

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

На правах рукописи

Шокер Хуссейн Мухаммад



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

Специальность 25.00.32 – Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Мустафин М.Г.

Санкт-Петербург – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ, ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И ТЕХНОЛОГИЙ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ФИКСАЦИИ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ	10
1.1 Предпосылки совершенствования методики фиксации памятников культурного наследия	11
1.2 Обзор некоторых примеров использования лазерного сканирования	14
1.3 Анализ существующих нормативно-методических документов, регламентирующих обмерные работы на объектах культурного наследия и использование технологии лазерного сканирования	17
1.4 Обзор применения различных геодезических методов измерений	20
1.4.1 Тахеометрические измерения	22
1.4.2 Технология ГНСС	23
1.4.3 Применение в геодезических работах беспилотных летательных аппаратов	27
1.4.4 Наземная фотограмметрическая съемка	29
1.4.5 Дистанционное зондирование.....	31
1.4.6 Технология НЛС.....	33
1.5 Факторы, влияющие на точность измерений при использовании технологии НЛС.....	35
1.5.1 СКП измерений (приборная погрешность)	36
1.5.2 Атмосферные условия	37
1.5.3 Влияние характеристик поверхностей сканируемых объектов	39
1.5.4 Конфигурация съемочной сети.....	40
1.6 Выводы по главе 1	42
ГЛАВА 2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ ДЛЯ СЪЕМКИ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ОЦЕНКОЙ ТОЧНОСТИ КООРДИНАТ СЪЕМОЧНЫХ ПУНКТОВ.....	44
2.1 Моделирование и оценка точности геодезической сети.....	44

2.1.1 Математический аппарат.....	44
2.1.2 Разработка автоматизированного алгоритма оценки точности определяемых точек	46
2.1.3 Автоматизация алгоритма построения схемы геодезической сети и оценки точности ее пунктов.....	49
2.1.4 Моделирование геодезических сетей.....	51
2.1.5 Оценка точности положения точек лазерных отражений.....	55
2.2 Разработка методики оценки линейно-угловых параметров лазерно-сканирующей съемки.....	57
2.3 Выводы по главе 2.....	68
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОБМЕРОВ ПАМЯТНИКОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ МЕТОДОМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ.....	70
3.1 Общая схема и процесс расчета предлагаемой методики.....	70
3.1.1 Первый этап процесса расчета	71
3.1.2 Второй этап процесса расчета.....	72
3.1.3 Заключительный этап процесса расчета.....	82
3.2 Определение точности построения модели.....	83
3.3 Теоретическое применение разработанной методики	85
3.4 Выводы по главе 3.....	91
ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ ОБМЕРА ПАМЯТНИКОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ МЕТОДОМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ	92
4.1 Описание объекта практической реализации разработанной методики	92
4.2 Процесс расчета практического применения разработанного метода	94
4.2.1 Предварительное моделирование.....	94
4.2.2 Учет норм при построении модели	96
4.2.3 Процесс и результаты моделирования мест точек стояния при НЛС	108
4.3 Выводы по главе 4.....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	117

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. 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 ТЛО 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 разработанности темы исследования. Предпосылки к разработке ТЛС для фиксации ПКН 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., 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 другие. В этих работах разработаны принципы адаптации новой технологии в геодезическое делопроизводство, которые во многом могут быть использованы для фиксации ПКН. 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 исследований – повышение информативности и точности фиксации ПКН на основе разработки методики обмера с использованием ТЛС.

Идея работы состоит в обосновании применения ТЛС для фиксации ПКН, куда будет включено комплексное рассмотрение всех стадий наземной лазерно-сканирующей съемки, а именно анализ объекта и его территории, масштаб чертежа (модели), оптимизация построения опорной и съёмочной сети с использованием моделирования и МНК, оценка точности съемки с использованием тахеометрических контрольных точек и определение единичного сектора охвата для обеспечения требуемой точности построения модели объекта.

Задачи исследований:

1. Анализ степени 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 ПКН и ее практическое применение.

Научная новизна исследований:

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

2. Приведены зависимости точности построения модели объекта культурного наследия лазерно-сканирующей съемкой от количества съемочных 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 ПКН 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.

2. Проектирование мест расположения СТ и оптимального их количества при НЛС 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 тахеометром. ТЛС измерений. Обработка результатов измерений. Методы математической статистики и теории вероятностей. МНК для обработки результатов измерений.

Анализ точности лазерно-сканирующей съемки. Моделирование объектов. Анализ результатов исследований.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований и основные положения диссертации докладывались на международных и всероссийских конференциях, в том числе:

1. Международный форум «Геострой-2019: Цифровые технологии в архитектуре, территориальном планировании, управлении урбанизированными территориями, рисками и чрезвычайными ситуациями, технологии информационного моделирования» (г. Новосибирск, 2019 г.).

2. Международная научно-техническая конференция «Строительство и архитектура: теория и практика развития отрасли» (г. Кисловодск, 2019 г.).

3. Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы инженерной геодезии» (г. Санкт-Петербург, ПГУПС, 2019 г.).

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 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.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы, включающего 126 наименований. Диссертация изложена на 130 странице машинописного текста, содержит 79 рисунков и 13 таблиц.

Благодарности. Выражаю искреннюю благодарность моему научному руководителю – д.т.н., заведующему кафедрой инженерной геодезии Горного университета Мустафину М.Г. за ценные советы при работе над диссертацией. Кроме того, благодарю всех сотрудников кафедры за внимание и содействие в подготовке диссертации.

Искреннюю благодарность выражаю к.т.н., заведующему кафедрой инженерной геодезии Ливанского международного университета М.Р. Аббуду за помощь и наставления при выполнении исследовательских работ.

Также, считаю своим приятным долгом выразить благодарность моим родителям за поддержку принятого мною решения поступить в аспирантуру и написать диссертацию.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ, ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И ТЕХНОЛОГИЙ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ФИКСАЦИИ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

Сохранение объектов культурного наследия связано с их фиксацией путем выполнения обмерных работ, которые могут быть эффективно выполнены при использовании метода лазерного сканирования, как средства получения наиболее полной и достоверной информации о геометрии объекта в конкретный момент времени [9, 18, 56, 67, 74, 86, 102]. Данный метод позволяет приступить к совершенствованию существующих подходов к фиксации памятников культуры. Однако в связи с относительно недавним внедрением лазерных сканеров в геодезическую практику, и особенно для фиксации памятников, эти методы не так широко представлены в технической литературе, по сравнению, например, с методом тахеометрической съемки [26, 45, 50, 54, 97].

Существует большое количество вопросов по обеспечению правильной техники использования технологии лазерного сканирования (ТЛС) для фиксации памятников [9, 18, 56, 67, 74, 86, 102], в целом они сводятся к обеспечению требований стандартов точности. Фиксация памятника позволяет получить его электронную копию, что сохраняет историческую память и возможность проведения ремонтных и восстановительных работ. Памятники культурного наследия (ПKN) за свою историю подвергаются различным воздействиям, например, процессы эрозии и вандализм, и как долгоживущие артефакты, они прошли множество этапов перестройки, получения повреждений и последующего ремонта. Таким образом, важно смоделировать ПKN с относительно высокой точностью. Из-за сложности этих сооружений 3D-моделирование этих сооружений занимает много времени и является сложным, обычно требующим больших усилий по обработке процессом. Для достижения наилучшей фиксации и визуализации в виде 3D-модели исторического памятника применяется технология цифрового сканирования [48, 69, 83, 87].

В соответствии с нормативными документами [31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38,

78, 80, 90] сохранение культурного наследия может быть создано как традиционными, так и современными методами.

Объекты культурного наследия в соответствии с Федеральным законом [33, 36, 39, 80] включают в себя памятники – отдельные постройки, здания и сооружения с исторически сложившимися территориями; мемориальные квартиры; мавзолеи, отдельные захоронения; произведения монументального искусства; объекты науки и техники, включая военные; объекты археологического наследия.

Рассмотрим основные традиционные и современные методы фиксации ПКН и проанализируем их преимущества и недостатки.

1.1 Предпосылки совершенствования методики фиксации памятников культурного наследия (ПКН)

ПКН (рисунок 1.1), в том числе храмы и другие сооружения, являются богатым наследием нашего прошлого, которое живет в нашей памяти. Идентичность и характер сообщества проявляются в ПКН или знаковых зданиях. Вместе с тем ПКН нечто большее, чем материальное воплощение. Они отражают морально-социальную сущность прошлого. Когда мы сохраняем наследие, это не означает просто замораживание здания во времени или создание музея, мы также стремимся сохранить и повысить ценность этих объектов, сохранив их первоначальную форму и архитектурные элементы. Сохранение наследия обеспечивает социальные устои за счет повышения ценности восстановленных объектов и их окрестностей [9, 13, 16, 18, 56, 67, 74, 86, 102].

Прошлое, как отпечаток фиксируется ПКН: замками или церквями, другими историческими сооружениями и хранит образ прежней жизни. Как правило, города растут рядом с такими памятниками, например, город Баальбек, построенный вокруг храма Баальбека в Ливане (рисунок 1.2), район винокурни в Торонто и другие [71, 101, 106].

ПКН подвергаются природным воздействиям: наводнениям, землетрясениям, пожарам и другим внешним процессам. В результате наносится

огромный ущерб культурному наследию.



Рисунок 1.1 – Памятник культурного наследия (ПКН) – Египетские пирамиды и сфинкс [18]



Рисунок 1.2 – Вид город и замка Баальбек (Ливан) [71]

Из нескольких зарегистрированных на международном уровне примеров можно привести следующие:

1. Католический собор Нотр-Дам-де-Пари (часть объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО "Париж, берега Сены") (рисунок 1.3), который был построен в 12 веке. Стены и внутренний сводчатый потолок сделаны из камня, а крыша и

шпиль были деревянными. Пожар в Соборе Парижской Богоматери произошел 15 апреля 2019 года. Обширные повреждения были нанесены внутренней крыше, что привело к ее обрушению [92, 101].



Рисунок 1.3 – Фотография собора Нотр-Дам-де-Пари во время пожара [43]

2. Башня Хэдлоу (рисунок. 1.4), которая была сильно повреждена во время шторма 1987 года. Это сооружение было включено в список Всемирного фонда памятников 1998 года из 100 находящихся под угрозой исчезновения зданий международного архитектурного значения [43, 44].

3. Пожары уничтожили несколько архитектурных памятников, например, архитектурные памятники в Ньюстеде в Леувардене [43].

4. Сейсмические толчки нанесли серьезный ущерб монументальным зданиям, например, приходской церкви Херкенбоса и церкви Миндербродеров в Рурмонде, как в провинции Лимбург в Голландии [43, 44].

Приведенные примеры утраты и частичного разрушения ПКН свидетельствуют, что задача их фиксации является актуальной. В этой связи необходимо использовать наиболее эффективные технологии. В нормативных документах [31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 78, 90] указывается, что ТЛС является

весьма эффективным средством фиксации ПКН, поэтому представляется целесообразным подробно рассмотреть состояние разработанности этого метода применительно к вопросам фиксации.



Рисунок 1.4 – Башня Хэдлоу [43]

1.2 Обзор некоторых примеров использования лазерного сканирования

С момента разработки первого поколения наземных лазерных сканеров технология лазерного сканирования постоянно развивалась, вместе с этим и расширялась область его использования в геодезии. В области культурного наследия все более популярным становится использование НЛС для регистрации и документирования наследия. Методику наземного лазерного сканирования (НЛС) использовали для фиксации Государственного художественного музея имени Пушкина в Москве [18] (рисунок 1.5). Сканировали также часть Колизея в Риме, НЛС, которые предназначены для сканирования с близкого расстояния, использовались для точной записи объектов, представляющих интерес.

НЛС использовалось для съемки крупных исторических памятников или объектов, таких как проект на Форуме Помпеи и проекты Великого Будды в 2007 году (рисунок 1.6) [107].

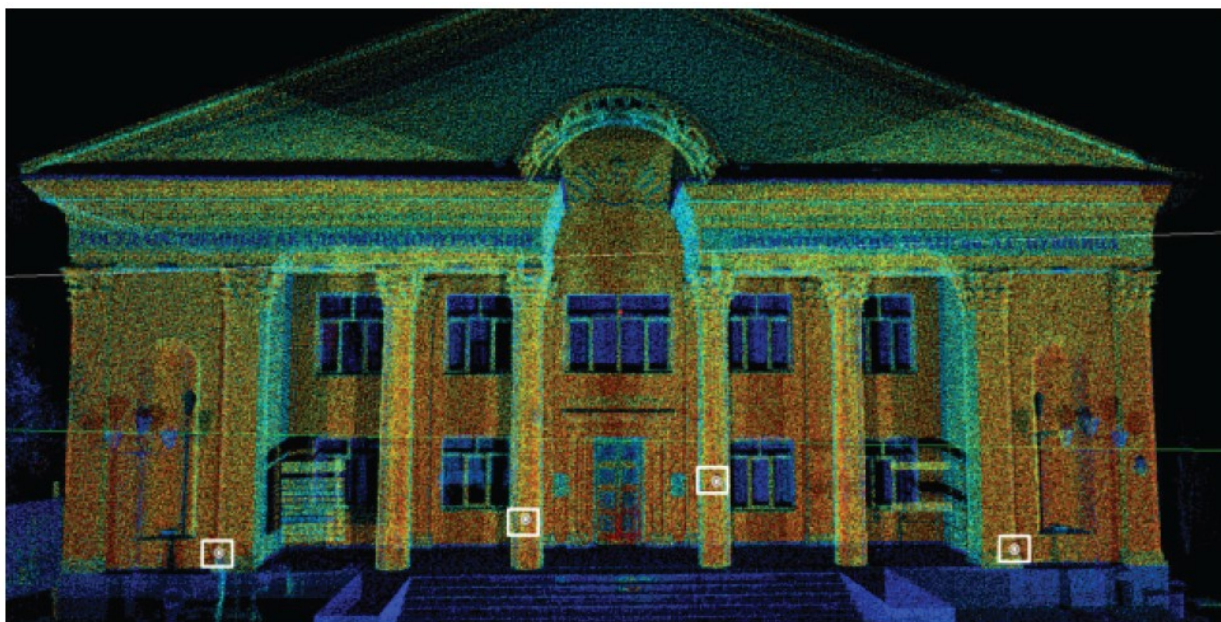


Рисунок 1.5 – Фасад ГАРД им. А.С. Пушкина [18]



Рисунок 1.6 – 3D-модель Будды Камакуры [107]

Качество сканирования. Одним из ключевых факторов при сканировании ПКН является информация о плотности точек и точности измерений, необходимая для получения чертежа или модели объекта, согласно требованиям проекта. На точность измерений влияют не только технические характеристики сканера, но и конфигурация и условия сканирования. Судариссанан С. и другие исследователи [71, 98, 111, 118, 121, 123, 124] классифицировали факторы, влияющие на точность данных, по механизму прибора, атмосферным условиям,

свойствам поверхности объекта и геометрии сканирования. Первые три фактора либо predeterminedены с помощью калибровки сканера, либо трудно контролируемы пользователями. Поэтому факторы геометрии сканирования, угол падения (УП) лазерного луча и расстояние между сканером и объектом являются основными при проектировании сети.

Обзор методов планирования НЛС. Основная цель планирования (проектирования НЛС) состоит в создании конфигурации точек сканирования, которая может удовлетворять качественному построению модели в соответствии с проектом. Проблемой планирования может стать задача поиска набора конфигураций датчиков, которые эффективно и точно выполняют задачу проверки функционирования какого-нибудь объекта, механизма. Ранние исследования были сосредоточены на планировании двумерных систем на основе фотокамер, а позже результаты были распространены на область 3D с помощью лазерного сканера [93, 96, 100, 114, 117, 122, 125]. Исследователи в работах [96, 100, 114, 125] изучали проблему проектирования НЛС с помощью компьютерных программ. Они сосредоточились на задаче надежного обнаружения особенностей объекта. Авторы данных исследований создали автоматизированную реконструкцию конкретных объектов в трехмерном виде, используя принцип триангуляции для построения моделей. Основные выводы этих исследований состоят в следующем:

1. В работе [122] съемка НЛС проектируется по т.н. «стратегии следующего наилучшего плана». В ходе этого процесса съемки способом подбора точек съемки достигается желаемый охват всего объекта [122]. Применяется т.н. «жадный алгоритм». Станции НЛС выбираются в нескольких вариантах. С помощью таблицы нулевых оценок (0 и 1) задача оптимизации состоит в том, чтобы найти минимальный набор местоположений, чтобы каждый сегмент сканируемого объекта мог быть охвачен (оценен как 1). На каждом шаге всегда выбираются станции с наибольшим количеством баллов, которые охватывают наиболее открытые сегменты сканируемого объекта.

2. Методика НЛС [96, 100, 114, 125] базируется на ее планировании по плановому чертежу или предварительному 3D-сканированию. Эти работы в большей степени соответствуют понятию «планирования НЛС». Тем не менее, процедуры выполняются без математического анализа точности единичного сектора охвата (точности измерений) и автоматизации, и оптимизации количества станций измерений.

Эти два метода имеют следующие ограничения:

1. Планирование выполняется без моделирования, и оптимальное решение зависит от предыдущего сканирования. Процесс сканирования зачастую выполняется несколько раз (отсутствие видимости и т.д.), что весьма трудоемко. Методика выполнена на относительно небольших объектах [122, 125].

2. Методики, основанные на построении модели сцены съемки, недостаточно исследованы относительно допустимого интервала угла падения НЛС и диапазона между сканером и сканируемым объектом, чтобы получить оптимизированный результат. Кроме того, алгоритмы, используемые для минимизации количества сканирований, имеют множество ограничений: разработка этих алгоритмов является чисто математической, без привязки к конкретной системе сканирования. Также не учитывается перекрытие между сканированиями. В заключение можно отметить, что исследования с использованием модельных методик редки и практически не применяются для фиксации памятников культурного наследия.

1.3 Анализ существующих нормативно-методических документов, регламентирующих обмерные работы на объектах культурного наследия и использование технологии лазерного сканирования

Темы фиксации объектов культурного наследия с помощью НЛС описываются в нескольких нормативных документах. Однако конкретных методик не приводится. Например, стандарт ISO [38] и национальный стандарт Российской Федерации (ГОСТ Р 56905-2016) [37]. В этих документах дается общая информация об использовании лазерно-сканирующей съемки при

археологических раскопках.

Вместе с тем, в национальном стандарте Российской Федерации [37] дается подробное описание производства архитектурных и археологических обмеров традиционным методом. Собственно, главным в нормативе является обеспечение точности обмерных чертежей, которые впоследствии должны применяться при лазерно-сканирующей съемке:

1. Обмерные чертежи объектов культурного наследия выполняют в масштабе 1:50, чем определяется принятая точность обмера – до 0,5 см, что дает в масштабе чертежа 0,1 мм – предельно мелкую, ощутимую на глаз величину.

2. Обмеры выполняют при помощи рулеток и складных метров. Промеры, производящиеся вдоль одной линии, ведут «нарастающим итогом» от одной точки, так как при сложении отдельных частных промеров могут нарастать ошибки.

3. Архитектурную форму объекта культурного наследия при архитектурно-археологическом обмере заранее принимают как нерегулярную. Для фиксации на ортогональных чертежах элементы архитектурной формы привязывают к надежно выверенным прямым, вертикалям и горизонталям. Обмер начинают с отбивки нулевой линии по всему периметру, по всем этажам или ярусам здания отдельно. Все нулевые линии связывают между собой, а по возможности – привязывают к ближайшему реперу, далее отбивается нулевая линия при помощи водяного уровня, а при больших размерах здания – нивелиром. Отбивка нулевой линии позволяет получить горизонтальный срез здания, его план, который может быть обмерен сравнительно простыми средствами.

4. Основу обмера планов составляет триангуляция. Схема обмера плана методом триангуляции приведена на рисунке 1.7.

5. При обмере планов сложной конфигурации, рекомендуется заменять устройство причалок проложением теодолитного хода (достаточная точность обмера углов в течение не более 30 с) с привязкой к нему основных точек плана системой полярных координат (рисунок 1.8).

Кроме того, стандартом установлены максимальные погрешности

измерения в зависимости от масштаба, как показано в таблице 1.1 [37].

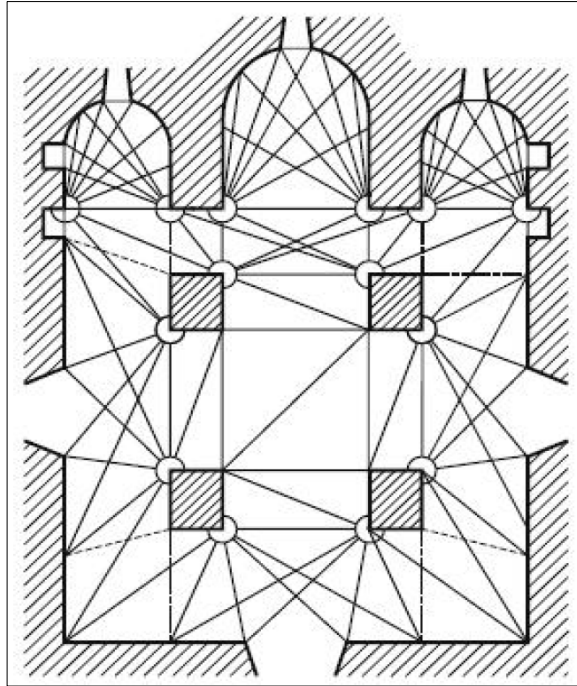


Рисунок 1.7 – Схема обмера плана методом триангуляции [37]

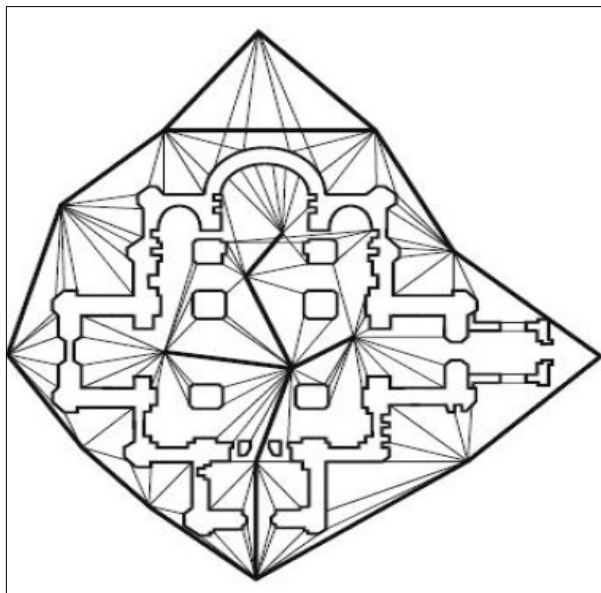


Рисунок 1.8 – Схема обмера плана с применением теодолита [37]

Таблица 1.1 – Требования к точности обмерных чертежей [37]

Масштаб чертежа	Вид чертежей	Предельная погрешность, мм
1:1-1:20	Чертежи деталей, шаблонов, прорисей	1-2
1:50	Чертежи планов, разрезов, фасадов	2-5
1:100	Чертежи планов, разрезов, фасадов	10-20
1:200	Обзорные чертежи планов, разрезов, фасадов	30-50
1:500	Схемы	200-300

Упомянутая выше информация необходима для общего понимания

процесса съемки и архивирования. Указанные нормативные документы являются основой при фиксации ПКН с использованием геодезического метода. Однако подробная методология и четкие рекомендации, касающиеся планирования, выполнения и оценки точности, отсутствуют. Изучение этих нормативных документов приводит к следующим вопросам:

- Проектирование геодезической съемочной сети (лазерно-сканирующих точек), обеспечивающей нормативным требованиям точности с учетом реальной ситуации с наличием различных препятствий на объектах культурного наследия.
- При проектировании съемочных точек какие принимать углы секторов охвата и расстояния до объекта, которые с одной стороны обеспечивали бы построение модели объекта, а с другой соответствовали бы требуемой точности.

1.4 Обзор применения различных геодезических методов измерений

Традиционно для документирования объектов культурного наследия используются обмеры и измерения, включающие визуальные осмотры, рулеточные измерения, теодолитную и тахеометрическую съемки. Такие измерения служат основой для создания геометрических моделей. Однако, что касается контуров объектов, то точность вполне получается приемлемой, чего не скажешь о различных деталях ПКН. В этой связи приведенные измерения приводят к упрощенным моделям.

Современные потребности и имеющиеся предпосылки для получения существенно более точных геометрических моделей требуют использования новых цифровых технологий и устройств.

Документирование объектов культурного наследия значительно эволюционировало в 21 веке и имеет тенденцию дальнейшего развития в настоящий момент. Переход от «методов ручной записи и измерений» к «цифровому» очевиден. Обозначим преимущества: уменьшение времени, отсутствие контакта с ПКН, исключение так называемого «человеческого

фактора» при обработке, записи и проведении измерений, большой выбор компьютерного программного обеспечения и алгоритмов обработки.

Цифровая запись ПКН как метод включает в себя все формы сбора цифровых данных, начиная от фотографий и заканчивая исправленными изображениями, посредством компьютерных технологий, например САПР (Автокад) [20], по обработке измерений: фотограмметрические, тахеометрические и 3D лазерного сканирования. При этом, используя как цифровые потоки, так и голос и видео [2, 11, 21, 48, 69, 83, 87]. Важно отметить, что при документировании памятников культурного наследия ручная запись используется в сочетании с цифровыми методами.

На рисунке 1.9 показаны различные методы записи при документировании измерений (обмеров) ПКН. Также на рисунке 1.9 можно увидеть, какие из методов следует использовать в зависимости от размера фиксируемого объекта.

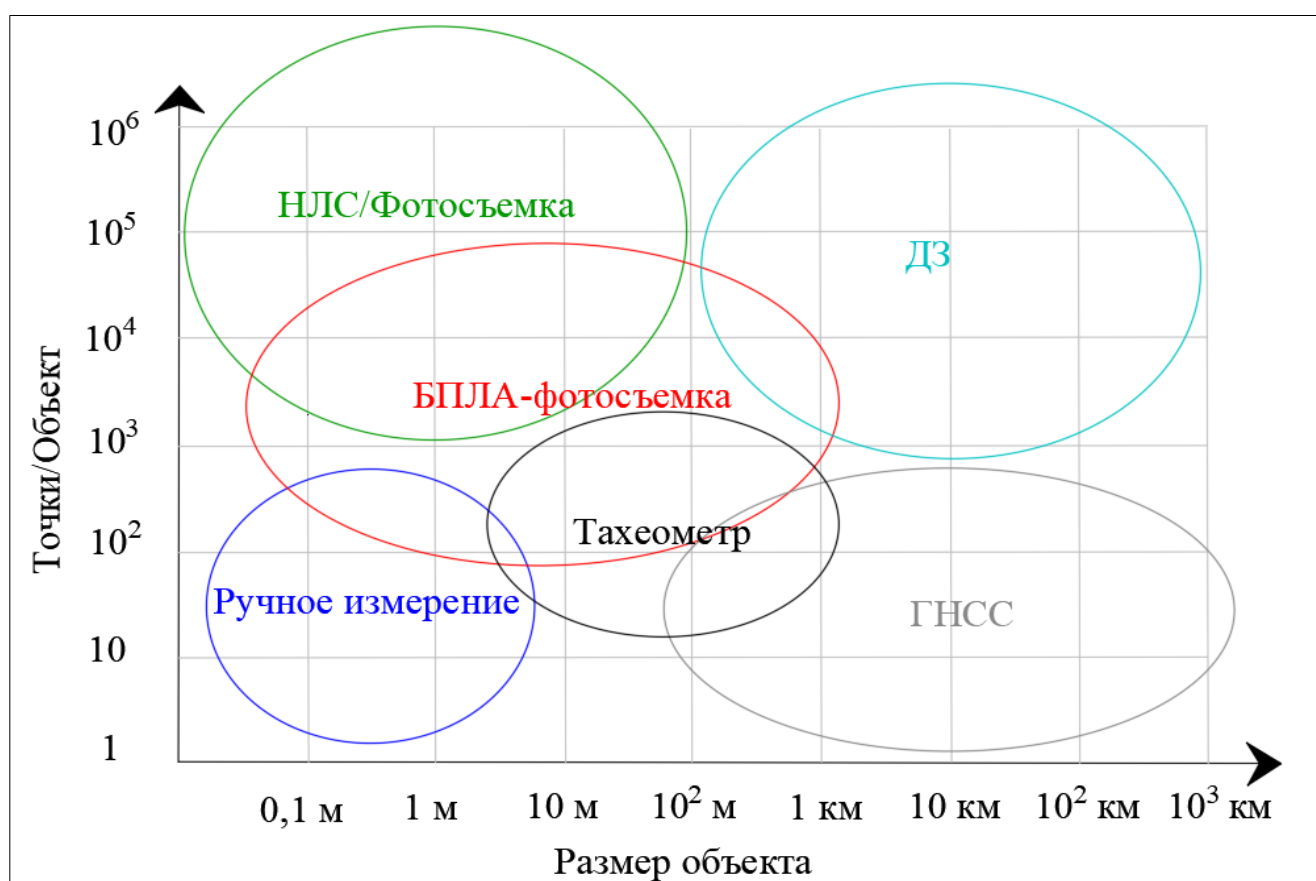


Рисунок 1.9 – Диаграмма методов записи [104]

По теме НЛС имеется довольно обширный объем литературы [3, 7, 17, 19, 22, 39, 42, 46, 47, 49, 52, 55, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 66, 68, 70, 72, 73, 77, 81, 82,

84, 85, 89, 94, 101, 106, 109, 115]. Широкое применение технологии ЛС и удешевление приборов открыли возможность проведения недорогостоящего сканирования для документирования объектов культурного наследия. Широкий спектр доступных пакетов программного обеспечения для НЛС и фотограмметрии создает основу для исследований в этой области в отношении рабочих процессов обработки данных для решения вопросов, отмеченных выше (см. подробнее раздел 1.3). Прежде чем перейти к изучению предпосылок по развитию технологии НЛС, рассмотрим существующие методы геодезических измерений, применяемые для фиксации ПКН.

1.4.1 Тахеометрические измерения

Первым рассматриваемым методом, используемым при цифровой записи ПКН, является тахеометрическая съемка (рисунок 1.10) [26, 45, 50, 54]. При тахеометрических измерениях координаты неизвестной точки относительно известной определяются по измеренным углам и расстояниям (рисунок 1.11). В случаях архивирования ПКН координированию подлежат характерные точки фасадов зданий или других ПКН [101, 106].



Рисунок 1.10 – Вид тахеометра (Обмер ПКН) [101]

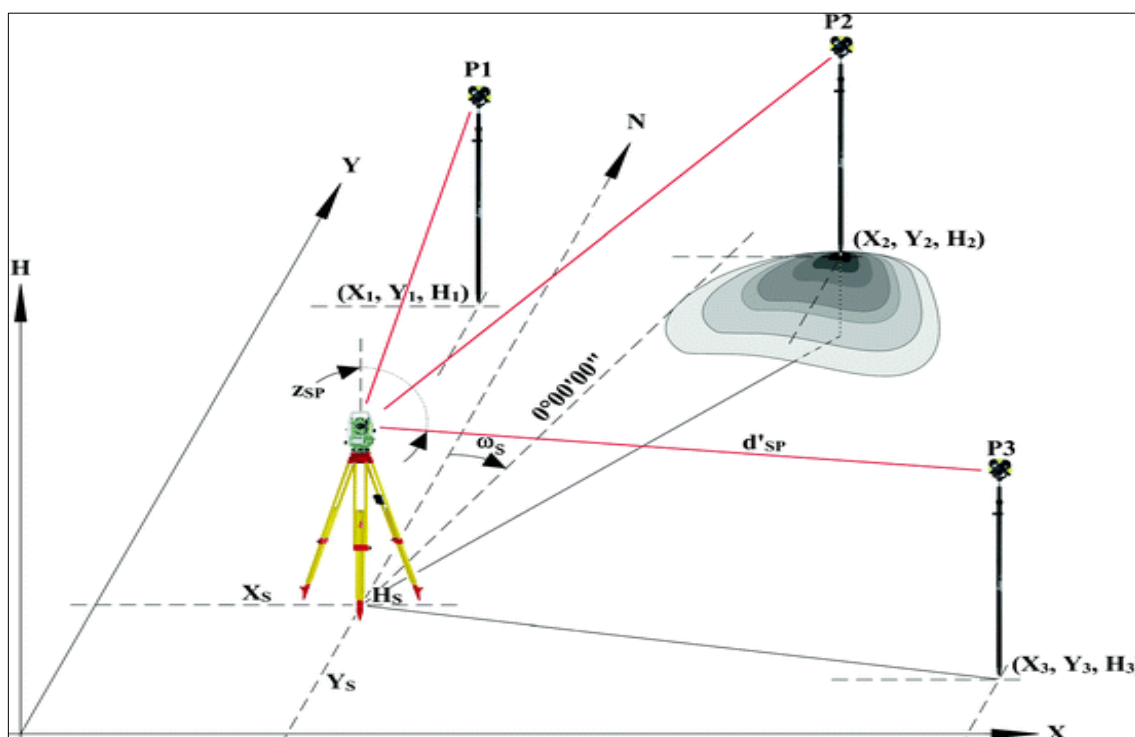


Рисунок 1.11 – Схема тахеометрических измерений ($X_S; Y_S; Z_S$ – координаты тахеометра, $X_n; Y_n; Z_n$ – координаты КТ, P – КТ, Z_{SP} – зенитный угол, ω_S – горизонтальный угол, d'_{SP} – расстояние) [45]

Ограничения применения тахеометра:

1. Упрощенное (по относительно малому числу точек) графическое представление объекта.
2. Необходимость большого временного интервала для относительно детального обмера объекта.
3. Высокая трудоемкости при выполнении детального обмера ПКН.

Вместе с недостатками следует указать на весьма высокую точность тахеометрических измерений. Таким образом, этот метод может быть использован при обмерах ПКН в качестве дополнительного, например, при создании съемочного обоснования или для оценки точности НЛС. И его предпочтительно использовать для памятников культурного наследия с легким доступом.

1.4.2 Технология ГНСС

Глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС) является альтернативным методом тахеометрических измерений. Она представляет собой

высокоточную систему 3D-позиционирования (рисунок 1.12). Точность ГНСС определений может достигать миллиметров. Однако возмущения в атмосфере приводят к снижению точности наблюдений.

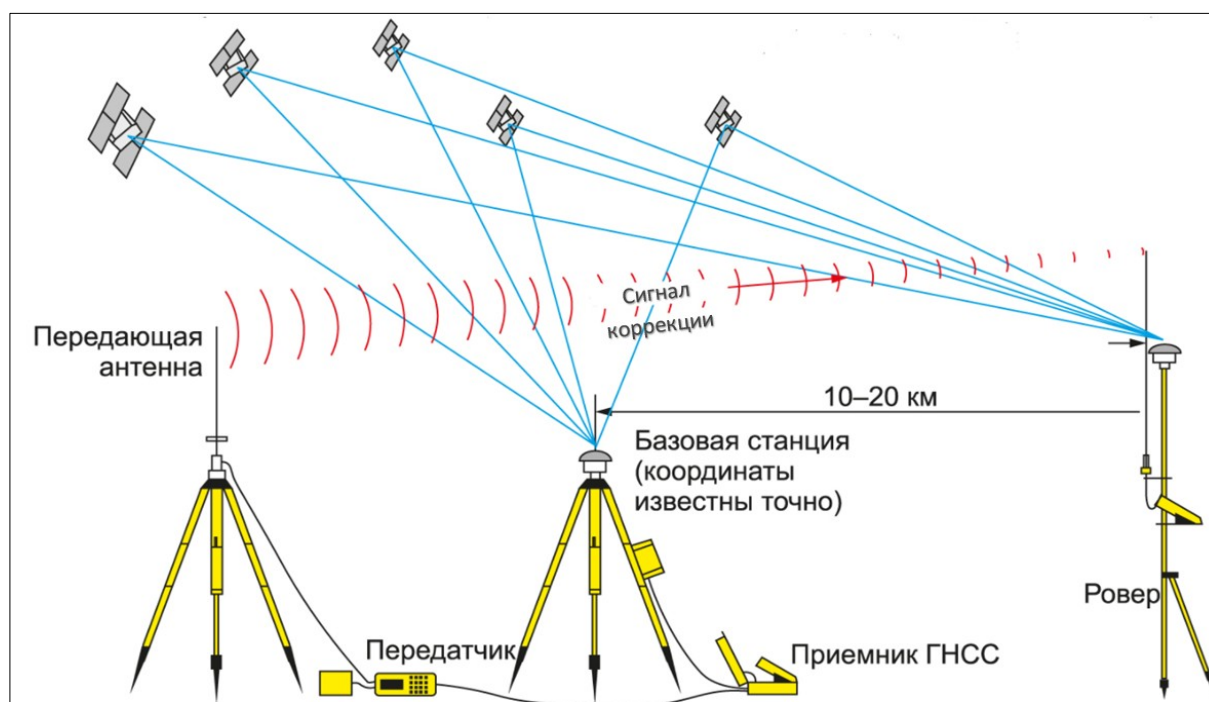


Рисунок 1.12 – Схема дифференциального метода ГНСС позиционирования [12]

В соответствии с ГОСТ Р 53607-2009 [34] принцип измерений заключается в следующем. В основе определения координат пунктов наблюдения с использованием ГНСС лежит метод засечки положения аппаратуры потребителя (мобильного приемника) от известных положений навигационных космических аппаратов. Геометрия определения координат пункта наблюдения (ПН) относительно опорного пункта (ОП) показана на рисунке 1.13.

Определение относительных координат по измерениям псевдодальностей выполняется одним из двух методов: дифференциальным или относительным. В дифференциальном методе по результатам наблюдений на опорном пункте формируются дифференциальные поправки к соответствующим параметрам наблюдений для определяемого пункта. Этот метод обеспечивает оперативное определение координат ПН (в реальном масштабе времени). В качестве ОП используются пункт локальной, региональной или широкозонной

дифференциальной подсистем ГНСС. Выбор подсистемы зависит от удаленности ПН от ОП.

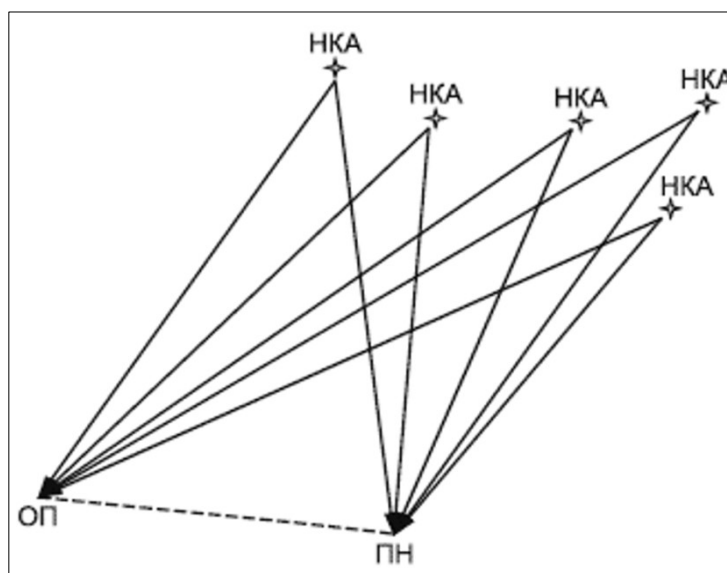


Рисунок 1.13 – Схема определения координат пунктов по технологии ГНСС [34]

В относительном методе наблюдения, выполненные одновременно на опорном и определяемом пункте, обрабатываются совместно. При этом определяются приращения координат ПН относительно ОП. Определение координат ПН может проводиться в статическом режиме, позволяющем выполнять продолжительные сеансы наблюдений.

Точность измерений зависит от режима измерений, например, быстрой статики, статики и RTK. Первые два режима являются наиболее точными: до единиц миллиметров и интервалом времени от 15-20 минут до нескольких часов. Режим RTK является более быстрым, однако точность составляет 3-5 см. Этот режим является очень быстрым методом геодезических измерений, и результаты могут быть получены немедленно, без необходимости последующей дополнительной обработки данных, так как коррекция производится с базовой станции во время измерения по радиосвязи.

Существует несколько способов передачи сигнала коррекции с базовой станции на мобильную станцию. Наиболее популярным способом передачи данных в реальном времени является радиосвязь [12, 54, 97]. Точность полученного измерения дальности зависит от количества видимых спутников,

разрешенных неоднозначностей, геометрии спутника и т.д.

Ограничения использования ГНСС-технологии:

1. Необходимость большого интервала времени для измерений и обмера объекта.
2. Мобильность обеспечивается применением режима RTK, однако точность измерений не велика.
3. Невозможность определений на вертикальных поверхностях.
4. Необходимость наличия открытых сцен приема для обеспечения хорошей видимости спутников, что не всегда возможно.

Таким образом, использование ГНСС для фиксации ПКН (рисунок 1.14) довольно затруднительно и предпочтительно совместное ее применение с другими технологиями. Примеры съемки местности с использованием тахеометров и ГНСС технологии рассматриваются в следующем разделе.



Рисунок 1.14 – Вид использования ГНСС при фиксации «Памятник культурного наследия» (ПКН) [106]

1.4.3 Применение в геодезических работах беспилотных летательных аппаратов

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) являются эффективным средством для фотограмметрической съемки (рисунок 1.15) [120, 119]. Такой способ еще называют фотограмметрической съемкой с близких расстояний в отличие от применения пилотируемых средств (самолетов). БЛА может летать в нескольких режимах: автономном, полуавтономном, дистанционно управляемом или комбинированном. Преимущества применения БЛА для фотограмметрического картирования на малых высотах заключаются в возможности выполнения аэрофотосъемки и построения планов и карт относительно дешевым и простым способом.

При составлении плана полета необходимо учитывать несколько элементов, таких как высота полета, путевые точки, скорость и другие. Платформа оснащена фотограмметрической измерительной системой, включающей видеокамеру, тепловые или инфракрасные камеры, бортовую лидарную систему или их комбинацию. Современные стандартные БЛА позволяют регистрировать и отслеживать положение и ориентацию внедренных датчиков в локальной или глобальной системе координат. БЛА-фотограмметрия представляет новое приложение в реальном времени и недорогие альтернативы классической пилотируемой аэрофотограмметрии. Все его элементы должны быть установлены правильно, чтобы гарантировать успешное получение всех аэрофотоснимков. Например, аэрофотосъемка должна на 60% перекрывать боковую границу и на 30% фронтальную (рисунок 1.16).

Существующие БЛА могут использоваться в крупномасштабных и маломасштабных приложениях (съемках) [120]. Основные преимущества БЛА по сравнению с системами пилотируемых летательных аппаратов заключаются в том, что БЛА можно использовать в ситуациях повышенного риска, не подвергая опасности жизнь человека в труднодоступных районах. К таким регионам относятся, например, районы стихийных бедствий и археологических раскопок, горные и вулканические районы, поймы рек, землетрясений. Кроме того,

дополнительными преимуществами являются возможность работы в режиме реального времени и возможность быстрого сбора данных при передаче изображений, видео и данных об ориентации в режиме реального времени на наземную станцию управления.

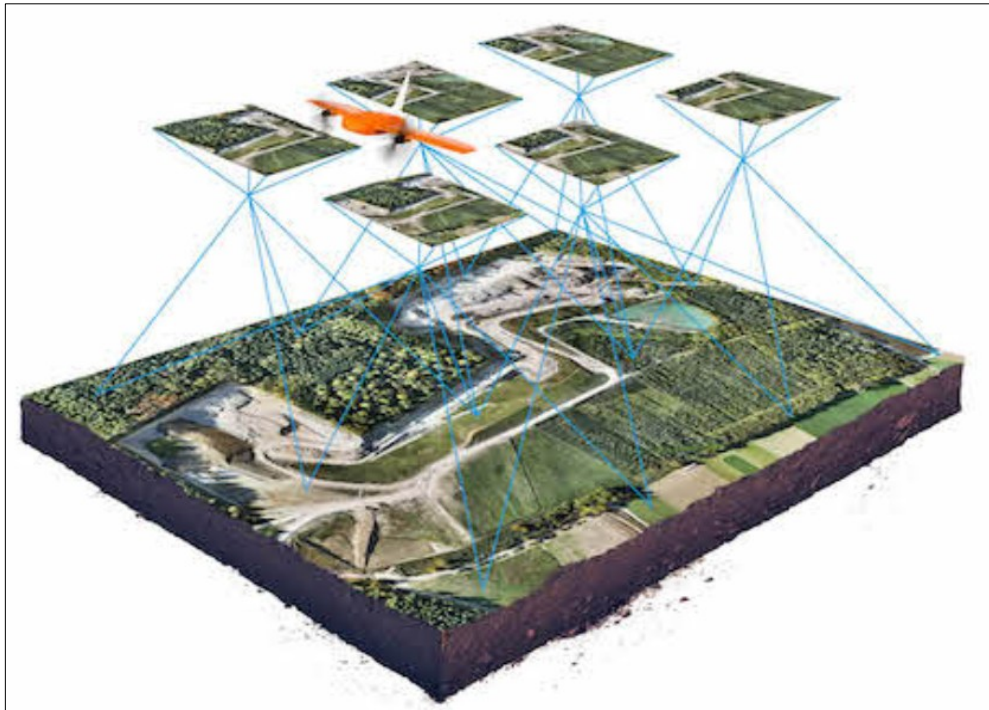


Рисунок 1.15 – Схема использования фотосъемки с беспилотного летательного аппарата (БЛА) [120]

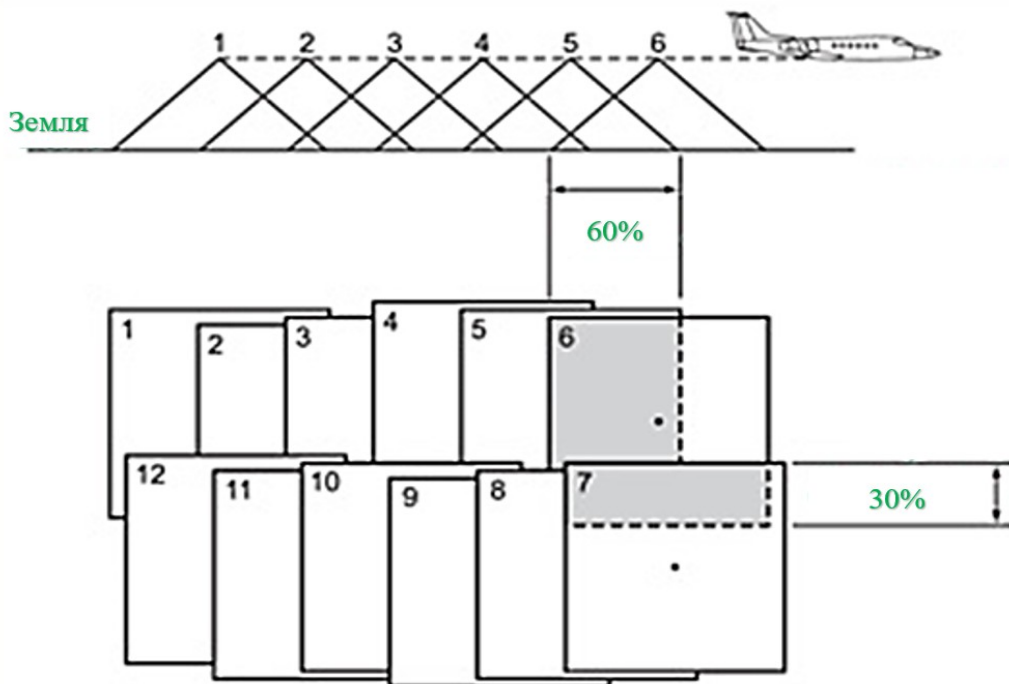


Рисунок 1.16 – Схемы маршрутов при фотосъемке с беспилотного летательного аппарата (БЛА) [119]

Этап сбора данных включает создание наземных контрольных точек (рисунок 1.17) с использованием тахеометра, которые используются для внешней ориентации, оценки точности, выполнения воздушной триангуляции. Камеру также необходимо откалибровать, чтобы получить параметры камеры.

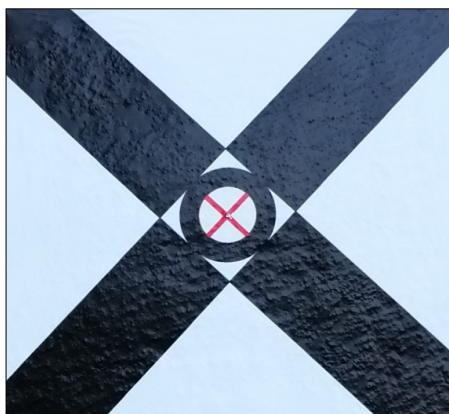


Рисунок 1.17 – Наземная контрольная точка [120]

Ограничения применения съемок с БЛА:

1. Для достижения высокого разрешения изображения требуется большое количество фотографий, много ракурсов обзора, что занимает длительное время обработки данных и требует специального программного обеспечения.
2. Низкое разрешение и искажения в случае съемки вертикальных поверхностей.

1.4.4 Наземная фотограмметрическая съемка

Наземная фотограмметрия это раздел фотограмметрии, относящийся к обработке фотограмметрических снимков, полученных с наземных пунктов или носителей съемочной системы [27, 28, 75, 119]. Наземная фотограмметрическая съемка (рисунок 1.18) основана на создании перекрывающихся изображений, полученных с помощью откалиброванных цифровых камер. Изображения корректируется по сети контрольных точек (опознаков, КТ), которые создаются геодезическими методами, например с использованием тахеометрических измерений или ГНСС определений. Некоторые из преимуществ, которые стимулируют использование этой технологии, заключаются в следующем:

высокое разрешение, высокая точность, достигающая сантиметра, простое и быстрое получение результата, низкая стоимость по сравнению с другими методами, легкая транспортировка на месте и одна из наиболее эффективных методик в случае закрытой территории [119].

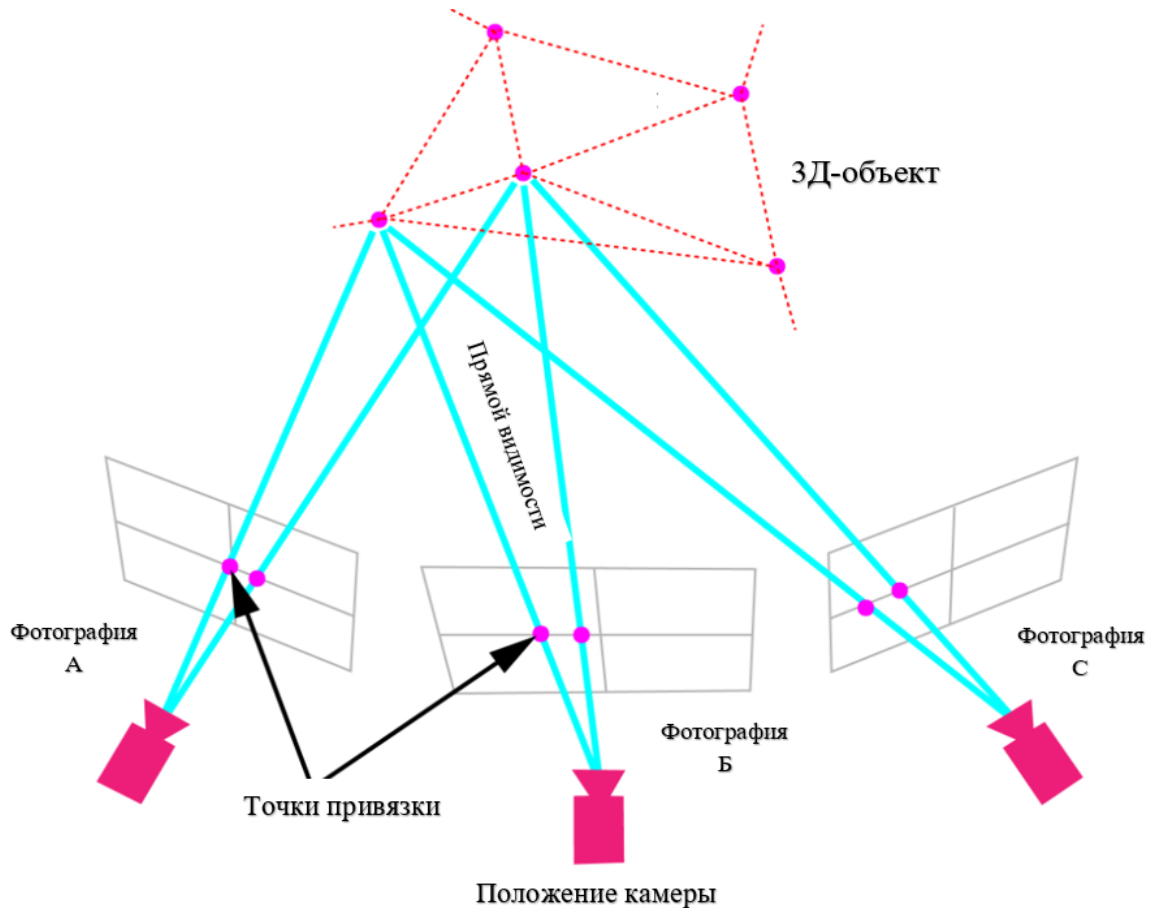


Рисунок 1.18 – Принципиальная схема применения наземной фотограмметрии [120]

Эта технология используется для сохранения исторических памятников во многих странах, таких как: монастырь "Христос Пантеоптес" в Фатихе в Стамбуле и церковь "Сан-Доминго-де-Силос" (XIV век) в Алькала-ла-Реаль (Хаэн, Испания) (рисунок 1.19) [112].

Ограничение наземной фотограмметрии: существуют некоторые недостатки, ограничивающие использование этого метода, такие как:

1. Длительная и сложная обработка данных.
2. Необходимость в обеспечении хорошей видимости объекта.
3. Необходимость в специальном программном обеспечении.

4. Невозможность фиксации верхних наружных плановых поверхностей (крыши).



Рисунок 1.19 – 3D-фотограмметрическая модель церкви "Сан-Доминго-де-Силос" [112]

1.4.5 Дистанционное зондирование

Дистанционное зондирование - является методом получения информации об объекте или явлении без непосредственного физического контакта с данным объектом. Суть процесса состоит в измерении времени отраженного и испускаемого излучения на расстоянии (обычно со спутника или самолета) [65, 113]. Преимущество использования дистанционного зондирования состоит в получении снимков земной поверхности на больших площадях.

В последнее время дистанционное зондирование играет все более важную роль в археологии и в процессе фиксации ПКН, используя его для документирования, картографирования, мониторинга и углубленного анализа культурного наследия и археологических памятников, расположенных в городских ландшафтах. Например: исследование роста городской территории в городе Алба-Юлия, который представляет собой румынский город с богатейшим

историческим прошлым (рисунок 1.20) [113]. Преимущества данных методов заключаются в следующем:

- Подробное изображение объекта культурного наследия в плане, а также и в объемном виде.
- Перманентные измерения исключают влияние температурных колебаний на состояние объектов культурного наследия.



Рисунок 1.20 – Картина мониторинга земной поверхности с применением метода дистанционного зондирования

(Границы городской территории города "Альба-Юлия")

(Границы города по годам: Красная зона – 2018, Желтая зона – 2010, Зеленая зона – 2006, Синяя, зона – 2000, Серая зона – 1994) [113]

Ограничение дистанционного зондирования. Существует ряд недостатков, обуславливающих ограниченное использование этих методов, среди которых можно выделить:

- Точность картирования не достигает крупного масштаба.
- Невозможность детальной съемки фасадов зданий.

Этот метод считается эффективным для мониторинга земель.

1.4.6 Технология НЛС

Технология НЛС стала одним из наиболее эффективных методов цифрового картирования и построения различных моделей [3, 7, 17, 19, 61, 62, 64, 66, 68, 70, 72, 73, 77, 81, 82, 84, 106, 109, 115].

НЛС позволяет дистанционно проводить съемку территории и объектов, которые являются сложными или недоступными для традиционных методов съемки [12, 26, 45, 54]. В течение нескольких минут НЛС фиксирует относительное положение поверхностей объектов в поле зрения в виде трехмерного облака точек, состоящего из миллионов точек, и их соответствующее значение интенсивности (i).

В настоящее время доступны два различных метода измерения, которые в основном используют измерения на основе импульсов или фаз. НЛС обычно состоит из двух основных частей: вращающегося двигателя и вращающегося зеркала. Комбинация двух вращающихся элементов позволяет получать панорамные виды. Полученное облако точек охватывает почти 360° как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях в сферической области (рисунок 1.21) [106, 109, 115].

На каждом шаге горизонтального углового поворота зеркало вращается с регулярным вертикальным угловым шагом и отклоняет лазерные лучи в определенном направлении. Возврат каждого лазерного луча, попадающего на поверхность объекта, измеряется в направлении испускаемого луча. Этот способ измерения положения поверхности объекта обеспечивает получение огромных объемов данных за очень короткий промежуток времени. Результирующее облако точек обычно задается в неорганизованных, т. е. не привязанных к сетке, декартовых координатах. В настоящее время НЛС имеют встроенные камеры, расположенные как можно ближе к лазерному излучателю, что делает получение цветных облаков точек очень простым и почти бесшовным.

Проектирование НЛС. Лазерное сканирование в последнее время стало

более популярным для широкого спектра инженерных и изыскательских работ из-за его способности получать большой объем информации с высокой степенью детализации и за относительно короткое время [17, 62, 68, 73, 85, 94, 101]. Применительно к задачам фиксации ПКН, эта технология, безусловно, является одной из наиболее перспективных, что отражено в ряде работ [9, 18, 56, 67, 74, 86, 102].

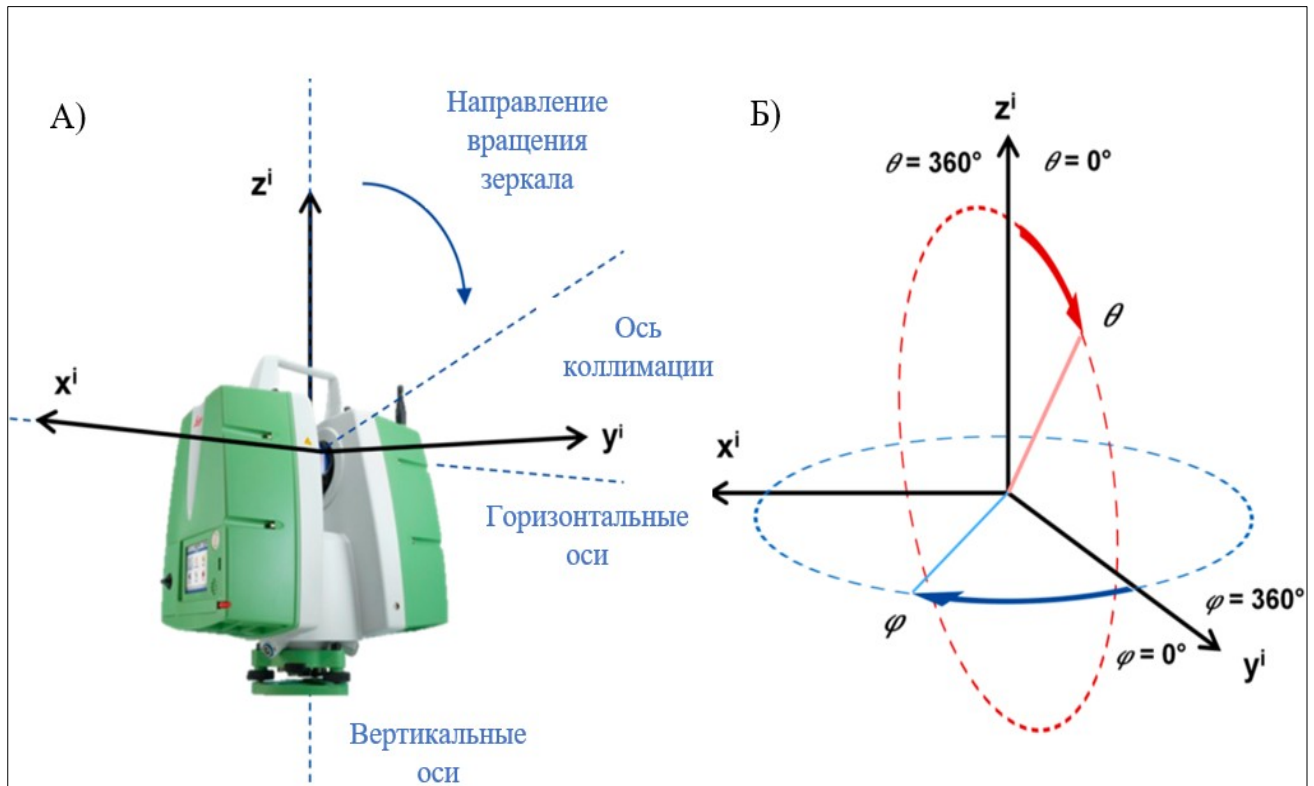


Рисунок 1.21 – Схема работы лазерного сканнера. (А) Локальная декартова система координат НЛС относительно основных осей приборов; (Б) идеальная панорамная геометрия НЛС [109]

Пример 3D-облака точек показан на рисунке 1.5. В этой модели точки окрашены в соответствии со значениями интенсивности сканирования (i). НЛС-очень удобный инструмент при моделировании, регистрации и мониторинге инженерных сооружений, таких как здания, мосты, дорожная инфраструктура или туннели, археологические объекты, а также природных объектов: деревья, пляжи.

На практике на процесс сканирования может влиять множество факторов (рисунок 1.22), которые можно сгруппировать по четырем основным:

1. Механизм и устройство сканера, которые включают в себя состав аппаратных компонентов, калибровку, настройки и изменения свойств излучаемого лазерного луча.
2. Атмосферные условия и окружающая среда, которые влекут за собой ошибки, связанные с атмосферными условиями, например, с изменением влажности, температуры и давления, которые имеют ограничения на физические измерения. Данный фактор также учитывает наличие окружающего освещения в сцене, например, полную темноту, искусственный свет или естественный солнечный свет. Кроме того, к атмосферным условиям относят также среда сканирования, например, в помещении или на открытом воздухе.
3. Свойства объекта. Этот влияющий фактор относится к свойствам поверхности, например, отражательной способности и шероховатости материала поверхности по отношению к длине волны сканера.
4. Геометрия сканирования. Данный фактор связан с размещением НЛС относительно местоположения и ориентации сканируемой поверхности, которая определяет локальный УП, локальный диапазон и локальную плотность точек лазерных точек, отбирающих пробу поверхности.

Все эти факторы будут подробно описаны в следующем разделе (1.5).

1.5 Факторы, влияющие на точность измерений при использовании технологии НЛС

Систематические и случайные ошибки, вызванные механизмом сканера, а также окружающими факторами, отражаются на качестве и точности облака точек (рисунок 1.22) [4, 23, 29, 40, 53, 63, 88, 99, 105, 110, 123]. Можно выделить четыре основные группы влияющих факторов (как указано в 1.4.6). В этом разделе подробно рассмотрим их.

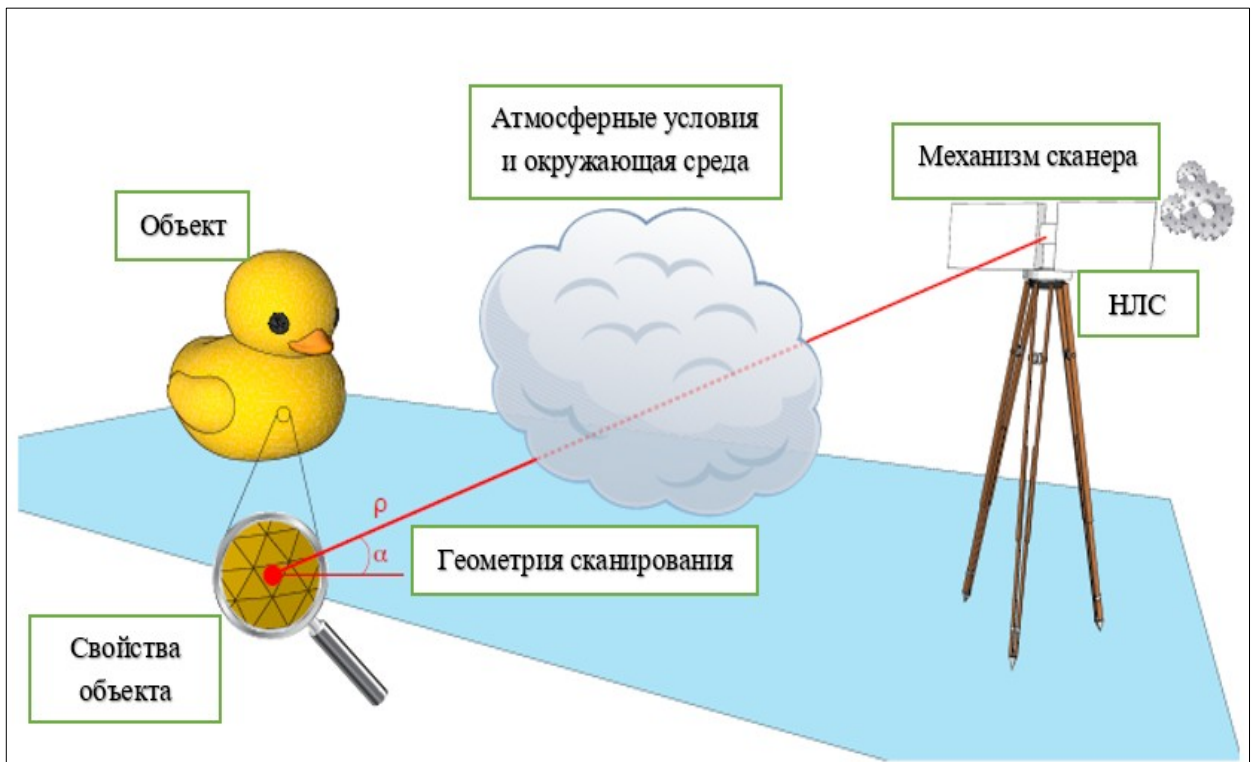


Рисунок 1.22 – Факторы, влияющие на точность положения 3D-точек (Механизм сканера, атмосферные условия и окружающая среда, свойства объекта, геометрия сканирования) [99]

1.5.1 СКП измерений (приборная погрешность)

Систематические и случайные ошибки, обусловленные механической конструкцией и техническими ограничениями оборудования, распространяются как при излучении лазерного луча, так и при приеме отраженного света. Тщательная калибровка прибора часто позволяет выявить систематические ошибки и исправить отклонения в конечном облаке точек. Изучаются различные подходы к калибровке, и для определения параметров калибровки используются различные методы анализа [51].

Случайные ошибки, обусловленные присущими различным блокам физическими свойствами, часто нелегко устранить. При изучении лазерного луча необходимо учитывать три основных фактора:

- Первым фактором является отклонение луча от линии направления. Лазерный луч может иметь небольшое отклонение от центральной оси

определенного направления. Эта неопределенность устраняется коллимационной поправкой.

- Вторым фактором связан с погрешностью отклонения луча, которая зависит от типа используемого лазерного сканера (одно-или много фазетное вращающееся зеркало). Угловое положение зеркала регистрируется кодером, который преобразует угловое положение зеркала в цифровой код. Ошибка устраняется метрологическими испытаниями.
- Третьим фактором является ошибка, вызываемая неперпендикулярностью осей, которая включает в себя три разные оси (рисунок 1.22). Первая ось — это горизонтальная ось, которая является осью вращения зеркала. Вторая ось — это вертикальная ось, которая является осью вращения головки сканера. Последней рассматриваемой осью является ось коллимации, которая является осью, проходящей через центр зеркала, как для излучения луча, так и для приема эха. Эти оси никогда не бывают идеально выровнены и стабильны, и поэтому приводят к неопределенности.

При приеме сигнала (отраженный луч) вышеупомянутые инструментальные неопределенности играют определенную роль.

1.5.2 Атмосферные условия

Лазерный луч проходит по воздуху до определенной отражающей поверхности, а его отражение рассеивается в определенном секторе направлений. Измеренный отраженный сигнал также распространяется по воздуху. В этой связи на лазерный луч будут влиять атмосферные условия в зависимости от используемой длины волны. Основными атмосферными факторами, которые необходимо учитывать, являются температура окружающей среды, влажность, окружающий свет, вибрации из-за турбулентности и чистоты воздуха [1, 30, 91, 95, 126]. Эти воздействия отражаются следующим образом. Во-первых, луч может быть ослаблен, что означает, что интенсивность сигнала становится слабее по

мере его прохождения через среду. Во-вторых, сигнал может быть искажен, что означает, что импульс будет удлинен или укорочен и что частота непрерывной волны изменится. В-третьих, лазерный луч может отклоняться от своего первоначального направления распространения из-за атмосферных возмущений, таких как капли или частицы пыли, присутствующие в среде [30, 91].

Экстремальные атмосферные условия, такие как очень высокие или низкие температуры, дождь и ветер, могут повлиять на работу прибора. Например, некоторые механические вращения, такие как зеркало или сканирующая головка, могут быть не такими точными, как указано при сканировании в нормальных погодных условиях. Кроме того, зеркальная поверхность подвержена перепадам температуры и может деформироваться. Вода конденсируется на поверхности, образуя тонкий слой воды или капель. Кроме того, как и любой электронный прибор, на работу сканера влияет влажность, которая может привести к повреждению внутренней электронной части в результате окисления и ослабления соединений [126].

Лазерный луч взаимодействует с атмосферой, состоящей в основном из азота (78%) и кислорода (21%). Вода также присутствует в атмосфере, часто в виде пара. Среди других газов атмосфера также содержит углекислый газ (0,035%). Все газообразные составляющие земной атмосферы оказывают влияние на передачу сигналов в зависимости от длины волны сигнала. Затухание лазерного луча в атмосфере описывается следующим законом [126] по формуле (1.1):

$$\eta_{atm} = \frac{I(\rho)}{I_0} = e^{-\Gamma \rho}, \quad (1.1)$$

где η_{atm} – коэффициент проходимости атмосферы, I_0 – интенсивность излучаемого сигнала, $I(\rho)$ – интенсивность принимаемого сигнала, ρ – расстояние до объекта и Γ – коэффициент ослабления атмосферы.

Как видно на рисунке 1.23, атмосферное затухание зависит от используемой длины волны лазерного излучения и расстояния до объекта. Производитель часто указывает общую точность измерений в условиях, близких к лабораторным.

Пользователь редко находится в таких (идеальных) условиях. В помещении необходимо учитывать искусственное окружающее освещение и пыль в воздухе. На открытом воздухе возможный дождь и туман влияют на количество и интенсивность возвращаемых сигналов. Кроме того, солнечный свет и его интенсивность также влияет на лазерный луч [91, 95].

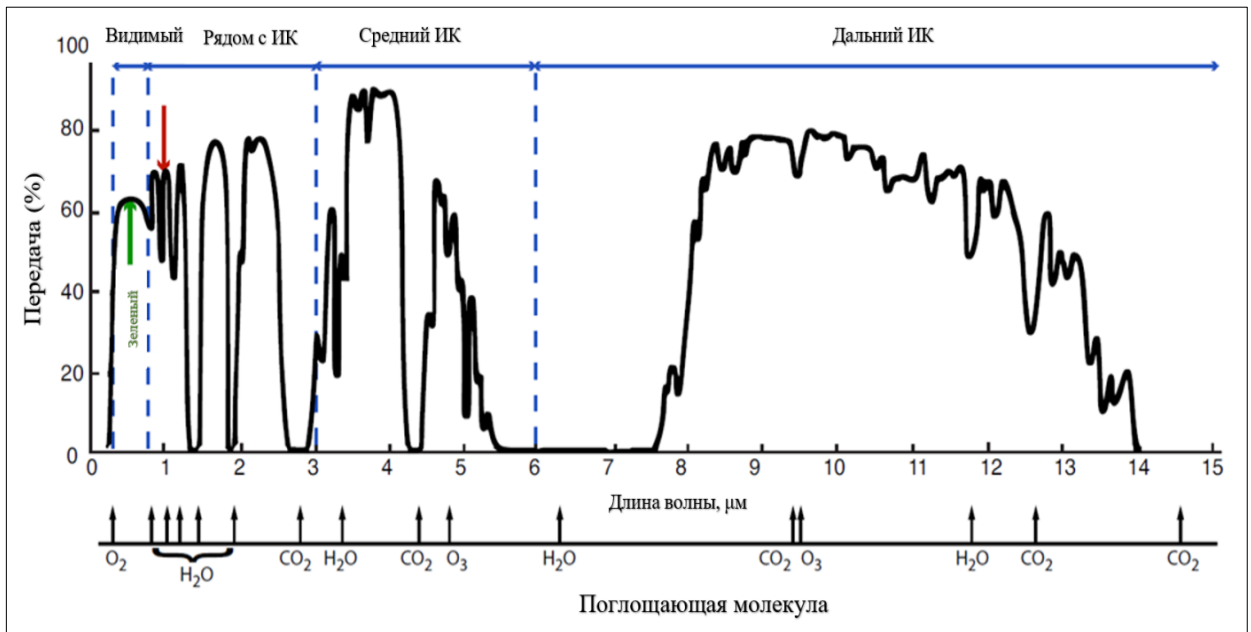


Рисунок 1.23 – Графики зависимости длины волны от коэффициента пропускания атмосферы, измеренного на расстоянии 1820 м на уровне моря [126]

1.5.3 Влияние характеристик поверхностей сканируемых объектов

Свойства поверхности, от которой отражается лазерный луч, влияют на степень его рассеивания и интенсивность.

Если поверхность идеально гладкая, она зеркально отражает свет по закону отражения. Поскольку при НЛС измеряется отраженный луч, то в случае зеркальных поверхностей, световой сигнал не возвращается обратно в сканер, если поверхность не перпендикулярна излучаемому направлению.

Если поверхность шероховатая, свет рассеивается в разных направлениях, следуя модели рассеяния Ламберта, изображенной на рисунке 1.24. Большинство поверхностей, встречающихся при сканировании, не являются идеальными. У них разные степени шероховатости. Определение влияния шероховатости каждого

материала при его сканировании является важной, но очень трудоемкой задачей и требует больших временных затрат [108, 116].

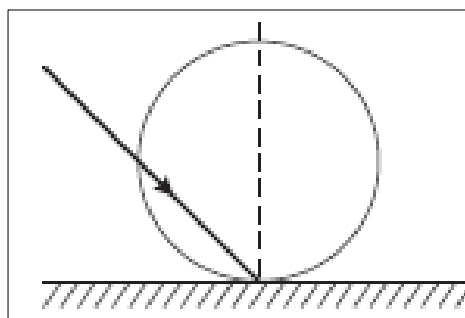


Рисунок 1.24 – Модель рассеяния отраженных лучей по закону Ламберта [108]

Двумя основными факторами, влияющими на качество определения положения точек лазерных отражений от любого материала, являются: количество возвращаемых сигналов и их искажение.

В настоящее время накоплен опыт исследований, отражающих влияние свойств поверхности на качество точек лазерных отражений [11, 6]. В основном фокусируясь на коррекции измеренной интенсивности сигналов. Вместе с тем контроль и коррекция измерений при НЛС может быть выполнена с применением контрольных точек (геодезический подход).

1.5.4 Конфигурация съемочной сети

Расположение сканерных станций при съемке объектов важный вопрос, от решения которого зависит качество конечной модели. При этом представляет интерес определение зависимостей влияния на точность измерений как УП, так и расстояний до поверхности рассматриваемого объекта. УП (рисунок 1.25) определяется как угол между вектором лазерного луча и вектором нормали поверхности. УП определяет охват съемки при определенном расстоянии между НЛС станцией и поверхностью сканирования. В этой связи важно определение таких соотношений, как СКП прибора, УП и расстояний, которые позволяют определить оптимальное местоположение сканерных станций для сканирования всего объекта.

Этот влияющий фактор хорошо известен, в особенности по результатам работ и данных воздушного лазерного сканирования [15, 105, 110, 123]. Но

количественное влияние этого фактора при НЛС мало изучено. Кратко определено в некоторых исследованиях, например [118, 121, 124], изменение интенсивности при различных условиях геометрии сканирования. В этой связи вопрос о влиянии УП и расстояний до сканируемого объекта следует рассмотреть отдельно.

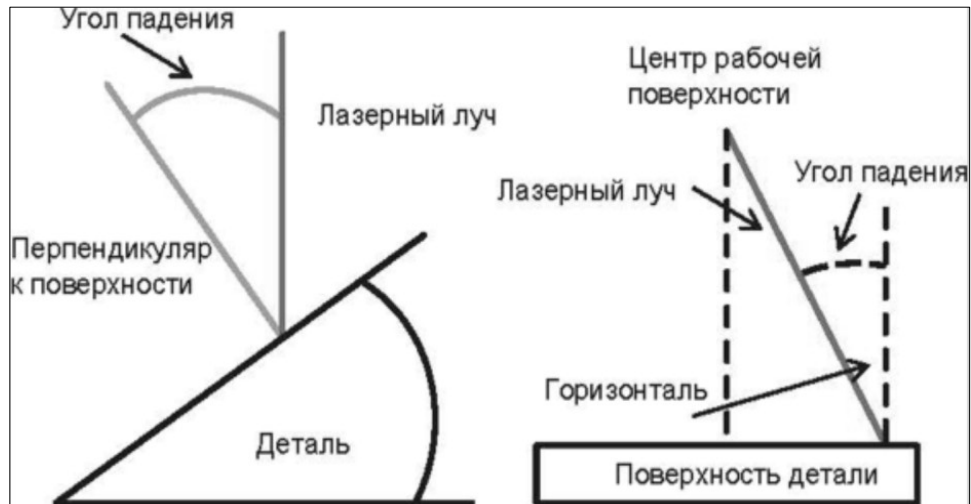


Рисунок 1.25 – Схема для пояснения влияния соотношения УП и расстояния до объекта сканирования [115]

В силу относительной новизны НЛС пользователю не просто выявить как производить съемку с определенной точностью, что также характерно и для точечной технологии тахеометрической съемки. Также возникает задача выбора места пунктов съемки, которые способны обеспечить наибольшую точность определения координат определяемых точек. Приборная точность, заявляемая производителем, может быть использована при однократных измерениях с одного съемочного пункта. При измерениях в безотражательном режиме данные результаты могут быть существенно ниже приборной точности. Применительно к НЛС, вопрос приобретает большую актуальность в связи с измерениями исключительно в безотражательном режиме. Отсутствие четких стандартов обуславливает востребованность проведения исследований данного вопроса.

Последовательность применения лазерно-сканирующей съемки с заданной (требуемой) точностью предполагает проектирование и оценку точности опорной сети. В соответствии с [37], независимо от состава обмерных и инженерно-

геодезических работ, в обязательном порядке рекомендовано выполнять работы по созданию, развитию и закреплению опорной геодезической сети, на базе которой производят измерения. Опорная сеть позволяет выполнять все виды работ по сохранению объекта культурного наследия в единой системе координат и высот.

1.6 Выводы по главе 1

Анализ традиционных и современных методов цифровой съемки для фиксации ПКН показывает [9, 18, 56, 67, 74, 86, 102] тенденцию их развития, направленную на широкое использование технологии НЛС. При этом имеется возможность не только создавать чертежи в плане или разрезы, но оперативно строить их трехмерные модели с визуализацией любой части. Однако из-за относительно недавнего использования технологии НЛС в геодезической практике и особенно при фиксации памятников, ряд технических вопросов решен недостаточно. Имеются результаты исследований [118, 121, 124] в которых изучается влияние линейно-угловых параметров лазерного сканера. Однако эти исследования проведены либо в лабораторных условиях с использованием плоских мишеней или применительно к оборудованию в помещениях.

В нормативной документации [37, 38] также отсутствуют четкие методические указания по технологии НЛС. Вместе с тем в них указывается на перспективность использования НЛС для фиксации ПКН и при этом обеспечивается наиболее точное отображение объекта.

В приведенном обзоре состояния изученности показано, что при использовании технологии НЛС важно определить местоположение съемочных точек, обеспечивающих количественную оптимальность (точек) и точность построение модели объекта. Фактически такие же задачи стоят при решении широкого спектра задач геодезического обеспечения, например, в строительстве. В этой связи исследованию подлежит определение диапазона углов сканирования для конкретного объекта, обеспечивающие определенную точность положения точек лазерных отражений. Безусловно этот диапазон должен быть увязан с расстояниями (сканирования) до объекта.

Вышеприведенный анализ также показал большой интерес ученых и практиков к перспективной технологии НЛС. В этой связи тема диссертации представляется актуальной, но для достижения ее цели - геодезическое обеспечение обмерной фиксации объектов культурного наследия на основе применения лазерно-сканирующей съемки, необходимо решить следующие задачи:

1. Проектирование геодезической сети для съемки объектов культурного наследия и проведение математического моделирования с оценкой точности координат съёмочных пунктов.
2. Разработка линейно-угловых параметров лазерно-сканирующей съемки для обмеров ПКН.
3. Разработка методики лазерно-сканирующей съемки ПКН и ее практическое применение.

Предлагаемая методика базируется на экспериментальных исследованиях, в которых расчетным путем выбирается квазиопорная сеть с оптимизацией количества точек и конфигурации. Далее проводят оценку точности положения СТ относительно квазиопорной сети, после чего выполняют оценку точности лазерно-сканирующей съемки относительно КТ, расположенных на фиксируемом объекте. При этом координаты КТ определяют на основе измерений электронным тахеометром. Такой подход обеспечивает применение лазерно-сканирующей съемки с требуемыми параметрами точности (в нашем случае субсантиметровая точность).

ГЛАВА 2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ ДЛЯ СЪЕМКИ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ОЦЕНКОЙ ТОЧНОСТИ КООРДИНАТ СЪЕМОЧНЫХ ПУНКТОВ

В соответствии с нормативным документом [37] обмерные чертежи должны иметь предельную погрешность измерений от 1 до 300 мм в зависимости от их детализации. Внедрение в жизнь технологии лазерного сканирования позволяет получать 3D-модели объектов с довольно высокой детализацией [85, 89, 94, 101, 106, 109, 115]. Однако это требует создания геодезической основы с предрасчётом точности координат ее пунктов.

В данной главе представлена методика оценки точности НЛС съёмки, выполненной в натуральных условиях с дифференциацией ошибок, вызванных УП и расстоянием до объекта. Проиллюстрирован метод наименьших квадратов (МНК) для расчета координат ТЛО и оценки их точности.

2.1 Моделирование и оценка точности геодезической сети

В последние годы применение МНК быстро набирает популярность, особенно при использовании в целях анализа и корректировки геодезических данных [6, 10, 24, 25, 103]. Применительно к вопросам фиксации ПКН с использованием технологии НЛС принцип построения съёмочной сети остается таким же, как и при тахеометрической съёмке. Вместе с тем в данной работе рассматривается оптимизация построения съёмочной сети с использованием модельных решений на основе МНК. Создается математическая модель геодезической сети [5, 8, 13, 41, 79, 103], которая оптимизируется на предмет получения наибольшей точности съёмочных точек относительно исходных пунктов.

2.1.1 Математический аппарат

В матричном виде основное уравнение МНК (по формулам (2.1-2.11)) имеет следующий вид:

$$V = AX - L, \quad (2.1)$$

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1m} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nm} \end{pmatrix}; X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix}; L = \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{pmatrix} \& V = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix},$$

где V – вектор поправок, A – матрица коэффициентов параметрических уравнений, X – матрица скорректированных параметров, L – вектор свободных членов (известные величины: разность измеренных и расчетных значений).

Весовая матрица является диагональной матрицей, а ее недиагональные элементы имеют нулевые значения. Значение весов обратно пропорционально дисперсии (σ).

$$P = \begin{pmatrix} p_{x1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{y1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{xn} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{yn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_{x1}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{y1}^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{xn}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{yn}^2} \end{pmatrix},$$

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_{Изм}^2 + \sigma_{Исхх}^2}, \quad (2.2)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_{Изм}^2 + \sigma_{Исху}^2}, \quad (2.3)$$

$$\sigma_{Изм} = \sqrt{\sigma_S^2 + \left(\frac{\sigma_\beta}{\rho} \times S \right)^2}, \quad (2.4)$$

$$\sigma_S = X + \frac{Y \times S}{10^6}, \quad (2.5)$$

где $\sigma_{Изм}$ – СКП измерений прибора, $\sigma_{Исхх}$ – точность положения исходных точек при x , $\sigma_{Исху}$ – точность положения исходных точек при y , σ_S – точность измерения расстояния, X , Y & σ_β – СКП измерений лазерного сканера ($X_M + Y_{РРМ}$, σ_β), S – максимальное расстояние, ρ – постоянное число ($\rho=206265$).

Неизвестные и остаточные векторы X и V соответственно могут быть

определены с использованием следующих формул (2.6-2.9):

$$N = A^T P A, \quad (2.6)$$

$$Q = N^{-1}, \quad (2.7)$$

$$T = A^T P L, \quad (2.8)$$

$$X = Q T, \quad (2.9)$$

где N – матрица нормальных уравнений, A^T – транспонированная матрица коэффициентов параметрических уравнений, P – матрица весов измеренных величин, Q – матрица обратная нормальной, T – вектор коррекции (вектор отклонений измерений от приближенных координат точек).

СКП измерений (стандартная ошибка) определена из выражения:

$$СКП^2 = \frac{V^T P V}{n - t} \text{ (стандартная ошибка) }, \quad (2.10)$$

где n - число измерений, t - число неизвестных.

СКП сети определена из выражения:

$$СКП_{сеть} = \sqrt{Trace(СКП)}, \quad (2.11)$$

где $СКП_{сеть}$ - СКП сети, $Trace(СКП)$ - сумме диагональных элементов матрицы стандартная ошибка.

2.1.2 Разработка автоматизированного алгоритма оценки точности определяемых точек

В настоящем разделе приводится разработанный автором программный алгоритм по оценке точности определяемых точек (ОТ). Данный алгоритм впоследствии послужит элементом построения автоматизированного алгоритма построения съемочной сети при НЛС.

Геодезическая горизонтальная сеть показана на рисунке 2.1. Модель содержит две ОТ (1 и 2), координаты которых задаются произвольным образом и в дальнейшем в программе определяется их положение, отвечающее наилучшей по точности. Задаются также два исходных пункта (ST1 и ST2), а также СКП тахеометра, например, с точностью определения расстояний $2 \text{ мм} + 2 \text{ промилле}$.

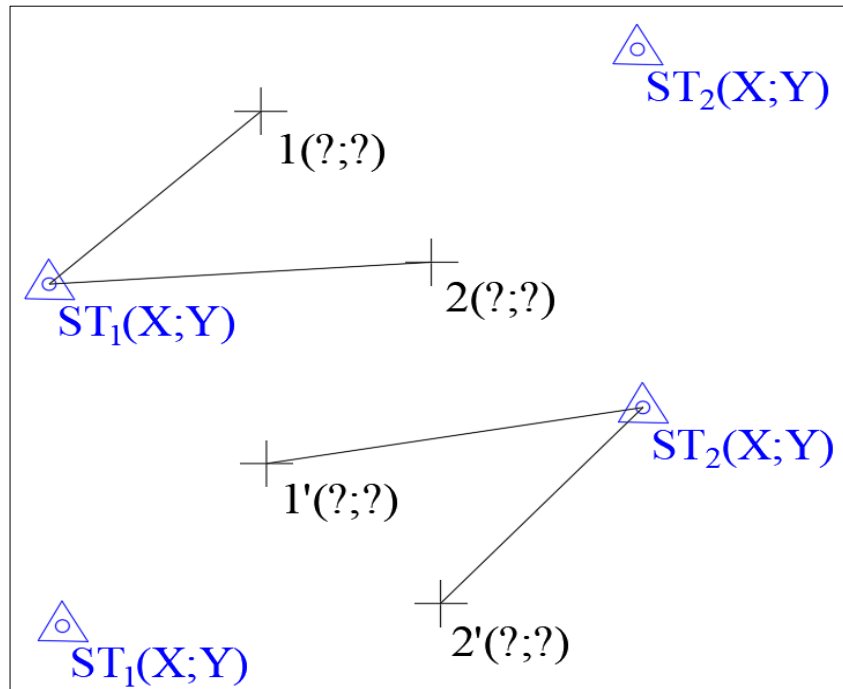


Рисунок 2.1 – Схема модели геодезической сети (Δ – исходные пункты, + – 1-2 определяемые)

Первым шагом является вывод следующих матриц: A (матрица коэффициентов параметрических уравнений), L (вектор свободных членов) (таблица 2.1) и P (матрица весов измеренных величин).

Таблица 2.1 – Координаты исходных и определяемых пунктов оцениваемой сети

Точки	Координаты, м		Дисперсии, м		Весовая матрица	
	X	Y	σ_x	σ_y	$\frac{1}{\sigma_x^2}$	$\frac{1}{\sigma_y^2}$
ST1	967,9205	1012,1726	0,002	0,002		
1	1007,4068	1035,5925	0,00288	0,00286	120161,59	122106,78
2	1048,4106	1037,5993	0,00294	0,00286	115342,45	121862,05
ST2	1080,9049	1002,3604	0,001	0,001	-	
1'	1007,4069	1035,5860	0,00236	0,00229	178266,08	189745,39
2'	1048,4093	1037,5963	0,00229	0,00229	189962,8	189148,42

$$A = \begin{pmatrix} x_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_2 \\ x_{1'} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_{1'} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_{2'} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_{2'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; L = \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ X_2 \\ X_2 \\ X_{1'} \\ Y_{1'} \\ X_{2'} \\ Y_{2'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1007,4065 \\ 1035,5835 \\ 1048,4105 \\ 1037,5990 \\ 1007,4069 \\ 1035,5860 \\ 1048,4093 \\ 1037,5963 \end{pmatrix},$$

$$P = \begin{pmatrix} 113360,4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 33532,9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 97933,3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 32039,9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 141893,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 66455,9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 170106,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 72053,01 \end{pmatrix},$$

Следующим шагом являются вычисления:

Матрица нормальных уравнений,

$$N = A^T \cdot P \cdot A = \begin{pmatrix} 255253,68 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 99988,93 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 268039,8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 104092,97 \end{pmatrix},$$

$$\text{Матрица обратная нормальной, } Q = N^{-1} = \begin{pmatrix} 3,91E-06 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,00E-06 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3,73E-06 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 9,60E-06 \end{pmatrix}$$

$$\text{Вектор коррекции, } T = A^T \cdot P \cdot L = \begin{pmatrix} 257144275,4 \\ 103547064,4 \\ 281015578,1 \\ 108006573,6 \end{pmatrix},$$

$$\text{Матрица скорректированных параметров, } X = Q \cdot T = \begin{pmatrix} 1007,4067 \\ 1035,5852 \\ 1048,4097 \\ 1037,5971 \end{pmatrix},$$

$$\text{вектор поправок, } V = A \cdot X - L = \begin{pmatrix} 1007,40672 \\ 1035,58519 \\ 1048,40977 \\ 1037,59718 \\ 1007,40672 \\ 1035,58519 \\ 1048,40977 \\ 1037,59718 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1007,4065 \\ 1035,5835 \\ 1048,4105 \\ 1037,5990 \\ 1007,4069 \\ 1035,5860 \\ 1048,4093 \\ 1037,5963 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,0002 \\ 0,0016 \\ -0,0007 \\ -0,0018 \\ -0,0002 \\ -0,0009 \\ 0,0004 \\ 0,0008 \end{pmatrix},$$

Следовательно, скорректированные координаты двух точек 1 и 2

соответственно: $x_1 = 1007,4067\text{ м}$, $y_1 = 1035,5852\text{ м}$, $x_2 = 1048,4097\text{ м}$ & $y_1 = 1037,5971\text{ м}$.

СКП измерений определена,

$$СКП^2 = \frac{V^T P V}{n-t} = \begin{pmatrix} 3,83E-07 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 9,77E-07 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3,64E-07 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 9,39E-07 \end{pmatrix},$$

Погрешность положения ОТ горизонтальной геодезической сети представлена в таблице 2.2:

Таблица 2.2 – СКП положений определяемых точек (ОТ)

точки	СКП ²		СКП, м			СКП _{сеть} , м
	σ_x^2	σ_y^2	σ_x	σ_y	$СКП = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$	
1	3,83E-07	9,77E-07	0,00059	0,00098	0,00117	0,0016
2	3,64E-07	9,39E-07	0,00059	0,00097	0,00117	

2.1.3 Автоматизация алгоритма построения схемы геодезической сети и оценки точности ее пунктов

Программа предназначена для построения и оценки точности точки геодезической сети, относительно двух исходных пунктов с использованием языка Python. В качестве входных данных используются следующие параметры: СКП тахеометра, координаты всех точек. Программа позволяет вводить и выводить данные в виде файла .csv, вычислять скорректированные координаты ОТ [76].

Рекомендации по запуску и работе в программе: Подробная процедура приведена в последовательном порядке для более удобного ее понимания. Для запуска программы необходимо запустить исполняемый файл 2dAdjustment.exe (после установки программного обеспечения Anaconda версии 4+).

После запуска программы появятся два черно-белых поля (рисунок 2.2), в первом из которых будет показан результат после ввода данных и нажатия кнопки "Расчет", а второе поле предназначено для ввода следующих данных:

- В рабочем окне программы слева есть поля, предназначенные для:
 1. Ввода числовых параметров расстояния и угловой точности тахеометра (например: 2 мм + 2 промилле, 1 ").

2. Кнопка «Точки наблюдения» (Observation points) с помощью нее можно ввести координаты ОТ. Метод записи файла Observation points .CSV осуществляется:

(Пункт; X; Y; Из исходной точки)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Name; X; Y; Ref} \\ 1; 1007.406; 1035.583; ST1 \\ 2; 1048.410; 1037.599; ST1 \\ 3; 1007.406; 1035.586; ST2 \\ 4; 1048.409; 1037.596; ST2 \end{array} \right\}$$

3. Кнопка «Опорные точки» (Reference points) с помощью нее можно ввести координаты и задать точность опорных точек. Метод записи файла References .CSV осуществляется:

(Исходные пункты; X; Y; Точность X; Точность Y)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Name; X; Y; segx; segy} \\ ST1; 967.920; 1012.172; 0.002; 0.005 \\ ST2; 1080.904; 1002.360; 0.001; 0.003 \end{array} \right\}$$

4. Кнопка "Calculate" предназначена для запуска расчета.
5. Кнопка "Save" предназначена для того, чтобы сохранить файл в формате CSV.
- В рабочем окне программы справа есть поле с примечаниями на английском языке, которые необходимо учитывать при использовании программы.

После ввода всех необходимых данных и нажатия кнопки "Расчет" (рисунок 2.3) результат будет показан в черном поле. Затем, после нажатия кнопки «Сохранить», результаты будут сохранены в папке 2D Results в папке 2dAdjustment в формате .csv следующим образом:

- Accuracy_of_coordinates.csv – СКП положения точек.
- corrected_coordinates.csv – скорректированные координаты.

- corrected_Network.csv – СКП положения геодезической плановой сети ($m_{Сеть}$)

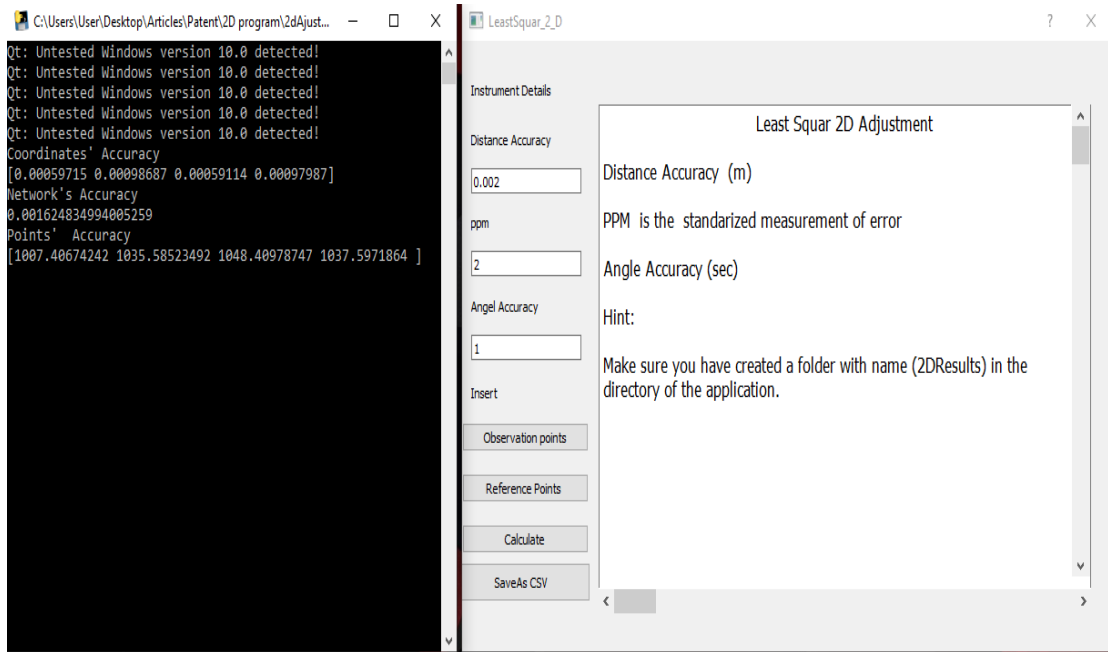


Рисунок 2.2 – Главная панель программы 2dAdjustment

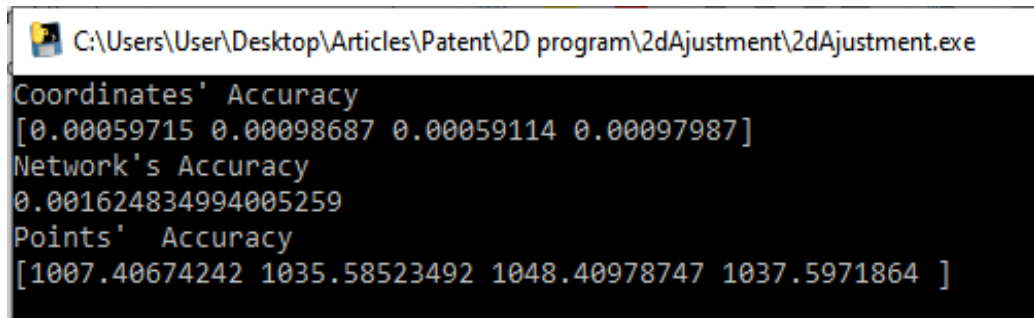


Рисунок 2.3 – Фрагмент программы: полученные результаты (Coordinates' Accuracy - точность положения ОТ $[\sigma_{x1} \sigma_{y1} \sigma_{x2} \sigma_{y2}]$, Network's Accuracy - Точность сети, Points' Accuracy - скорректированные координаты $[X_1 Y_1 X_2 Y_2]$)

2.1.4 Моделирование геодезических сетей

Приведенную выше программу следует рассматривать как первый шаг к оптимизации построения съемочной сети при НЛС. Фиксация ПКН обычно выполняется путем геодезических измерений, порядок которых предусматривает создание геодезической съемочной сети [5, 8, 13, 41, 79, 103]. Проектирование съемочной сети для обмерных работ по технологии НЛС эффективно выполнять с применением компьютерных технологий с оценкой точности модели и

предполагаемых геодезических измерений. В этой связи, наиболее целесообразным представляется предварительное моделирование геодезической сети. Моделирование конфигурации геодезической сети с оценкой точности выполнялось по схеме, приведенной на рисунке 2.4. Пункты геодезической сети смоделированы в среде Автокад: четыре исходных (S_1, S_2, S_3, S_4) пункта и пять определяемых (съёмочных) точек.

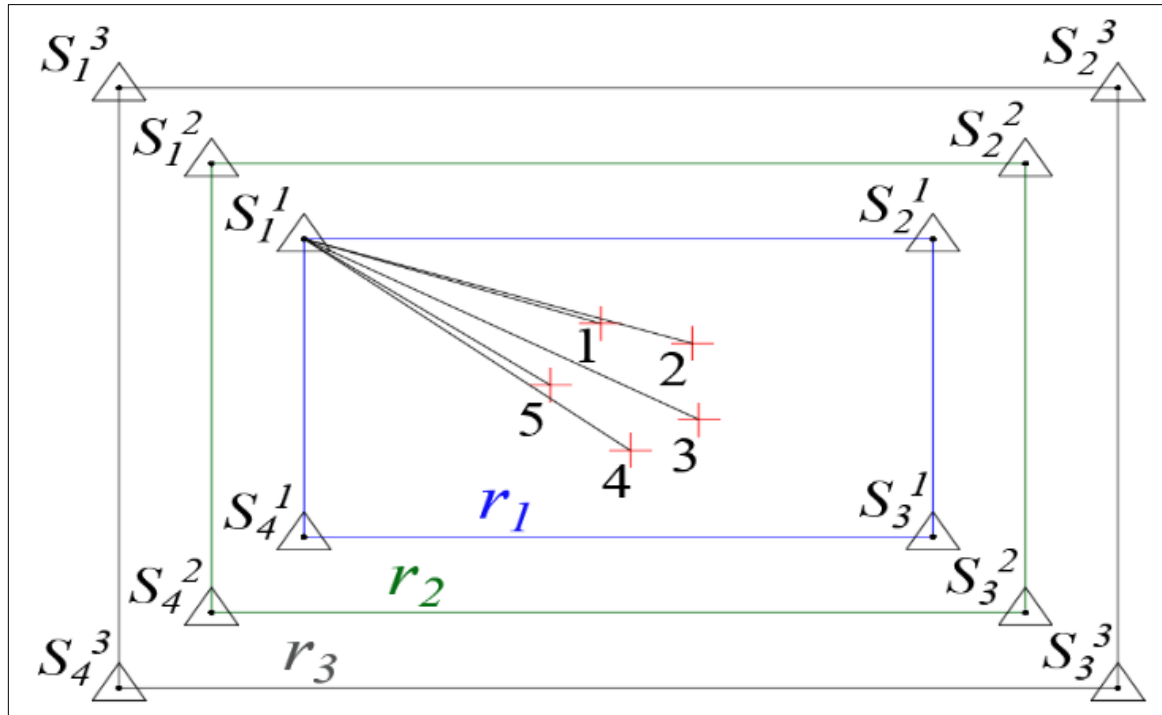


Рисунок 2.4 – Схема модели геодезической сети для оценки точности СТ. (Δ – исходные пункты, + – 1-5 СТ) [71]

Длины линий (измерения) имитировались с учетом СКП тахеометра. Расстояния между исходными точками и определяемыми точками варьировались 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 СКП измерений тахеометра: $2 \text{ мм} + 2ppm \& 2''$, $3 \text{ мм} + 2ppm \& 3''$, $5 \text{ мм} + 3ppm \& 5''$ (рисунок 2.4).

Используя алгоритм МНК (рисунок 2.5-приложение), были выполнены расчеты и определены средние апостериорные СКП положения пяти СТ.

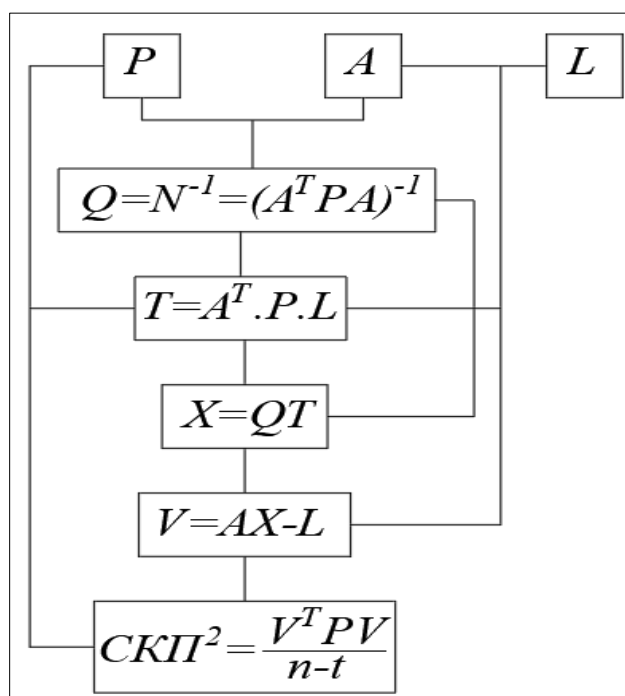


Рисунок 2.5 – Схема уравнивания измерений и определения поправок [82]

На рисунках 2.6-2.7 показаны усредненные СКП съемочных точек с последовательным применением от 1 до 4 опорных пунктов и использованием трех различных тахеометров, а также трех расстояний до исходных пунктов.

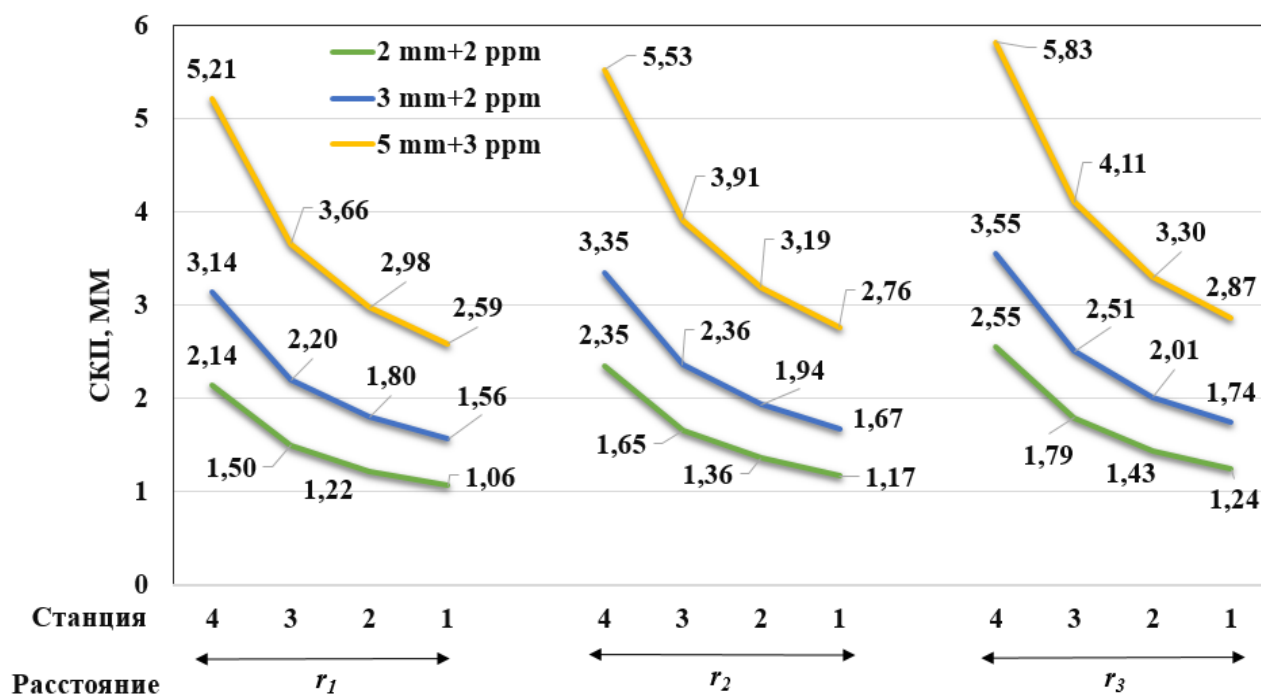


Рисунок 2.6 – Графики вариаций априорных СКП положений съемочных точек в зависимости от расстояний до исходных пунктов и СКП тахеометра

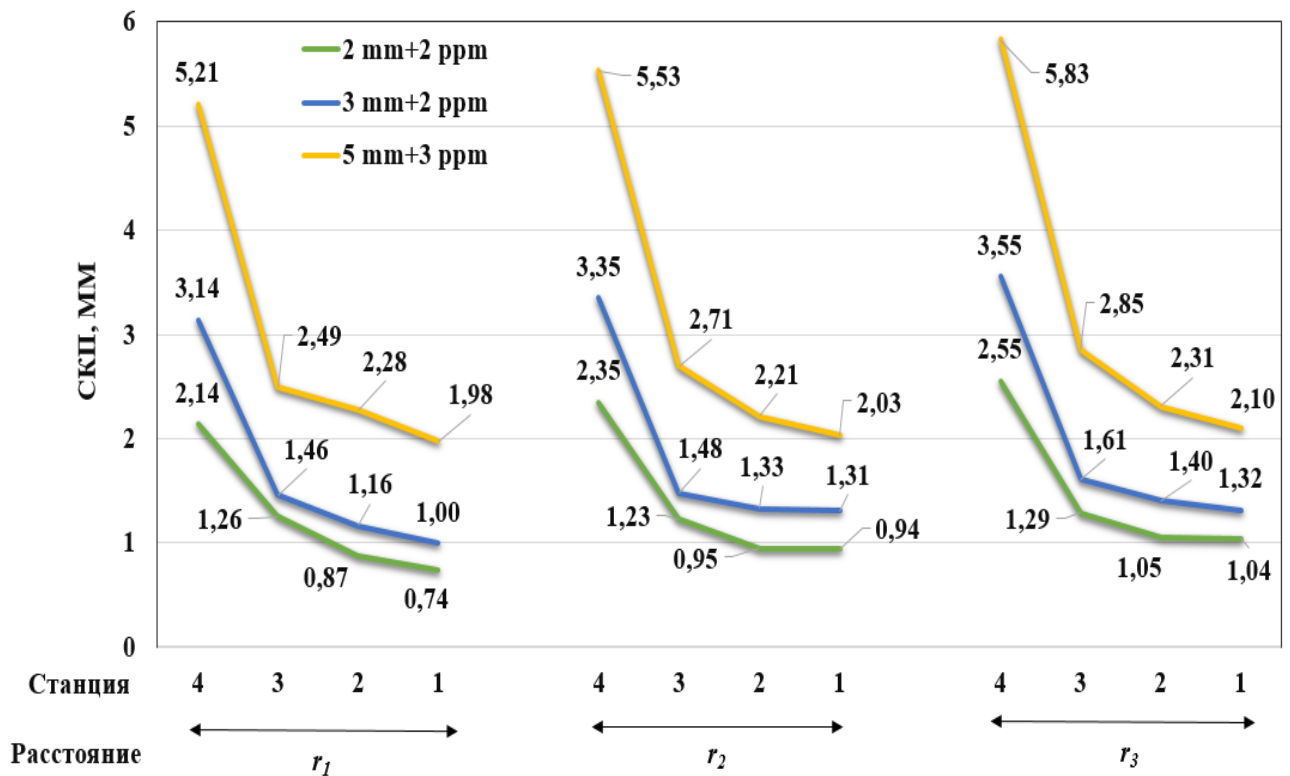


Рисунок 2.7 – Графики вариаций апостериорных СКП съемочных точек в зависимости от расстояний до исходных пунктов и инструментальной точности тахеометра

Полученные результаты (см. рисунки 2.6-2.7) соотносятся с известными выводами [6, 103] и в данной работе приведены для отображения последовательности разработки геодезического обеспечения применения лазерно-сканирующей съемки объектов культурного наследия [9, 18, 56, 67, 74, 86, 102]. Кроме того, эти результаты послужили основой для проектирования съемочной сети при лазерно-сканирующей съемке объекта культурного наследия – замка Баальбек (Ливан).

Следующим шагом была разработка методики оценки точности положения точек лазерных отражений (ТЛО). Методика предусматривает введение дополнительных контрольных точек (КТ) на объекте съемки (например, стена замка). При этом координаты КТ определяются на основе тахеометрических измерений. Такой подход представляет собой сугубо геодезический подход к оценке точности и позволяет оценить погрешности лазерно-сканирующей съемки.

2.1.5 Оценка точности положения точек лазерных отражений

КТ были закреплены на стене замка и представляли собой пленочные отражатели (рисунок 2.9). Координирование выполнено тахеометром *Topcon OS-105* с точностью определения расстояний $2 \text{ мм} + 2 \text{ ppm}$ в режиме наведения на призму и $3 \text{ мм} + 2 \text{ ppm}$ в безотражательном режиме (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Тахеометр *Topcon OS-105* [106]

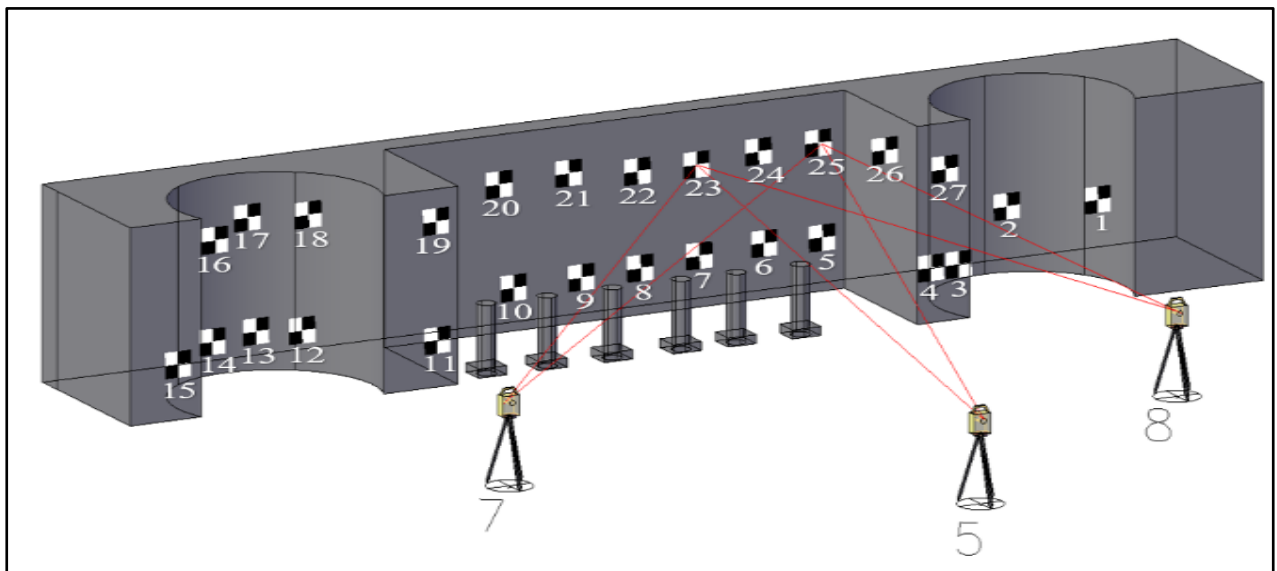


Рисунок 2.9 – Модель стены храма Баальбек. (5,7,8 – станции НЛС, □ – контрольные точки) [86]

Сначала по методике, описанной выше, построена съемочная сеть и определены координаты точек. Сеть состоит из 8 точек, расположенных перед

стеной (рисунок 2.10). При этом исходными были три пункта: S_1 , S_2 и S_3 . Далее были определены координаты 27 КТ, закрепленных на стене (рисунок 2.9).

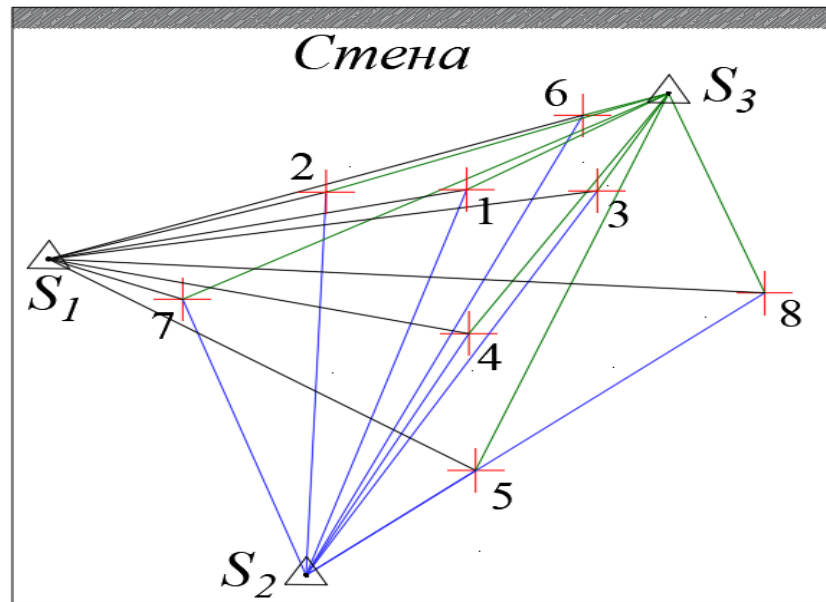


Рисунок 2.10 – Схема геодезической съёмочной сети. (Δ - опорные пункты, + СТ)

[71]

На графике (рисунок 2.11) показаны точности съёмочных точек (желтый цвет) и контрольных (зеленый цвет) точек в зависимости от количества исходных станции (1–3).

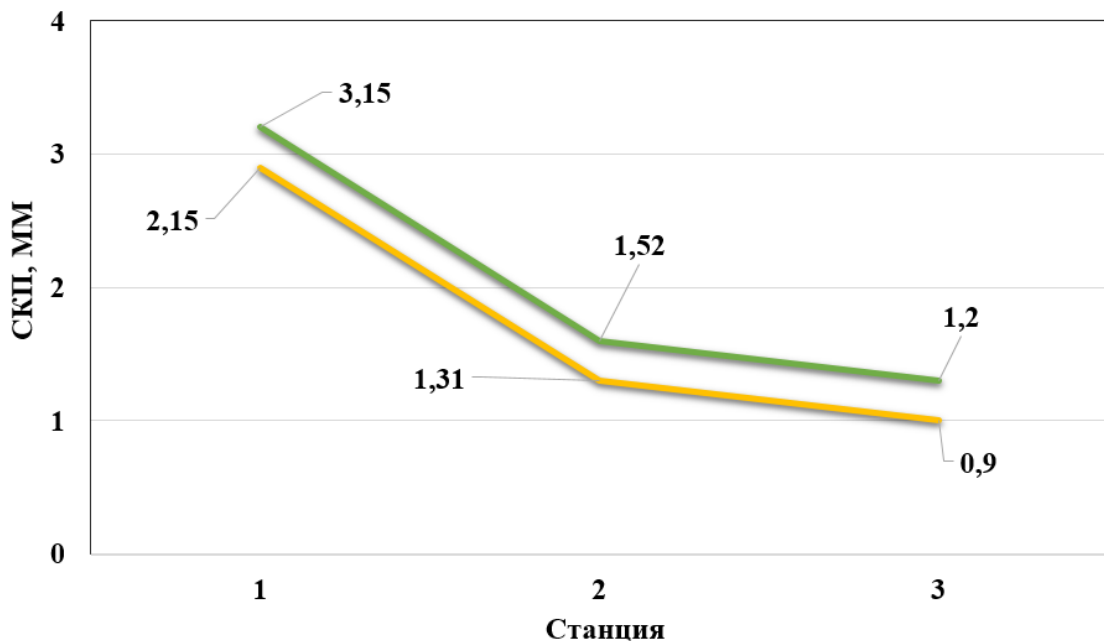


Рисунок 2.11 – Графики вариации СКП положения точек: съёмочных (желтый цвет), контрольных на стене (зеленый цвет)

Ясно, что при уменьшении количества исходных пунктов уменьшается точность определяемых точек. Важно, что соразмерно уменьшается и точность координат КТ. При использовании 3-х тахеометрических станций можно получить субмиллиметровую точность КТ, которая обеспечит определение ТЛО в соответствии со стандартом [37], регламентирующем диапазон точности фиксации объектов культурного наследия для чертежей масштаба 1: 20 и крупнее.

2.2 Разработка методики оценки линейно-угловых параметров лазерно-сканирующей съемки

В целом ряде исследований по применению НЛС имеются рекомендации по выполнению измерений в диапазоне углов падения лазерного луча не более 60° - 70° [71, 98, 121, 124]. Вместе с тем не дается расширенного научного объяснения в каких случаях возможно применение этого диапазона, и какая при этом достигается точность положения ТЛО. Объектом исследования является фрагмент замка Баальбек, представленный на рисунке 2.12



Рисунок 2.12 – Фрагмент замка Баальбек – храмовая стена [86]

Методика оценки точности положения ТЛО, основанная на использовании КТ, созданных тахеометрическим способом и уравненных по МНК (рисунок 2.5),

реализована на практике. Лазерное сканирование поверхности исследуемого объекта (стена замка Баальбек) проводилось (рисунок 2.12) путем последовательной установки сканера на каждой из 8 СТ (рисунок 2.10). Использована сканирующая станция *Leica P30* (рисунок 2.13) с горизонтальной и вертикальной угловой точностью 8 дюймов, точностью в диапазоне до 10 мм во всем разрешенном диапазоне и 3 мм в диапазоне до 50 м.



Рисунок 2.13 – Лазерный Сканер Leica P30 [106]

Результатом съемки является облачная модель храмовой стены (рисунок 2.14).

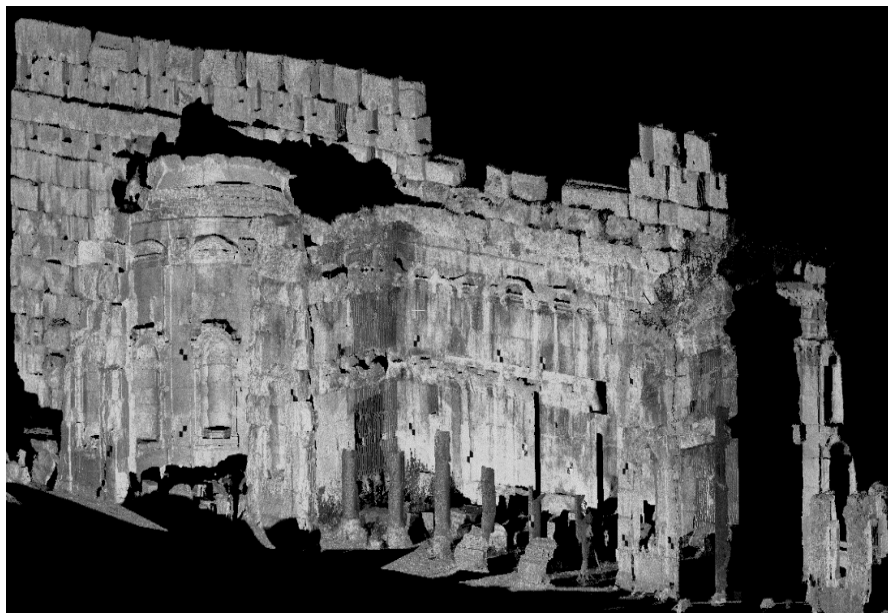


Рисунок 2.14 – Модель облака точек [101]

Ее построение разбивается на этапы. На первом этапе съемки была определена ошибка положений ТЛЮ, вызванная одним циклом съемки с 8 станций НЛС. При этом расстояния до стены составили интервал от 14 до 50 метров. КТ были

представлены в виде пластиковых атмосферостойких черно-белых квадратных пластин с размерами $50 \times 50 \text{ см}^2$ (рисунок 2.15).



Рисунок 2.15 – Вид КТ, закрепленной на стене

Диапазон УП лазерных лучей при НЛС составил от 90° (перпендикулярно стене) до 7° или, если считать относительно перпендикуляра к стене, от нуля до 83° . Качественно картину зависимости углов съемки отражает визуализация облачной модели (рисунок 2.16). Интенсивность ТЛО уменьшается с увеличением УП (рисунок 2.16). Видно, что в пределах $60\text{-}80^\circ$ находится граница эффективного применения НЛС.

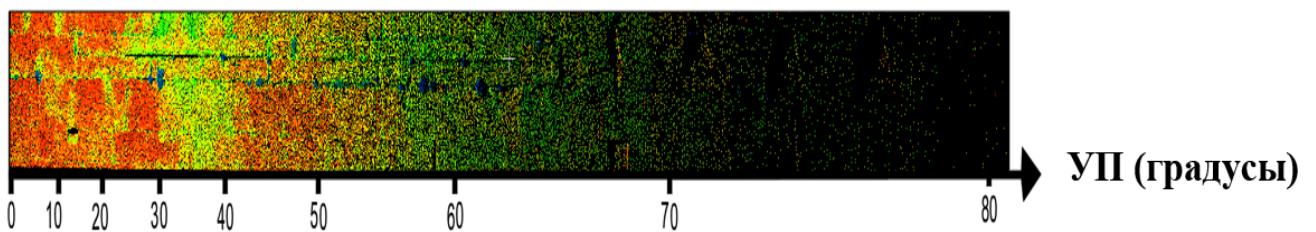


Рисунок 2.16 – Картина интенсивности ТЛО в зависимости от УП лучей

Подтвержденный факт о том, что интенсивность ТЛО уменьшается по мере увеличения УП луча отмечается в ряде работ [71, 98, 121, 124]. В то же время интерес представляет связь интенсивности лазерного луча с точностью измерений.

На рисунке 2.17 показано распределение интенсивности лазерного луча при малом и большом УП. В первом случае распределения интенсивности лазерного

луча сосредоточено в меньшей области. При этом ясно, что обратный сигнал значительно сильнее, чем при большом УП (рисунок 2.17). Учитывая этот эффект, наглядно продемонстрированный, вытекает объяснение того обстоятельства, что при больших УП лазерные лучи отражаются существенно в меньшем количестве, соответственно возрастает и погрешность измерений.

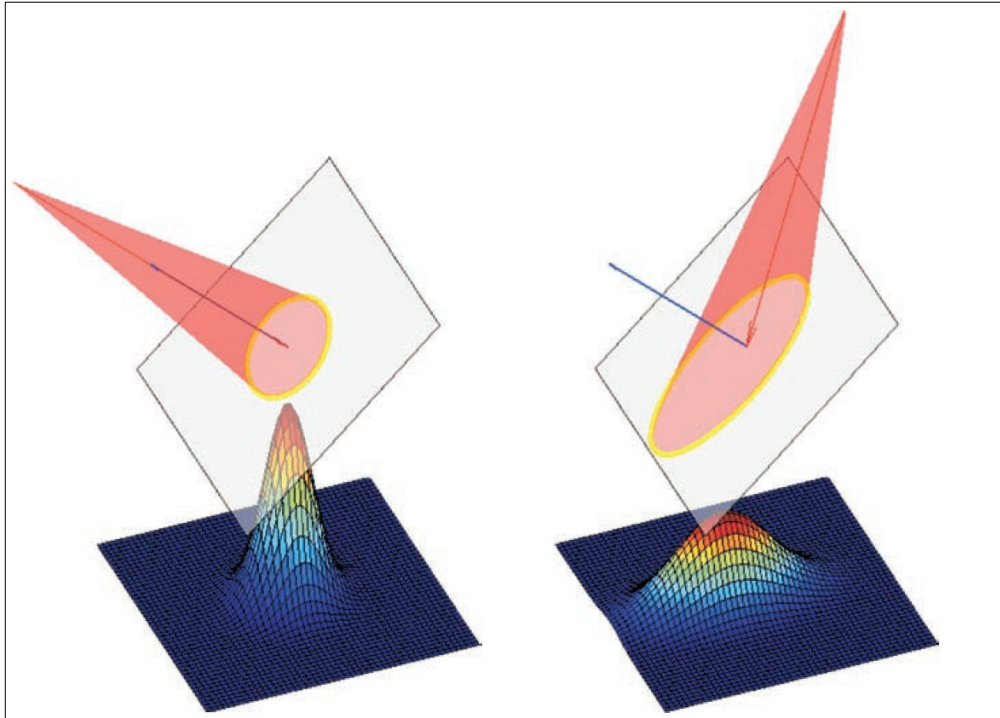


Рисунок 2.17 – Влияние угла падения на относительное распределение интенсивности отраженного сигнала: (слева) при УП = 0°; и (справа) при УП = 60° [98]

Анализ проведенных измерений (съемки по технологии НЛС) позволил количественно определить связь интенсивности точек и УП (см. рисунок 2.18).

Для количественного определения зависимости УП на интенсивность ТЛО проведен специальный анализ.

Выполнено уравнивание и оценка точности ТЛО (плановые координаты) с использованием МНК для схемы СТ - КТ (рисунок 2.9-2.10), где первые представляли собой опорные, а вторые - определяемые точки. В результате средние отклонения координат ТЛО относительно СТ составили 1,2 мм. Погрешность (*Error*) определялась в виде вектора и рассчитана из выражения (по формуле (2.12)):

$$Error = \sqrt{(x_T - x_{ЛС})^2 + (y_T - y_{ЛС})^2}, \quad (2.12)$$

где x_T, y_T – координаты КТ (уравненные по МНК координаты); $x_{ЛС}, y_{ЛС}$ – координаты ТЛЮ.

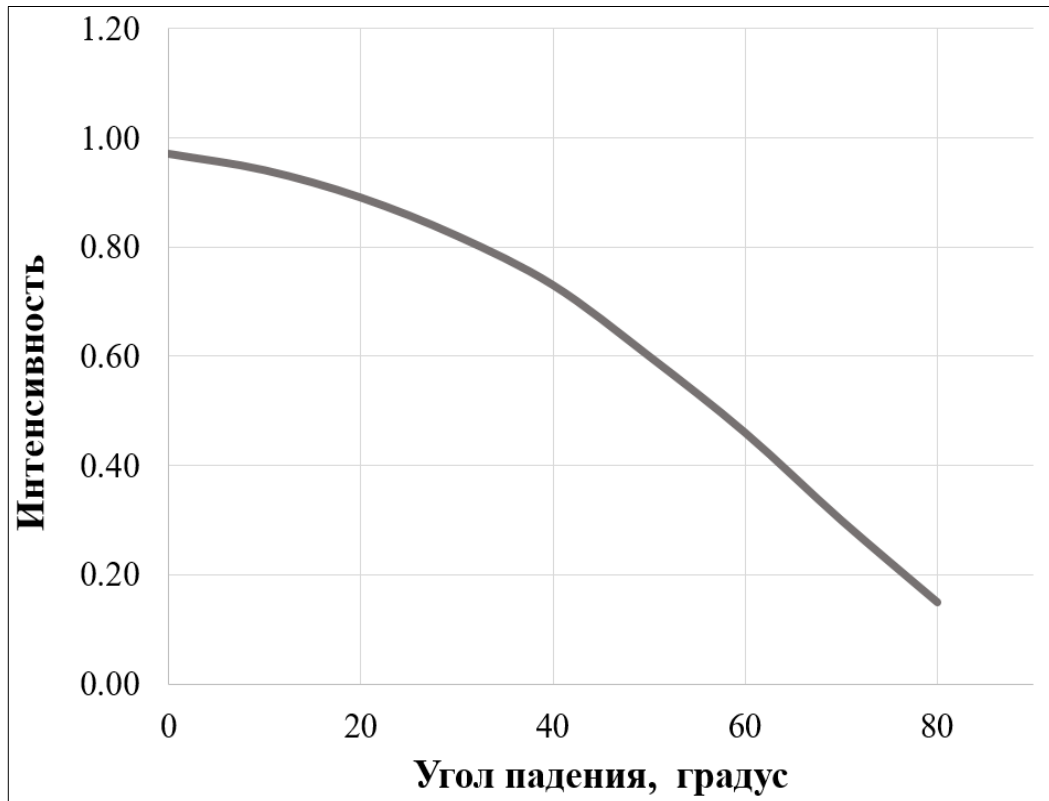


Рисунок 2.18 – Соотношение между интенсивностью лазера и УП

По проведенным расчетам построены графики (рисунок 2.20), отражающие зависимости точности положения ТЛЮ от УП и расстояний до стены. На рисунках 2.19 и 2.20 представлены схемы измерений со станции №1. Зона съемки разделена на точки, расположенные справа (зона Б) или слева (зона А) от станции.

Как и в рисунке 2.20 график показывает возрастание ошибки положения ТЛЮ с увеличением расстояния и УП лазерного луча. Соотношение между погрешностями положения точек и углов падения лазерного луча представлено на рисунке 2.21. Приведены отклонения положения ТЛЮ от координат контрольных (связующих) точек 6, 18, 24.

Затем для определения влияния расстояний на точность положений ТЛЮ выполнен анализ результатов НЛС 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 относительно КТ 20, 21 и 22 (рисунок 2.22). Как видно из рассмотрения графиков (рисунок 2.21-2.22), погрешность соотносится соразмерно с расстоянием и углом падения луча сканирования.

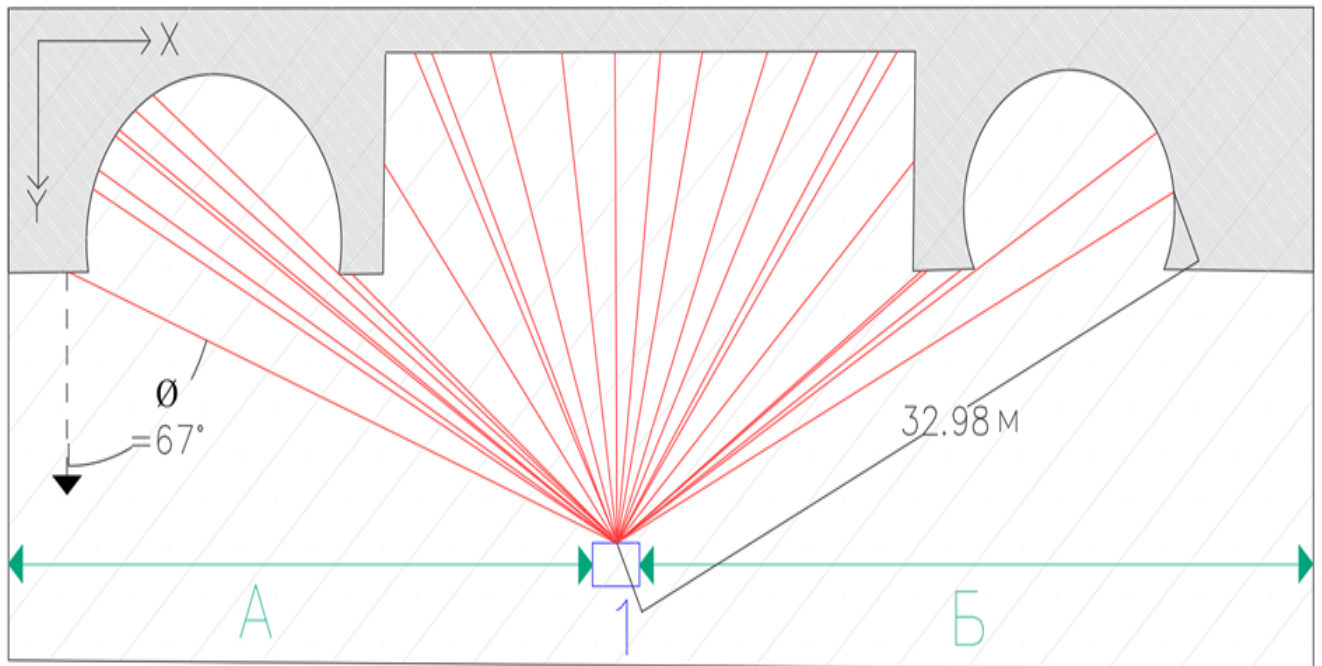


Рисунок 2.19 – Схема к иллюстрации задачи о точности положения ТЛО в зависимости от угла падения луча и расстояния



Рисунок 2.20 – Связь между общей погрешностью и горизонтальными расстояниями для ТЛО при НЛС со станции №1

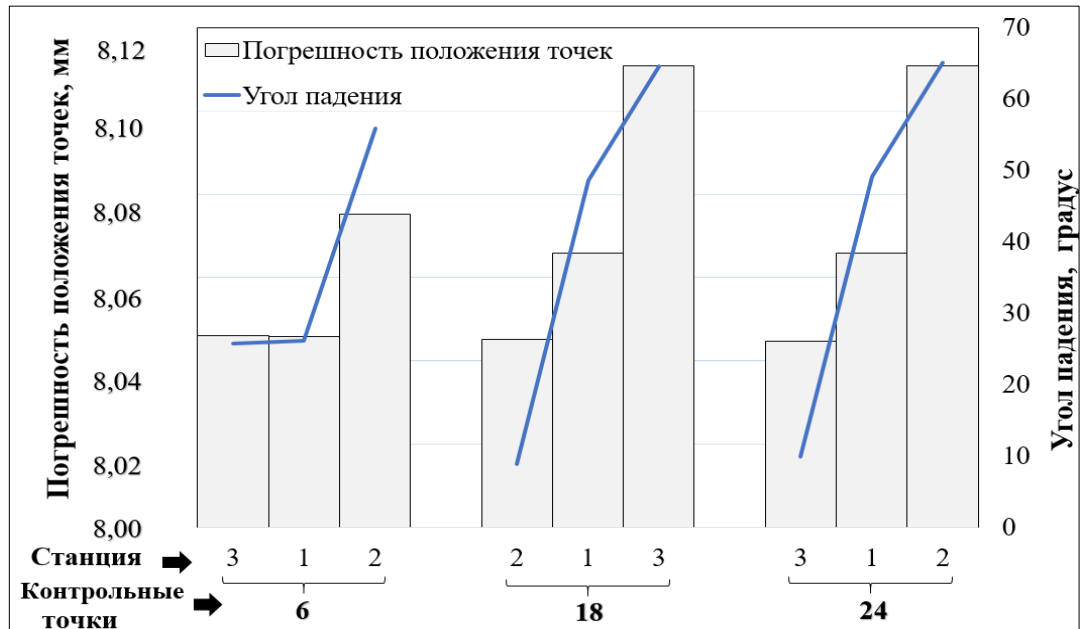


Рисунок 2.21 – Диаграмма погрешности положения ТЛО от угла падения луча

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

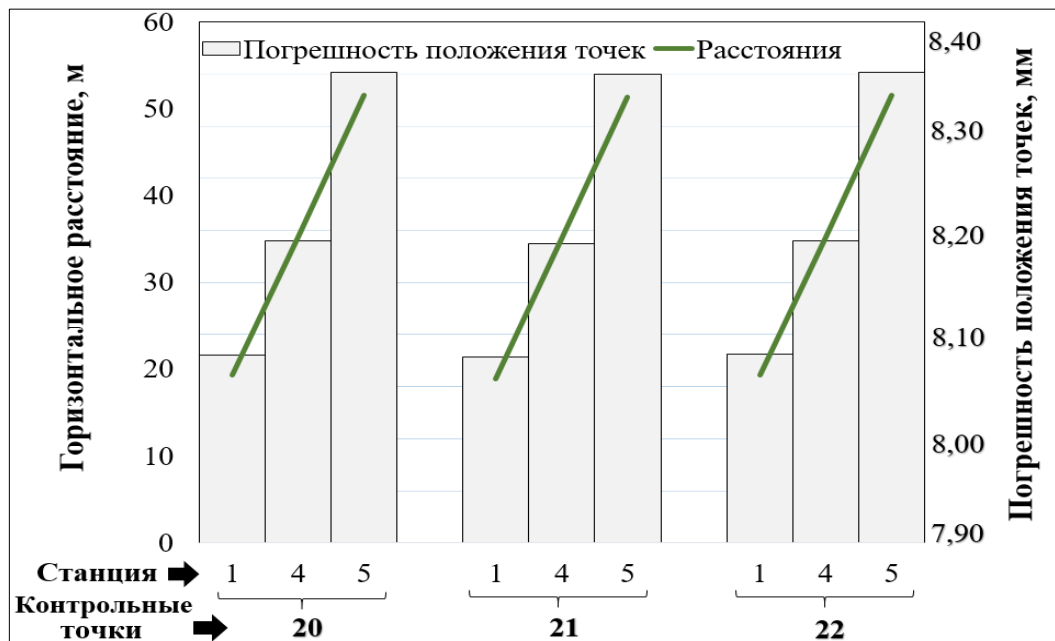


Рисунок 2.22 – Соотношение между погрешностью положения ТЛО и расстоянием до съемочной станции

Рассматриваемый пример (стена замка Баальбек) включает в себя разные формы элементов либо декора, или конструктивных. Рассматриваемый пример (стена замка Баальбек) включает в себя разные формы декоративных и конструктивных элементов. Для их более конкретизированного анализа удобно

ошибки измерений разделить на $f(x)$ (вдоль стены, квазипараллельно земной поверхности) и $f(y)$ (перпендикулярно стене).

На рисунках 2.23 и 2.24 показано распространение ошибок $f(x)$ и $f(y)$. Результаты отражают единичный случай, т.е. при измерениях с одной станции (№1). На рисунке 2.23 $f(x)$ и $f(y)$ представлены как функции УП. А на рисунке 2.24, как функция от расстояния.

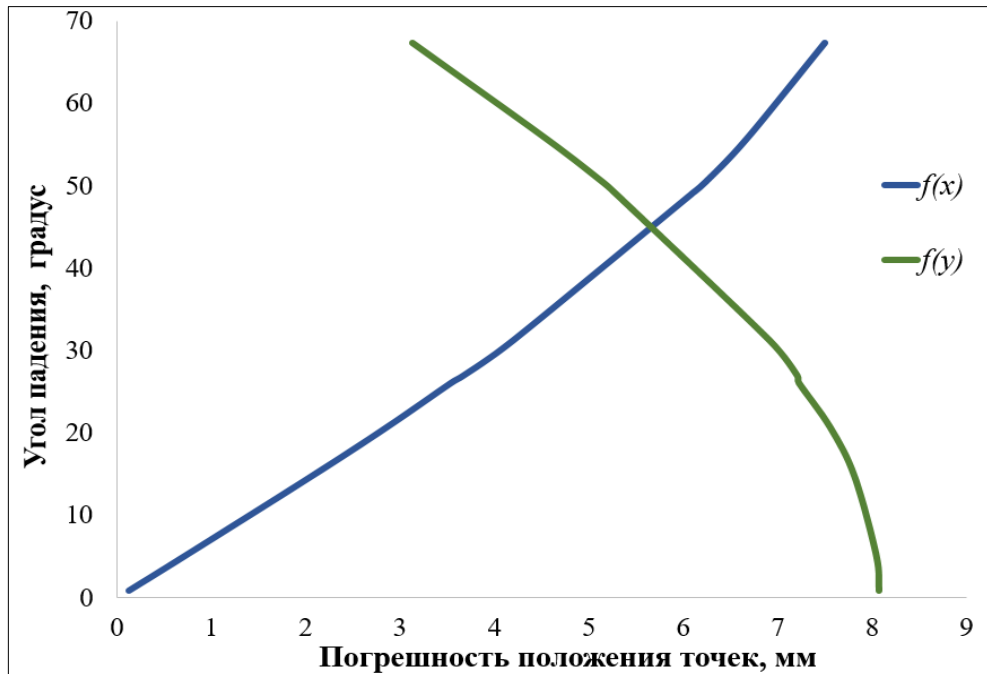


Рисунок 2.23 – График распределения ошибки координат ТЛО в зависимости от УП

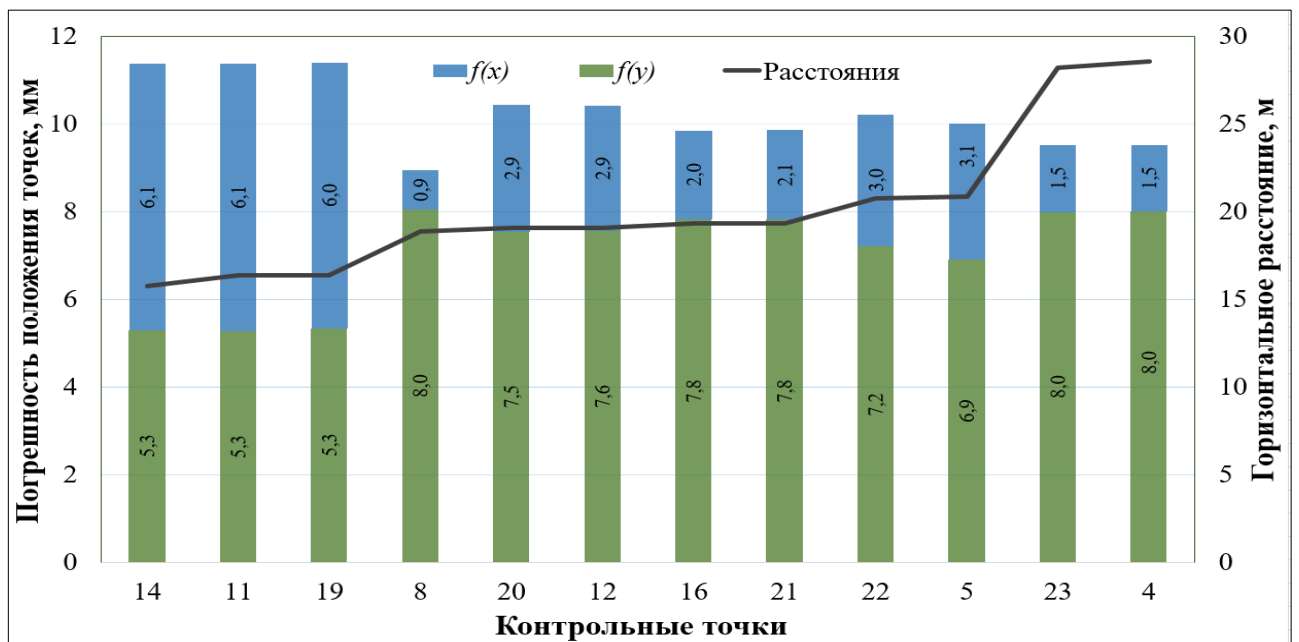


Рисунок 2.24 – График распространения ошибки координат ТЛО от ГР

Как следует из рассмотрения графиков, ошибки определения координат точек увеличиваются пропорционально УП и расстоянию. При этом эта связь определена количественно. Минимальные ошибки имеют место при УП лучей близких к нулевым (рисунок 2.23) и соответственно максимальные при больших УП. При этом максимальная ошибка не превышает 8,1 мм, когда УП находится в диапазоне от 0° до 68° .

Таким образом при единичных измерениях (с одной станции) при не превышении УП 68° можно достичь точности положения 8 мм. Однако на станции №6 угол достиг 77° (рисунки 2.25-2.26). Цель следующих шагов - показать методику обработки результатов съемки (отклонение ошибки $f(x)$ и $f(y)$), включающих большие углы, превышающие 68° .

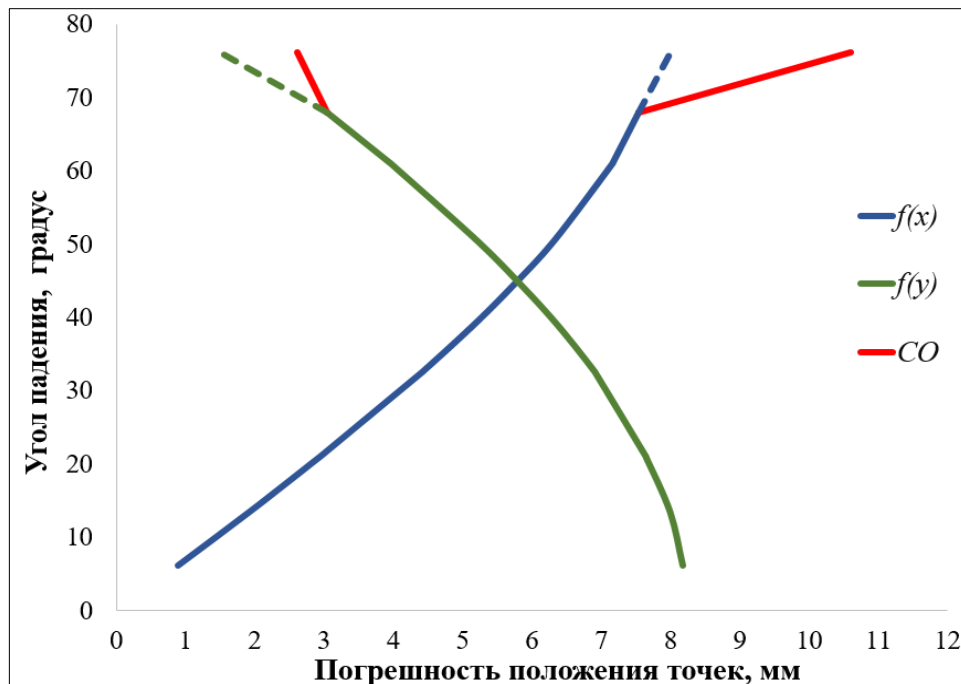


Рисунок 2.25 – График распределения ошибки координат ТЛО в зависимости от УП

По результатам обработки НЛС съемки (рисунок 2.10), проведенной с 8 съемочных станций, получены следующие результаты (рисунок 2.27). На рисунке 2.27 $f(x)$ и $f(y)$ параболическая аппроксимация по МНК от измеренных величин, которая четко выделяется на интервале углов падения от 0° до 68° . До значений в $68-79^\circ$ фактические данные распределяются по линейному закону (красная линия-

CO). Где CO рассматривается как случайная ошибка (см. рисунок 2.25-2.27).

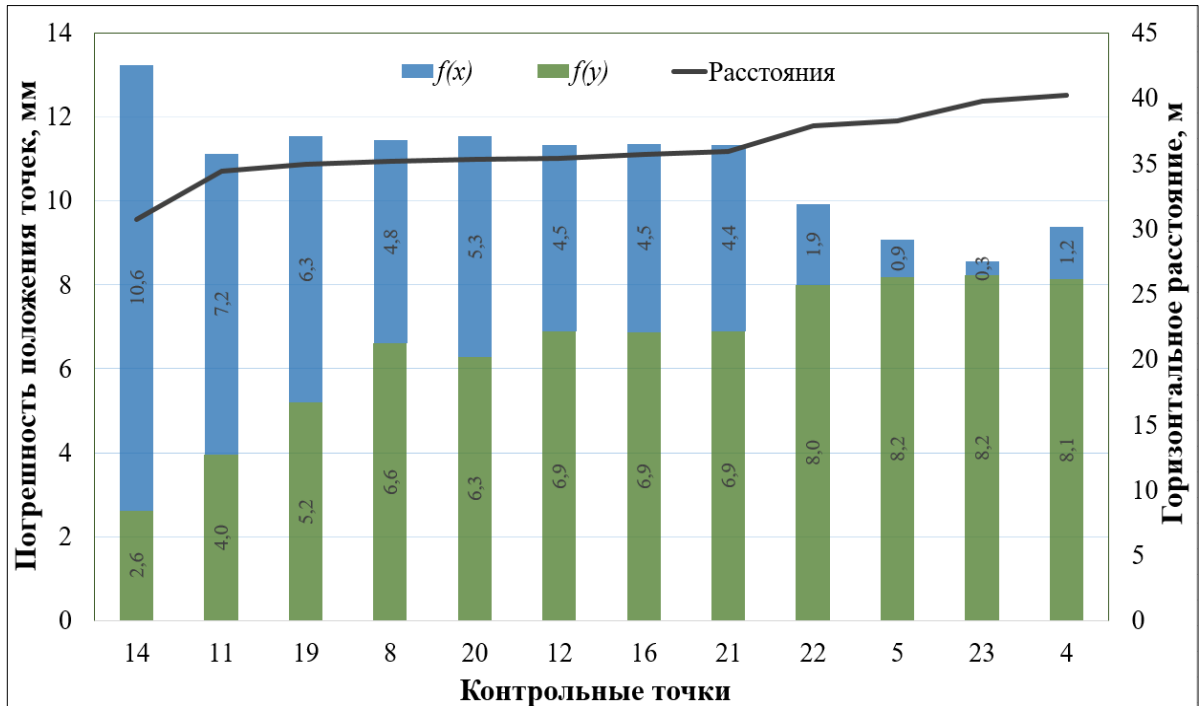


Рисунок 2.26 – График распространения ошибки координат ТЛЮ от ГР

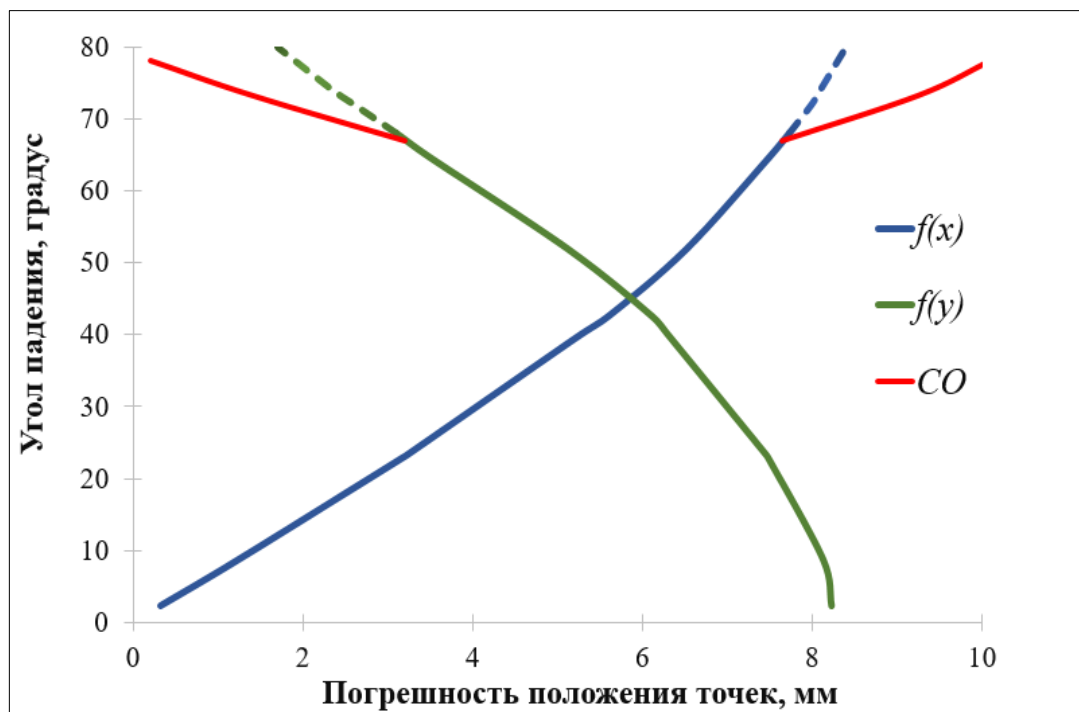


Рисунок 2.27 – Обобщенный график распространения погрешности координат точек сканирования от угла падения лазерного луча

Приведенные результаты показали хорошую сходимость с теми, которые получены в исследованиях [121, 124], но отличаются условиями эксперимента и

методикой анализа данных измерений.

В таблице 2.3 приведены расчетные значения погрешности положения ТЛО и определенные на основе НЛС съемки стены замка Баальбек.

Таблица 2.3 – Погрешность положения ТЛО 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
$f(x)$	0,00	1,23	3,20	4,43	5,6	6,52	7,17	7,60
e_x , мм	0,7	1,64	2,53	4,02	6,00	6,40	6,80	7,14
$f(y)$	8,22	8,14	7,55	6,90	6,33	5,12	3,95	3,04
e_y , мм	8,02	8,00	7,80	7,10	6,40	5,39	4,15	3,24

Полученные результаты были использованы при определении погрешности положения ТЛО с учетом других ошибок из следующих выражений (по формулам (2.13-2.14)):

$$e = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_{Ц}^2 + \sigma_{\Phi}^2 + \sigma_{Изм}^2}, \quad (2.13)$$

$$\begin{cases} e_x = e \cdot \sin \theta \\ e_y = e \cdot \cos \theta \end{cases}, \quad (2.14)$$

где σ_0 – точность положения лазерной станции, $\sigma_{Ц}$ – ошибка центрирования прибора, σ_{Φ} – ошибка графическая ($\sigma_{Ц} = \sigma_{\Phi} = 0,5\text{мм}$), $\sigma_{Изм}$ – ошибка прибора, e_x – ошибка в основном зависит от вариации УП, e_y – ошибка в основном зависит от вариации расстояния, θ – УП.

Ошибка каждого измерения ($\sigma_{Изм}$) независимо может быть рассчитана (по формуле (2.15)):

$$\sigma_{Изм} = \sqrt{\sigma_S^2 + \left(\frac{\sigma_{\beta}}{\rho} \times S \right)^2}, \quad (2.15)$$

где σ_S – точность измерения расстояния, σ_{β} – точность углового измерения, ρ – постоянное число ($\rho = 206265$), S – расстояния.

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

2.3 Выводы по Главе 2

В настоящей главе поставлена и решена задача методического подхода и определения главных параметров при применении технологии НЛС для обмеров ПКН. Результаты исследований в большей мере представляют научное обобщение геодезического метода применительно к технологии НЛС.

На примере памятника мирового наследия показано последовательно подготовка и выполнение обмерных работ. Рассмотрен процесс проектирования съемочной сети. Эффективно использован МНК при оценке точности как положения съемочных точек, так и ТЛО. Результаты согласуются с исследованиями ряда независимых специалистов [93, 96, 100, 114, 117, 122, 125]. Вместе с тем численно определены зависимости точности положений ТЛО от угла съемки и расстояния до отражающей поверхности [71, 98, 111, 118, 123]. Основными выводами по результатам исследований в этой главе являются:

1. На основе теоретических исследований, включавших моделирование съемочных сетей с оценкой их точности по МНК и экспериментальных работ с большим объемом лазерного сканирования, разработана методика фиксации объектов культурного наследия на основе применения лазерно-сканирующей съемки. Методика обобщает принципы геодезического метода для выполнения обмерных работ по технологии НЛС и включает работы по проектированию съемочной сети и оценку точности положения ТЛО с использованием контрольных точек, координированных тахеометрическими измерениями.

2. Продемонстрированный алгоритм оптимизации положения точек съемочной сети относительно исходных пунктов позволяет предусчитывать и точность положения ТЛО. Например, для достижения относительной точности положения ТЛО в 2 мм на расстояниях от 50 до 100 м можно применять сканеры с точностью $3 \text{ мм} + 2\text{ppm}$ и $5 \text{ мм} + 3\text{ppm}$ и использовать от 2 до 4 съемочных станций соответственно, либо с одной станции, но сканером с точностью $2 \text{ мм} + 2\text{ppm}$.

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. По результатам проведенных натурных измерений и их обработке можно при решении конкретной задачи выделить диапазон углов сканирования (УП, см. Рисунок 2.27), обеспечивающий требуемую точность. Это важно, так как по определенному единичному сектору сканирования определенной точности возможно проектирование схемы построения съемочной сети и делать это в автоматизированном режиме. Такой подход в автоматизированном режиме рассматривается в следующей главе

4. Разработана компьютерная программа для построения оптимальной съемочной сети. Программа реализует метод наименьших квадратов для оценки точности точек геодезической сети.

5. Полученные результаты соотносятся с данными других исследователей [121, 124], использовавших лазерно-сканирующую съемку.

6. По результатам данных исследований сформулировано первое научное положение. При применении лазерно-сканирующей съемки для фиксации ПКН 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.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОБМЕРОВ ПАМЯТНИКОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ МЕТОДОМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Для создания полной и точной (удовлетворяющей нормативной точности) 3D-модели ПКН обычно выполняют рекогносцировочные работы, при которых тестовыми сканированиями намечается схема съемочной сети (места расположения сканерных станций). Выбор мест сканирования, ориентаций и параметров сканирования должен быть тщательно подобран в соответствии с соответствующими критериями, чтобы трехмерная модель могла быть построена при минимальном количестве станций сканирования. Оптимальное размещение лазерного сканера такое, при котором обеспечивается полный пространственный охват ПКН и требуемая точность измерений и, в конечном итоге, построение модели. В этой связи при решении задачи планирования размещений лазерного сканера следует оперировать несколькими параметрами, такими как допустимый (соответствующий определенной точности) диапазон УП луча лазера с учетом дальности сканирования.

Без модельного подхода геодезисту не просто рассмотреть все необходимые конфигурации для выполнения обмерных работ ПКН. В случае сканирования больших объектов это просто невозможно и требуется привлечение компьютерных технологий.

Автором предлагается автоматизированная методика вычисления координат точек и определения оптимальной конфигурации съемочных станций сканирования, обеспечивающая заданную точность построения модели рассматриваемого объекта. Ниже описывается разработанный алгоритм, который использует результаты проведенных исследований (вторая глава) и позволяет проектировать съемочную сеть на основе разработанного единичного сектора охвата лазерного сканера.

3.1 Общая схема и процесс расчета предлагаемой методики

На рисунке 3.1 показана блок-схема реализации всех этапов предлагаемого

подхода. Как видно, выполняется итерационный процесс оптимизации. Сначала моделируются точки сканирования в плановом виде. Далее после достижения оптимального положения эти области являются сканерными съемочными точками.

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

- Точность положения лазерно-сканирующей станции.
- Требуемое перекрытие между каждыми двумя соседними станциями сканирования (30% на основе [96]).
- Паспортная точность (СКП) лазерного сканера.
- Допустимый УП луча (для конкретного случая 68° на основе упомянутого выше результата во второй главе).
- Минимально необходимая точность модели облака точек (На основе ГОСТ Р 56905-2016) [37].

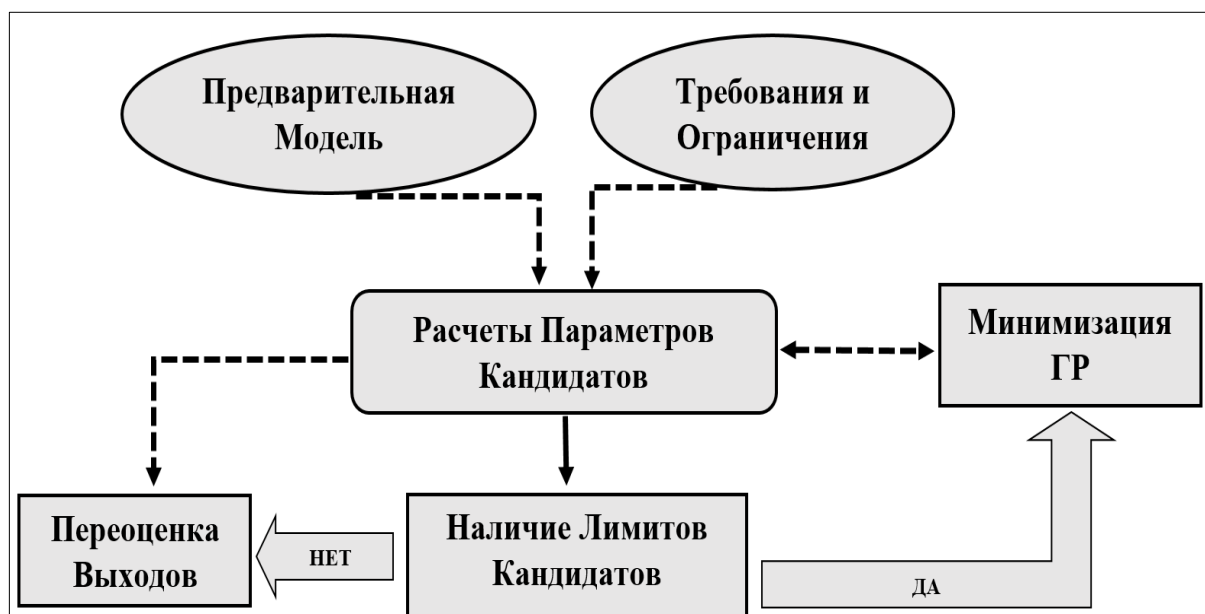


Рисунок 3.1 – Блок-схема оптимизации расположения сканерной станции

1.1.1 Первый этап процесса расчета

Перед началом процесса расчета объект сканирования разделяется на правильные фигуры (многоугольники). В каждой фигуре определяются координаты и значения всех элементов (вершины, углы, расстояния). Кроме того, каждая фигура дискретизируется на треугольные элементы. Процесс расчета

начинается с вычисления максимального расстояния (максимальной дальности с учетом допустимого угла падения лазерного луча) следующим образом (по формулам (3.1-3.2)):

$$S_{МАК}^2 \times \left(\frac{Y^2}{10^{12}} + \frac{\sigma_{\beta}^2}{\rho^2} \right) + S_{МАК} \times \left(\frac{2 \times X \times Y}{10^6} \right) + X^2 - \sigma_{np}^2 = 0, \quad (3.1)$$

$$\sigma_{np} = \sqrt{\sigma_{Треб}^2 - (\sigma_{КТ}^2 + \sigma_{Ц}^2 + \sigma_{\Phi}^2)}, \quad (3.2)$$

где $S_{МАК}$ – максимальное расстояние, X , Y & σ_{β} – координаты станции ($X_M + Y_{PPM}$, σ_{β}), ρ – постоянное число ($\rho=206265$), σ_{np} – СКП прибора, $\sigma_{Треб}$ – требуемая точность, $\sigma_{КТ}$ – точность положения лазерной станции, $\sigma_{Ц}$ – ошибка центрирования прибора и σ_{Φ} – ошибка графическая ($\sigma_{\psi} = \sigma_{\phi} = 0,5$ мм).

Расчетная точность положения станции НЛС вводится в качестве входных данных для создания оптимальной съемочной сети.

3.1.2 Второй этап процесса расчета

Второй шаг заключается в вычислении координат мест расположения сканера в пределах треугольников, которые принадлежат определенному многоугольнику (элемент объекта сканирования). После определения первой точки сканирования таким же образом моделируются следующие станции. 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.

Особое внимание уделяется угловым областям объекта сканирования и в этой связи начинается вычисление местоположения точки сканирования с вершин (углов).

Определение положения станции лазерного сканирования (кандидата К^В)

Местоположение кандидата для сканирования угловых частей объекта определяется как показано ниже:

- Когда: Угол объекта $< 180^\circ$, максимальное расстояние ($S_{МАК}$) равно наклонному расстоянию между K^B (НЛС) и верхним краем объекта сканирования (рисунки 3.2-3.3) (по формулам (3.3-3.5)).

$$S_{МАК} = SD_{МАК},$$

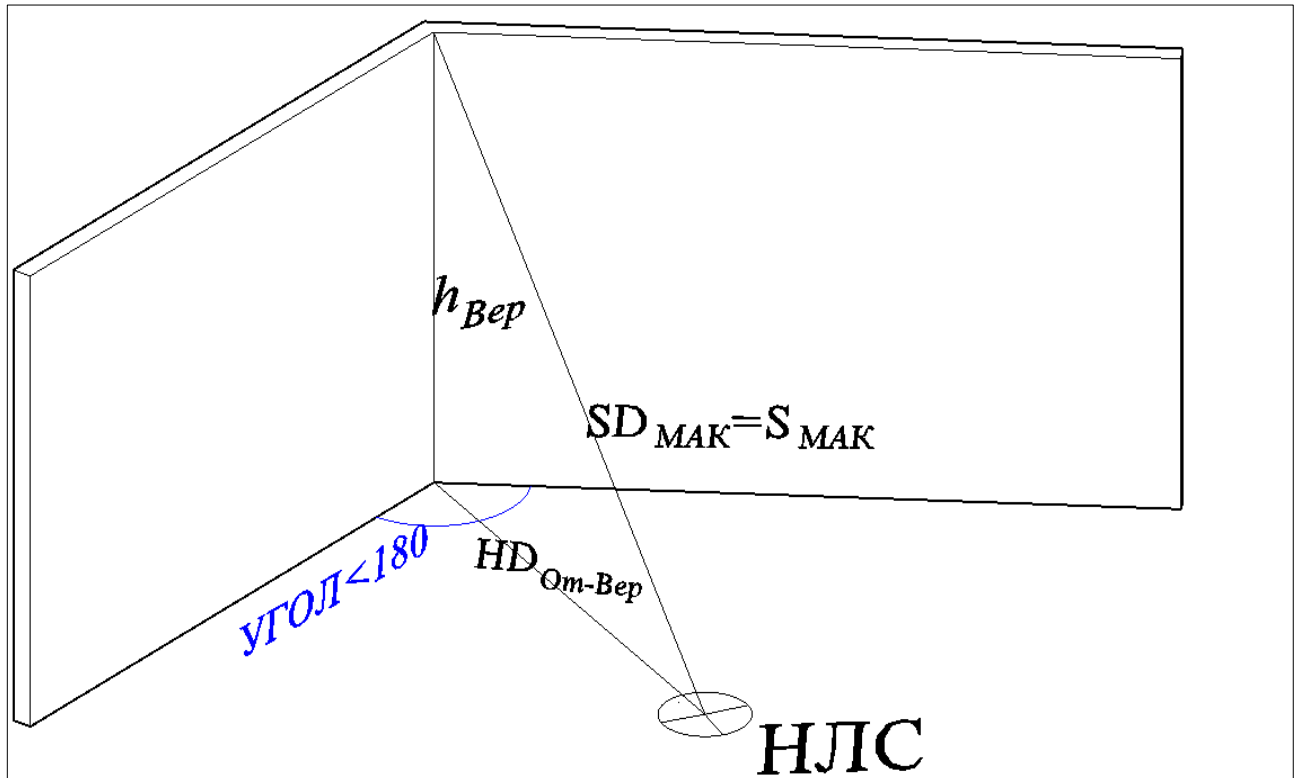


Рисунок 3.2 – Схема к определению места сканирования (кандидата) для случая сканирования угла объекта (менее 180°)

- $\alpha = \frac{\gamma_{20л}}{2}$; при $\alpha > 90^\circ - \theta_{МАК}$,
- $HD_{От \rightarrow Вер} = \sqrt{SD_{МАК}^2 - h_{Вер}^2}$, (3.3)
- $\gamma_{МАК} = 2 \times [180^\circ - (90^\circ + \alpha)]$, (3.4)
- $L = 2 \times HD_{От \rightarrow Вер} \times \cos(\alpha)$, (3.5)

где $SD_{МАК}$ – наклонное расстояние, $\theta_{МАК}$ – максимальный угол падения, $HD_{от \rightarrow Вер}$ – горизонтальное расстояние (ГР) от угла объекта до кандидата, $h_{Вер}$ – высота объекта, $\gamma_{МАК}$ – максимальный угол лазерного сканирования (распространяется влево и вправо от угла объекта сканирования), L – сектор покрытия сканером поверхности объекта в обе стороны от угла.

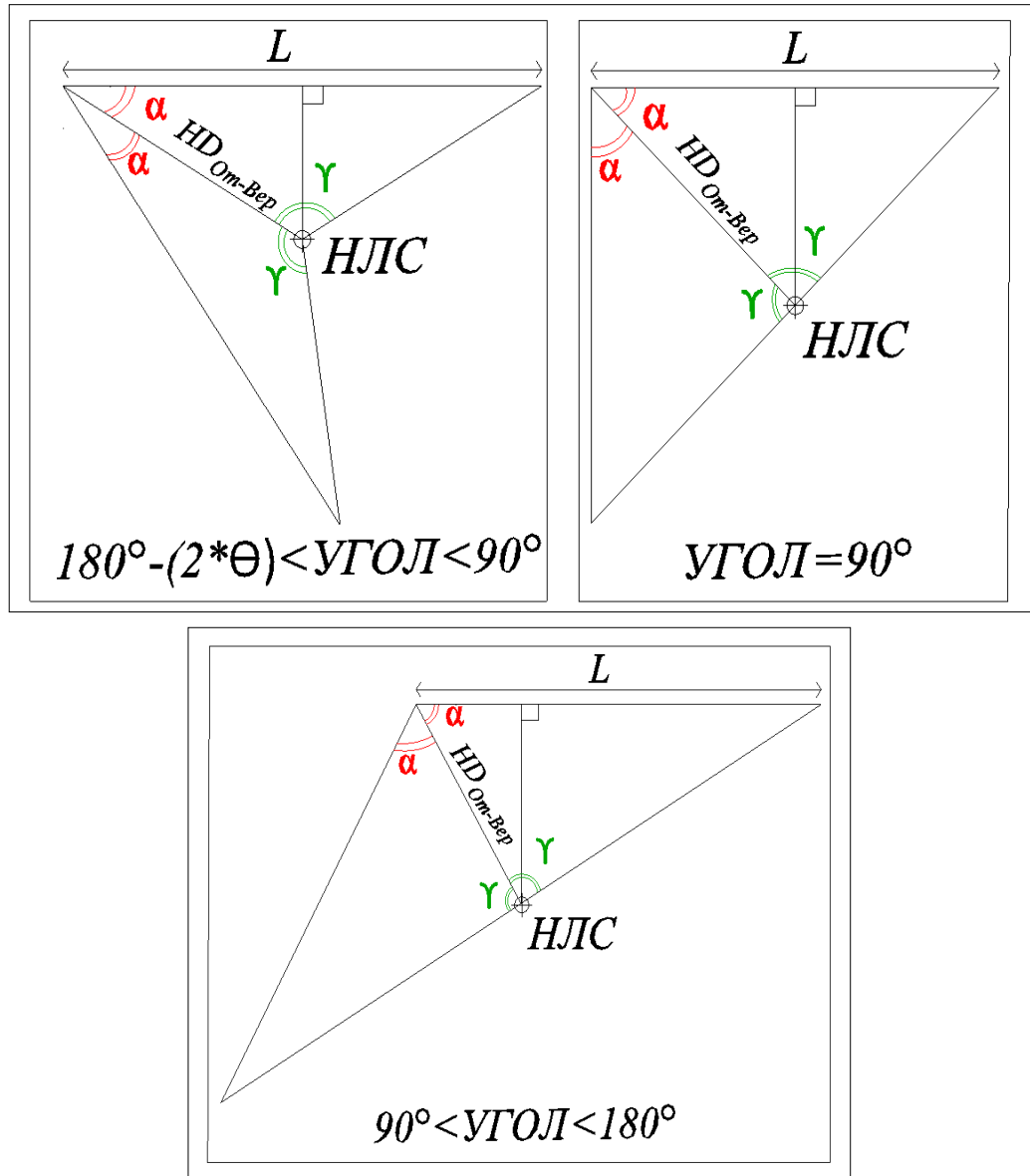


Рисунок 3.3 – Схема к определению местоположения станции для разных значений углов объекта сканирования

$$(180^\circ - (2 \times \theta) < \text{Угол} < 90^\circ, \text{Угол} = 90^\circ \& 90^\circ < \text{Угол} < 180^\circ)$$

- Когда: $\text{Angle} > 180^\circ$, максимальное расстояние ($S_{\text{МАК}}$) принимается равным наклонному расстоянию между точкой K^B и верхом объекта при максимальном угле падения (рисунки 3.4-3.5) (по формулам (3.6-3.10)).

$$S_{\text{МАК}} = SD_{\theta_{\text{МАК}}},$$

- $\alpha = \frac{\text{Угол}}{2}$; Состояние: $\alpha < 90^\circ + \theta_{\text{МАК}}$, если иначе, то решения нет.

$$\bullet \quad HD_{Om \rightarrow Bep} = \frac{x}{\cos(\alpha - 90)}, \quad (3.6)$$

$$x = \cos(\theta_{MAK}) \times HD_{\theta_{MAK}} \quad \& \quad HD_{\theta_{MAK}} = \sqrt{SD_{\theta_{MAK}}^2 - h_{Bep}^2}, \quad (3.7)$$

$$HD_{Om \rightarrow Bep} = \frac{\cos(\theta_{MAK}) \times \sqrt{SD_{MAK}^2 - h_{Bep}^2}}{\cos(\alpha - 90)}, \quad (3.8)$$

$$\bullet \quad \gamma_{MAK} = 180^\circ - [(90^\circ - \theta_{MAK}) + \alpha], \quad (3.9)$$

$$\bullet \quad L = [\sin(\theta_{MAK}) - \cos(\theta_{MAK}) \times \tan(\alpha - 90^\circ)] \times \sqrt{SD_{MAK}^2 - h_{Bep}^2},$$

$$L = HD_{Om \rightarrow Bep} \times \cos(\alpha - 90^\circ) \times [\tan(\theta_{MAK}) - \tan(\alpha - 90^\circ)], \quad (3.10)$$

где $HD_{\theta_{MAK}}$ – ГР между сканером-кандидатом и стеной при максимальном угле падения, $SD_{\theta_{MAK}}$ – расстояние наклона между сканером-кандидатом и верхней частью стены при максимальном угле падения.

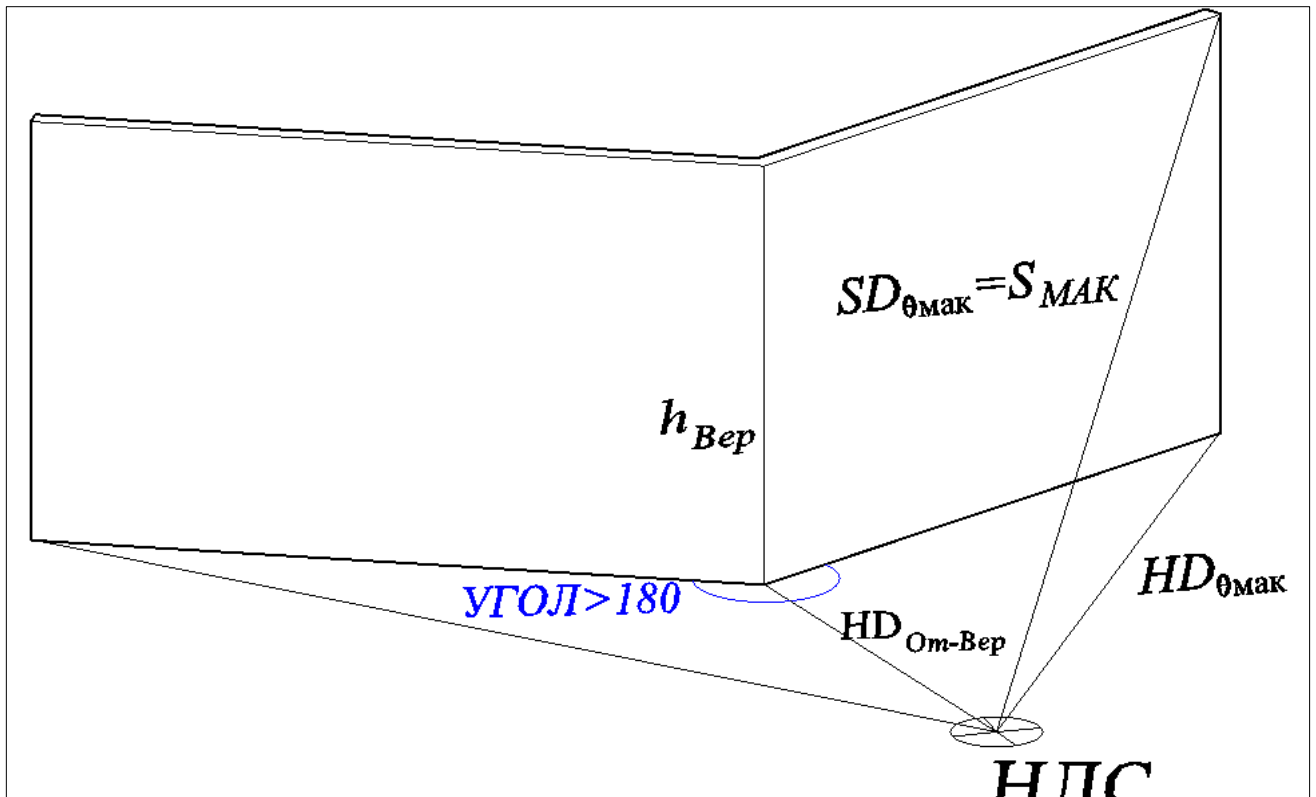


Рисунок 3.4 – Схема для случаев, когда угол объекта более 180°

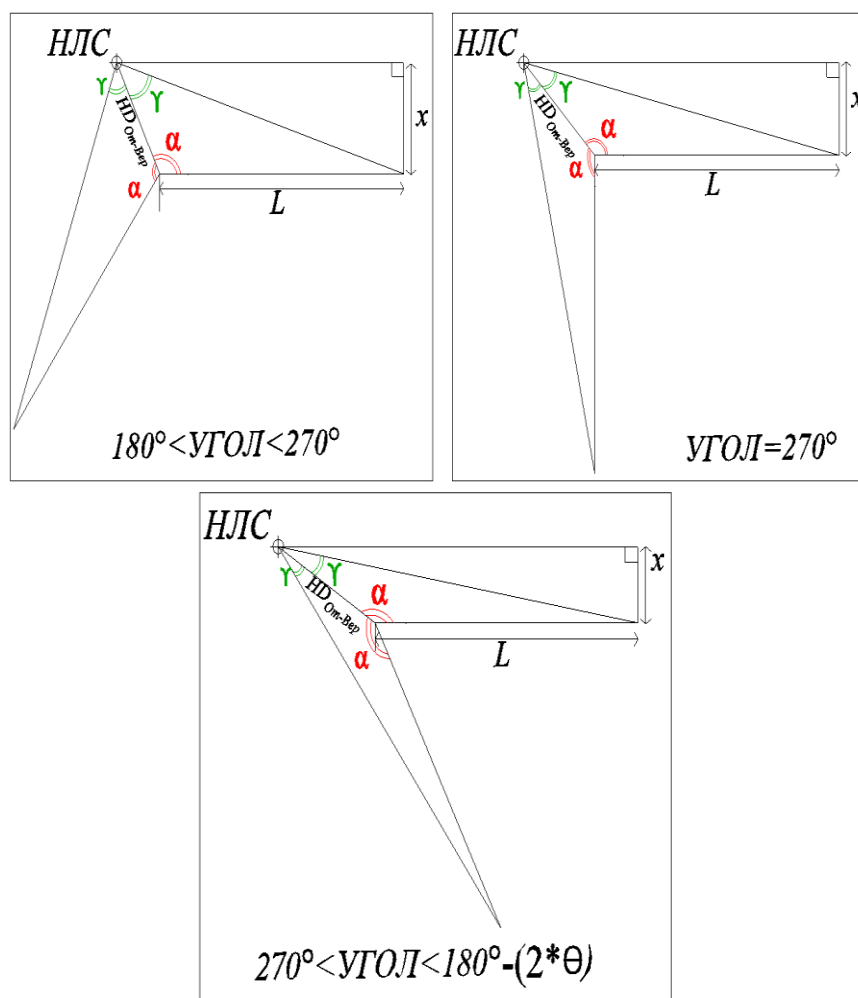


Рисунок 3.5 – Схемы к определению места кандидата, когда угол объекта больше 180°

Определение местоположения станции сканирования (кандидата K^C) для съемки плоских поверхностей

После расчета местоположения K^B рассчитываются кандидаты для съемки плоскостных элементов сканируемого объекта (стен) с учетом требуемого перекрытия сканирования между самими K^C , и K^C & K^B . Максимальное расстояние ($S_{МАК}$) принимается равным наклонному расстоянию между лазерным сканером и верхней частью стены при максимальном угле падения (рисунок 3.6) (по формулам (3.11-3.18)).

$$S_{МАК} = SD_{\theta_{МАК}},$$

$$\bullet \quad HD_{\theta_{МАК}} = \sqrt{SD_{\theta_{МАК}}^2 - h_C^2}, \quad (3.11)$$

$$\bullet \quad HD_{\theta=0^\circ} = HD_{\theta_{МАК}} \times \cos(\theta_{МАК}), \quad (3.12)$$

$$\bullet \quad L_C = 2 \times HD_{\theta=0^\circ} \times \tan(\theta_{МАК}), \quad (3.13)$$

где $SD_{\theta_{МАК}}$ – наклонное расстояние между лазерным сканером и верхней частью стены при максимальном угле падения, $HD_{\theta_{МАК}}$ – ГР между сканером-кандидатом и стеной при максимальном угле падения, $HD_{\theta=0^\circ}$ – ГР между сканером-кандидатом и стеной при угле падения, равном нулю, $\theta_{МАК}$ – максимальный УП, h_C – высота стены, L_C – сектор охвата кандидатом сканера.

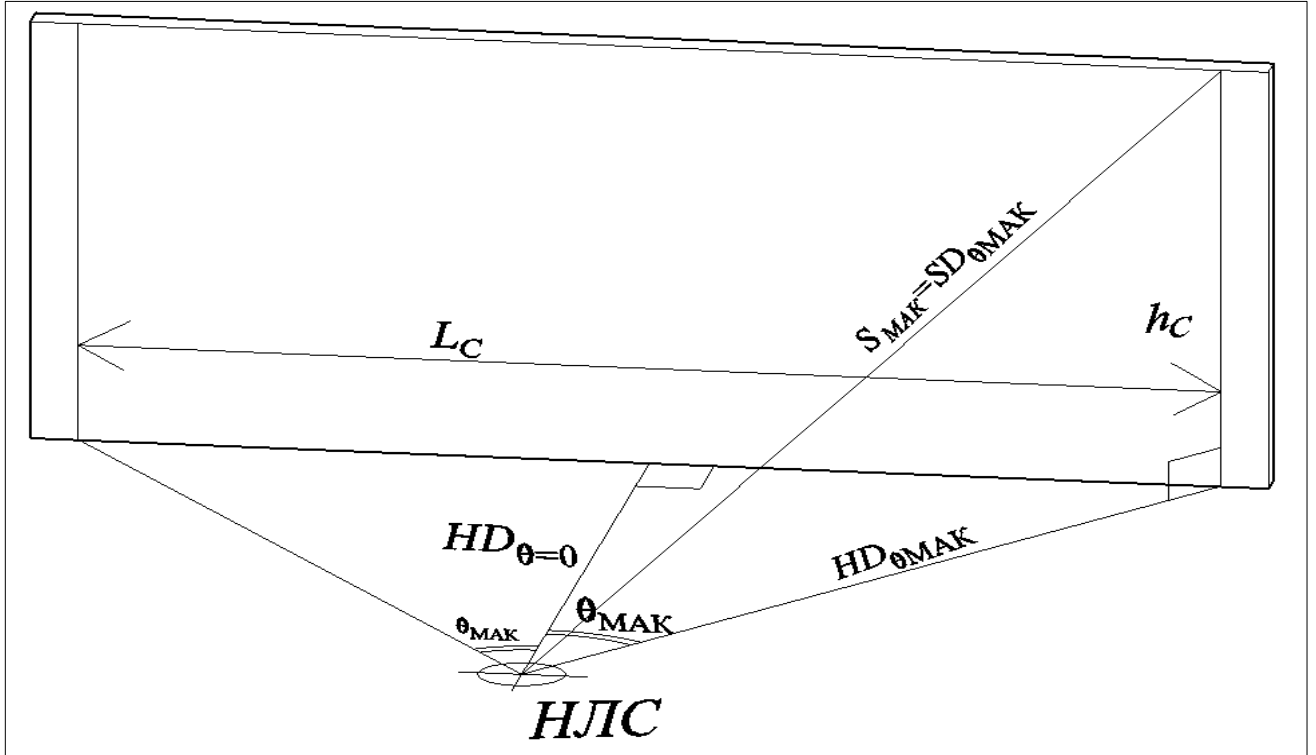


Рисунок 3.6 – Схема к определению места кандидата для съемки плоскостей (стен)

(\oplus – НЛС-кандидат)

$$\bullet \quad O_{\%} = \frac{O}{100}, \quad (3.14)$$

$$\bullet \quad O_1 = l_1 \times O_{\%}, O_2 = l_2 \times O_{\%}, \dots O_n = l_n \times O_{\%}, \quad (3.15)$$

$$\bullet \quad L_O = L_C \times O_{\%}, \quad (3.16)$$

$$\bullet \quad L_W'' = L_w + l_1 \times (O_{\%} - 1) + l_2 \times (O_{\%} - 1), \quad (3.17)$$

$$\bullet \quad X'' = \frac{L_W'' - L_O}{L_C - L_O}; \quad X = \text{Round}_{up}(X'', 0), \quad (3.18)$$

где O – размер перекрытия между двух секторов охвата сканера, O_1 – перекрытие между первым сканированием кандидата стены (K_1^C) и первым

сканированием кандидата при сканировании угла здания (K_1^B), O_n – перекрытие между кандидатом стены (K_n^C) и кандидатом угла здания (K_n^B), l_n – расстояние покрытия на K_n^B от двух соседних стенок, L_σ – расстояние по стене, равное сектору покрытия со станции, X'' – количество кандидатов, расположенных перед стеной, X – натуральное число X'' .

На этом шаге значения K^C могут иметь три случая покрытия ТЛЮ стены:

1. Если $X=0$; В этом случае вся стена может быть покрыта 2-мя кандидатами.

Если требуемое перекрытие достигается между двумя соседними K_n & K_{n+1} , то тогда нет необходимости в дополнительном (3 кандидате) (рисунок 3.7).

$$O \geq O_R, O_R \geq O_n \cup O_{n+1},$$

где O – перекрытие между двумя скорректированными K^B , O_R – требуемое перекрытие.

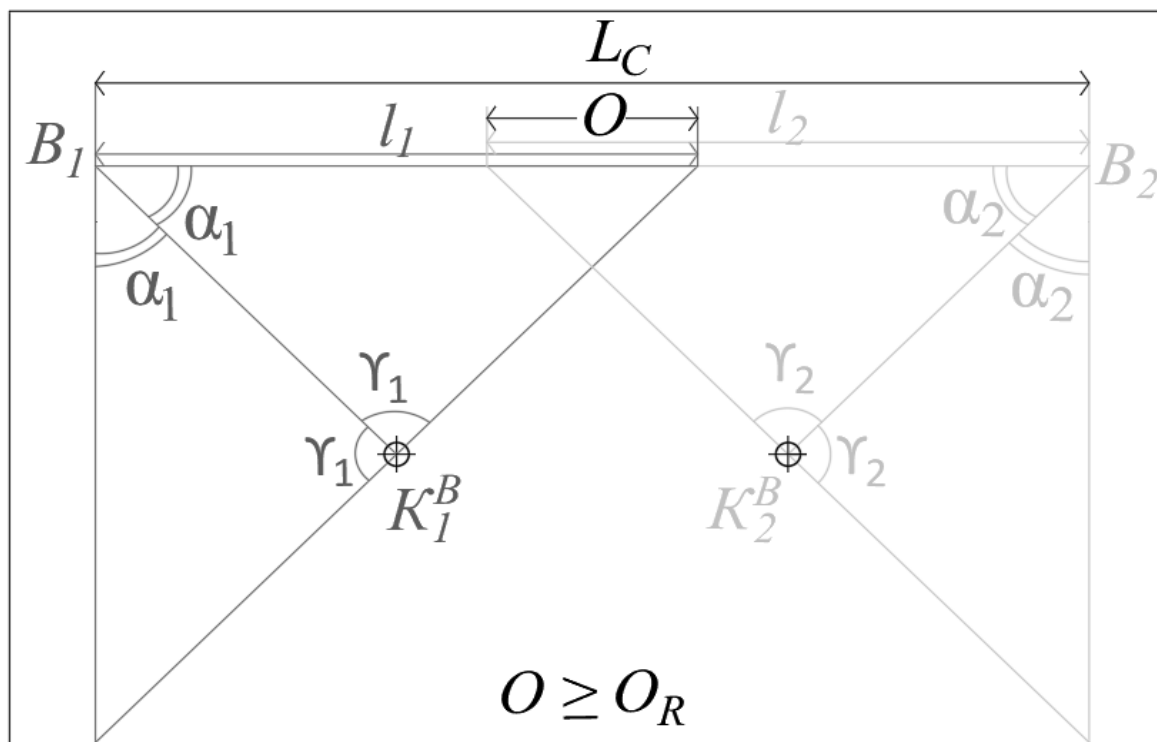


Рисунок 3.7 – Схема для случая $X=0$ (B – вершина, α – половина угла вершины, γ максимальный угол сканирования кандидата, K^B (\oplus – кандидат)

2. Если $X=0$ и требуемое перекрытие между K_n & K_{n+1} не достигается ($O < O_R$, $O_R \leq O_n \cup O_{n+1}$) (рисунок 3.8-а) и в случае $X=1$ (рисунок 3.8-б) необходимо добавить нового кандидата. Положение станции определяется из выражения (по формулам (3.19-3.22)):

$$x = \frac{L_W + l_n \times (1 - O_{\%}) - l_{n+1} \times (1 - O_{\%})}{2}, \quad (3.19)$$

$$y = HD_{\theta=0^\circ}, \quad (3.20)$$

где x & y – координата K^C в локальной системе, L_W – длина стенки, $HD_{\theta=0^\circ}$ – ГР при нулевом угле падения.

Поле кандидата (сектор охвата) - равнобедренный треугольник; его параметры следующие:

$$b = L_C - L_W'', \quad (3.21)$$

$$h = \frac{b}{2} - \tan(90^\circ - \theta_{МАК}), \quad (3.22)$$

где b & h – основание и высота треугольника.

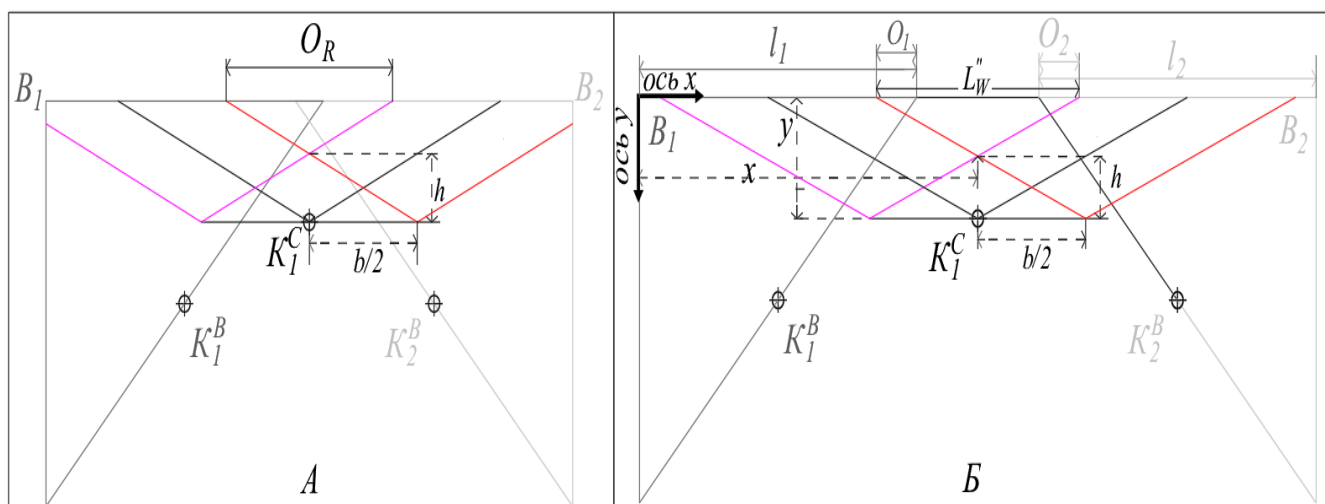


Рисунок 3.8 – Схема к определению координат точек станций сканирования при съемке стен (плоских поверхностей)

А- В случае $X=0$, Б - В случае $X=1$. (ось x & y – абсцисса и ордината локальной системы, K^B & K^C (\oplus – кандидаты вершин и стенок, x & y – координата (местоположение) K^C , b & h – параметры поля)

3. Если $X > 1$; В этом случае необходимо добавить более одного кандидата (рисунок 3.9) (по формулам (3.23-3.27)). (кандидаты находятся в той же локальной системе координат, когда: $X = 1$).

$$L_{NO} = \frac{L''_W - (X \times L_C)}{1 - X}; M = L_{NO} - (L_C \times O_{\%}), \quad (3.23)$$

$$x_1 = l_1 \times (1 - O_{\%}) + \left(\frac{L_C}{2}\right) + [0 \times (L_C - L_{NO})] - \left(\frac{M}{4}\right),$$

$$x_2 = l_1 \times (1 - O_{\%}) + \left(\frac{L_C}{2}\right) + [1 \times (L_C - L_{NO})],$$

$$x_3 = l_1 \times (1 - O_{\%}) + \left(\frac{L_C}{2}\right) + [2 \times (L_C - L_{NO})],$$

↓

$$x_n = l_1 \times (1 - O_{\%}) + \left(\frac{L_C}{2}\right) + [(n-1) \times (L_C - L_{NO})] + \left(\frac{M}{4}\right), \quad (3.24)$$

$$y_1 = y_2 = \dots = y_n = HD_{\theta=0^\circ}, \quad (3.25)$$

где L_{NO} – расстояние новое перекрытия между двумя K^C , x_1, x_2, \dots, x_n & y_1, y_2, \dots, y_n – координаты $K_1^C, K_2^C, \dots, K_n^C$.

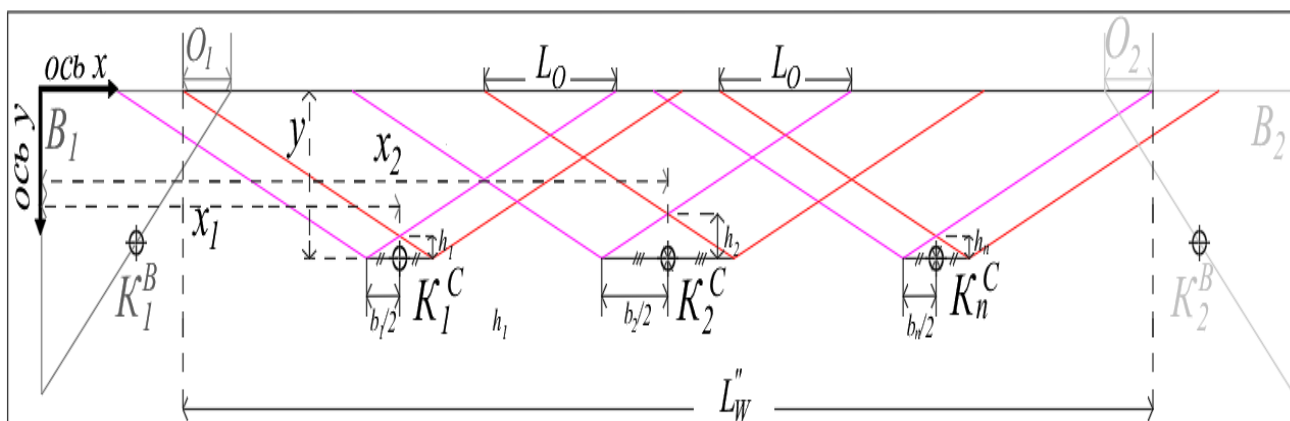


Рисунок 3.9 – Схема для определения координат станций в случае $X > 1$ (ось x & y – абсцисса и ордината локальной системы)

Ниже приведены параметры кандидата (равнобедренных треугольников, секторов охвата):

$$b_1 = \frac{M}{2}; b_2 = M; b_3 = M \rightarrow b_n = \frac{M}{2}, \quad (3.26)$$

$$h_1 = \frac{b_1}{2} - \tan(90^\circ - \theta_{МАК}),$$

$$h_2 = \frac{b_2}{2} - \tan(90^\circ - \theta_{МАК}) \rightarrow h_n = \frac{b_n}{2} - \tan(90^\circ - \theta_{МАК}), \quad (3.27)$$

Где b & h – являются основанием и высотой треугольника поля (рисунок 3.9).

Особые случаи

В процессе планирования местоположения K^B (на третьем этапе). Если $\alpha: 90^\circ - \theta_{МАК} < \alpha < 90^\circ + \theta_{МАК}$, то добавляется K^B . А если иначе, то K^B отменяется и новый K^C должен быть добавлен, чтобы покрыть всю область сканирования. Поэтому есть два случая:

- 1- Если $X=1$ и одна или две точки кандидатов (K_1^B или K_2^B) не вычисляются, то расположение кандидатов K^C подчиняются тем же формулам, что и для случая, когда X равно единице ($X=1$) (рисунок 3.10). Но при расчете основание треугольника L_w'' принимается равным длине стены, как показано ниже:

$$L_w'' = L_w, \quad b = L_c - L_w,$$

Если $X > 1$ и один или два из K_1^B & K_2^B отменяются. Расположение кандидатов K^C подчиняются тем же формулам, что и когда X было больше одного ($X > 1$) (рисунок 3.11).

Примечание: в случае двух отмен K_1^B & K_2^B стена рассматривается как протяженная (без углов).

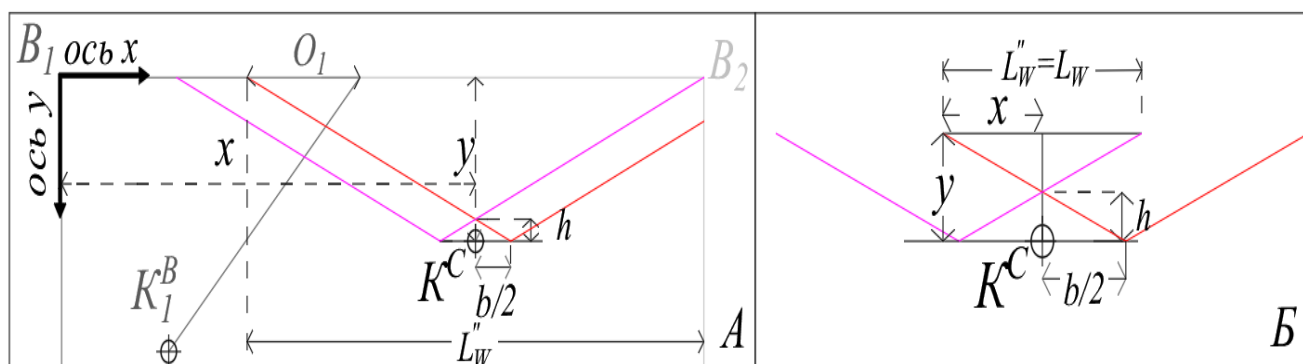


Рисунок 3.10 – Схема для особых случаев: отмены K_1^B & K_2^B ($X=1$) (А – если один из них отменен, Б – если два отменены)

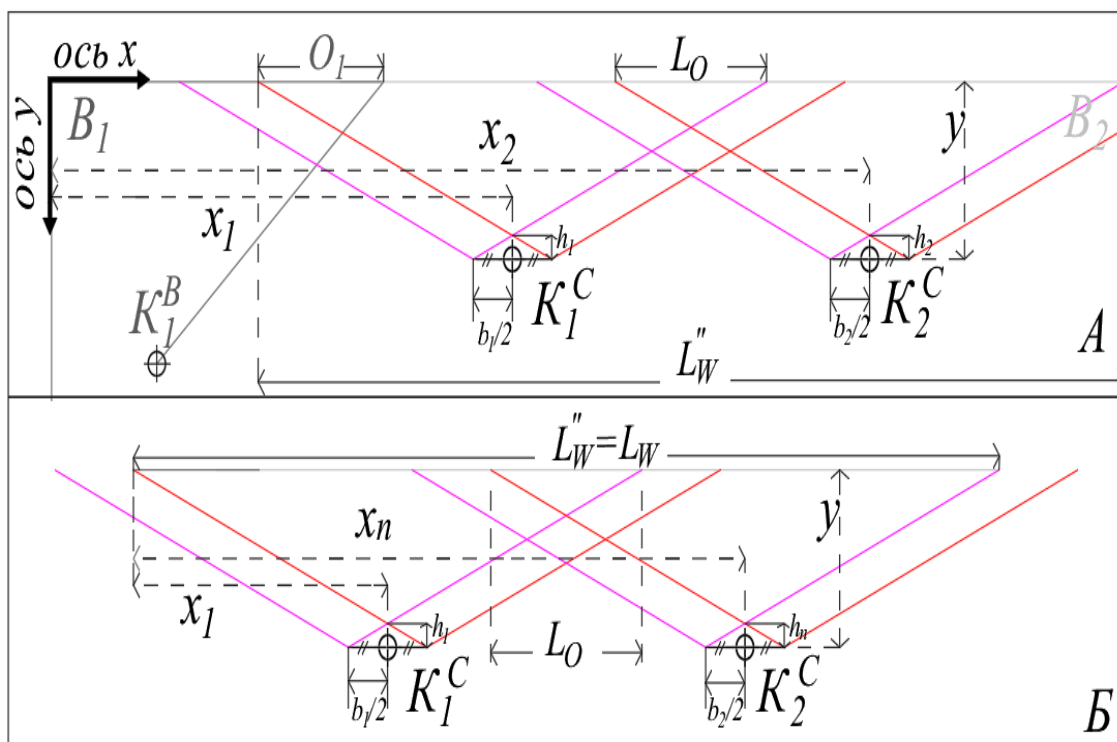


Рисунок 3.11 – Схема для особых случаев: отмены K_1^B & K_2^B ($X > 1$) (А – если один из них отменен, Б – если два отменены)

3.1.3 Заключительный этап процесса расчета

После расчета местоположения всех кандидатов выполняется итерационный процесс (последний шаг) оптимизации, заключающийся в сокращении и пересчете числа кандидатов.

Поскольку основными кандидатами являются K^B , перепланировка будет проведена, если один или несколько из них будут отменены, в процессе могут добавиться новые кандидаты. Затем позиция и точность каждого из них пересчитываются следующим образом:

1- В случае, если один или несколько кандидатов находятся:

- За пределами пограничной зоны (наружное сканирование),
- Внутри недоступной зоны,
- Перед препятствием, препятствующим попаданию лазерных лучей в цель.

В данном случае решение состоит в том, что нужно минимизировать ГР ($HD_{\theta=0^\circ}$) между кандидатом и поверхностью сканирования, затем

производится процесс пересчета новых кандидатов. Этот процесс повторяется для покрытия всей области сканирования.

- 2- Случай, когда кандидат может быть удален при сохранении полного охвата области сканирования (рисунок 3.12).

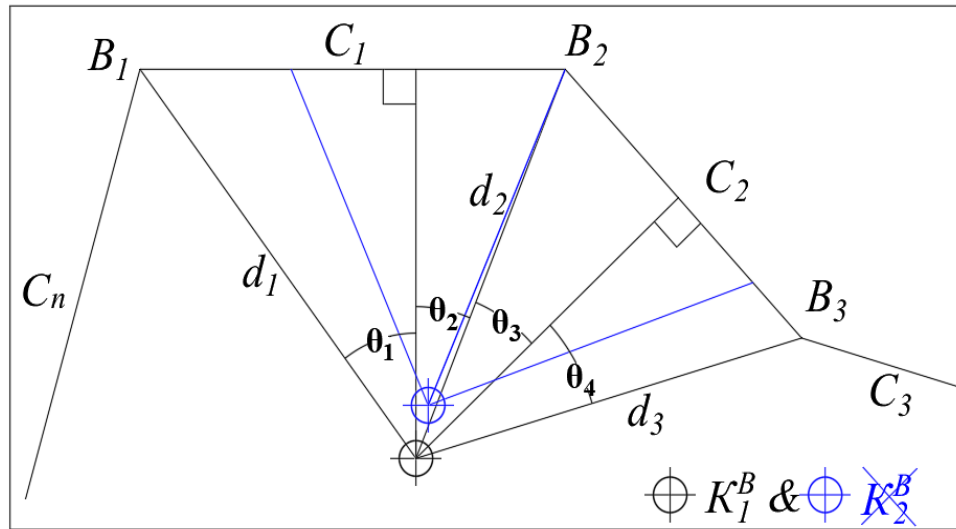


Рисунок 3.12 – Схема к оптимизации расчета местоположения сканерных станций

- 3- Если для всех кандидатов $X=0$, а это возникает, когда сканирование выполняется внутри объекта, то кандидаты K^B могут быть заменены одним кандидатом, расположенным в области пересечения всех кругов (красная зона на рисунке 3.13).

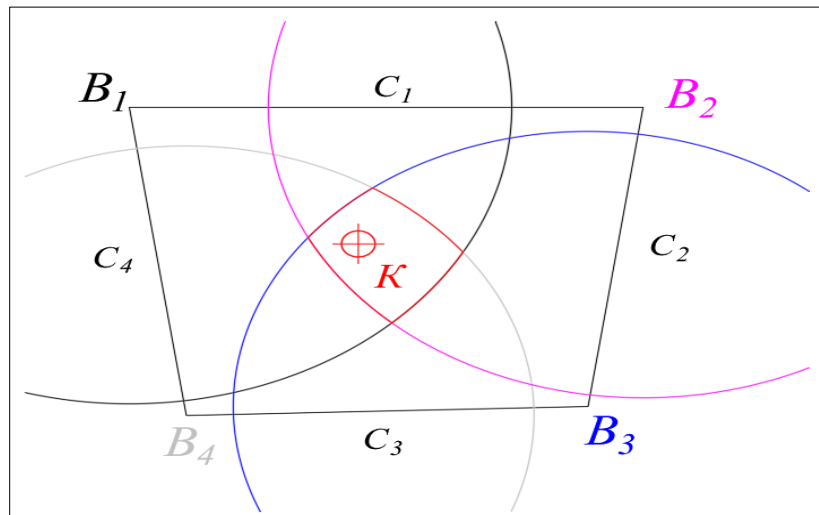


Рисунок 3.13 – Схема для определения кандидата внутри объекта съемки

3.2 Определение точности построения модели

Автоматизированное проектирование мест установки сканера выполняется

для отметки земной поверхности. Учет высоты прибора может дать запас для каждой станции (рисунок 3.14). В таком случае необходимо выполнить следующие действия. Следующие выражения способствуют оценке погрешности (по формулам (3.28-3.32)):

$$h = d_1 + IH_1 = d_2 + IH_2 \ \& \ \cos(Va) = HD/SD, \quad (3.28)$$

$$\sin(Va) = \frac{h - IH}{SD} \ \& \ \cos(Va) = \sqrt{1 - \sin^2(Va)}, \quad (3.29)$$

$$\Delta_{HD} = \frac{HD_2 - HD_1}{2} = \frac{SD}{2} \times [\cos(Va_2) - \cos(Va_1)], \quad (3.30)$$

$$\Delta_{HD} = \frac{SD}{2} \times \left[\sqrt{1 - \sin^2(Va_2)} - \sqrt{1 - \sin^2(Va_1)} \right], \quad (3.31)$$

$$\Delta_{HD} = \frac{SD}{2} \times \left[\sqrt{1 - \left(\frac{h - IH_2}{SD} \right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{h - IH_1}{SD} \right)^2} \right], \quad (3.32)$$

где h – высота объекта сканирования, IH_1 – максимальная высота прибора, IH_2 – минимальная высота прибора, Va – вертикальный угол, SD – расстояние наклона, рассматриваемое как фиксированное и постоянное значение, HD – ГР, Δ_{HD} – радиус кругового поля кандидата.

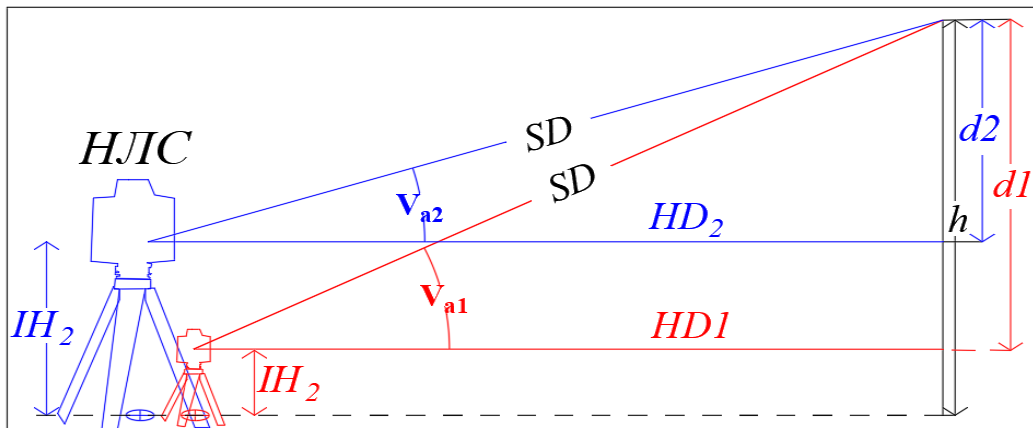


Рисунок 3.14 – Схема для расчета с учетом высоты прибора

Например, и в случае $h = 40\text{ м}$, $SD \approx 96\text{ м}$, $IH_1 = 0\text{ м}$ и $IH_2 = 0,4\text{ м}$ (что в реальном сканировании является минимальной высотой НЛС). Радиус кругового поля кандидата: $\Delta_{HD} = 0,091\text{ м}$.

3.3 Теоретическое применение разработанной методики

В этом разделе разработанная методология тестируется на трех теоретических примерах с различной геометрией объектов (рисунок 3.15), чтобы охватить все прогнозируемые случаи планирования лазерного сканирования.

Были использованы чертежи со всей необходимой информацией о форме объекта съемки (размеры, значения высоты) (таблица 3.1), созданные в среде Автокад. Далее выполняется автоматизация построения съемочной сети. При этом вводятся в качестве исходных данных требования Национального стандарта Российской Федерации (ГОСТ Р 56905-2016) [37] и результат второй главы (линейно-угловые параметры НЛС). Данные получили следующие значения: $\sigma_{\text{Треб}} = 0,01\text{ м}$, $\sigma_{\text{КТ}} = 0,0005\text{ м}$, $\theta_{\text{МАК}} = 68^\circ$, $O(\%) = 30\%$.

Результаты были представлены в виде числовых таблиц, содержащих местоположение, ограничения и точность каждого планируемого кандидата (таблицы 3.2 – 3.4).

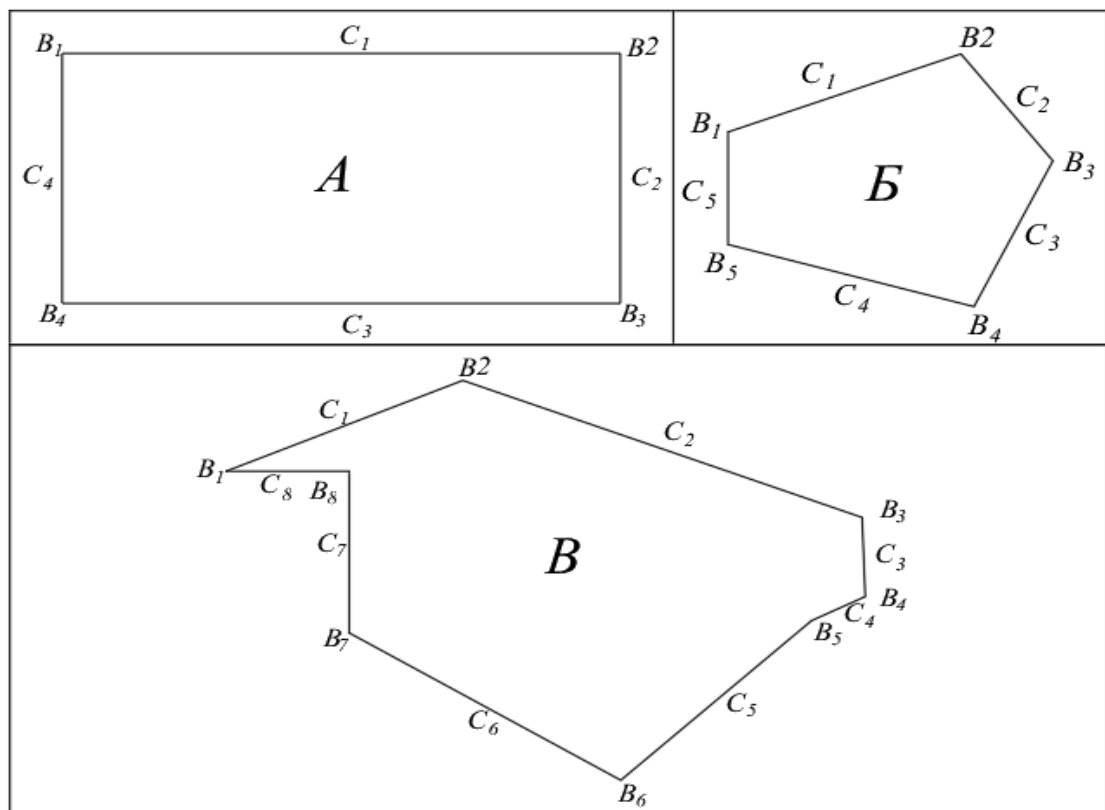


Рисунок 3.15 – Схема геометрических фигур. А – правильный многоугольник, Б – выпуклый многоугольник, В – вогнутый многоугольник. (В – Вершины и С – Стороны)

Таблица 3.1 – Размеры, высота и значения углов всех вершин и сторон, всех геометрических фигур, упомянутых на рисунке 3.15

Зона	№	Стороны		Вершины	
		Расстояния, м	Высота, м	Внут угол	Высота, м
А	1	500	25	90°	12
	2	250	25	90°	25
	3	500	29	90°	20
	4	250	29	90°	29
Б	1	99	19	110,522°	19
	2	60	15	107,097°	15
	3	72	14	116,507°	12
	4	101,737	18	100,132°	14
	5	50,000	19	105,742°	18
В	1	230,571	51	23,179°	51
	2	383,061	53	135,861°	49
	3	79,161	55	113,006°	53
	4	53,712	55	114,513°	55
	5	233,917	60	196,475°	55
	6	284,495	60	105,771°	60
	7	161,679	48,000	121,195°	45
	8	110,115	51	270°	48

На рисунках 3.16-3.17, показан результат в виде диаграммы оптимального расположения сканирующих станций. Три формы (А, Б и В) покрыты 28, 7 и 34 станциями (12, 1 и 16 внутренними, и 16, 6 и 18 внешними станциями). Серые зоны представляют область, в которой могут перемещаться радиолокационные станции-кандидаты (станции сканирования), сохраняя при этом полный охват объекта сканирования. Кроме того, каждая станция имеет круговую погрешность, равную 18,2 см (на основе результата раздела 3.2).

Таблица 3.2 – Параметры кандидатов полигона А

	Кандидат	α	HD от→Вер, м	Υ	Вершина	
Внутренняя	1	45°	95,159	90°	1	
	2	45°	92,597	90°	2	
	3	45°	93,804	90°	3	
	4	45°	91,423	90°	4	
Наружная	5	135°	95,159	23°	1	
	6	135°	92,597	23°	2	
	7	135°	93,804	23°	3	
	8	135°	91,423	23°	4	
	К	х, м	у, м	б/2, м	h, м	Стороны
Внутренняя	9	167,811	34,687	12,246	4,948	1
	10	251,268	34,687	24,492	9,896	
	11	334,726	34,687	12,246	4,948	
	12	124,403	34,687	53,118	21,461	2
	13	166,347	34,248	11,280	4,558	3
	14	251,178	34,248	22,561	9,115	
	15	336,010	34,248	11,280	4,558	
	16	123,151	34,248	52,119	21,058	4
Наружная	17	113,919	34,687	8,744	3,533	C ₁
	18	207,884	34,687	17,487	7,065	
	19	293,107	34,687	17,487	7,065	
	20	387,072	34,687	8,744	3,533	
	21	93,170	34,687	28,501	11,515	C ₂
	22	156,363	34,687	28,501	11,515	
	23	112,950	34,248	8,100	3,272	C ₃
	24	207,324	34,248	16,199	6,545	
	25	293,597	34,248	16,199	6,545	
	26	387,971	34,248	8,100	3,272	
	27	92,535	34,248	27,594	11,149	C ₄
	28	156,020	34,248	27,594	11,149	

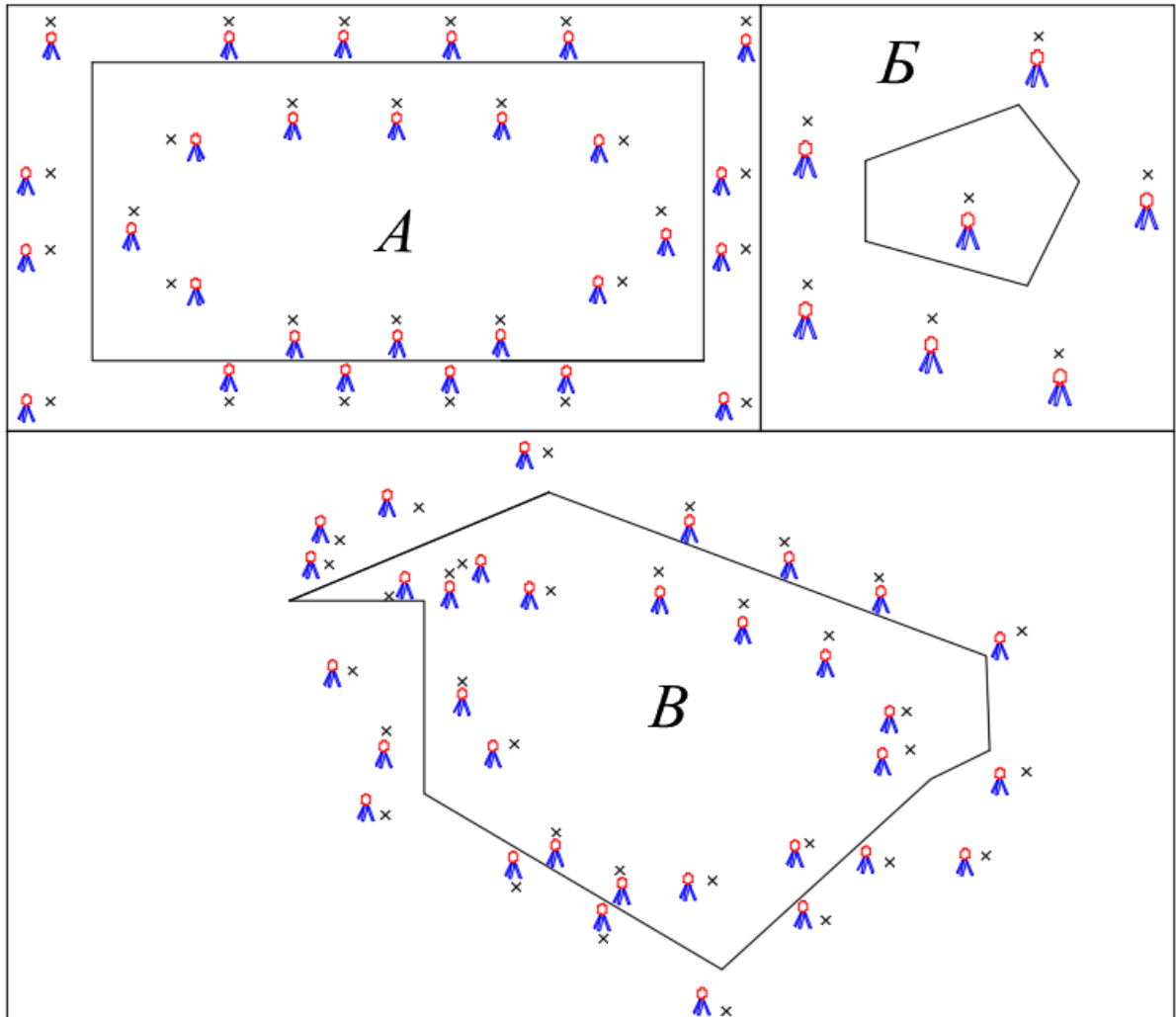


Рисунок 3.16 – Схема к оптимизации мест расположения сканера при НЛС для покрытия всей поверхности геометрических фигур. А – правильный многоугольник, Б – выпуклый многоугольник, В – вогнутый многоугольник

( X) – НЛС-кандидат)

Таблица 3.3 – Параметры кандидатов полигона Б (ЗПК – Зона пересечения кругов)

Зона	Кандидат	Круги	Радиус, м	Поля
Внутренняя	1	C1	94,012	ЗПК
		C2	94,732	
		C3	95,159	
		C4	94,885	
		C5	94,208	

Продолжение таблицы 3.3

–	Кандидат	α	HD _{от→Вер} , м	Υ	Вершина	
наружная	2	124,739°	42,856	33,261°	2	
	3	126,4515°	44,119	31,5485°	3	
	4	121,7465°	41,919	36,2535°	4	
	5	129,934°	46,355	28,066°	5	
	6	127,129°	44,264	30,871°	6	
	К	х, м	у, м	h/2, м	h, м	Стороны
	7	50,025	35,291	78,078	31,545	4

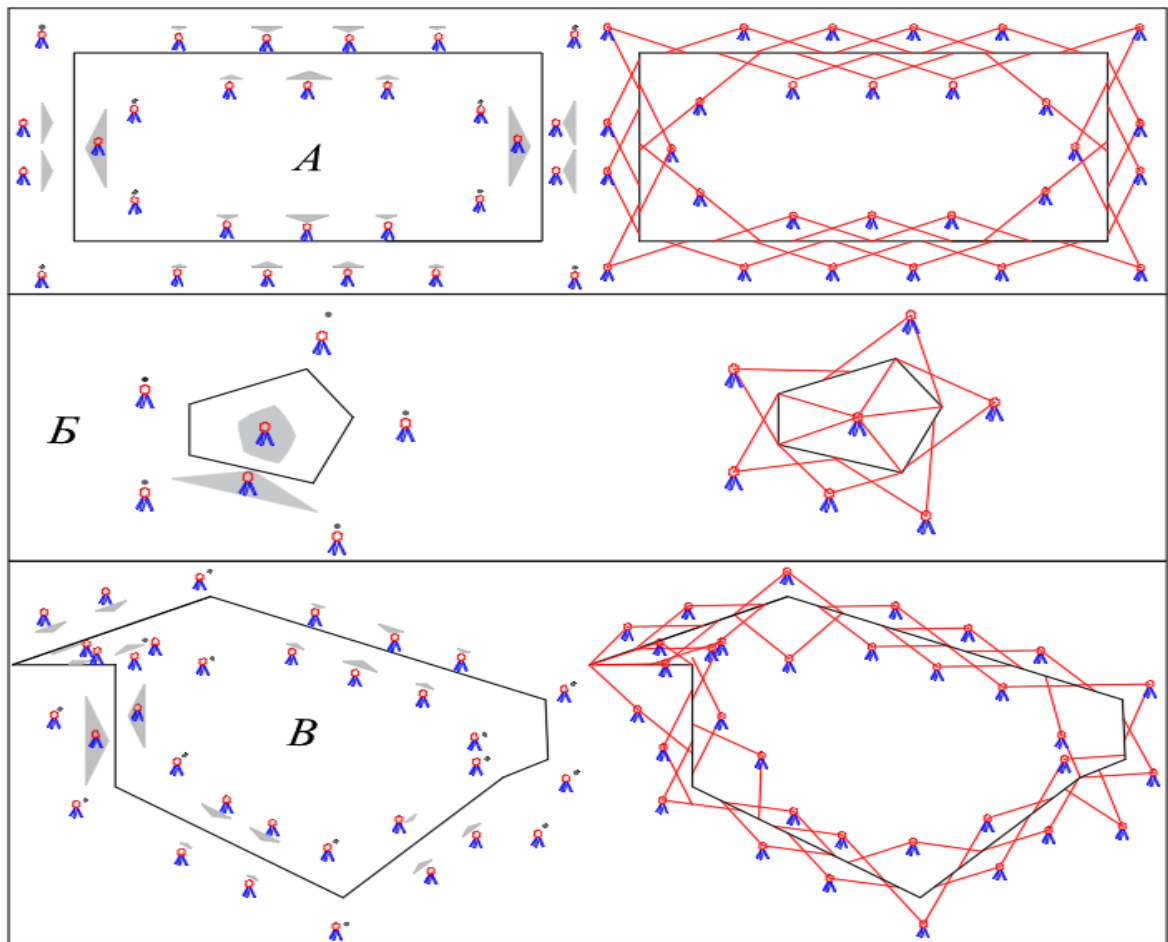



Рисунок 3.17 – Схема к оптимизации мест расположения сканера при НЛС для покрытия всей поверхности геометрических фигур. А – правильный многоугольник, Б – выпуклый многоугольник, В – вогнутый многоугольник. ( – сканер (сектор НЛС-кандидат), серая зона – сектор охвата кандидата, красные линии – зоны покрытия)

Таблица 3.4 – Параметры кандидатов полигона В

	Кандидат	α	HD _{от→Вер} , м	Υ	Вершина	
Внутренняя	1	67,9305°	82,451	44,139°	1	
	2	56,503°	79,939	66,994°	2	
	3	57,2565°	78,576	65,487°	3	
	4	98,2375°	29,742	59,7625°	4	
	5	52,8855°	74,828	74,229°	5	
	6	60,5975°	84,701	58,805°	6	
	7	135°	43,991	23°	7	
Наружная	8	112,0695°	33,329	45,9305°	1	
	9	123,497°	35,910	34,503°	2	
	10	122,7435°	34,996	35,2565°	3	
	11	81,7625°	78,576	16,475°	4	
	12	127,1145°	35,152	30,8855°	5	
	13	119,4025°	36,421	38,5975°	6	
	14	45°	83,037	90°	7	
	Кандидат	х, м	у, м	б/2, м	h, м	Стороны
Внутренняя	15	58,097	30,429	17,217	6,956	1
	16	129,103	30,429	17,217	6,956	
	17	107,759	29,946	9,730	3,931	2
	18	182,334	29,946	19,460	7,862	
	19	256,909	29,946	9,730	3,931	
	20	109,360	28,031	8,034	3,246	5
	21	114,386	28,031	18,206	7,356	6
	22	175,105	28,031	18,206	7,356	
	23	93,888	31,106	41,319	16,694	7
	24	71,117	30,429	36,317	14,673	8
	25	57,753	30,429	17,561	7,095	1
	26	128,071	30,429	17,561	7,095	
	27	111,932	29,946	6,933	2,801	2
	28	194,899	29,946	13,865	5,602	
	29	277,866	29,946	6,933	2,801	
	30	72,278	28,031	12,863	5,197	5

Продолжение таблицы 3.4

Внутренняя	31	143,683	28,031	12,863	5,197	5
	32	96,205	28,031	6,892	2,785	6
	33	179,551	28,031	6,892	2,785	
	34	60,967	31,106	58,481	23,628	7

Таким образом, 100% объектов будут покрыты облаком точек (красные линии, рисунок 3.17). Серые зоны представляют собой область, по которой НЛС-кандидаты могут перемещаться, сохраняя при этом полный охват всех полигонов. Итак, можно сделать вывод, что теоретически полигоны покрыты ТЛО на 100%.

3.4 Выводы по Главе 3

Разработана автоматизированная методика построения съемочной сети для производства НЛС. Основные выводы:

1. На основе разработанных в предыдущей главе параметров единичного сектора сканирования, ограниченного углами менее 68 градусов в настоящей главе создан алгоритм программного построения съемочной сети. Методика разработана без привязки к конкретной схеме объекта сканирования, что означает, что можно применять ее к любым формам зданий и сооружений с обеспечением требуемых величин перекрытий и точности облачной модели. Таким образом, в ходе этого исследования была разработана полная система проектирования, которая может обеспечить оптимальный план для сети сканирования с высокой точностью.

2. Экспериментальные расчеты, проведенные для трех теоретических примеров с различной геометрией объектов, показали хороший результат. Получено 100% покрытие ТЛО с минимальным числом кандидатов (точек стояния).

3. Разработанная методика требует своего практического применения и проверки, которая реализована и описана в следующей главе.

ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ ОБМЕРА ПАМЯТНИКОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ МЕТОДОМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

4.1 Описание объекта практической реализации разработанной методики

Разработанная методика автоматизированного построения съемочной сети при обмере ПКН была применена к нескольким объектам.

Первым объектом явилось здание Кфури в лесу Вата-эль-Мрудж-Болония (рисунок 4.1), Ливан. Традиционное строение (объект культурного наследия), которому более 90 лет, состоит из двух этажей. Здание прошло 3 этапа строительства:

- 1-й этап в 1918 году, когда хозяин построил первый этаж.
- Второй этап состоялся в 1920 году, он построил 2-й этаж.
- Наконец, третий этап строительства был реализован в 1938 году, когда здание было перестроено.



Рисунок 4.1 – Здание семьи Кфури.

Здание состоит из 3-х частей после того, как французская семья перестроила его в отель: главный вход, жилое помещение и открытый внутренний двор.

Второй объект представляет собой объект мирового культурного наследия. Сканирование проведено для части храмового комплекса Баальбек, расположенного в Ливане. Он состоит из храмов Вакха и Юпитера. Баальбек-город на северо-востоке Ливана, расположенный примерно в 82 км от столицы Бейрута. Замок построен в 2000 году до н. э. [101].

Большой храмовый комплекс “Юпитер” состоит из четырех секций: монументального входа, шестиугольного двора, Большого двора, Храма (рисунок 4.2) [101]. Полное святилище имеет примерно 120 м в ширину и 270 м в длину. К сожалению, сегодня можно увидеть только остатки коринфских колонн Великого Храма. Фрагменты дают представление об огромных масштабах оригинальной структуры.

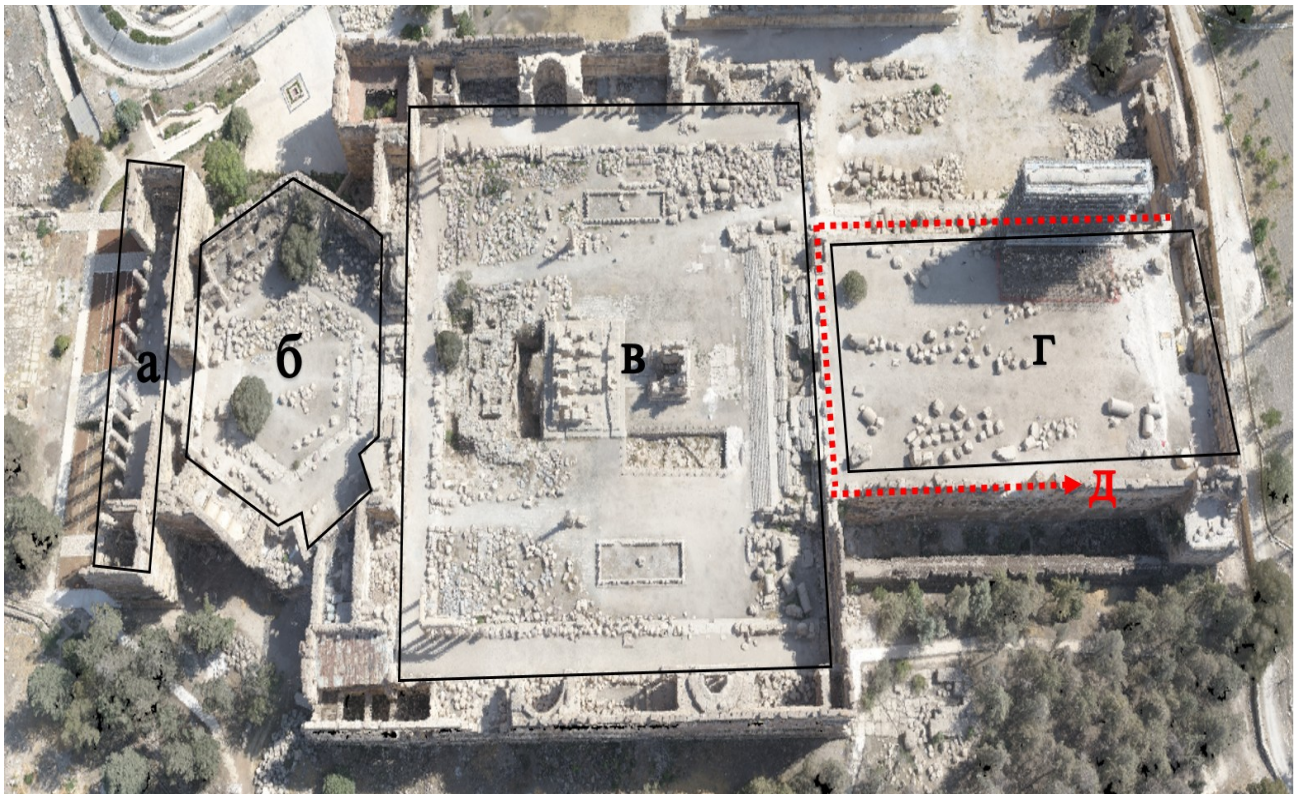


Рисунок 4.2 – Вид на храм Юпитера, который расположен в городе Баальбек в Ливане: а- монументальный вход или пропилеи, б-шестиугольный двор, в- Большой корт, г- Храм Юпитера, д -Расположение колонн

4.2 Процесс расчета практического применения разработанного метода

4.2.1 Предварительное моделирование

Процесс расчета начинается с создания предварительной модели каждого объекта. Двумерный чертеж здания (рисунок 4.5) был создан на основе международного стандарта Российской Федерации (ГОСТ Р 56905-2016) [37]. Измерения методом триангуляции проводились с использованием рулеточных мер (складных метров). Численные линейные измерения (таблицы 4.1) были преобразованы в чертеж САПР, как показано на рисунке 4.3.

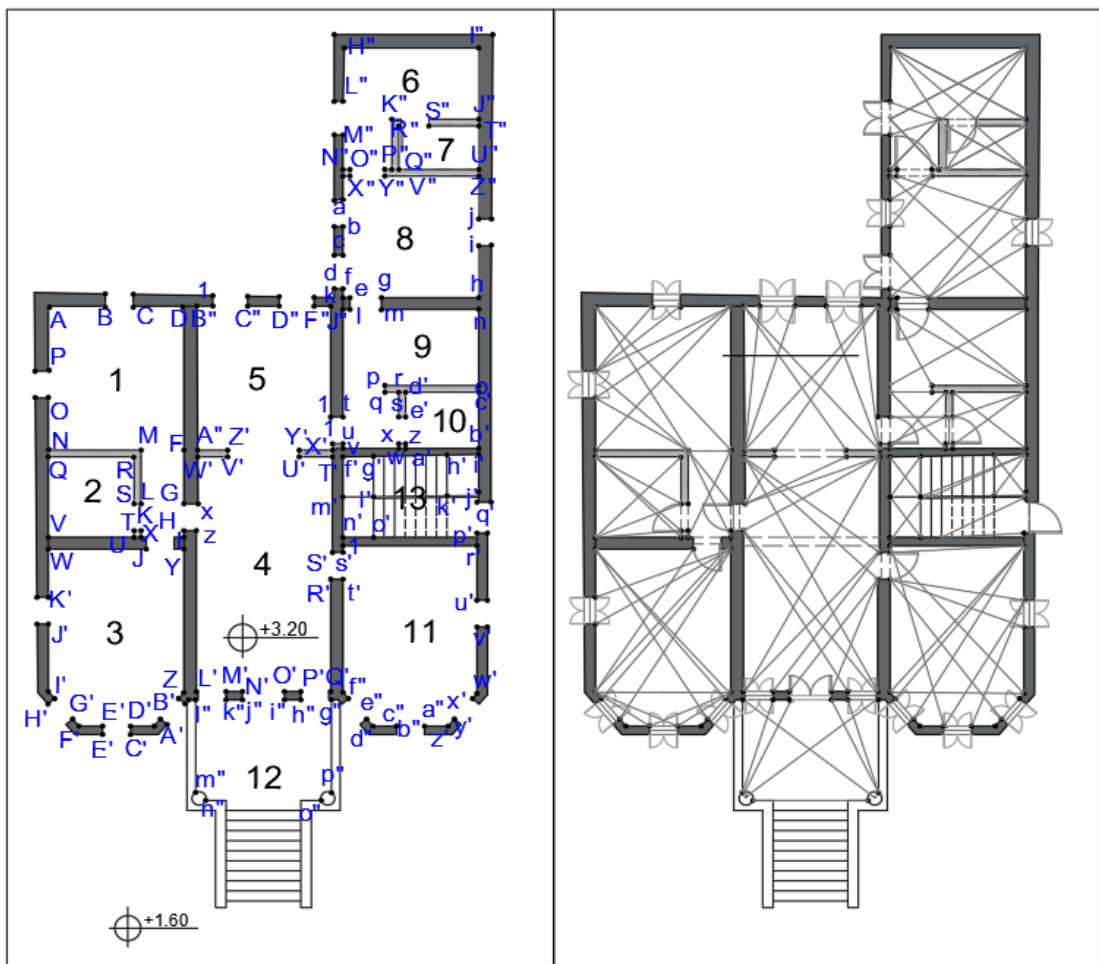


Рисунок 4.3 – Схема построения триангуляции, применительно к первому этажу здания

Касательно случая с храмом, то ввиду его огромных размеров и отсутствия крыши, двумерный чертеж храма со всей необходимой информацией был извлечен из облачной модели с низким разрешением, созданной с помощью БЛА (рисунок 4.4). БЛА "Фантом 4 pro" - это оборудование, которое использовалось

для объединения фотографий храма. Съемка с БЛА велась на высотах 105 метров с 80% перекрытием (продольным и поперечным).

Таблица 4.1 – Результаты линейных измерений каждой зоны на первом этаже

Зона 1:	Зона 3:	Зона 5:	Зона 8:	Зона 11:
AF=5,78 м	XK'=4,13 м	A"J"=4,53 м	jb=1,38 м	r't'=3,83 м
AM=5,05 м	XJ'=4,47 м	A"F"=4,32 м	Z"c=1,67 м	r's'=3,88 м
BP=2,53 м	YI'=5,86 м	A"D"=4,56 м	Z"b=1,13 м	t'r'=4,08 м
CP=3,12 м	YM'=5,9 м	X"B"=4,33 м	gi=3,89 м	t'v'=5,59 м
DP=4,33 м	YG'=5,78 м	X"C"=5,2 м	gj=5,3 м	v'f'=6,01 м
DO=4,7 м	I'G=1,82 м	B"Z'=4,56 м	ic=1,92 м	v'e"=4,37 м
DN=5,78 м	I'E'=2,53 м	B"Y'=5,79 м	hb=5,31 м	v'd"=4,02 м
GM=1,96 м	I'D'=3,83 м	Зона 6:	ha=4,54 м	v'c"=1,96 м
IM=2,87 м	WZ=2,53 м	H"J'=2,52 м	id=3,64 м	t'w'=6,01 м
JF=2,88 м	WA'=1,83 м	H"K"=3,22 м	hc=3,13 м	t'x'=7,07 м
MP=3,58 м	WB'=5,17 м	I"L"=4,42 м	hd=1,67 м	t'z'=5,04 м
MO=3,07 м	WC'=5,29 м	K"L"=4,39 м	ja=1,92 м	t'z'=5,31 м
MF=1,71 м	Зона 4:	I"K"=3,31 м	Зона 9:	f'w'=3,83 м
Зона 2:	T'X=3,21 м	K"M"=2,6 м	om=3,59 м	Зона 12:
QS=2,78 м	T'Z=4,09 м	M"P"=1,49 м	oi=4,41 м	m"k"=2,89 м
QT=3,29 м	W'S'=5,28 м	M"O"=2,04 м	ok=2,56 м	m"i"=4,79 м
QU=3,42 м	W'R'=4,82 м	Зона 7:	np=1,2 м	p"g"=3,3 м
US=2,64 м	XV'=7,98 м	U"R"=1,92 м	tq=2,31 м	p"i"=2,9 м
UT=4,33 м	XU'=5,71 м	U"S"=2,62 м	tp=2,32 м	m"j"=3,07 м
	XS'=5,66 м	T"V"=2,62 м	ts=5,31 м	m"o"=4,37 м
	XR'=5,14 м	V"R"=1,55 м	tx=3,67 м	m"k"=3,08 м
	ZS'=4,19 м	U"S"=5,2 м	su=1,78 м	Зона 13:
	ZR'=3,6 м		st=1,59 м	m'g'=1,47 м
	R'L'=4,8 м		Зона 10:	i"f"=1,49 м
	R'N'=4,47 м		ce'=2,21 м	m'o'=1,48 м
	ZP'=5,2 м		cz=2,68 м	n'i'=1,49 м
	ZQ'=4,09 м		c'a'=2,63 м	i'l'=3,07 м
			d'b'=2,53 м	j'f'=4,37 м
				q'p'=2,68 м

Наземное лазерное сканирование выполнялось сканером *Leica P30*, который обеспечивает высокое качество 3D-данных по фазовому методу с точностью 1,2 мм+10 ppm.

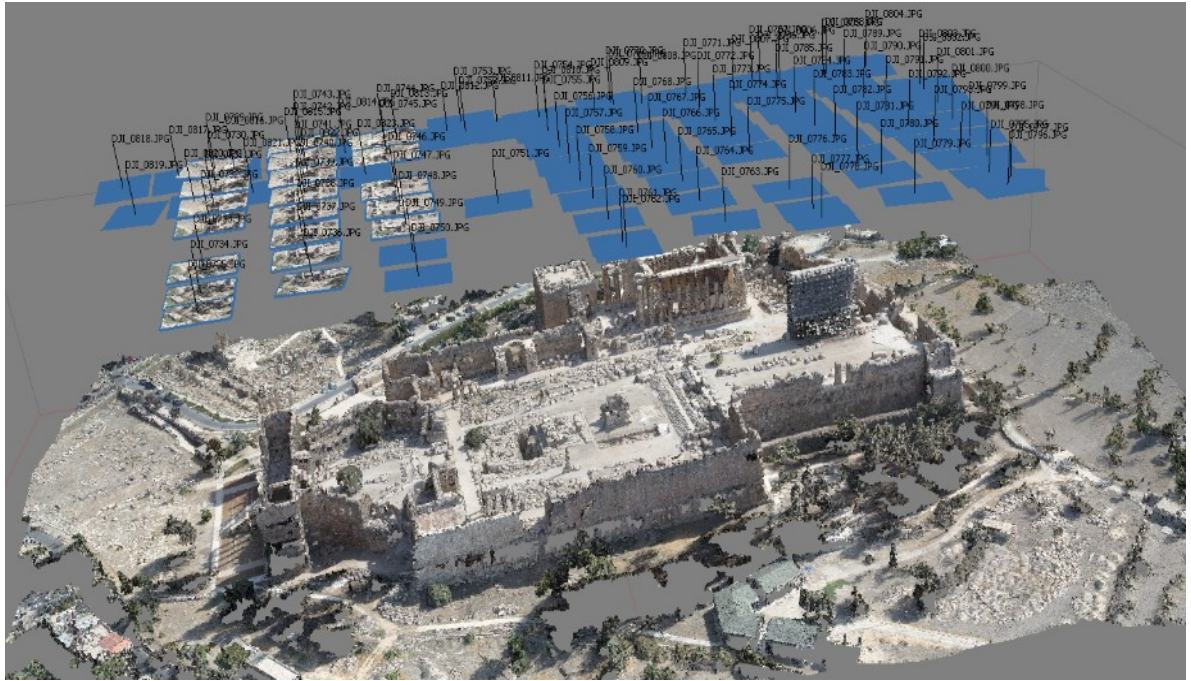


Рисунок 4.4 – Трехмерная модель облачной модели замка Баальбек

4.2.2 Учет норм при построении модели

В двух таблицах 4.2-4.3 показаны измеренные параметры, по которым построены модели (здание и храм).

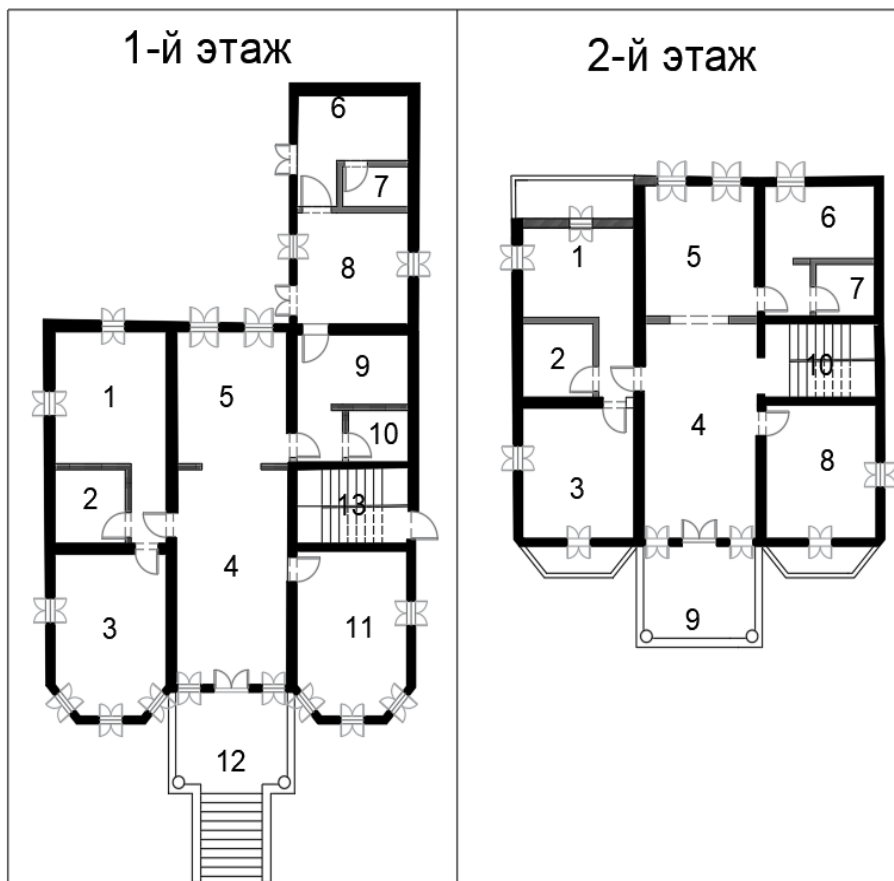


Рисунок 4.5 – Чертеж для первого и второго этажей семейного здания Кфури

Таблица 4.2 – Сформированные исходные данные для здания (рисунок 4.5)

Зона	№	Стены		Вершины	
		Расстояния, м	Высота, м	Внут. угол	Высота, м
1	1	4,300	4,2	90°	4,2
	2	3,875	4,2	90°	4,2
	3	4,300	4,2	90°	4,2
	4	3,875	4,2	90°	4,2
2	1	2,400	4,2	90°	4,2
	2	2,450	4,2	90°	4,2
	3	2,400	4,2	90°	4,2
	4	2,450	4,2	90°	4,2
3	1	5,282	4,2	90°	4,2
	2	3,875	4,2	90°	4,2
	3	5,282	4,2	90°	4,2
	4	3,875	4,2	90°	4,2
4	1	7,000	4,2	90°	4,2
	2	3,860	4,2	90°	4,2
	3	7,000	4,2	90°	4,2
	4	3,860	4,2	90°	4,2
5	1	4,300	4,2	90°	4,2
	2	3,830	4,2	90°	4,2
	3	4,300	4,2	90°	4,2
	4	3,830	4,2	90°	4,2
6	1	2,130	4,2	90°	4,2
	2	3,840	4,2	90°	4,2
	3	2,130	4,2	90°	4,2
	4	3,840	4,2	90°	4,2
7	1	1,300	4,2	90°	4,2
	2	2,284	4,2	90°	4,2
	3	1,300	4,2	90°	4,2
	4	2,284	4,2	90°	4,2

Продолжение таблицы 4.2

8	1	3,625	4,2	90°	4,2
	2	3,881	4,2	90°	4,2
	3	3,625	4,2	90°	4,2
	4	3,881	4,2	90°	4,2
9	1	2,271	4,2	90°	4,2
	2	3,881	4,2	90°	4,2
	3	2,271	4,2	90°	4,2
	4	3,881	4,2	90°	4,2
10	1	1,680	4,2	90°	4,2
	2	2,080	4,2	90°	4,2
	3	1,680	4,2	90°	4,2
	4	2,080	4,2	90°	4,2
11	1	5,282	4,2	90°	4,2
	2	3,875	4,2	90°	4,2
	3	5,282	4,2	90°	4,2
	4	3,875	4,2	90°	4,2
12	1	3,000	4,2	90°	4,2
	2	3,880	4,2	90°	4,2
	3	3,000	4,2	90°	4,2
	4	3,880	4,2	90°	4,2
13	1	2,400	4,2	90°	4,2
	2	3,831	4,2	90°	4,2
	3	2,400	4,2	90°	4,2
	4	3,831	4,2	90°	4,2
1'	5	2,925	4,2	90°	4,2
	6	3,875	4,2	90°	4,2
	7	2,925	4,2	90°	4,2
	8	3,875	4,2	90°	4,2
2'	9	2,450	4,2	90°	4,2
	10	2,400	4,2	90°	4,2
	11	2,450	4,2	90°	4,2
	12	2,400	4,2	90°	4,2
3'	13	4,250	4,2	90°	4,2
	14	3,874	4,2	90°	4,2

Продолжение таблицы 4.2

3'	15	4,250	4,2	90°	4,2
	16	3,874	4,2	90°	4,2
4'	17	7,000	4,2	90°	4,2
	18	3,893	4,2	90°	4,2
	19	7,000	4,2	90°	4,2
	20	3,893	4,2	90°	4,2
5'	21	4,250	4,2	90°	4,2
	22	3,903	4,2	90°	4,2
	23	4,250	4,2	90°	4,2
	24	3,903	4,2	90°	4,2
6'	25	2,370	4,2	90°	4,2
	26	3,831	4,2	90°	4,2
	27	2,370	4,2	90°	4,2
	28	3,831	4,2	90°	4,2
7'	29	1,678	4,2	90°	4,2
	30	2,039	4,2	90°	4,2
	31	1,678	4,2	90°	4,2
	32	2,039	4,2	90°	4,2
8'	33	4,350	4,2	90°	4,2
	34	3,831	4,2	90°	4,2
	35	4,350	4,2	90°	4,2
	36	3,831	4,2	90°	4,2
9'	37	3,000	4,2	90°	4,2
	38	3,884	4,2	90°	4,2
	39	3,000	4,2	90°	4,2
	40	3,884	4,2	90°	4,2
10'	41	2,400	4,2	90°	4,2
	42	3,880	4,2	90°	4,2
	43	2,400	4,2	90°	4,2
	44	3,880	4,2	90°	4,2
наружная	1	13,182	12	90°	12
	2	8,575	12	90°	12
	3	7,700	12	270°	12
	4	4,534	12	90°	12

Продолжение таблицы 4.2

наружная	5	20,882	12	90°	12
	6	13,109	12	90°	12

Таблица 4.3 – Данных для автоматизированного расчета мест расположения сканерных станций для съемки храма (рисунок 4.6)

Зона	№	Стены		Вершины	
		Расстояния, м	Высота, м	Внут. угол	Высота, м
З ₁	1	115,297	9,67	89,872°	9,67
	2	119,699	26,5	89,929°	7,58
	3	114,882	26,5	90,225°	26,5
	4	120,008	26,5	89,974°	26,5
З ₂	1	96,266	15	89,432°	15
	2	47,846	15	90,291°	15
	3	96,037	15	89,605°	15
	4	47,673	15	90,673°	15
З ₃	1	18,501	13	139,157°	13
	2	28,062	13	109,529°	13
	3	4,222	13	202,895°	13
	4	5,484	13	102,129°	13
	5	6,483	13	136,263°	13
	6	8,261	13	128,929°	13
	7	23,165	13	135,687°	13
	8	6,459	13	107,465°	13
	9	10,731	13	261,689°	13
	10	23,069	13	108,075°	13
	11	21,652	13	129,206°	13
	12	49,165	13	115,539°	13
З ₄	1	14,137	19,2	84,958°	19,2
	2	50,094	19,2	97,037°	19,2
	3	15,832	16,2	86,416°	14
	4	50,867	19,2	91,589°	16,2
З ₅	1	12,178	1,6	89,064°	1,6

Продолжение таблицы 4.3

3 ₅	2	10,839	8	90°	1,5
	3	12	8,8	90,367°	8
	4	10,918	8,8	90,568°	8,8
3 ₆	1	12,654	8	88,234°	8
	2	6,797	8	85,326°	8
	3	18,501	8	142,361°	8
	4	20,771	8	44,079°	8
3 ₇	1	21,651	15,5	64,461°	15,5
	2	11,34	15,5	63,641°	15,5
	3	10,685	15,5	148,625°	15,5
	4	17,584	15,5	83,273°	15,5
3 ₈	1	2,722	19	117,096°	19
	2	11,588	15	90,096°	15
	3	8,262	14	44,312°	12
	4	6,483	19	107,632°	14
3 ₉	1	6,459	14	98,311°	14
	2	10,241	14	72,535°	14
	3	5,009	14	117,228°	14
	4	10,731	14	71,925°	14
3 ₁₀	1	13,578	20,6	95,19°	20,6
	2	13,6	20,6	87,234°	20,6
	3	14,137	20,6	83,278°	20,6
	4	11,3	20,6	94,298°	20,6
3 ₁₁	1	15,832	14	78,858°	14
	2	10	14	93,789°	14
	3	14,39	14	89,455°	14
	4	11	14	97,897°	14
Наружная	1	95,666	22,8	88,758°	17,5
	2	26,393	24,5	274,852°	22,8
	3	131,753	24,5	86,035°	24,5
	4	22,899	22	85,221°	22
	5	28,062	21	253,359°	18
	6	8,443	25,5	202,895°	21
	7	9,943	25,5	266,058°	25,5

Продолжение таблицы 4.3

Наружная	8	13,578	25,5	95,19°	25,5
	9	73,694	25,5	87,518°	25,5
	10	14,39	23	89,691°	23
	11	12,823	23	97,897°	23
	12	28,15	23	287,598°	23
	13	11,34	23	192,57°	23
	14	17,375	23	234,603°	23
	15	126,241	23	87,55°	23
	16	36,033	26,5	90,145°	11
	17	96,037	26,5	269,384°	26,5
	18	58,596	26,5	0°	26,5

В исходные данные вводятся также нормы Национального стандарта Российской Федерации [37] и результат второй главы (точность в зависимости от угла и дальности стрельбы ТЛС). Данные получили следующие значения: $\sigma_{\text{Треб}} = 0,01\text{м}$, $\sigma_{\text{КТ}} = 0,0005\text{м}$, $\theta_{\text{МАК}} = 68^\circ$, $O(\%) = 30\%$. Далее применяется автоматизация построения схемы сканирования с оптимизацией расположения сканеров. Была применена разработанная в третьей главе автоматизированная методика построения и оптимизации расположения станций сканирования (кандидатов). В таблицах таблицы 4.4 - 4.5 представлены местоположения, ограничения и границы каждой планируемой лазерной станции или кандидата.

Таблица 4.4 – Параметры кандидата для здания (ЗПК – Зона пересечения кругов)

Зона	Кандидат	Круги	Радиус, м	Поля
1	1	С1	95,820	ЗПК
		С2	95,820	
		С3	95,820	
		С4	95,820	
2	2	С1	95,820	ЗПК
		С2	95,820	
		С3	95,820	

Продолжение таблицы 4.4

2	2	C4	95,820	ЗПК
3	3	C1	95,820	ЗПК
		C2	95,820	
		C3	95,820	
		C4	95,820	
4	4	C1	95,820	ЗПК
		C2	95,820	
		C3	95,820	
		C4	95,820	
5	5	C1	95,820	ЗПК
		C2	95,820	
		C3	95,820	
		C4	95,820	
6	6	C1	95,820	ЗПК
		C2	95,820	
		C3	95,820	
		C4	95,820	
7	7	C1	95,820	ЗПК
		C2	95,820	
		C3	95,820	
		C4	95,820	
8	8	C1	95,820	ЗПК
		C2	95,820	
		C3	95,820	
		C4	95,820	
9	9	C1	95,820	ЗПК
		C2	95,820	
		C3	95,820	
		C4	95,820	
10	10	C1	95,820	ЗПК
		C2	95,820	
		C3	95,820	

Продолжение таблицы 4.4

10	10	C4	95,820	ЗПК
11	11	C1	95,820	ЗПК
		C2	95,820	
		C3	95,820	
		C4	95,820	
12	12	C1	95,820	ЗПК
		C2	95,820	
		C3	95,820	
		C4	95,820	
13	13	C1	95,820	ЗПК
		C2	95,820	
		C3	95,820	
		C4	95,820	
1'	14	C1	95,820	ЗПК
		C2	95,820	
		C3	95,820	
		C4	95,820	
2'	15	C1	95,820	ЗПК
		C2	95,820	
		C3	95,820	
		C4	95,820	
3'	16	C1	95,820	ЗПК
		C2	95,820	
		C3	95,820	
		C4	95,820	
4'	17	C1	95,820	ЗПК
		C2	95,820	
		C3	95,820	
		C4	95,820	
5'	18	C1	95,820	ЗПК
		C2	95,820	
		C3	95,820	
		C4	95,820	

Продолжение таблицы 4.4

6'	19	C1	95,820	ЗПК	
		C2	95,820		
		C3	95,820		
		C4	95,820		
7'	20	C1	95,820	ЗПК	
		C2	95,820		
		C3	95,820		
		C4	95,820		
8'	21	C1	95,820	ЗПК	
		C2	95,820		
		C3	95,820		
		C4	95,820		
9'	22	C1	95,820	ЗПК	
		C2	95,820		
		C3	95,820		
		C4	95,820		
10'	23	C1	95,820	ЗПК	
		C2	95,820		
		C3	95,820		
		C4	95,820		
наружная	К	α	HD _{от→Вер} , м	γ	Вершина
	24	135°	50,445	23°	1
	25	45°	95,221	90°	3
	26	135°	50,445	23°	5
	27	135°	50,445	23°	6

Таблица 4.5– Параметры кандидата для храма

(ЗПК – Зона пересечения кругов)

Зона	К	Круги	Радиус, м	Поля
З ₁	1	C1	95,424	ЗПК
		C2	95,612	
		C3	92,179	
		C4	92,179	
З ₂	2	C1	94,732	ЗПК
		C2	94,732	

Продолжение таблицы 4.5

3 ₂	2	C3	94,732	ЗПК
		C4	94,732	
3 ₃	3	C1	95,027	ЗПК
		C2	95,027	
		C3	36,320	
		C4	95,027	
		C5	95,027	
		C6	95,027	
		C7	95,027	
		C8	95,027	
		C9	47,057	
		C10	95,027	
		C11	95,027	
		C12	95,027	
3 ₄	4	C1	93,971	ЗПК
		C2	93,971	
		C3	94,885	
		C4	94,534	
3 ₅	5	C1	95,899	ЗПК
		C2	95,901	
		C3	95,578	
		C4	95,508	
3 ₆	6	C1	95,578	ЗПК
		C2	95,578	
		C3	95,578	
		C4	95,578	
3 ₇	7	C1	94,652	ЗПК
		C2	94,652	
		C3	94,652	
		C4	94,652	
3 ₈	8	C1	94,012	ЗПК
		C2	94,732	

Продолжение таблицы 4.5

З ₈	8	C3	95,159	ЗПК		
		C4	94,885			
З ₉	9	C1	94,885	ЗПК		
		C2	94,885			
		C3	94,885			
		C4	94,885			
З ₁₀	10	C1	93,674	ЗПК		
		C2	93,674			
		C3	93,674			
		C4	93,674			
З ₁₁	11	C1	94,885	ЗПК		
		C2	94,885			
		C3	94,885			
		C4	94,885			
	К	α	HD _{от→Вер} , м	γ	Вершина	
	24	135,621°	8,020	22,379°	1	
	25	42,574°	37,651	94,852°	2	
	26	136,9825°	10,187	21,0175°	3	
	27	137,3895°	24,974	20,6105°	4	
	28	53,3205°	36,175	73,359°	5	
	29	46,971°	46,310	86,058°	7	
	30	136,241°	8,414	21,759°	9	
	31	135,154°	18,374	22,845°	10	
	32	136,225°	23,162	21,775°	15	
	33	134,9275°	15,515	23,072°	16	
	34	45,308°	65,877	89,384°	17	
наружная	К _В	х, м	у, м	б/2, м	h, м	Стороны
	35	31,277	13,427	7,661	3,095	1
	36	39,617	15,258	4,976	2,011	3
	37	82,536	15,258	4,976	2,011	
	38	33,096	29,385	45,463	18,368	9
	39	36,685	8,360	0,062	0,025	15
	40	65,467	8,360	0,124	0,050	
	41	94,250	8,360	0,062	0,025	

Продолжение таблицы 4.5

наружная	42	80,450	12,257	14,750	5,960	17
	43	16,787	9,600	6,974	2,818	18
	44	36,104	9,600	6,974	2,818	

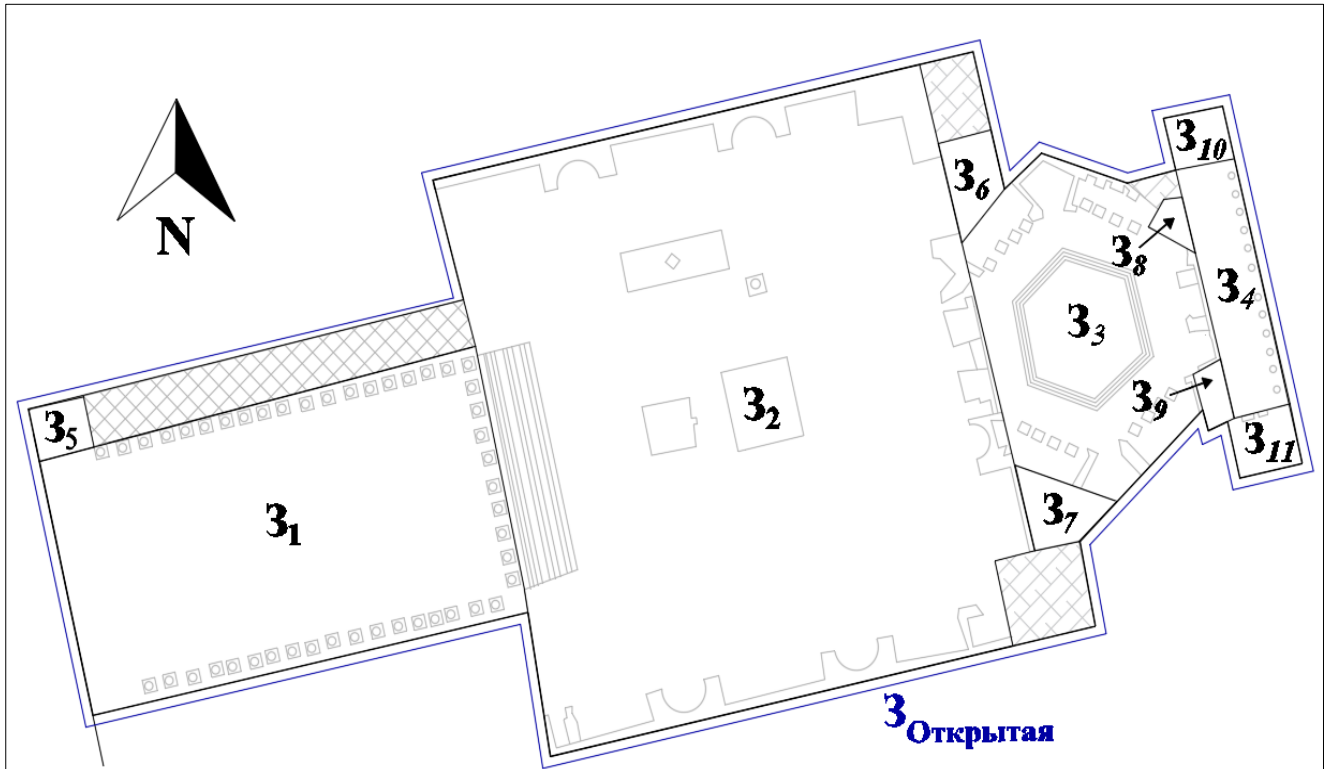


Рисунок 4.6 – План объекта съемки: Храм Юпитера. (З – внутренние зоны, ___ – открытая зона и □□ – недоступная зона)

4.2.3 Процесс и результаты моделирования мест точек стояния при НЛС

В результате применения алгоритма, представленного в предыдущей главе получены следующие результаты.

Здание (объект №1) было охвачено 27 станциями. (13 и 10 внутренних станций на первом и втором этажах и 4 внешних станции). На рисунке 4.7 показан результат (схема оптимального расположения сканирующих станций).

Храм Юпитера (объект №2) был охвачен 32 станциями (11 внутренних и 21 внешняя станция) (рисунок 4.8. б).

Внешние станции расположены ближе к контуру здания. Это связано с процессом оптимизации, упомянутым на рисунке 3.1, где ГР между кандидатами

и объектом уменьшается, поскольку они расположены в неприемлемой области (внешняя граница).

Схема оптимального расположения сканирующих станций храма показана на рисунке 4.8. После расчета параметров кандидатов 15 лазерных кандидатов были размещены за пределами границы храма (рисунок 4.8.а). Данное обстоятельство потребовало пересчета их параметров путем минимизации ГР каждого из них, согласно блок-схеме на рисунке 3.1.

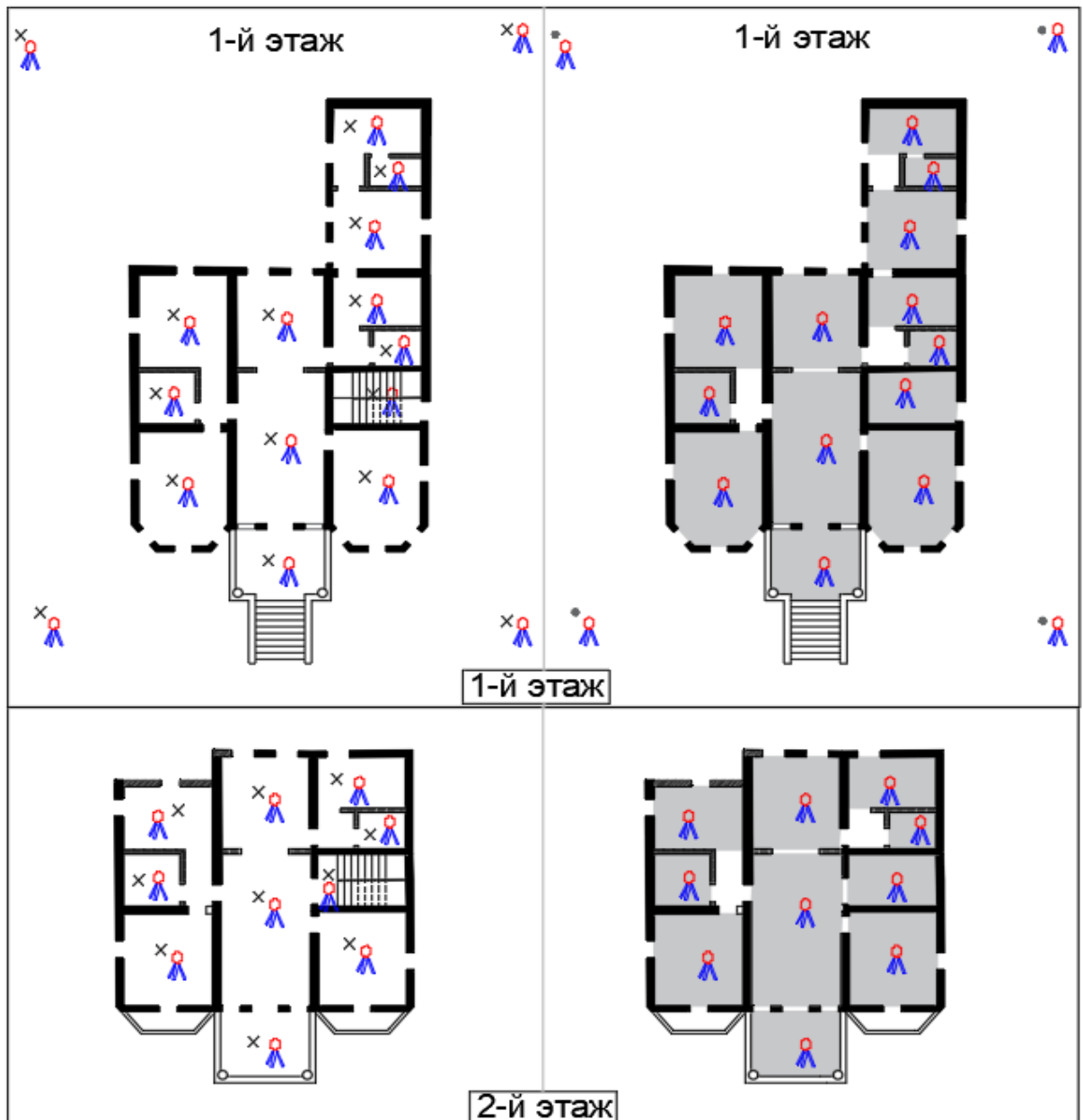


Рисунок 4.7 – Схема к оптимизации мест расположения сканера при НЛС для покрытия всей поверхности здания. (x) – сканер (сектор НЛС-кандидат), серая зона – сектор охвата кандидата)

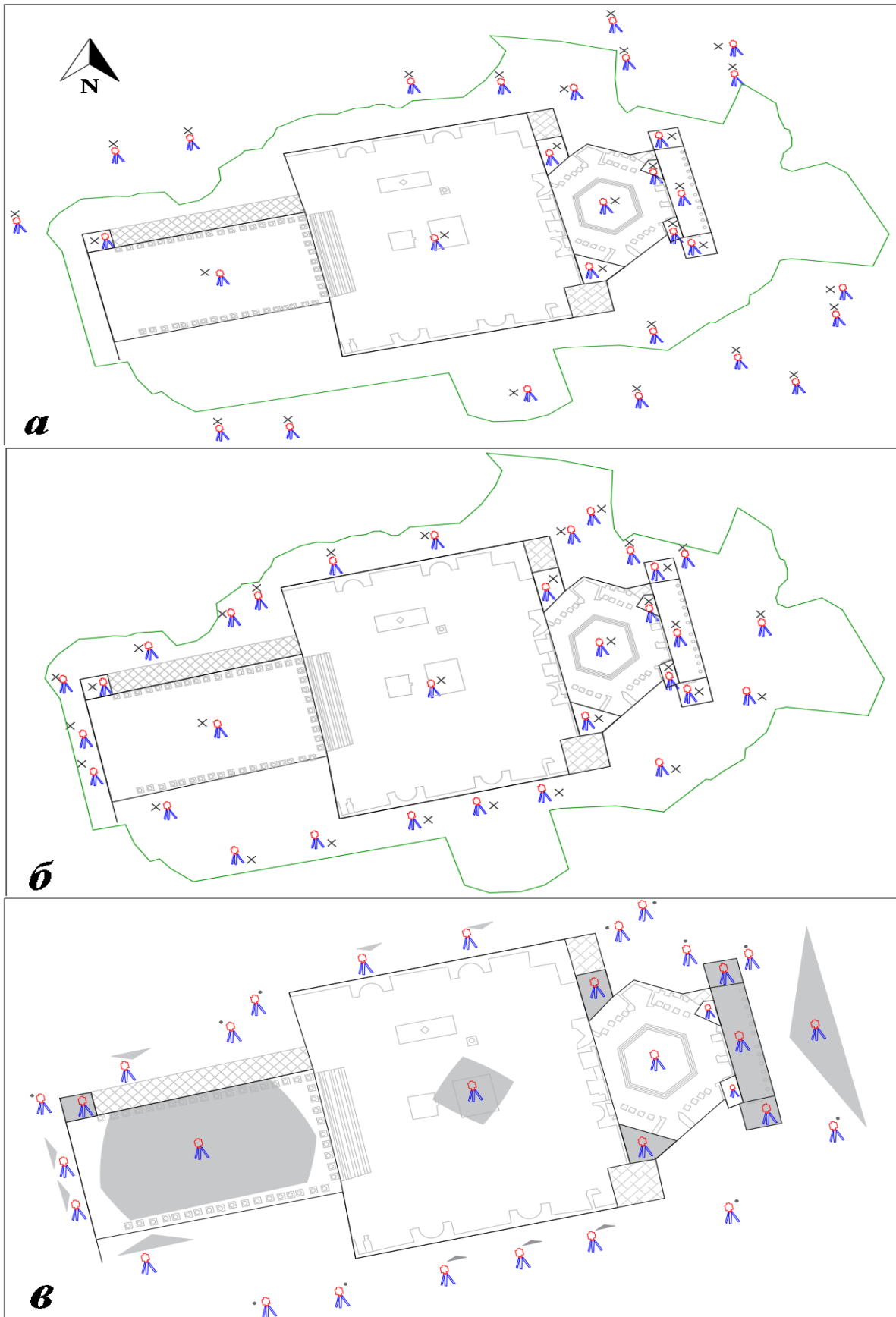



Рисунок 4.8 – Схема к оптимизации мест расположения сканера при НЛС для покрытия всей поверхности храма Юпитера . ( – сканер (сектор НЛС-кандидат), серая зона – сектор охвата кандидата, зеленая линия – граница храма)

На рисунках 4.7 и 4.8.в, серые зоны представляют область, на которую могут перемещаться НЛС-кандидаты, сохраняя при этом полный охват контура.

После практического применения предложенного подхода были рассчитаны оптимальные местоположения параметров лазерного кандидата (таблицы 4.4-4.5), затем их параметры были изображены при помощи САД-программного обеспечения.

На завершающем этапе задача пользователя состояла в том, чтобы выбрать оптимальные положения лазерных кандидатов в зеленых зонах. Для создания оптимальной сети триангуляции НЛС (светло-голубые линии, рисунки 4.9-4.10) при сохранении перекрытия и видимости между кандидатами. Таким образом, 100% здания и храма будет покрыто облаком точек (красные линии, цифры. 4.9-4.10).

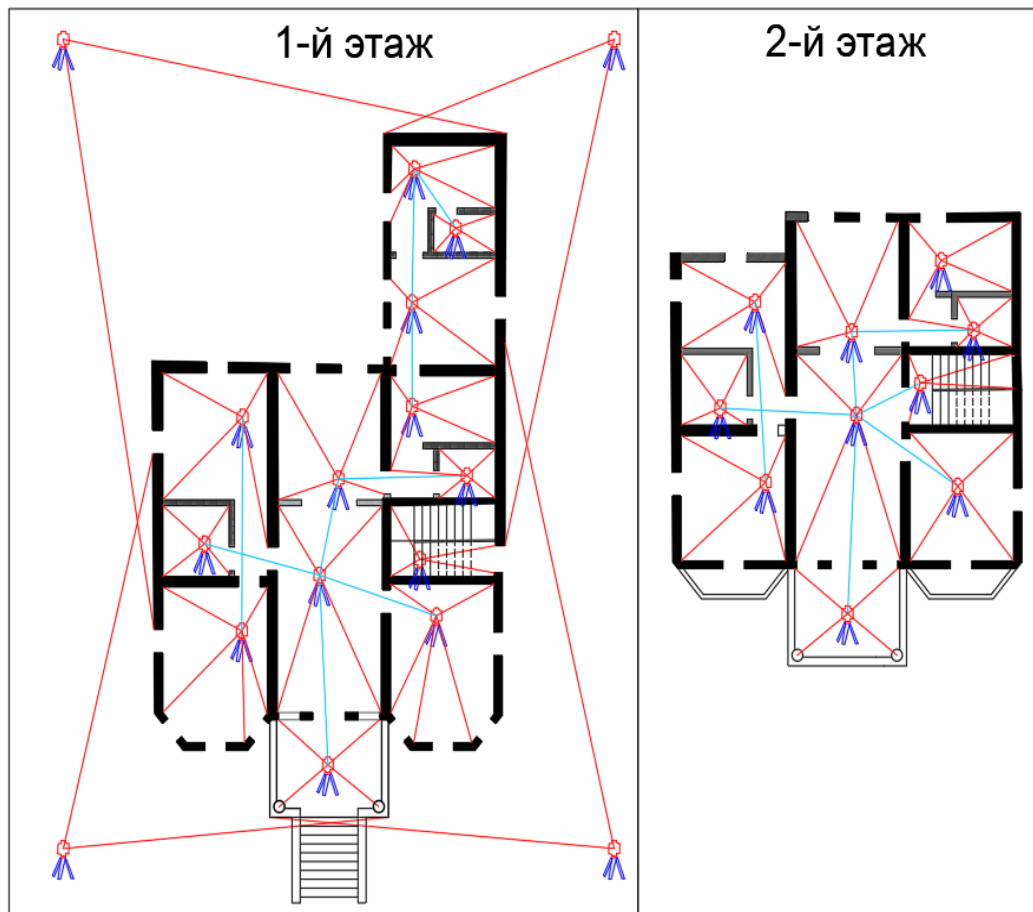


Рисунок 4.9 – План здания с местами расположения кандидатов для здания (📡 – сканер (сектор НЛС-кандидат), красная линия – диапазон покрытия кандидатом, синяя линия – сеть триангуляции для кандидатов)

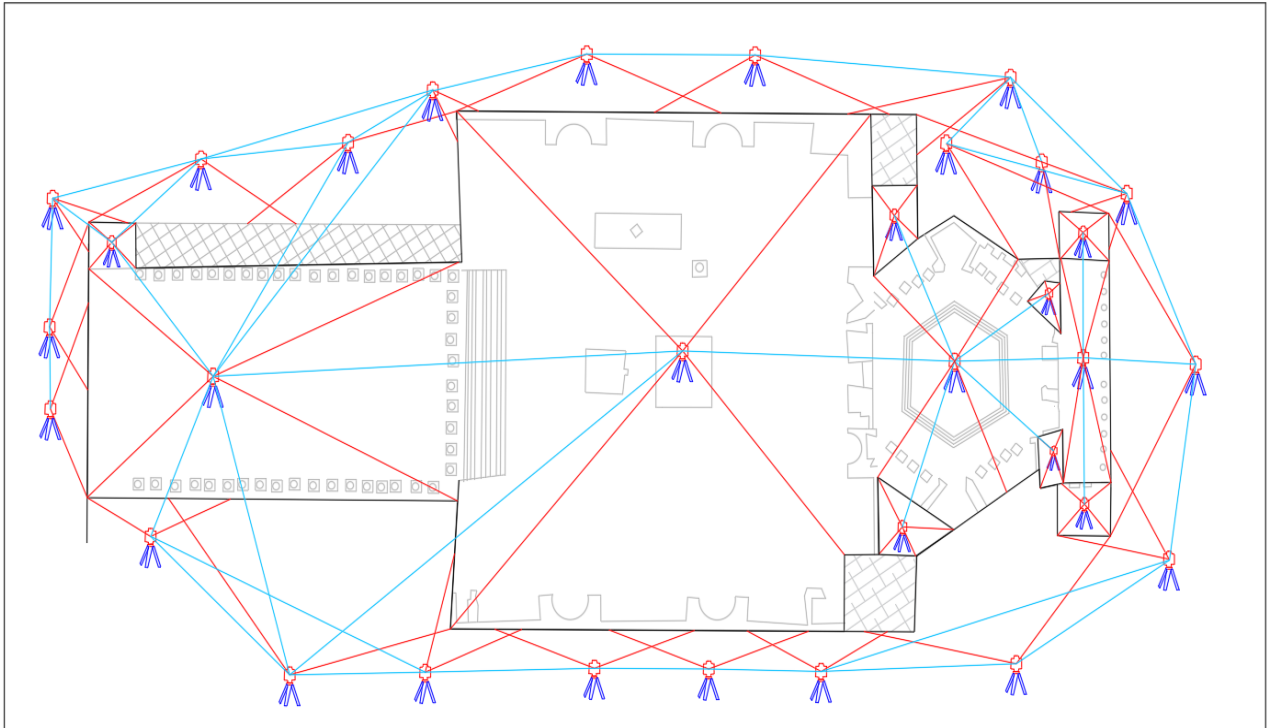


Рисунок 4.10 – План здания с местами расположения кандидатов для храма Юпитера (📐 – сканер (сектор НЛС-кандидат), красная линия – диапазон покрытия кандидатом, синяя линия – сеть триангуляции для кандидатов)

4.3 Выводы по Главе 4

Реализация результатов диссертационного исследования для конкретных объектов показала работоспособность и целесообразность применения разработанной методики на практике. Процесс по созданию оптимальной съемочной сети при использовании технологии НЛС проведен для традиционного исторического ливанского здания и для всемирно известного ПКН, расположенных в Ливане. Работа состояла в определении требуемых ограничений, создании предварительной модели (или чертежа), разделении объекта на правильные геометрические фигуры, расчета оптимального местоположения параметров лазерного кандидата и создания сети триангуляции НЛС.

Основные результаты и особенности практической реализации разработанной методики:

1. На основе разработанного алгоритма расчета оптимального расположения сканера создана съемочная сеть и рассчитаны ее оптимальные

параметры. Определено минимальное количество лазерных станций, необходимых для получения конечного облака точек данной области с полным охватом объекта сканирования (100%), достаточной точностью и коротким временем вычислений.

2. Из рассмотренных параметров требуемая точность, перекрытие сканирования, угол и дальность действия оказали наибольшее влияние на количество выбранных станций, в то время как форма и размер ячеек сети в основном влияют на время вычисления.

3. Разработанный подход позволяет создавать обмерные чертежи (модели) разного масштаба (1:20 и крупнее) и с достижением требуемой точности модели на основе (ГОСТ Р 56905-2016) [37] (таблица. 1.1).

4. После завершения полевых и камеральных работ был составлен подробный отчет, который был представлен Министерству культуры Ливана. Одобрена работа по разработанной методике, которая была реализована на объекте всемирного культурного значения Баальбек, в которой автор диссертации принимал активное участие.

5. По результатам настоящих исследований сформулировано второе научное положение: проектирование мест расположения СТ и оптимального их количества при НЛС эффективно выполнять с использованием разработанных параметров единичного сектора охвата сканирования, учитывающих угловую и линейную точность измерений.

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 МНК 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 КТ на снимаемом объекте, обеспечивающую оценку точности ТЛО.
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 данных исследований дали возможность определить для определенных условий единичный сектор охвата лазерного сканирования, что важно для проектирования СТ на конкретном объекте.
4. Автором разработана компьютерная программа для построения и оценки точности точки геодезической сети, позволяющая оценить точность модели объекта фиксации.
5. Разработанная методика трехмерной оптимизации расположения станций сканирования реализована в форме подхода и протестирована с обеспечением 100% покрытия ТЛО 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 ПКН на основе широкого привлечения данных воздушного лазерного сканирования.
8. Перспективы дальнейших исследований состоят в разработке технологии комплексной съемки, включающей наземное и воздушное лазерное сканирование, которая обеспечит полноценное 3D построение модели объекта и более качественную фиксацию памятников культурного наследия.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

БЛА	–	Беспилотный летательный аппарат
ГНСС	–	Глобальная навигационная спутниковая система
ГР	–	Горизонтальные расстояния
КТ	–	Контрольная точка
МНК	–	Метод наименьших квадратов
НЛС	–	Наземное лазерное сканирование
ОП	–	Опорный пункт
ОТ	–	Определяемые точки
ПKN	–	Памятник культурного наследия
ПН	–	Пункт наблюдения
СКП	–	Средняя квадратическая погрешность
СТ	–	Съемочная точка
ТЛО	–	Точки лазерных отражений
ТЛС	–	Технология лазерного сканирования
УП	–	Угол падения
RTK	–	Кинематика в реальном времени

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. – Вып. 2. – С. 3–20.
2. Аникст, Д. А. Аппаратура для эталонирования геодезических приборов / Д. А. Аникст, В. Г. Львов // Геодезия и картография. – 1981. – № 9. – С. 19–24.
3. Аникушкин, М. Н. Наземные системы лазерного сканирования. Опыт работ / М. Н. Аникушкин // Геопрофи. – 2005. – № 1. – С. 49–50.
4. Арефьев, А. А. Исследование влияния амплитудных искажений энергетического профиля лазерного пучка на ошибку измерения непрямолинейности и неплоскостности / А. А. Арефьев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1983. – № 5. – С. 95–98.
5. Астапович, А. В. Регуляризованный метод оптимального уравнивания геодезических сетей / А. В. Астапович // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2002. – № 1. – С. 30–40.
6. Астапович, А. В. Уравнивание геодезических сетей с учетом ошибок координат исходных пунктов регуляризованным методом наименьших квадратов / А. В. Астапович // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2002. – № 3. – С. 21–25.
7. Байбородин, Ю. В. Основы лазерной техники / Ю. В. Байбородин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища школа, 1988. – 383 с.
8. Баканова, В. В. Крупномасштабные топографические съемки / В. В. Баканова. – М.: Недра, 1983. – 182 с.
9. Богданец, Е. С. Создание трехмерной модели архитектурного объекта по данным наземного лазерного сканирования / Е. С. Богданец, А. А. Кривенко, В. В. Мусихин // «Геопрофи». – 2007. – № 4. – С. 50–52.

10. Большаков, В. Д. Теория математической обработки геодезических измерений / В. Д. Большаков, П. А. Гайдаев. – 2 изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1977. – 367 с.
11. Большаков, В. Д. Геодезия. Изыскания и проектирование инженерных сооружений: справ. пособие/ В. Д. Большаков, Е. Б. Ключин, И. Ю. Васютинский. – М.: Недра, 1991. – 238 с.: ил.
12. Брынь, М. Я. О работе с GPS-приемниками в закрытой и полузакрытой местности / М. Я. Брынь, И. Д. Марковкин, В. Н. Баландин, А. В. Юськевич// Материалы научной школы "Астронавигация 2000". - СПб., – 2000. – С. 38– 40.
13. Бутлер, С. А. Уравнивание тригонометрических сетей, определенных длинами сторон / С. А. Бутлер // Геодезист. – 1939. – № 8. – С. 21–41.
14. Быкова, Е. Н. создание SD-модели памятников архитектуры для целей Кадастра / Е. Н. Быкова // Известия вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2010. – №3. – С.22–25.
15. Вагин, В. А. Влияние соотношения точности угловых и линейных измерений на внутреннюю надежность в полигонометрических построениях / В. А. Вагин, Диб Бирути // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1992. – № 2. – С. 9–15.
16. Валеев, С. Г. Регрессионное моделирование при обработке наблюдений / С. Г. Валеев. – М.: Недра, 1991. – 272 с.
17. Вальков, В. А. Применение наземного лазерного сканирования для создания трехмерных цифровых моделей Шуховской башни / В. А. Вальков, М. Г. Мустафин, Г. В. Макаров // Записки Горного института. – 2013. – Т. 204. – С. 58–61.
18. Варламова, Л. Д. Использование лазерного сканера для сохранения архитектурно-исторического наследия / Л. Д. Варламова, Д. Д. Дмитриев // Интерактивная наука, 2017. – Ч. 22.– С. 10–13.

19. Виноградов, К. П. Перспективные методы обработки результатов наземного лазерного сканирования / К. П. Виноградов // Вестник. Зодчий. 21 век. – 2011. – №2 (39). – С. 80–81.
20. Войнаровский, А. Е. Технология обмеров фасадов стереофотограмметрическим методом в системе AutoCAD / А. Е. Войнаровский / Инженерно-строительный журнал. – 2010. – №7. – С. 31–34.
21. Воронков, Н. Н. Геодезия. Геодезические и фотограмметрические приборы: справ. пособие / Н. Н. Воронков, В. С. Плотников, Е. И. Калантаров. – М.: Недра, 1991. – 429 с.: ил.
22. Выстрчил, М. Г. Обоснование способов внешнего ориентирования цифровых моделей горных выработок, получаемых по результатам съемок лазерно-сканирующими системами: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16 / Выстрчил Михаил Георгиевич. – СПб, 2014. – 167 с.
23. Гайдаев, П. А. Об оценке точности измерений после отбраковки по допускам, установление допусков / П. А. Гайдаев, И. В. Колесников // Геодезия и картография. – 1975. – № 8. – С. 30–35.
24. Гайдаев, П. А. Математическая обработка геодезических сетей / П. А. Гайдаев. – М.: Недра, 1977. – 288 с.
25. Ганьшин, В. Н. Точность оценивания и форма представления результатов измерений / В. Н. Ганьшин, М. С. Нестеренок // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1982. – № 3. – С. 3–6.
26. Гауф, М. Электронные теодолиты и тахеометры / М. Гауф; пер. с чеш. – М.: Недра, 1978. – 150 с.
27. Гельман, Р. Н. Калибровка аэрофотоснимков на основе сравнения фотограмметрических моделей / Р. Н. Гельман // Геодезия и картография. – 1986. – № 2. – С. 26–29.
28. Гельман, Р. Н. Лабораторная калибровка цифровых камер с большой дисторсией / Р. Н. Гельман, А. Л. Дунц // Геодезия и картография. – 2002. – № 7. – С. 23–31.

29. Герасименко, М. Г. О некоторых проблемах современных высокоточных линейных измерений / М. Г. Герасименко, А. А. Генике // Геодезия и картография. – 1981. – № 6. – С. 16–20.
30. Голубев, А. Н. Влияние дисперсионного искажения сигнала в атмосфере на фазовые измерения в лазерном дальномере / А. Н. Голубев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1981. – № 4. – С. 3–7.
31. ГОСТ Р 8.794-2012 Сканеры наземные лазерные. Методика поверки. – М.: Изд-во стандартов, 2012. – 21 с.
32. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. - утв. Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 2011. – 83 с.
33. ГОСТ Р 51833-2001. Национальный стандарт Российской Федерации. ФОТОГРАММЕТРИЯ. Термины и определения, 2001.– 10 с.
34. ГОСТ Р 53607-2009. Национальный стандарт Российской Федерации. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических и землеустроительных работ. Определение относительных координат по измерениям псевдодальностей, 2009.– 7 с.
35. ГОСТ Р 55528-2013. Национальный стандарт Российской Федерации. Состав и содержание научно-проектной документации по сохранению объектов культурного наследия. Памятники истории и культуры. Общие требования, 2013.– 15 с.
36. ГОСТ Р 56891.2-2016. Сохранение объектов культурного наследия. Термины и определения. Часть 2. Памятники истории и культуры, 2016. – 12 с.
37. ГОСТ Р 56905-2016. Проведение обмерных и инженерно-геодезических работ на объектах культурного наследия. Общие требования, 2016. – 25 с.
38. ГОСТ Р ИСО 17123. Государственная система обеспечения единства измерений. Оптика и оптические приборы. Методики полевых испытаний геодезических и топографических приборов, 2011. – Часть 1.

39. Гусев, В. Н. Основы наземной лазерно-сканирующей съемки : Учеб. пособие / В. Н. Гусев, А. И. Науменко, Е. М. Волохов, В. А. Голованов. – СПб.: Санкт-Петерб. гос. горн, ин-т., 2007. – 86 с.
40. Джунь, И. В. Метод сравнения точности геодезических приборов, учитывающий эксцесс закона распределения вероятностей ошибок / И. В. Джунь // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1989. – № 3. – С. 55–61.
41. Дуда, П. И. Методика проектирования геодезических сетей в условиях применения наземного лазерного сканирования / П. И. Дуда, Г. М. Таратинский, Д. И. Степанов // Маркшейдерский вестник. – 2010. – №3. – С. 34–39.
42. Зубов, А. В. Программный комплекс для определения кренов сооружений башенного типа по данным наземного лазерного сканирования / А. В. Зубов, Н. Н. Елисеева // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81, №7. – С. 2–7.
43. Информационный сайт интернет-издания news: <https://ihbconline.co.uk/newsachive/?p=20030>.
44. Информационный сайт интернет-издания news: <https://time.com/5571495/notre-dame-burned-buildings/>.
45. Камен, Х. Электронные способы измерений в геодезии / Х. Камен. – М.: Недра, 1982. – 132 с.
46. Канашин, Н. В. Разработка технологии наземной сканерной съемки железнодорожных станций: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.35 / Канашин Николай Владимирович. – М., 2009. – 160 с.
47. Канашин, Н. В. Сканерная сеть для съемки железнодорожной станции / Н. В. Канашин, К. П. Виноградов // Геодезия и картография. – 2009. – № 5. – С. 14–16.
48. Канашин, Н. В. Опыт применения трехмерного моделирования при реконструкции мостов / Н. В. Канашин, А. А. Никитчин, Д. А. Афонин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – Т. 14, № 2. – С. 238–246. ISSN печатной версии: 1815-588X.
49. Караванов, М. Ю. Лазерные сканеры Callidus / М. Ю. Караванов // Строительная техника и технология. – 2002. – № 4. – С. 12–16.

50. Карпик, А. П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий Текст.: монография / А. П. Карпик. – Новосибирск: СГГА, 2004. – 260с.
51. Карсунская, М. М. Возможные пути уменьшения влияния инструментальных ошибок электронных геодезических приборов на точность угловых измерений / М. М. Карсунская, Х. К. Ямбаев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2000. – № 4. – С. 100–115.
52. Кафтан, В. И. Калибровка лазерного сканера на коротком эталонном геодезическом базисе Текст. / И. В. Кафтан, М. В. Никифоров // Геодезия и картография. – 2012. – № 5. – С. 14–19.
53. Кемниц, Ю. В. Теория ошибок измерений / Ю. В. Кемниц. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1967. – 176 с.
54. Ключин, Е. Б. Инженерная геодезия: учеб. для техникумов / Е. Б. Ключин, Д. Ш. Михелев. – М.: Недра, 1990. – 264 с.: ил.
55. Ковров, А. А. ПО RiSCAN PRO и его возможности по обработке данных наземного лазерного сканирования / А. А. Ковров // Геопрофи. – 2006. – №5. – С. 59–61.
56. Комиссаров, А. В. Получение метрической информации об объектах архитектурного наследия по данным наземного лазерного сканирования / А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров // Изв. вузов. Стр-во. – 2006. – № 5. – С. 112–115.
57. Комиссаров, А.В. Наземное лазерное сканирование: монография / А. В. Комиссаров, В. А. Середович, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова. – Новосибирск: СГГА, 2009. – 261 с.
58. Комиссаров, А. В. Обоснование углового шага сканирования при наземной лазерной съемке / А. В. Комиссаров, Т. А. Широкова, Е. В. Романович // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 2. – С. 96–99.
59. Комиссаров, А. В. Априорная оценка точности создания цифровых моделей местности и рельефа по данным наземного лазерного сканирования / А. В. Комиссаров, Т. А. Широкова, А. В. Комиссаров, Е. А. Егорченкова, Н. С. Коротченко // Инженерные изыскания. – 2012. – № 12. – С. 58–60.

60. Комиссаров, А. В. Лазерное сканирование: обобщение существующей практики / А. В. Комиссаров // Инженерные изыскания.– 2013. – № 2. – С. 22–25.
61. Комиссаров, А. В. Методика совместного получения и обработки данных наземного лазерного сканирования и цифровой съемки / А. В. Комиссаров, М. С. Калинина // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.– 2015. – № 4.– С. 39–42.
62. Комиссаров, А. В. Системное представление лазерного сканирования / А. В. Комиссаров // Геодезия и картография.– 2015. – №. 7 – С. 18–23.
63. Комиссаров, А. В. Классификация погрешностей в результатах лазерного сканирования / А. В. Комиссаров // Геодезия и картография.– 2015. – №. 10 – С. 13–18.
64. Коугия, В. А. Уравнивание сканерного хода / В. А. Коугия, Н. В. Канашин // Безопасность движения поездов: Труды IX научно-практической конференции, М.: Московский государственный университет путей сообщения. – 2008. – С. IX-14–IX-15.
65. Креков, Г. М. Имитационное моделирование в задачах оптического дистанционного зондирования / Г. М. Креков, И. М. Орлов, В. В. Белов, М. Л. Белов, А. В. Белохвостиков, И. В. Мишин, Р. Г. Сафин . – Новоси-бирск: Наука, 1988. – 165 с.
66. Крутиков, Д. В. Трехмерное наземное лазерное сканирование в решении задач геоинформационного обеспечения инфраструктуры горнодобывающих предприятий: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16 / Крутиков Дмитрий Викторович. – Екатеринбург, 2011. – 123 с.
67. Маркузе, Ю. И. Основы уравнительных вычислений / Ю. И. Маркузе. – М.: Недра, 1990. – 240 с.
68. Мельников, С. Р. Инновации в создании цифровых моделей – трехмерные лазерные безотражательные сканирующие системы / С. Р. Мельников, О. В. Дроздов // Нефтяное хозяйство. – 2001. – № 6. – С. 26–27.
69. Могильный, С. Г. Измерительный комплекс «Визир 3D» на предприятиях Украины: Геодезический контроль и выверка технологического

оборудования / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, В. Н. Ревуцкий, В. А. Пригаров // Геопрофиль. – 2009. – № 3 (6). – С. 12–19.

70. Могильный, С. Г. Исследование методов определения геометрических параметров вращающихся агрегатов по данным лазерного сканирования / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, А. В. Иванов, А. В. Середович, Е. К. Лагутина, А. В. Мартынов // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 89–107.

71. 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.

72. Нестеренко, Е. А. Методика съемки карьеров, отвалов и складов на основе применения трехмерных лазерно-сканирующих систем: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16 / Нестеренко Екатерина Александровна. – Санкт-Петербург, 2010. – 133 с.

73. Носов, В. К. Разработка методики лазерно-сканирующей съемки крепи вытянутых подземных горных выработок (на примере гидротехнических тоннелей Зеленчукской ГАЭС): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16 / Носов Владимир Константинович. – Санкт-Петербург, 2012. – 20 с.

74. Павлов, В. И. Методы построения плоских проекций сложных архитектурных поверхностей по данным наземного лазерного сканирования / В. И. Павлов // Известия ВУЗов, «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2011. – № 4. – С. 63–67.

75. Руководство по применению фотограмметрических методов для составления обмерных чертежей инженерных сооружений. ПНИИС. – М.: Стройиздат, 1984. – 312 с.

76. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611958 Российская Федерация. Программа для построения и оценки точки точности двумерной геодезической сети / **Шокер Хуссейн Мухаммад**, Мустафин Мурат Газизович // – № 2021611125; заявл. 05.02.2021; опубл. 09.02.2021, Бюл. № 2.

77. Середович, А. В. Методика создания цифровых моделей объектов нефтегазопромыслов средствами наземного лазерного сканирования: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.32 / Середович Александр Владимирович. – Новосибирск, 2007. – 165 с.
78. Строительные нормы и правила: СНиП 31-06-2009. Общественные здания и сооружения. - утв. приказом Министерства регионального развития РФ, 2009. – 56 с.
79. Уставич, Г.А. Комбинированный способ создания инженерно-топографических планов масштаба 1:500 промышленных территорий и отдельных промплощадок / Г. А. Уставич, В. А. Середович, Я. Г. Пошивайло, А. В. Середович, А. В. Иванов // Геодезия и картография.– 2009. – № 1. – С. 31–37.
80. Федеральный закон от 25.06.2002 г. № 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации».
81. Фрейдин, А. Лазерное 3D-сканирование в геодезии для строительства / А. Фрейдин // Строительная инженерия. – 2005. – № 1. – С. 40–43.
82. 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.
83. Цветков, В. Я. Цифровые карты и цифровые модели / В. Я. Цветков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2000. – № 2. – С. 147–155.
84. Чибуничев, А. Г. Разработка автоматизированной технологии создания векторной модели объекта по результатам трехмерного лазерного сканирования и цифровой фотосъемки / А. Г. Чибуничев, В. П. Галахов // Изв. вузов Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 2. – С. 89–92.
85. Чибуничев, А. Г. Технология совместной обработки результатов наземного лазерного сканирования и цифровой фотосъемки / А. Г. Чибуничев, В. П. Галахов // Инженерные изыскания. – 2011. – № 2. –С. 32–36.

86. **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.2–10.
87. Шоломицкий, А. А. Высокоточный измерительный комплекс «Визир 3D»/ А. А. Шоломицкий, А. Л. Сотников // *Prostoev.NET*. – 2014. – № 1. – С. 52–58.
88. Abbas, M. A. An on-site approach for the self-calibration of terrestrial laser scanner / M. A. Abbas, D. D. Lichti, A. K. Chong, H. Setan, Z. Majid // *In Measurement: Journal of the International Measurement Confederation.*, 2014, 52, pp. 111–123.
89. Abellán, A. Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities / A. Abellán, T. Oppikofer, M. Jaboyedo, N. J. Rosser, M. Lim, M. J. Lato // *Earth Surf. Processes Landf.*, 2014, 39, pp. 80–97.
90. Barber, D. Awards a standard specification for terrestrial laser scanning of cultural heritage / D. Barber, J. Mills, P. Bryan // *In: CIPA XIX International Symposium.*, 2003, pp. 619–625.
91. Beland, R. R. Propagation through atmospheric optical turbulence. *In Atmospheric Propagation of Radiation.*, 1993, 2, pp. 157–232.
92. Bernardini, F. Building a digital model of Michelangelo's Florentine Pieta / F. Bernardini, H. Rushmeier, IM. Martin, J. Mittleman, G. Taubin // *Comput Graph Appl IEEE*. – 2002. – № 22 (1). – С. 59–67.
93. Biswas, H. Planning for scanning using building information models: A novel approach with occlusion handling / H. Biswas, F. Bosché, M. Sun // *In Proceedings of the 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining, Oulu, Finland, 15–18 June 2015.*
94. Bogomolova, N. Laser scanning application possibilities in the engineering structures survey / N. Bogomolova, A. Nikitchin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – V. 698, No 4. – pp. 044010. DOI: 10.1088/1757-899X/698/4/044010.

95. Borah, D. K. Estimation of Laser beam pointing parameters in the presence of atmospheric turbulence / D. K. Borah, D. G. Voelz // In *Applied Optics.*, 2007, 46(23), pp. 6010–6018.
96. Bornaz, L. Multiple scan registration in LIDAR close-range applications / L. Bornaz, A. Lingua, F. Rinaudo // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2003, 34, pp. 72–77.
97. Bryn, M. J. Geodetic monitoring of deformation of building surrounding an underground construction / M. J. Bryn, D. A. Afonin, N. N. Bogomolova // *Procedia Eng.*, 2017, 189, pp. 386–392. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.061.
98. Bucksch, A. Error budget of Terrestrial Laser Scanning: Influence of the intensity remission on the scan quality / A. Bucksch, R. Lindenbergh, J. van Ree // In *Proceedings of the GeoSiberia.*, 2007, 1, pp. 113–122.
99. Chan, T. O. Cylinder based self-calibration of a panoramic terrestrial laser scanner / T. O. Chan, D. D. Lichti, // In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.*, 2012, 39-B5, pp. 169–174.
100. Che, E. Multi-scan segmentation of terrestrial laser scanning data based on normal variation analysis / E. Che, M. J. Olsen // *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2018, 143, pp. 233–248.
101. **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. – pp. 044017.
102. El-Hakim, SF. Detailed 3D reconstruction of large-scale heritage sites with integrated techniques / SF. El-Hakim, J-A. Beraldin, M. Picard, G. Godin // *Comput Graph Appl IEEE.* – 2004. – № 24 (3). – C. 21–29.
103. Eteje, S. O. Understanding Horizontal Geodetic Network Precision and Accuracy Determination Using Least Squares Technique / S. O. Eteje, O. F. Oduyebo // *Int. J. Innov. Res. Multidiscip. F.*, 2018, 4, 7, pp. 129–135.

104. Federman, A. Documentation for the Conservation of Built Heritage: Analysis of Recording Methodologies (Doctoral dissertation, Carleton University), 2017, pp. 25.
105. Garcia-San-Miguel, D. Geometric calibration of a terrestrial laser scanner with local additional parameters: An automatic strategy / D. Garcia-San-Miguel, J. Lerma // In ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing., 2013, 79, pp.122–136.
106. 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. – pp. 044009.
107. Ikeuchi, K. The great buddha project: Digitally archiving, restoring, and analyzing cultural heritage objects / K. Ikeuchi, T. Oishi, J. Takamatsu, R. Sagawa, A. Nakazawa, R. Kurazume, K. Nishino, M. Kamakura, Y. Okamoto // International Journal of Computer Vision., 2007, 7, pp. 189–208.
108. Kaasalainen, S. Study of surface brightness from backscattered Laser intensity calibration of Laser data / S. Kaasalainen, E. Ahokas, J. Hyypä, J. Suomalainen // In IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters., 2005, 2(3), pp. 255–259.
109. Kanashin, N. V. Application of Laser Scanning Technology in Geotechnical Works on Reconstruction of Draw Spans of the Palace Bridge in Saint Petersburg / N. V. Kanashin, A. A. Nikitchin, E. S. Svintsov // Procedia Engineering. – 2017. – V. 189 – P. 393-397. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.062.
110. Kersten, T. Geometric accuracy investigations of the latest terrestrial laser scanning systems / T. Kersten, K. Mechelke, M. Lindstaedt, H. Sternberg // In: Integrating Generations, FIG Working Week, Stockholm, Sweden. – 2008. – C. 14–19.
111. Kukko, A. Effect of incidence angle on laser scanner intensity and surface data / A. Kukko, S. Kaasalainen, P. Litkey // In Applied Optics., 2008, 47(7), pp. 986–992.
112. Mataa, E. Digital and analytical photogrammetric recording applied to cultural heritage. a case study: “St. DOMINGO DE SILOS’CHURCH (XIVth

CENTURY, ALCALA LA REAL, SPAIN)” / E. Mataa, J. Cardenala, P. Castroa, J. Delgadoa, M. A. Hernandezza, J. L. Pereza, M. Ramos, M. Torresa // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* – 2004. – 34(Part XXX).

113. Moise, C. Remote sensing for cultural heritage assessment and monitoring: the case study of Alba Iulia / C. Moise, I. Dana Negula, C. E. Mihalache, A. M. Lazar, A. L. Dedulescu, G. T. Rustoiu, I. C. Inel, A. Badea // *Sustainability.* – 2021. – № 13 (3). – 1406 c.

114. Mozaar, M. Optimal placement of a terrestrial laser scanner with an emphasis on reducing occlusions / M. Mozaar, M. Varshosaz // *Photogramm. Rec.*, 2016, 31, pp. 374–393.

115. Oskouie, P. Automated measurement of highway retaining wall displacements using terrestrial laser scanners / P. Oskouie, B. Becerik-Gerber, L. Soibelman // *Autom. Constr.*, 2016, 65, pp. 86–101.

116. Pfeifer, N. Analysis of the backscattered energy in Terrestrial Laser Scanning data / N. Pfeifer, B. Hofle, C. Briese, M. Rutzinger, A. Haring // *In Proceedings of the ISPRS Congress, Silk Road for Information from Imagery.*, 2008, 37, pp. 1045–1051.

117. Reed, MK. Constraint-based sensor planning for scene modeling / MK. Reed, PK. Allen // *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell.* – 2000. – № 22 (12). – C. 1460–1467.

118. Roca-Pardinas, J. Analysis of the influence of range and angle of incidence of terrestrial laser scanning measurements on tunnel inspection / J. Roca-Pardinas, R. Arguelles-Fraga, F. de Asis Lopez, C. Ordonez // *In Tunnelling and Underground Space Technology.*, 2014, 43, pp. 133–139.

119. Salvi, J. A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation / J. Salvi, C. Matabosch, D. Fofi, J. Forest // *In Image and Vision Computing.*, 2006, 25, pp. 578–596.

120. 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, C. Ordóñez // *Remote Sens.* – 2018. – №10. – P. 1606.

121. Soudarissanane, S. Error budget of terrestrial laser scanning: influence of the incidence angle on the scan quality / S. Soudarissanane, J. Van Ree, A. Bucksch, R. Lindenbergh // In: *3D-NordOst*, Berlin, Germany. – 2007. – C. 1–8.

122. Soudarissanane, S. Optimizing terrestrial laser scanning measurement set-up / S. Soudarissanane, R. Lindenbergh // Paper presented at the International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Calgary, Canada. – 2011. – C. 29–31.

123. Soudarissanane, S. Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points / S. Soudarissanane, R. Lindenbergh, M. Menenti, P. Teunissen // *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2011, 66, 4, pp. 389–399. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2011.01.005

124. Tan, K. Correction of incidence angle and distance effects on TLS intensity data based on reference targets / K. Tan, X. Cheng // *Remote Sens.*, 2016, 8, 3, pp. 251–271. DOI: 10.3390/rs8030251.

125. Tarabanis, KA. A survey of sensor planning in computer vision / KA. Tarabanis, PK. Allen, RY. Tsai // *IEEE Trans Robot Autom.* – 1995. – № 11 (1). – C. 86–104.

126. Weichel, H. Laser beam propagation in the atmosphere. Tutorial texts in optical engineering. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, USA. Includes bibliographical references., 1990, pp. 89–98.