифицировать по точности линейные и угловые диапазоны. Разработан единичный сектор охвата лазерного сканера при наземного лазерного сканирования, характеризующийся определенной точностью, что позволяет проведение проектирования съемочных станций на конкретном памятников культурного наследия.

В четвёртой главе представлена методика выполнения обмера памятников культурного наследия с использованием лазерного сканера. Приведена общая схема работ. Показана

практическая реализация методики на объекте мирового значения храма Баальбек в Ливане.

В заключении представлены основные выводы и результаты исследований, а также даны рекомендации по использованию технологии наземного лазерного сканирования для фиксации памятников культурного наследия.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых научных положениях:

1. При применении лазерно-сканирующей съемки для фиксации памятников культурного наследия целесообразно построение съемочной сети выполнять на основе предварительного моделирования ее конфигурации и точности, а также использования контрольных точек, размещаемых непосредственно на изучаемом объекте и определяемых по тахеометрическим измерениям.

Технология лазерного сканирования нашла свое применение во многих областях инженерной деятельности, и ее использование для фиксации памятников культурного наследия представляется весьма перспективным. В соответствии с национальным стандартом Российской Федерации (ГОСТ р 56905-2016), фиксация дает максимально исчерпывающее представление о современном состоянии объекта культурного наследия на момент проведения исследования. Однако основным, на сегодняшний день сдерживающим данную технологию фактором можно назвать практически полное отсутствие утвержденной нормативно-технической документации регламентирующей и описывающей методики проведения полевых и камеральных работ.

Сохранение культурного наследия связано с фиксацией объектов, для чего требуется определенная точность измерений. Фиксация памятников культурного наследия обычно выполняется путем геодезических измерений, порядок которых предусматривает создание геодезической сети, включая съемочные пункты. Проектирование съемочной сети для обмерных работ по технологии наземного лазерного сканирования весьма ответственная задача, от

качества решения которой зависит и точность модели, и объем выполняемых работ. В этой связи наиболее целесообразно предварительное моделирование геодезической сети.

Моделированием конфигурации геодезической сети с оценкой точности выполнялось по схеме, приведенной на рисунке 1. Пункты геодезической сети смоделированы в среде Автокад: четыре исходных (S_1, S_2, S_3, S_4) пункта и пять определяемых (съемочных) точек.

Длины линий (измерения) имитировались с учетом средней квадратической погрешности тахеометра. Расстояния между исходными точками и определяемыми точками варьировалось в пределах: $r_1 = 100 \text{ м}$ ($S_1^1, S_2^1, S_3^1, S_4^1$), $r_2 = 200 \text{ м}$ ($S_1^2, S_2^2, S_3^2, S_4^2$) и $r_3 = 300 \text{ м}$ ($S_1^3, S_2^3, S_3^3, S_4^3$). При имитации каждого расстояния использовались три уровня точности, отвечающие средней квадратической погрешности измерений тахеометра: 2 мм +2ppm & 2", 3 мм +2ppm & 3", 5 мм +3ppm & 5" (рисунок 1).

Используя алгоритм метода наименьших квадратов (МНК, рисунок 2-приложение), были выполнены расчеты и определены средние апостериорные средняя квадратическая погрешность положения пяти контрольных точек.

На рисунке 3 показаны усредненные средняя квадратическая погрешность съемочных точек с последовательным применением от 1 до 4 опорных пунктов и использованием трех различных тахеометров, а также трех расстояний до исходных пунктов.

Результаты этих испытаний послужили основой для проектирования мест расположения измерительных лазерно-сканирующих станций для стены замка Баальбек (Ливане).

Оценка точности положения точек лазерных отражений выполнена с привлечением тахеометрических измерений. Контрольные точки закреплены на стене замка и представляют собой пленочные отражатели (рисунок 4). Координирование выполнено тахеометром *Topcon OS-105* с точностью определения расстояний 2 мм + 2 ppm в режиме наведения на призму и 3 мм + 2 ppm в безотражательном режиме.

Сначала по методике, описанной выше, определены координаты съемочной сети, состоящей из 8 точек и расположенных перед стеной (рисунок 5). При этом исходными были три пункта: $S1$, $S2$ и $S3$. Далее определены координаты 27 контрольных точек, закрепленных на стене (рисунок 4). При использовании 3 тахеометрических станций можно получить субмиллиметровую точность контрольных точек, которая обеспечит определение точек лазерных отражений в соответствии со стандартом (ГОСТ Р 56891.2-2016), регламентирующем диапазон точности фиксации объектов культурного наследия для чертежей масштаба 1: 20 и крупнее.

В целом ряде исследований по применению технология лазерного сканирования имеются рекомендации по выполнению измерений в диапазоне углов падения лазерного луча не более 60° - 70° . Вместе с тем не дается расширенного научного объяснения в каких случаях возможно применение этого диапазона и какая при этом достигается точность положения точек лазерных отражений.

Автор предлагает методику оценки точности положения точек лазерных отражений, основанную на использовании контрольных точек, созданных тахеометрическим способом и уравненных по методу наименьших квадратов (рисунок 2). Лазерное сканирование поверхности исследуемого объекта (стена замка Баальбек) проводилось (рисунок 4) путем последовательной установки сканера *Leica P30* на каждой из 8 съемочных точек (рисунок 5). Сначала определена общая ошибка, вызванная одним циклом съемки из 8 станций лазерного сканера. Погрешность (*Error*) рассмотрена в виде вектора и рассчитана из выражения (1):

$$Error = \sqrt{(x_T - x_{LC})^2 + (y_{LC} - y_{LC})^2}, \quad (1)$$

где x_T, y_T – координаты контрольных точек; x_{LC}, y_{LC} – координаты точек лазерных отражений.

Соотношение между погрешностями положения точек и углов падения лазерного луча представлено на рисунке 6. Приведены отклонения положения точек лазерных отражений от координат контрольных (связующих) точек 6, 18, 24.

При этом проанализированы результаты съемок с 3 сканерных станций (1, 2 и 3), расположенных на одинаковом расстоянии от стены (16,67 м).

Затем для определения влияния расстояний на погрешность положения точек выполнен анализ результатов наземного лазерного сканирования съемки со станций 1, 4 и 7, которые расположены на разных расстояниях от стены: 16,67, 33,33 и 50 м соответственно. Оценка точности выполнялась с опорой на контрольные точки 20, 21 и 22 (рисунок 7). Как видно из рассмотрения графиков, погрешность коррелируется с расстоянием и углом падения луча сканирования.

Рассматриваемый пример (стена замка Баальбек) вмещает в себя разные формы элементов либо декора, или конструктивных. Для их более конкретизированного анализа удобно ошибки измерений разделить на $f(x)$ (вдоль стены, квазипараллельно земной поверхности) и $f(y)$ (перпендикулярно стене).

По результатам обработки наземного лазерного сканирования съемки (рисунок 5), проведенной с 8 съемочных станций получены следующие результаты (рисунок 8). На рисунке 8, $f(x)$ и $f(y)$ параболическая аппроксимация по методу наименьших квадратов от измеренных величин, которая четко выделяется на интервале углов падения от 0° до 68° . До значений в $78-79^\circ$ фактические данные распределяются по линейному закону (красная линия-СО).

В таблице 1 приведены расчетные значения ошибки положения точек лазерного отражения и определенные на основе наземного лазерного сканирования съемки стены замка Баальбек.

Таблица 1 – Ошибки положения точек лазерных отражений в зависимости от угла падения: расчетные (e_x, e_y) и по результатам измерений ($f(x), f(y)$)

Угол, градус	0	10	20	30	40	50	60	68
$f(x)$	0	1.23	3.2	4.43	5.6	6.52	7.17	7.6
e_x , мм	0.7	1.64	2.53	4.02	6	6.4	6.8	7.14
$f(y)$	8.22	8.14	7.55	6.9	6.33	5.12	3.95	3.04
e_y , мм	8.02	8	7.8	7.1	6.4	5.39	4.15	3.24

По результатам проведенных натурных измерений и их обработке можно при решении конкретной задачи выделить диапазон углов сканирования, обеспечивающий требуемую точность.

2. Проектирование мест расположения съемочных точек и оптимального их количества при наземном лазерном сканировании эффективно выполнять с использованием разработанных параметров единичного сектора охвата сканирования, учитывающих угловую и линейную точность измерений.

Проблема оптимального проектирования съемочной сети достаточно хорошо решена для точечных геодезических измерений и в фотограмметрии. Для наземного лазерного сканирования многое из разработанного приемлемо, но в силу своих особенностей необходимо обоснование параметров единичного измерения.

Автором разработана методика, использующая результаты вышеприведенных исследований и позволяющая проектирование съемочной сети на основе разработанного единичного сектора охвата лазерного сканера. На рисунке 9 показана блок-схема предлагаемого подхода. Как видно, подход представляет собой итерационный процесс оптимизации. Сначала моделируется процесс сканирования в двумерном плановом виде, по которому определяются области установки сканера.

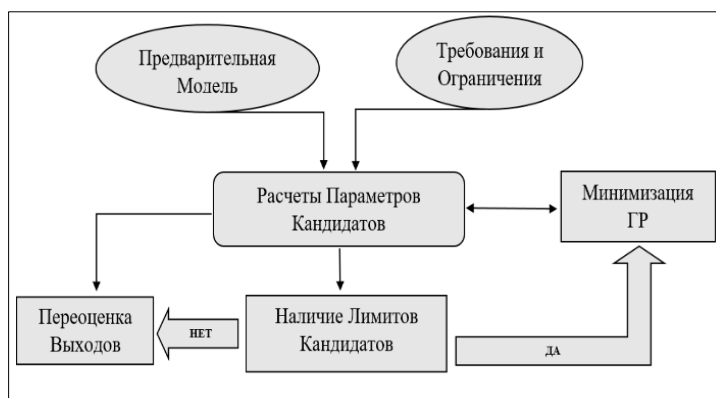


Рисунок 9 – Блок-схема оптимизации расположения сканерной станции.

По предварительной модели для расчета параметров кандидата (станция лазерного сканирования) требуются следующие данные и ограничения:

- Точность лазерной контрольной точки станции.
- Требуемое перекрытие между каждыми двумя соседними станциями сканирования.
- Паспортная точность (средняя квадратическая погрешность) лазерного сканера.
- Допустимый угол падения луча (68° на основе упомянутого выше результата).
- Минимально необходимая точность модели облака точек (ГОСТ Р 56905-2016).

Построив схему объекта сканирования (рисунки 11-14), процесс расчета (первый шаг) начинается с вычисления максимального расстояния (максимального диапазона с учетом допустимого угла падения лазерного луча) следующим образом (2, 3):

$$S_{МАК}^2 \times \left(\frac{Y^2}{10^{12}} + \frac{\sigma_{\beta}^2}{\rho^2} \right) + S_{МАК} \times \left(\frac{2 \times X \times Y}{10^6} \right) + X^2 - \sigma_{np}^2 = 0, \quad (2)$$

$$\sigma_{np} = \sqrt{\sigma_{Треб}^2 - (\sigma_{КТ}^2 + \sigma_{Ц}^2 + \sigma_{\phi}^2)}, \quad (3)$$

где $S_{МАК}$ - максимальное расстояние, X, Y & σ_{β} - паспортная точность прибора лазерного сканера ($X_M + Y_{PPM}, \sigma_{\beta}''$), σ_{np} - ошибка прибора, $\sigma_{Треб}$ - требуемая точность, $\sigma_{КТ}$ - точность лазерной станции.

Второй шаг начинается с вычисления координат мест расположения сканера (в вершинах треугольников). Затем наступает очередь покрыть остальную часть геометрической фигуры или многоугольника фиксируемого объекта сканерными станциями. При этом соблюдается угловой диапазон, допустимые расстояния и перекрытия.

Процесс оптимизации автоматизирован. Визуализация процесса выполняется в среде Автокад. Определение наилучших мест расположения станций проводится с учетом реальной ситуации и корректируется при невозможности ее размещения в моделируемом месте. В заключительном шаге выполняется оптимизация числа станций сканирования.

Программа протестирована на трех теоретических примерах с различной геометрией объектов (рисунок 10). Далее автор применил этот подход к одному из древнейших храмов в мире "Храму Юпитера", расположенному в храмовом комплексе Баальбек (Ливан, рисунок 11) и зданию Кфури в лесу Вата-эль-Мрудж-Болония (Ливан, рисунок 12).

Касательно случая с храмом, то ввиду его огромных размеров и отсутствия крыши, двумерный чертеж храма со всей необходимой информацией был извлечен из облачной 3D-модели с низким разрешением, созданной с помощью беспилотной летательного аппарата. Двумерный чертеж здания был создан на основе международного стандарта Российской Федерации (ГОСТ Р 56905-2016). Измерения методом триангуляции проводились с использованием рулеточных мер (складных метров).

Наземное лазерное сканирование выполнено сканером "Leica P30", который обеспечивает высочайшее качество 3D-данных по принципу фазового сдвига с точностью 1,2 мм+10 ppm. Далее применена автоматизация построения схемы сканирования с оптимизацией мест расположения сканеров. Затем, введены в качестве исходных данные требования Национального стандарта Российской Федерации (ГОСТ Р 56905-2016) и и результат выполнения второго задания в данной диссертации (точности в зависимости от угла и расстояния наземного лазерного сканирования съемки). Данные получили следующие значения: $\sigma_{\text{Треб}} = 0,01$, $\sigma_{KT} = 0,009$, $\theta_{\text{МАК}} = 68^\circ$, $O_{(\%) } = 30\%$.

На рисунках 10, 11, 12, 13 и 14, показан результат (схема оптимального расположения станций сканирования). Храм Юпитера покрыт 32 станциями (11 внутренних и 21 наружная станция). И здание покрыто 27 станциями. (13 и 10 внутренних станций на первом и втором этажах и 4 внешних станции). Серые зоны представляют собой область, где наземный лазерный сканер-кандидаты (станции сканирования) могут перемещаться, сохраняя при этом полный охват объекта сканирования.

На завершающем этапе задача пользователя состоит в том, чтобы выбрать оптимальные положения лазерных кандидатов в серых зонах. Для создания оптимальной сети триангуляции наземного лазерного сканирования (светло-голубые линии, рисунки 13-14) при сохранении перекрытия и видимости между кандидатами. Таким образом, 100% здания и храма будет покрыто облаком точек (красные линии, рисунки 13-14).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи: разработки методики лазерно-сканирующей съемки для обмеров памятников культурного наследия.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. На основе теоретических исследований, включавших моделирование съемочных сетей с оценкой их точности по методу наименьших квадратов и экспериментальных работ с большим объемом лазерного сканирования, выполненных автором диссертации разработана методика фиксации объектов культурного наследия на основе применения лазерно-сканирующей съемки.

2. Представлена методика геодезического обеспечения съемочной сети при ТЛС, включающая алгоритм оптимизации координат съемочной сети относительно исходных пунктов, а также технологию размещения контрольных точек на снимаемом объекте, обеспечивающую оценку точности точек лазерных отражений.

3. Проведено обобщение результатов моделирования и фактических результатов съемки, позволившее получить зависимости линейно-угловых параметров от условий лазерной съемки, а также диапазон углов единичного сканирования, отвечающего определенной точности. Результаты этих исследований дали возможность определить для определенных условий единичный сектор охвата лазерного сканирования, что важно для проектирования съемочных точек на конкретном объекте.

4. Автором разработана компьютерная программа для построения и оценки точки точности геодезической сети, позволяющая оценить точность модели объекта фиксации.

5. Разработанная методика трехмерной оптимизации расположения станций сканирования, реализована в программном виде и протестирована с обеспечением 100% покрытия точек лазерных отражений исследуемого объекта.

6. Разработанная методика в виде практических рекомендаций для Министерства культуры Ливана реализована на объекте мирового культурного значения замка Баальбек в Ливане.

7. Перспективы исследований состоят в развитии настоящих исследований с построением трехмерной модели

памятников культурного наследия на основе широко привлечения данных воздушного лазерного сканирования.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Мустафин, М.Г. Оценка влияния линейно-угловых параметров лазерно-сканирующей съемки на точность построения модели объекта / М.Г. Мустафин, **Х.М. Шокер** // Маркшейдерский вестник. – Москва. – 2020. – № 6 (139). – С.42-50.

2. **Шокер, Х.М.** Геодезическое обеспечение использования технологии лазерного сканирования для фиксации памятников культурного наследия / Х. М. Шокер, М.Г. Мустафин // Геодезия и картография. – Москва. – 2021. – № 2. – С.2.

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

3. Hatoum, H.M. Geodesic methods for modeling and protection of megalopolis objects / H.M. Hatoum, **H.M. Choker**, M.G. Mustafin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. –2019. –Т.698. – P.7.

4. **Choker, H.M.** The big structures modeling and archiving using terrestrial laser scanner and proposing a new geodetic method for future monitoring / H.M. Choker, H.M. Hatoum, M.R. Abboud // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. –2019. –Т.698. – P.7.

5. Аль Фатин, Х.Д. Влияние атмосферных условий и геометрии сети на результаты геодезических наблюдений / Х.Д. Аль Фатин, Х.М. Хатум, **Х.М. Шокер**, О.А. Колесник // Известия ТулГУ. Науки о Земле // Тульский государственный университет – Москва. – 2021. – Вып.2 (469). – С.3-20.

Публикации в прочих изданиях:

6. Хатум, Х.М. Современные геодезические технологии измерений при создании моделей объектов и контроле деформационных процессов / Х.М. Хатум, **Х.М. Шокер**,

М.Г. Мустафин, М.Р. Аббуд // Естественные и технические науки. – Москва. – 2019. – № 4 (130). – С.126-129.

Свидетельство:

7. **Шокер, Х.М.** Программа для построения и оценки точки точности двумерной геодезической сети / Х.М. Шокер, М.Г. Мустафин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: правообладатель Санкт-Петербургский горный университет. – рег. № 2021611958 от 09.02.2021 г. – М.: Роспатент, 2021.

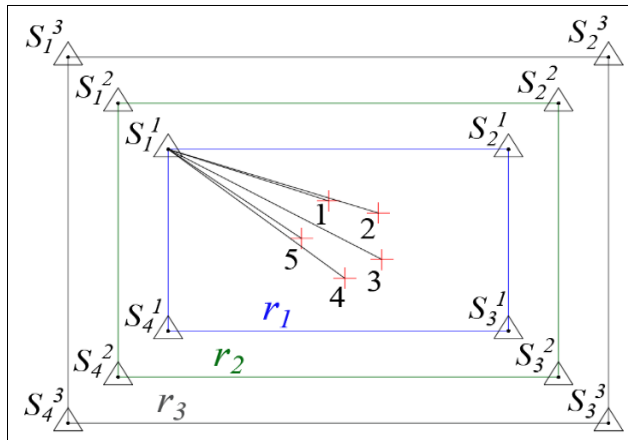


Рисунок 1 – Схема модели геодезической сети для оценки точности съёмочных точек (Δ – исходные пункты, + – 1-5 съёмочные точки)

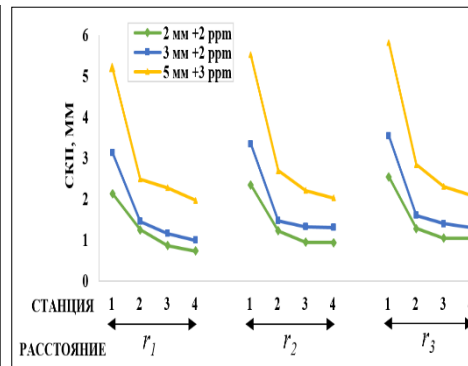


Рисунок 3 – Графики вариаций средняя квадратическая погрешность съёмочных точек в зависимости от расстояний до исходных пунктов и инструментальной точности тахеометра

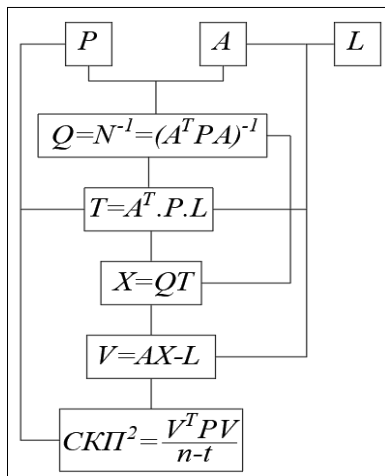


Рисунок 2 – Схема уравнивания измерений координат и определений невязок

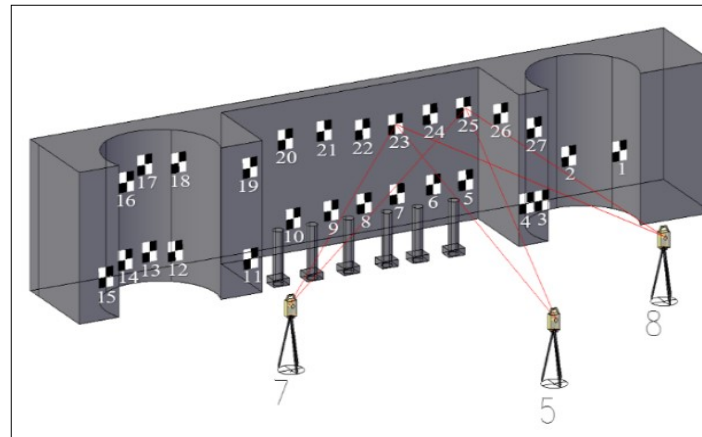


Рисунок 4 – Модель стены храма Баальбек (5,7,8 – станции измерений по технологии наземного лазерного сканирования, □- контрольные точки, координаты которых определены тахеометрическими измерениями)

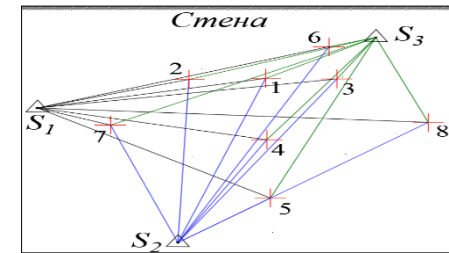


Рисунок 5 – Схема к построению геодезической съёмочной сети (Δ - опорные пункты, + съёмочные точки)

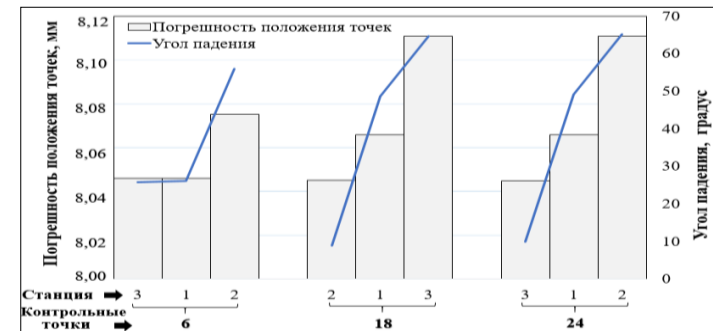


Рисунок 6 – Диаграмма погрешности положения точек лазерных отражений от угла падения луча

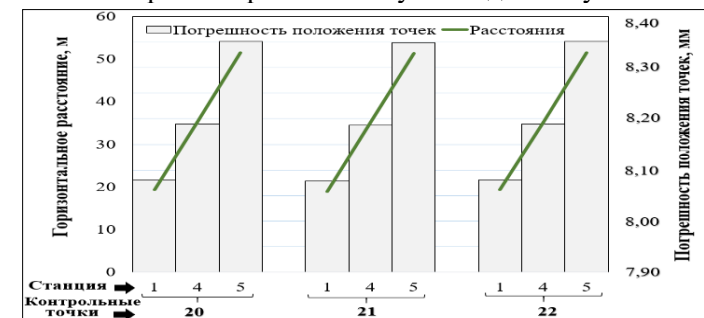


Рисунок 7 – Соотношение между погрешностью положения точек лазерных отражений и расстояния до съёмочной станции

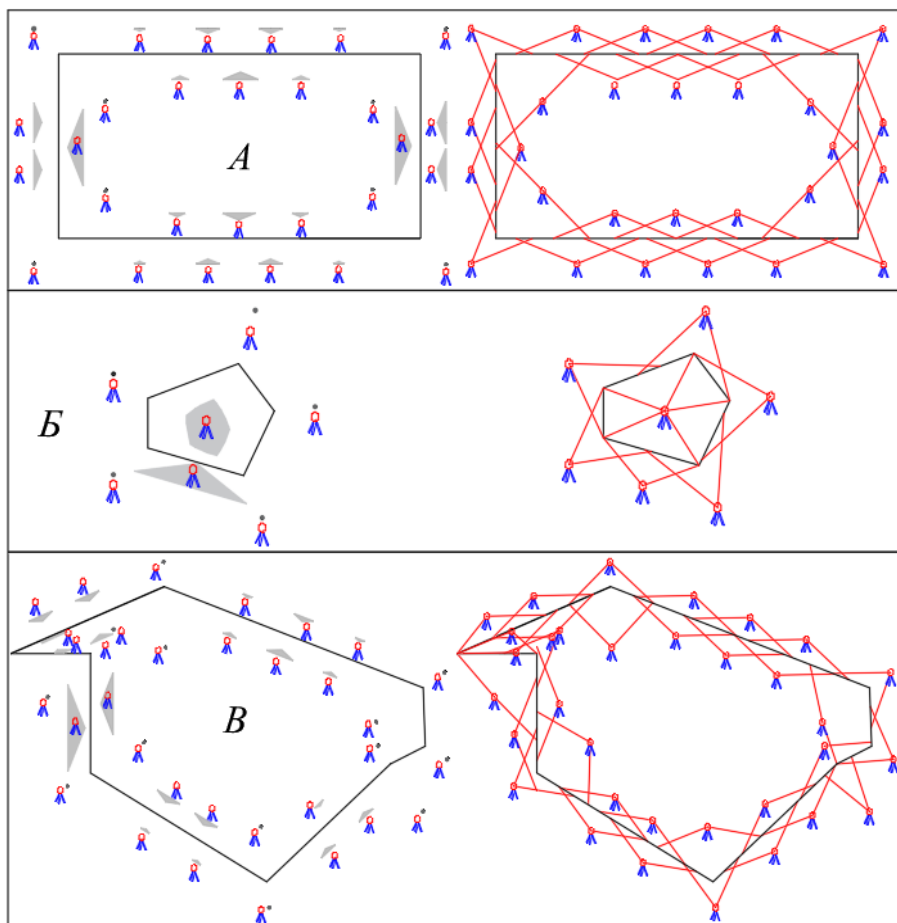


Рисунок 10 – Схема к оптимизации мест расположения сканера при наземного лазерного сканирования для покрытия всей поверхности геометрических фигур: А – правильный многоугольник, Б – выпуклый многоугольник, В – вогнутый многоугольник (📡 – сканер (сектор наземный лазерный сканер -кандидат), серая зона – сектор охвата кандидата, красные линии – зоны покрытия)

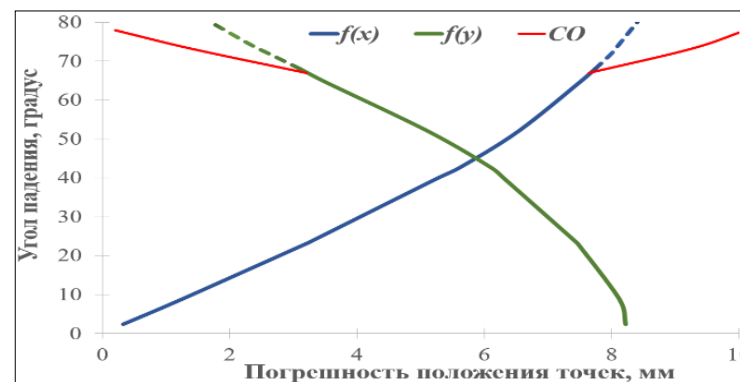


Рисунок 8 – Обобщенный график распространения погрешности координат точек сканирования от угла падения лазерного луча

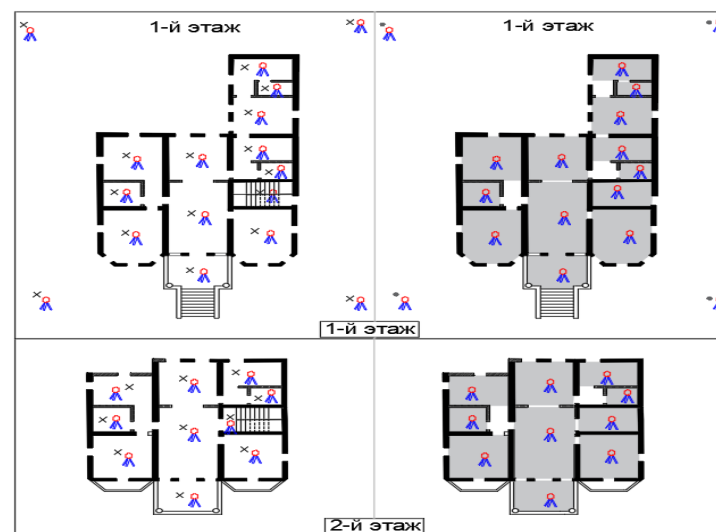


Рисунок 11 – Схема к оптимизации мест расположения сканера при наземного лазерного сканирования для покрытия всей поверхности здания (📡 – сканер (сектор наземный лазерный сканер -кандидат), серая зона – сектор охвата кандидата)

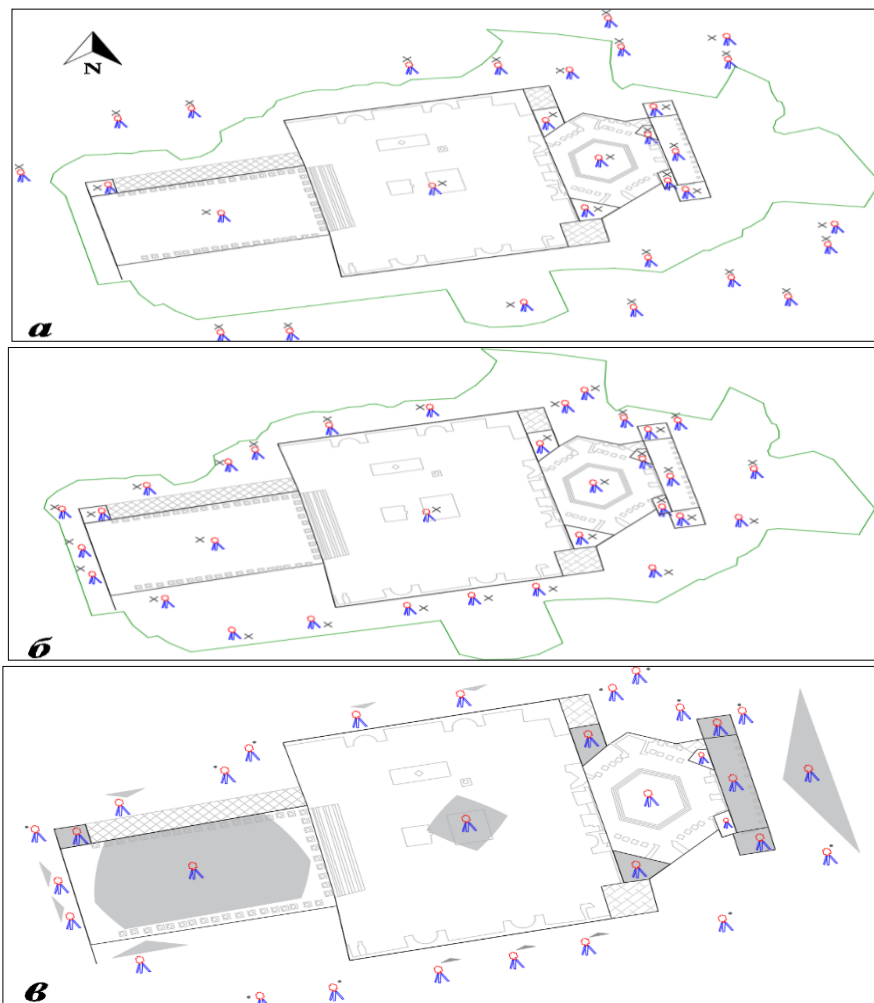


Рисунок 12 – Схема к оптимизации мест расположения сканера при наземном лазерном сканировании для покрытия всей поверхности храма Юпитера (— сканер (сектор наземный лазерный сканер -кандидат), серая зона – сектор охвата кандидата, зеленая линия – граница храма)

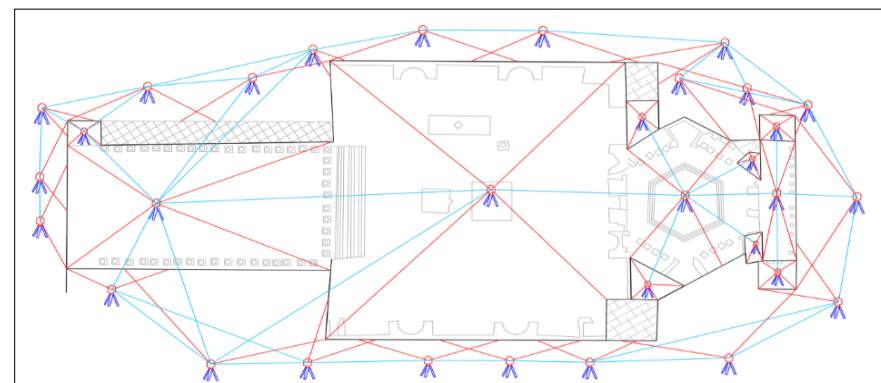


Рисунок 13 – План здания с местами расположения кандидатов для храма Юпитера (— сканер (сектор наземный лазерный сканер-кандидат), красная линия – диапазон покрытия кандидатом, синяя линия – сеть триангуляции для кандидатов)

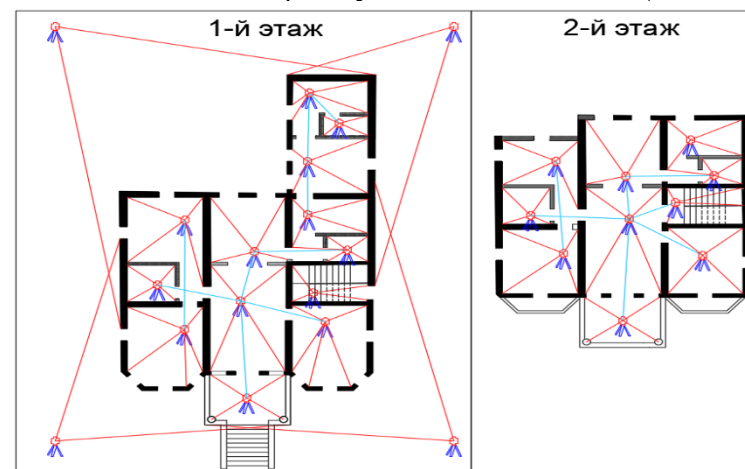


Рисунок 14 – План здания с местами расположения кандидатов для здания (— сканер (сектор наземный лазерный сканер -кандидат), красная линия – диапазон покрытия кандидатом, синяя линия – сеть триангуляции для кандидатов)