

Комиссаров Александр Владимирович



МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТРИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК СКАНОВ

25 00 34 – «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Новосибирск – 2007

Работа выполнена в Сибирской государственной геодезической академии

Научный руководитель —	кандидат технических наук, доцент Широкова Тамара Антоновна
Официальные оппоненты	доктор технических наук Трубина Людмила Константиновна,  кандидат технических наук, профессор Михайлов Александр Павлович
Ведущая организация —	Сибирский государственный университет путей сообщения

Защита состоится «25» мая 2007 г в 15 00 час на заседании диссертационного совета Д 212 251 02 при Сибирской государственной геодезической академии (СГГА) по адресу 630108, г Новосибирск, 108, ул Плеханова, 10, СГГА, ауд 403

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГГА

Автореферат разослан «25» апреля 2007 г  
Афтореферат размещен на сайте СГГА [http //www ssga ru](http://www.ssga.ru)

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Середович В А

Изд лиц ЛР № 020461 от 04 03 1997  
Подписано в печать 24 апреля 2007 Формат 60×84 1/16  
Усл печ л 1,40 Уч изд л 1,01 Тираж 100 экз 3.73.  
Отпечатано в картопечатной лаборатории СГГА  
630108, Новосибирск, 108, Плеханова, 8

## Общая характеристика работы

### Введение

**Актуальность.** Развитие автоматизированных геодезических и фотограмметрических комплексов привело к появлению новых аппаратных средств для получения метрической информации об объектах, в частности наземных лазерных сканеров (НЛС). Для внедрения новых инструментов в топографо-геодезическое производство необходимо разработать методики исследования метрических характеристик результатов наземного лазерного сканирования, что свидетельствует об актуальности темы диссертационной работы.

Сущность наземного лазерного сканирования заключается в измерении с высокой скоростью расстояний от сканера до точек объекта и регистрации соответствующих направлений (вертикальных и горизонтальных углов), следовательно, измеряемые величины при наземном лазерном сканировании являются аналогичными, как и при работе с электронными тахеометрами. Однако принцип тотальной съемки объекта, а не его отдельных точек, характеризует НЛС как съемочную систему, результатом работы которой является трехмерное изображение или так называемый скан. При обработке данных наземного лазерного сканирования используется фотограмметрический подход, а именно применяются такие же процессы, понятийный и математический аппараты (дешифрирование массива точек, отбраковка грубых измерений, фильтрация «шумов», внешнее ориентирование и подсоединение сканов, автоматическое распознавание образов и т. д.). Таким образом, для определения точностных характеристик изображений, получаемых наземным лазерным сканером, следует использовать комплексный подход, в основе которого лежат методики исследования съемочных систем, геодезических и фотограмметрических приборов.

**Степень разработанности проблемы.** Математическим и методическим аспектам исследования геодезических приборов посвящено очень много работ. Существенный вклад в разработку методик исследования точностных характеристик геодезических приборов внесли доктора технических наук Елисеев С. В., Плотников В. С., Уставич Г. А., Воронков Н. Н., Деймлих Ф., кандидаты технических наук Спиридонов А. И., Бронштейн Г. С., Захаров А. И. и многие другие.

Значительный вклад в разработку тест-объектов и тестовых полигонов, математического аппарата для калибровки съемочных систем, определения точностных характеристик фотограмметрических приборов внесли доктора технических наук Антипов И. Т., Дубиновский В. Ъ., Амромин П. Д., Погорелов В. В., кандидат технических наук Калантаров Е. И. и другие.

В настоящее время в научно-технической литературе практически нет публикаций российских ученых, посвященных исследованиям точности НЛС.

Работы зарубежных авторов (докторов, инженеров Licht D , Boehler W , Ingensand H , Ullrich A и других) преимущественно относятся к постановке проблемы или разработке концептуальных идей калибровки и исследования НЛС. Следовательно, тематика данной диссертационной работы является мало проработанной.

**Целью работы** являлась разработка методики исследования точности изображений, получаемых наземными лазерными сканерами.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1) выполнен анализ

– внешних факторов и технических характеристик приборов, влияющих на точность получения данных НЛС,

– существующих методик исследования геодезических и фотограмметрических приборов, съемочных систем и НЛС,

2) разработаны методики и тест-объекты для исследования стабильности работы измерительных блоков сканера,

3) разработаны методики и тестовые полигоны для исследования точности внешнего ориентирования сканов, измерения расстояний, вертикальных и горизонтальных направлений, регистрируемых НЛС,

4) проведена апробация предложенных методик.

**Объект и предмет исследования.** В качестве объекта исследования выступают сканы, полученные НЛС. Предметом исследования являются методики исследования метрических характеристик сканов.

**Теоретическая и методологическая база исследований.** Методологической и теоретической основой работы являются методы вычислительной математики, статистической обработки результатов измерений, способы построения геодезических сетей, приемы математического моделирования, подходы и методы исследований, применяемые в фотограмметрии. В качестве программного обеспечения (ПО) использовались программные продукты (ПП) для получения и обработки данных наземного лазерного сканирования RISCAN PRO 1 2, CYCLONE 5 2, POINTSCAPE 2 1, REALWORKSURVEY 4 2, интегрированная среда разработки приложений DELPHI 7 0 и программный комплекс MICROSOFT EXCEL 2003.

**Информационная база исследований.** В качестве исходных данных использованы паспорт полевого компаратора, расположенного на геодезическом полигоне «Учебный», результаты наземной лазерной съемки, полученные при выполнении хозяйственных работ, аналитические макеты результатов геодезических измерений и сканерной съемки радиального тестового полигона, макеты сканов, инструкции и нормативные документы по производству фотограмметрических и геодезических работ, руководства пользователя НЛС.

рических и геодезических работ, руководства пользователя НЛС

**Научная новизна** выполненной работы состоит в следующем

1) разработана методика исследования стабильности работы измерительных блоков НЛС, которая позволяет установить момент начала стабильной работы сканера и ее продолжительность,

2) разработана методика создания радиального тестового полигона для исследования точности внешнего ориентирования сканов,

3) предложены методика и тестовый полигон для исследования точности построения трехмерных векторных моделей объектов по данным наземного лазерного сканирования. В основу идеи тестового полигона положены принципы создания испытательных полигонов, используемых при калибровке съемочных систем и исследовании фотограмметрических приборов и цифровых станций,

4) разработаны методики и тест-объекты для исследования точности измерения расстояний и углов лазерным сканером, учитывающие конструктивные особенности НЛС,

5) разработана методика прокладки сканерных ходов, позволяющих аналогично фототриангуляции сократить объем работ по плано-высотному обоснованию сканерной съемки

**На защиту выносятся**

1) методика исследования стабильности работы измерительных блоков сканеров,

2) радиальный тестовый полигон и методика его создания для исследования точности внешнего ориентирования сканов,

3) методики и тест-объекты для исследования точности измерения расстояний и углов НЛС,

4) тестовый полигон и методика исследования точности построения трехмерных векторных моделей объектов по данным наземного лазерного сканирования,

5) методика прокладки сканерных ходов

**Теоретическая значимость** Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке технологий и методик наземного лазерного сканирования реальных объектов, для разработки методических пособий по проведению работ при наземной лазерной съемке

**Практическая значимость** Разработанные методики применяются при метрологической аттестации НЛС в метрологической службе СГА, что подтверждено соответствующим актом внедрения. На основе результатов проведенных исследований сформулированы рекомендации по выполнению сканерной съемки для решения практических задач

**Реализация результатов работ.** Основные положения, разработанные в диссертационной работе, реализованы в ПП (программы определения координат центров специальных марок на радиальном тестовом полигоне, исследования распределения случайных ошибок величин, измеряемых НЛС, на соответствие нормальному закону, программы вписывания плоскости в массив точек и исключения систематических ошибок из результатов угловых измерений НЛС), которые внедрены в учебный процесс кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования СГГА, производственный процесс регионального центра лазерного сканирования СГГА. Результаты экспериментальных исследований использованы для составления актов метрологической аттестации НЛС Riegl LMS-Z360 серийный номер 9993954, Riegl LMS-Z420i серийный номер 9995355, Riegl LMS-Z210 серийный номер 9992983 и Mensi GS200 серийный номер 04-j-125 и при выполнении следующих хоздоговорных работ

1) «Исполнительная съемка фасада строящегося здания» по заказу ООО «Синай и К», договор 1128-04,

2) «Исполнительная съемка фасада здания» по заказу Новосибирского авиационного технического колледжа, договор 1132-04,

3) «Производство топографо-геодезических работ по созданию топографических планов земельных участков, находящихся в пользовании ОАО «Сибнефть-Ноябрьскнефтегаз» по заказу ОАО «Сибнефть-Ноябрьскнефтегаз», договор 1174-04

**Апробация работы** Результаты работы докладывались на Новосибирской межвузовской научной студенческой конференции «Интеллектуальный потенциал Сибири» в 2004 г; на научно-технической конференции преподавателей СГГА «Современные проблемы геодезии и оптики» в 2004 г, на окружной научно-технической конференции «ГИС – интегрированное решение муниципальных задач» в 2004 г в Екатеринбурге, на международной конференции и выставке «Лазерное сканирование и цифровая аэросъемка Сегодня и завтра» в 2004 г в Москве, на международных промышленных форумах GEOFORM+ (на конференциях «Геопространственные технологии и сферы их применения» в 2005, 2006 гг в Москве), на научных конгрессах «ГЕО-Сибирь», направление «Геодезия, картография, маркшейдерия» в 2005, 2006 гг в Новосибирске, на презентации-семинаре «Приборы и технологии лазерной локации, цифровой аэросъемки и геопозиционирования в геоинформатике, природопользовании, мониторинге природных ресурсов земли и лесоустройстве, инженерно-геодезических и инженерно-геологических изысканиях» в 2006 г в Новосибирске

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 16 работ, из них 8 – без соавторов, 2 – в журналах, включенных в перечень ВАК

**Структура и объем работы** Общий объем диссертационной работы составляет 201 страницу печатного текста, содержит 45 рисунков и 18 таблиц, состоит из введения, трех разделов, заключения, 8 приложений и библиографии из 247 наименований, в том числе 52 зарубежных

### Содержание работы.

Система для наземного лазерного сканирования включает наземный лазерный сканер (НЛС) и полевой персональный компьютер со специализированным программным обеспечением. НЛС состоит из лазерного дальномера, адаптированного для работы с высокой частотой, и блока развертки лазерного луча (рисунок 1)

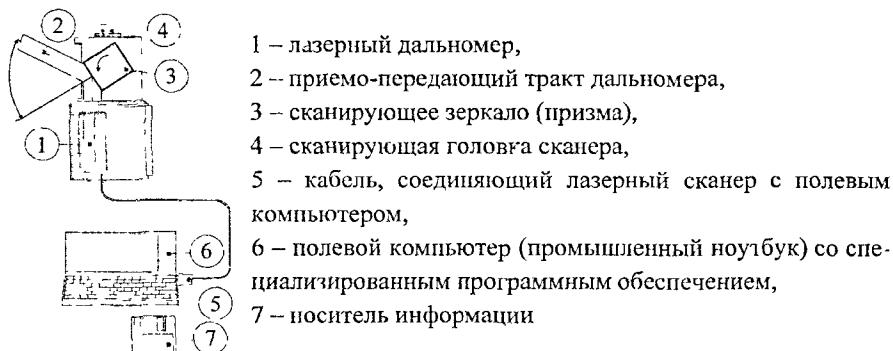


Рисунок 1 – Принципиальная схема НЛС

В качестве блока развертки в НЛС выступает сервопривод и полигональное зеркало или призма. Сервопривод отклоняет луч на заданную величину в горизонтальной плоскости, при этом поворачивается вся верхняя часть сканера, которая называется головкой. Развертка в вертикальной плоскости осуществляется за счет вращения или качания зеркала.

В процессе сканирования фиксируются направление распространения лазерного луча и расстояние до точек объекта. Результатом работы НЛС является растровое изображение – скан, значения пикселей которого представляют собой вектор с компонентами измеренным расстоянием ( $R$ ), интенсивностью от-

раженного сигнала ( $I$ ) и RGB-составляющей ( $I_{RGB}$ ), характеризующей реальный цвет точки объекта. Положение (строка и столбец) каждого элемента (пикселя) полученного раstra определяется измеренными вертикальным ( $\theta$ ) и горизонтальным ( $\varphi$ ) углами. Из анализа принципа действия сканеров видно, что метрические характеристики сканов определяются точностью работы лазерного дальномера и блока развертки лазерного луча.

Другой формой представления результатов наземного лазерного сканирования является массив точек (рис. 2) лазерных отражений от объектов, находящихся в поле зрения сканера, с пятью характеристиками: пространственными координатами ( $X, Y, Z$ ), вычисленными в системе координат сканера по измеренному расстоянию и направлению лазерного луча, интенсивностью и реальным цветом.

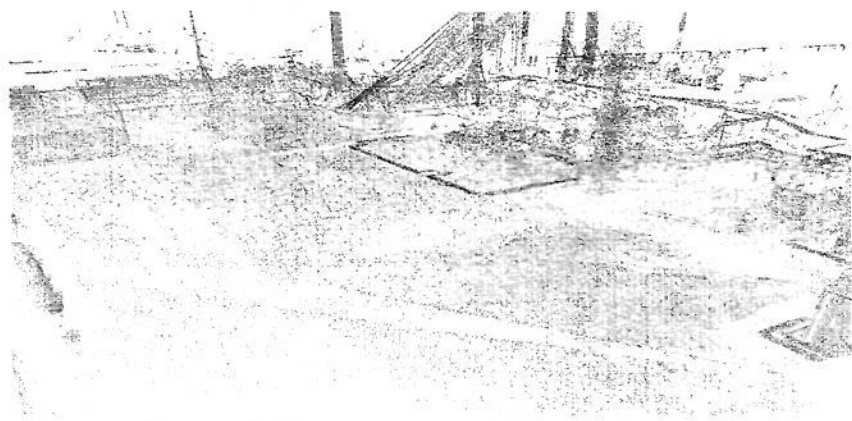


Рисунок 2 – Результат наземного лазерного сканирования

На основе анализа литературных источников выполнена классификация технического и программного обеспечения наземного лазерного сканирования. Анализ электронных способов измерения линейных и угловых величин позволил сделать вывод, что на точность получения данных при лазерном сканировании влияют следующие основные факторы:

- окружающая среда (рефракция, вибрация, изменение скорости распространения электромагнитного излучения);
- метрологические свойства объектов съемки (форма, цвет, ориентация и размеры);
- инструментальные характеристики прибора (вертикальное и горизонтальное разрешение, расходимость лазерного луча, синхронность измерения

расстояний и углов)

Для описания влияния перечисленных факторов на метрические характеристики изображений предложена общая формула функции входного сигнала, поступающего на приемник при измерении расстояний НЛС

$$f_{вх}(t) = \int_{-\Delta\varphi}^{\Delta\varphi} \int_{-\Delta\nu}^{\Delta\nu} \left[ f_{вых} \left( t - \frac{2D(\varphi, \nu)}{c} \right) K_{отр}(\varphi, \nu) \Psi(\varphi, \nu) \right] d\varphi d\nu + \eta(t), \quad (1)$$

где  $f_{вых}(t)$  – функция выходного сигнала,

$D(\varphi, \nu)$  – функция, которая описывает расстояние от лазерного источника до различных точек объекта (т.е. отражает форму объекта),

$K_{отр}(\varphi, \nu)$  – функция, характеризующая коэффициент отражения сигнала от различных точек объекта,

$\Psi(\varphi, \nu)$  – функция, описывающая распределение сигнала в пространстве, т.е. отражающая величину расходимости лазерного луча,

$\eta(t)$  – функция, которая характеризует шумовые составляющие

С использованием формулы (1) можно выполнить математическое моделирование процесса сканерной съемки и изучить влияние таких характеристик объекта, как форма, цвет и структура на точность получения данных

Анализ способов калибровки кадровых съемочных систем, исследования геодезических и фотограмметрических приборов, цифровых фотограмметрических станций и НЛС показал, что существующие методики без их адаптации невозможно использовать для определения метрических характеристик сканов. Однако принципы и идеи, заложенные в них, могут быть применены для исследования метрических характеристик сканов и наземных лазерных сканеров в целом

В результате анализа принципа действия НЛС и источников ошибок, влияющих на метрические свойства изображений, получаемых лазерным сканером, предложена общая методика метрологической аттестации НЛС (рис. 3)

Метрические характеристики изображения, получаемого сканером, зависят от точности работы лазерного дальномера и блока развертки лазерного луча НЛС

Для исследования стабильности работы измерительных блоков НЛС предложена методика, сущность которой заключается в многократном сканировании специальной марки и определении расстояния от сканера до ее центра, а также горизонтального и вертикального углов на центр марки в сферической

системе координат. Затем по измеренным величинам (расстоянию ( $R$ ), горизонтальному ( $\varphi$ ) и вертикальному ( $\theta$ ) углам) строятся три графика, на которых по оси абсцисс откладывается номер сканирования, характеризующий время работы сканера, а по оси ординат – отклонения измеренных величин (расстояния или углов) при каждом сканировании от среднего значения. По каждому графику выявляется прямолинейный участок и для него строится тренд на основе уравнения прямой, в котором неизвестными являются коэффициент  $a$ , характеризующий степень стабильности ( $R$  или  $\varphi$  и  $\theta$ ), и свободный член  $b$ , отражающий величину систематической ошибки измеряемых расстояний (или горизонтальных и вертикальных углов) с момента стабильной работы отдельных блоков сканера.

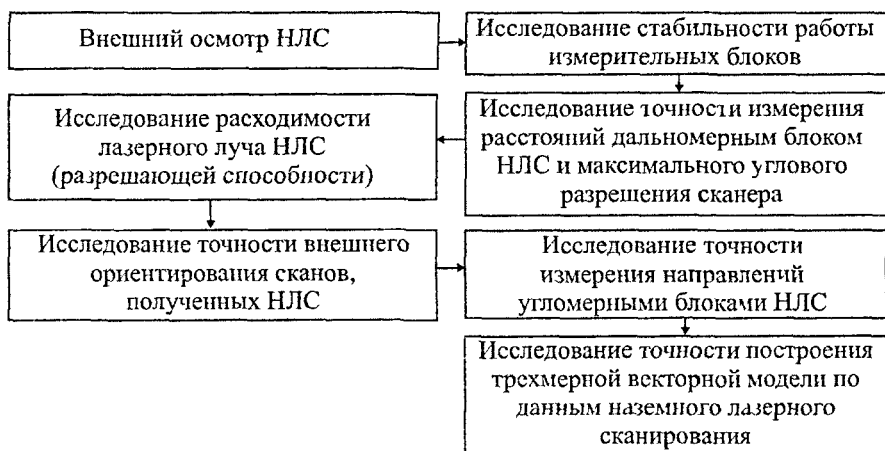


Рисунок 3 – Методика метрологической аттестации НЛС

Исходными данными для построения тренда являются отклонение измеряемой величины при  $i$ -м сканировании от среднего ( $\Delta R_i^{np\ изм}$ ) и время работы сканера с начала его запуска ( $t_i$ ). Определение неизвестных  $a$  и  $b$  выполняется по методу наименьших квадратов (МНК)

На основе практических исследований делается вывод о требуемом времени прогрева сканера с целью обеспечения стабильной работы измерительных блоков и допустимом времени непрерывной работы сканера на станции  $t_{непр\ раб}$ , которое вычисляется на основе условия

$$t_{\text{непр раб}} \leq \frac{\delta_{\text{изм}}}{5 a}, \quad (2)$$

где  $\delta_{\text{изм}}$  – ошибка единичного измерения расстояния (горизонтального или вертикального углов) НЛС, приведенная в паспорте прибора или полученная в результате исследования

Предложенная методика исследования точности измерения расстояний лазерным дальномером НЛС основана на использовании полевой компаратора. Сущность методики заключается в следующем. Сканер устанавливается в створе линии, соединяющей центры двух стеклянных пластин  $\mu_1$  и  $\mu_2$ , расстояние между которыми определено с высокой точностью (рисунок 4). Пластинки должны быть отцентрированы и установлены отвесно на тумбах при помощи лота/параллеля, а их основания приведены в горизонтальное положение. Затем выполняется сканирование пластинок с максимальным вертикальным и горизонтальным разрешением. В результате съемки будет получено множество значений расстояния от сканера до пластинок (от нескольких сотен до сотен тысяч).

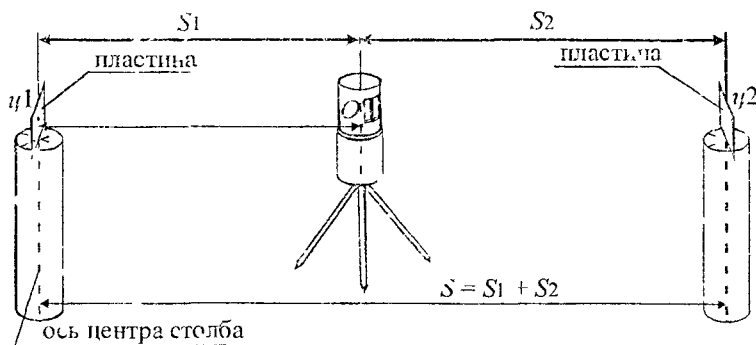


Рисунок 4 – Схема измерений для тестирования дальномерного блока

По данным сканерной съемки пластинок строятся их трехмерные векторные модели в единой системе координат, и вычисляется расстояние  $S_{1-2}$  между геометрическими центрами пластинок

Если ошибку измерения расстояний дальномерным блоком НЛС представить в виде формулы

$$\Delta_S = a + bS_{\text{изм}}, \quad (3)$$

где  $\Delta_S$  – ошибка измерения расстояний дальномерами,

$S$  – величина измеряемого расстояния,  
 $a$  и  $b$  – коэффициенты, характеризующие постоянную и законопостоянную ошибки,  
то с учетом выражения (3) и рисунка 4 можно записать уравнение

$$2a + bS_{изм} = S_{ист} - S_{изм}, \quad (4)$$

где  $S_{изм}$  – расстояние между точками 1 и 2, вычисленное по координатам центров пластин, полученным по данным лазерного сканирования

Поскольку при испытаниях дальномерного блока НЛС измеряется несколько длин отрезков, то для каждого расстояния можно составить систему уравнений вида (4), из решения которой определяются величины  $a$  и  $b$ . По значениям  $a$  и  $b$  и заданному расстоянию  $S$  вычисляют ошибку  $\Delta_S$  по формуле (3), которую сравнивают с приведенной в паспорте прибора и делают вывод о необходимости калибровки дальномерного блока сканера

Обеспечить размещение начала системы координат сканера на линии, соединяющей центры пластин, очень сложно. В работе выполнены исследования влияния отклонения положения точки  $O$  от линии  $u_1u_2$  (рис. 4) на точность определения параметров  $a$  и  $b$ , которые показали, что величиной нестворности, не превышающей 9,0 % от расстояния, можно пренебречь

При выполнении сканерной съемки объектов одним из основных процессов является внешнее ориентирование сканов по координатам специальных марок. Поэтому возникает задача определения оптимального количества, геометрии расположения марок и расстояния от них до сканера для достижения необходимой точности внешнего ориентирования сканов. Для этих целей были выведены формулы диагональных элементов обратной весовой матрицы, возникающей при определении элементов внешнего ориентирования сканов, для случая, когда ось сканера примерно отвесна, а марки находятся на равном удалении от сканера в количестве четырех и восьми штук. Проверка правильности полученных формул произведена с помощью программы, составленной в среде Delphi, моделирующей процесс внешнего ориентирования сканов и позволяющей выполнить априорную оценку точности внешнего ориентирования сканов на этапе проектирования сканерной съемки

Для экспериментальных исследований точности внешнего ориентирования сканов предложен тестовый полигон, показанный на рисунке 5, назначение которого аналогично фотограмметрическому испытательному полигону для калибровки съемочных систем

Размер радиального тестового полигона должен выбираться в соответствии с техническими характеристиками сканера и, в первую очередь, зависит от дальности действия, расходимости лазерного луча и максимального разрешения сканера. Так как угол поля зрения у большинства современных моделей сканеров составляет  $360^\circ$  в горизонтальной плоскости, то марки необходимо размещать по окружности на различных расстояниях от сканера. При такой геометрии расположения марок точность определения элементов внешнего ориентирования сканов будет максимальной, так как корреляция между угловыми и линейными элементами внешнего ориентирования скана будет минимальной.

Для определения координат и высот центров специальных марок тестового полигона выбраны и обоснованы способы прямой линейно-угловой засечки и тригонометрического нивелирования, как наиболее экономически выгодные и обеспечивающие необходимую точность.

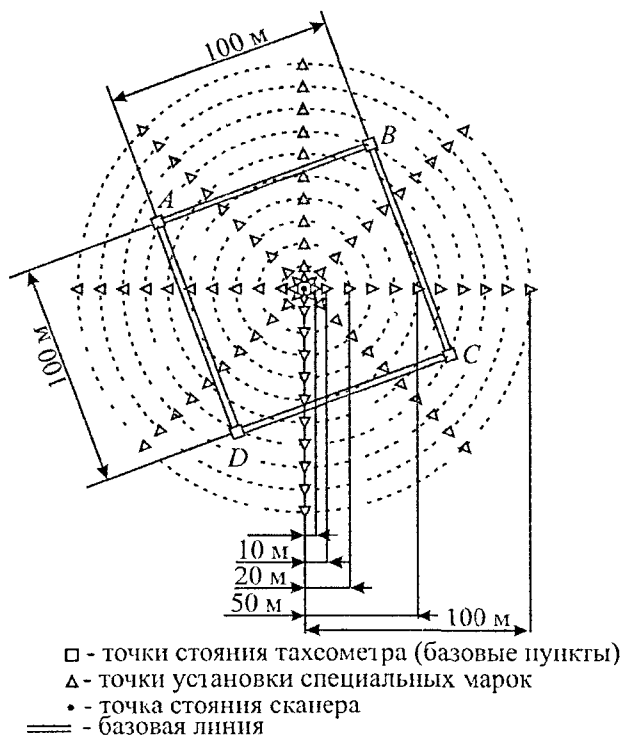


Рисунок 5 – Схема радиального полигона

Проведение геодезических измерений на радиальном тестовом полигоне рекомендуется выполнять с помощью электронного тахеометра, который позволяет одновременно регистрировать наклонные расстояния, горизонтальные и вертикальные углы на точки полигона. Измерение линейных и угловых величин целесообразнее выполнять способом круговых приемов. При этом наблюдение одним полуприемом производится по известной в геодезии методике, и должны учитываться все рекомендации по выполнению высокоточного геометрического нивелирования.

С целью исследования оптимальной геометрии расположения базовых пунктов и наиболее точного метода уравнивания при определении координат точек полигона была создана программа математического моделирования радиального тестового полигона, с использованием которой определены места размещения базовых точек, показанные на рисунке 5, а также выявлено, что более высокую точность определения планового положения специальных марок обеспечивает параметрический способ уравнивания измеренных величин с одновременным исключением систематических ошибок.

Для исключения систематических ошибок в угловых измерениях предложена динамическая модель вида

$$\sigma_i = \Delta A + \left( \Delta_0 + \Delta_1 t_i + \Delta_2 t_i^2 \right) \cos \varphi_i, \quad (5)$$

где  $\Delta A$  – поправка, учитывающая постоянную ошибку визирования и влияние рефракции при измерении направления на базовые пункты  $A, B, C, D$  (см. рисунок 4),

$\Delta_0, \Delta_1, \Delta_2$  – коэффициенты, учитывающие влияние рефракции, связанной с изменением температурного и влажностного градиентов во времени,

$t_i$  – промежуток времени между моментами начала наблюдений и измерения  $i$ -го направления,

$\varphi_i$  – углы, образуемые направлением максимальных градиентов температуры и влажности и измеряемым направлением, которые определяются следующим образом

$$\varphi_i = \varphi_0 + A_{изм\ i}, \quad (6)$$

где  $A_{изм\ i}$  – измеренное  $i$ -е направление,

$\varphi_0$  – постоянная величина, характеризующая фазовый сдвиг макси-

мальных градиентов температуры и влажности

Поправки  $\sigma$ , вычисляемые по формуле (5), будут едины для всех направлений, измеренных с одной точки стояния прибора

Для исключения систематических ошибок из результатов линейных измерений следует использовать модель, учитывающую постоянную и законопостоянную ошибки дальномера

Наиболее высокую точность определения высот обеспечивает метод уравнивания с исключением систематических ошибок из результатов тригонометрического нивелирования, основанный на предположении, что коэффициент рефракции является величиной постоянной для всех направлений, измеренных с одного пункта

Для исследования точности внешнего ориентирования сканов выполняются сканирование радиального тестового полигона и определение координат специальных марок в системе координат скана. Затем производится внешнее ориентирование сканов при различных комбинациях геометрии расположения и числа марок, и выполняется оценка точности определения элементов внешнего ориентирования ( $X_0, Y_0, Z_0, \alpha, \omega, \kappa$ ), на основании чего делается вывод об оптимальной геометрии расположения специальных марок относительно сканера

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований точности внешнего ориентирования сканов показал следующее

- СКО единицы веса при определении элементов внешнего ориентирования сканов в основном определяется точностью измерения расстояний,
- точность определения элементов внешнего ориентирования скана возрастает пропорционально  $\sqrt{n}$ , где  $n$  – количество марок,
- максимальная точность определения элементов  $X_0, Y_0$  достигается для случая, когда начало системы координат сканера и специальные марки находятся в одной плоскости,
- при увеличении отстояния специальных марок от сканера возрастает точность определения угловых элементов внешнего ориентирования скана

В большинстве случаев результатом обработки данных наземного лазерного сканирования является векторная трехмерная модель объекта. Для исследования точности построения таких моделей предложены тестовый полигон, состоящий из геометрических примитивов (цилиндра, шара, конуса, куба и плоскости), и методика, включающая следующие процессы

- создание тестового полигона (определение параметров и координат характерных точек геометрических примитивов),
- наземная лазерная съемка тестового полигона,

- встраивание геометрических примитивов в полученный массив гочек,
- сравнение полученных параметров и координат характерных точек примитивов с истинными, на основе которого делается вывод о точности построения трехмерной модели

При выполнении наземного лазерного сканирования возникает задача объединения сканов, для решения которой в программном обеспечении, поставляемом со сканером, можно использовать

- характерные точки отсканированных объектов (менее точный),
- специальные марки, плановое положение и высоты центров которых определены в единой системе координат (более точный)

Размещение специальных марок и определение координат их центров любым геодезическим способом приводит к увеличению времени на производство полевых работ, в связи с чем разработана методика прокладки сканерных ходов, позволяющая сократить работы по подготовке планово-высотного обоснования сканерной съемки

Цель прокладки сканерных ходов подобна основному назначению фототриангуляции или тахеометрической съемки методом блоков. Сущность сканерного хода заключается в следующем. Вокруг первой сканерной станции расставляются шесть или более специальных марок, у четырех из которых (четвертая для контроля) определяются пространственные координаты во внешней системе координат. Эти марки будут являться опорными. Со второй станции в поле зрения сканера должно попадать не менее трех марок, отобразившихся на первом скане, и не менее трех марок, которые будут видны с третьей станции, и так далее. На последней сканерной станции необходимо иметь минимум две опорные марки с известными координатами для уравнивания и оценки точности прокладки сканерного хода.

Сканы ориентируются в следующем порядке. Первый скан внешне ориентируется по координатам опорных специальных марок. Второй скан подсоединяется к первому по общим маркам и так далее до последнего скана. Объединение и внешнее ориентирование сканов выполняется с использованием уравнений, аналогичных тем, которые возникают на этапе подсоединения независимых моделей при маршрутной фототриангуляции. Отличием является то, что при подсоединении и внешнем ориентировании сканов не определяется масштабный коэффициент.

Результатом проложения сканерного хода будут являться параметры, характеризующие положение сканов в пространстве ( $X_0, Y_0, Z_0, \alpha, \omega, \kappa$ ), координаты специальных марок и единая точечная модель объекта.

Для выявления накопления ошибок в координатах точек сканерного хода и определения количества сканов, через которое необходимо располагать опорные марки, разработан тестовый полигон, вид которого представлен на рисунке 6



Рисунок 6 – Схема прокладки сканерного хода

На основе разработанных методик выполнены экспериментальные исследования точности изображений, получаемых НЛС

В таблице 1 приведены результаты исследования стабильности работы измерительных блоков трех моделей сканеров Riegl LMS-Z210 и Z360, Mensi GS200, которые показали, что прогрев данных сканеров необходимо выполнять около одного часа для обеспечения наиболее стабильной работы

Таблица 1 – Время непрерывной работы дальномерного и угломерных блоков лазерных сканеров Riegl LMS-Z210 и Z360, Mensi GS200

Сканер	Дальномерный блок	Блоки измерения углов	
		горизонтальных	вертикальных
Riegl LMS-Z210	$3^h 52^m 37^s$	$1^h 36^m 53^s$	$4^h 39^m 56^s$
Riegl LMS-Z360	$4^h 30^m 14^s$	$3^h 22^m 49^s$	$1^h 42^m 08^s$
Mensi GS200	$9^h 05^m 26^s$	$0^h 30^m 14^s$	$0^h 21^m 42^s$

Экспериментальные испытания доказывают работоспособность предложенной методики исследования стабильности работы измерительных блоков НЛС и подтверждают необходимость проведения этих исследований для каждой модели лазерного сканера

Из-за того, что данные сканирования содержат случайные ошибки (шумовую составляющую) и обладают статистической избыточностью, при по-

строении формализованных трехмерных моделей объектов возникает задача оптимального вписывания геометрических примитивов в массив точечных измерений. Обычно в качестве математического аппарата для решения этой задачи используется МНК, который предполагает, что случайные ошибки измеряемых величин ( $R$ ,  $\varphi$ ,  $\theta$ ) распределяются по нормальному закону. Для проверки этой гипотезы предложено применять тест-объект в виде идеальной плоскости и методику исследования, заключающуюся в сканировании с максимальным разрешением данного тест-объекта и определении по полученным данным коэффициентов, характеризующих положение и ориентацию плоскости. После определения отстояния  $\Delta_i$  каждой точки скана от плоскости формируется статистический ряд, включающий величины  $\Delta_i$ , и исследуется на соответствие нормальному закону распределения. Для этих целей используется многосторонний критерий  $\chi^2$ , а также проверка эксцесса и асимметрии.

Выполненные эксперименты на макетных материалах показали, что величины  $\Delta_i$  объективно отражают закон распределения случайных ошибок в расстояниях, горизонтальных и вертикальных углах, измеренных НЛС.

На основе исследования распределения случайных ошибок измерения расстояний, вертикальных и горизонтальных углов сканерами Riegl LMS-Z210 и Z360, Menzi GS200 выявлено, что оно соответствует нормальному закону. Кроме того, эксперименты показали, что при многократной съемке объекта достаточно девяти сканирований, так как увеличение их числа к повышению точности измерения расстояний не приводит, но при этом увеличивается время работы на станции. Также было установлено, что точность единичного измерения расстояний всеми исследуемыми сканерами соответствует паспортным данным.

В результате исследования точности измерения расстояний дальномерными блоками НЛС Riegl LMS-Z360 и Z4201 установлено, что

- точность измерения расстояний НЛС Riegl LMS-Z4201 соответствует паспортным характеристикам и не превышает 5,0 мм,

- ошибка измерения расстояний НЛС Riegl LMS-Z360 превышает значение, указанное в паспорте прибора. Максимальная ошибка измерения расстояний составляет 24 мм при отстоянии пластины от сканера 60 м. Для обеспечения паспортной точности измерения расстояний необходимо произвести его калибровку.

В ходе экспериментов также установлено, что ошибки встраивания плоскости, по полученным сканам НЛС Riegl LMS-Z360 и Z4201, не зависят от отстояния объекта от сканера, и максимальное разрешение этих сканеров соот-

ветствует паспортным значениям

Для исследования точности внешнего ориентирования сканов создан радиальный тестовый полигон по разработанной методике. Геодезические измерения на полигоне выполнены электронным тахеометром Leica TCR 405 (точность измерения расстояний – 3 мм + 2 ppm, – углов 5") В результате раздельного определения плановых координат и высот базовых пунктов тестового полигона получены следующие СКО  $m_X^{xyH} = 0,67$  мм,  $m_Y^{xyH} = 0,77$  мм и  $m_H^{xyH} = 0,82$  мм. Средние СКО определения координат и высот центров светоотражающих марок относительно базовых пунктов составили  $m_X^M = 0,84$  мм,  $m_Y^M = 0,93$  мм и  $m_H^M = 0,82$  мм.

С использованием созданного тестового полигона проведены исследования точности внешнего ориентирования сканов, полученных НЛС Riegl LMS-Z360, на основе которых сделаны следующие выводы:

- максимальная точность внешнего ориентирования сканов достигается при отстоянии светоотражающих марок от сканера порядка 20 м,
- светоотражающие марки необходимо размещать по окружности симметрично относительно точки стояния сканера в пределах сектора не менее 150°,
- оптимальное количество светоотражающих марок составляет 8 штук, так как увеличение их числа к существенному изменению точности внешнего ориентирования сканов не приводит,
- при отстоянии от сканера до светоотражающих марок от 5 до 70 м СКО единицы веса при определении элементов внешнего ориентирования сканов составила от 4 до 14 мм.

С помощью радиального тестового полигона выполнено исследование точности измерения вертикальных и горизонтальных направлений НЛС Riegl LMS-Z360 и Z420i, на котором светоотражающие марки располагались на одной окружности в количестве 40 штук. В процессе исследований получены ошибки измерения вертикальных и горизонтальных направлений. На рисунке 7 приведен график погрешностей измерения горизонтальных направлений сканером Riegl LMS-Z360.

Выполненные испытания показали, что измеренные направления содержат систематические ошибки, для исключения которых использован ряд Фурье вида

$$\Delta\lambda = \sum_{j=1}^k A_j \cos(\omega_j \lambda_i + \lambda_{0j}), \quad (7)$$

где  $A_j$  – амплитуда колебаний ошибок для гармоники с номером  $j$ ,  
 $\omega_j$  – частота колебаний ошибок для  $j$ -й гармоники,  
 $\lambda_i$  – измеренное направление,  
 $\lambda_{0j}$  – начальная фаза,  
 $k$  – число гармоник



Для каждого значения  $\Delta\varphi_i$  и  $\Delta\theta_i$  составлены уравнения вида (7) и решены итерационным методом с использованием МНК. Определение значимости каждого параметра выполнено на основе регрессионного анализа с применением критерия Стьюдента.

В результате экспериментов определены значимые параметры для каждого исследуемого блока НЛС Ricgl LMS-Z360 и Z420i, величины которых представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения амплитуды и фазы для учета длиннопериодических систематических ошибок вертикальных и горизонтальных направлений, измеренных НЛС Riegl LMS-Z360 и Z420i

Номер гармоники	Амплитуда ( $A_j$ )	СКО определения амплитуды	Фаза $\lambda_0$	СКО определения фазы
Riegl LMS-Z420i – блок регистрации вертикальных направлений				
2	0° 0' 4,4"	0° 0' 0,7"	54° 41' 39,0"	9° 18' 14,4"
3	0° 0' 4,8"	0° 0' 1,9"	параметр незначимый	параметр незначимый
Riegl LMS-Z360 – блок регистрации горизонтальных направлений				
2	0° 0' 7,6"	0° 0' 0,4"	-39° 4' 19,2"	3° 12' 45,0"
Riegl LMS-Z360 – блок регистрации вертикальных направлений				
2	0° 0' 4,8"	0° 0' 1,1"	41° 45' 11,1"	8° 49' 45,9"
3	0° 0' 3,8"	0° 0' 1,5"	параметр незначимый	параметр незначимый

После исключения длиннопериодических ошибок из измеренных горизонтальных и вертикальных направлений распределение величин  $\Delta\varphi$  и  $\Delta\theta$  стало соответствовать нормальному закону

На основе выполненных исследований угломерных блоков НЛС Riegl LMS-Z360 и Z420i можно сделать следующие выводы

- горизонтальные направления, измеряемые сканером Riegl LMS-Z420i, не содержат систематических ошибок (математическое ожидание разностей  $\Delta\varphi$  составляет 0,00023°),

- СКО измерения горизонтальных направлений ( $m_{\Delta\varphi}$ ) НЛС Riegl LMS-Z420i составляет 0,0014°, а вертикальных  $m_{\Delta\theta}$  – 0,0013°, что соответствует точности, заявленной заводом-изготовителем,

- СКО горизонтальных направлений  $m_{\Delta\varphi}$ , измеренных НЛС Riegl LMS-Z360, составляет 0,0017° а вертикальных  $m_{\Delta\theta}$  – 0,0015°, что соответствует паспортной точности прибора,

- точность измерения вертикальных углов ( $m_{\Delta\theta}$ ) НЛС Riegl LMS-Z420i и Z-360 можно повысить до 0,0008° путем введения поправок в углы с использованием полинома вида (7) и вычисленных параметров  $A_j$  и  $\lambda_0$ , (таблица 2) С

помощью этой же методики можно обеспечить точность измерения горизонтальных направлений сканером Riegl LMS-Z360 до 0,0009°

Для исследования методики прокладки сканерных ходов был создан тестовый полигон, схема которого показана на рисунке 6 Сканерный ход протяженностью 200 м включал 9 станций В таблицах 3 и 4 представлены СКО еди-

ности веса, характеризующие точность подсоединения сканов и СКО определения координат центров специальных марок

Таблица 3 – Точность подсоединения сканов

Номер скана	СКО единицы веса, м	Номер скана	СКО единицы веса, м
1	0,0112	5	0,0046
2	0,0094	6	0,0057
3	0,0075	7	0,0061
4	0,0039	9	0,0108
5	0,0031		

Таблица 4 – Оценка точности прокладки сканерного хода

Номер станции	$m_x$ , м	$m_y$ , м	$m_z$ , м
1	0,005	0,018	0,002
2	0,011	0,019	0,006
3	0,015	0,020	0,013
4	0,023	0,025	0,021
5	0,033	0,035	0,034
6	0,045	0,040	0,045
7	0,056	0,055	0,058
8	0,066	0,076	0,067
9	0,068	0,089	0,073

Из таблицы 4 видно, что СКО прокладки сканерного хода соответствует точности создания топографических карт, включая масштаб 1 : 500

Результаты выполнения производственных работ показали следующие преимущества разработанной методики прокладки сканерных ходов

- при проведении работ на одном объекте несколькими бригадами можно использовать один электронный тахеометр,

- сокращается количество исполнителей в бригаде до двух человек

Результаты исследований использовались для метрологической проработки хозяйственных и научно-исследовательских работ

- составление топографического плана масштаба 1 : 500 на территорию Новосибирского судоходного шлюза и создание трехмерной модели его шлюзовых камер,

- производство топографо-геодезических работ по созданию топографических планов и электронных планов земельных участков, находящихся в пользовании ОАО «Сибнефть – Ноябрьскнефтегаз»,

- исполнительная съемка для определения геометрических параметров купола здания Новосибирского государственного академического театра оперы и балета,

- создание цифровой модели рельефа территории Сибирской государст-

венной геодезической академии,

- создание трехмерной модели Областного театра кукол,
- построение трехмерной модели Новосибирского биоглобного комплекса по данным наземного лазерного сканирования

### **Заключение**

Результатом диссертационной работы является следующее

1) выполнен анализ

- влияния окружающей среды, метрологических свойств объектов и инструментальных ошибок на метрические характеристики сканов,
- способов калибровки кадровых съемочных систем, исследования геодезических и фотограмметрических приборов и НЛС. Сделан вывод, что существующие методики без их адаптации невозможно использовать для исследования лазерных сканеров,

2) разработаны программа метрологической аттестации НЛС и методики определения метрических характеристик изображений, получаемых наземными лазерными сканерами, в том числе

- методика исследования стабильности работы измерительных блоков, позволяющая сделать заключение о времени непрерывной работы НЛС, в течение которого ошибки измеряемых величин не превышают допуск,

- методика исследования точности измерения расстояний НЛС с использованием полевого компаратора, учитывающая конструктивные особенности приборов (отсутствие возможности горизонтирования и центрирования большинства моделей сканеров),

- методика исследования точности измерения углов лазерными сканерами,

3) разработаны методики и тестовые полигоны для оценки точности отдельных этапов обработки данных наземного лазерного сканирования, а именно

- радиальный тестовый полигон, состоящий из специальных марок, расположенных на окружностях различного радиуса относительно сканера, для исследования точности внешнего ориентирования сканов,

- тестовый полигон, включающий геометрические примитивы различной формы и размера, для исследования точности построения трехмерных векторных моделей объектов по данным лазерного сканирования,

- методика прокладки сканерного хода, позволяющего сократить объем работ по плано-высотному обоснованию сканерной съемки,

4) на основе разработанных методик и контрольных образцов выполнено исследование наземных лазерных сканеров Riegl LMS-210, Z360, Z4201, Mensi GS200, составлены акты их метрологической аттестации и сформулированы практические рекомендации по выполнению наземной лазерной съемки объектов

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования СГГА и производственный процесс регионального центра лазерного сканирования, а также применяются при метрологической аттестации НЛС в метрологической службе СГГА, что подтверждено соответствующими актами

### **Список опубликованных работ по теме диссертации**

- 1 Комиссаров, А В Исследование точности наземных лазерных сканеров [Текст]/ А В Комиссаров// Современ проблемы техн наук сб тез докл Новосиб межвуз науч студен конф «Интеллектуальный потенциал Сибири» Ч 3 – Новосибирск, 2004 – С 104
- 2 Комиссаров, А В Исследование точности трехмерного лазерного сканера (на примере Riegl LMS Z-360) [Текст]/ А В Комиссаров, Д В. Комиссаров// Материалы IV Междунар конф и выставки «Лазерное сканирование и цифровая аэросъемка Сегодня и завтра» – М Типография компании XPortMedia, 2004 – С 10 - 11
- 3 Комиссаров, А В Современные возможности создания трехмерных метрических моделей объектов с применением наземных лазерных скансров [Текст]/ А В Комиссаров, А В Середович// Тез и аннотации докл Окружной научно-техн конф «ГИС-интегрированное решение муниципальных задач» – Екатеринбург Уралгеоинформ, 2004 – С 37 - 38
- 4 Комиссаров, А В Разработка тест-объектов для исследования точности наземных лазерных сканеров [Текст]/ А В Комиссаров// Материалы конф Международного промышленного форума GEOFORM+ «Геопространственные технологии и сферы их применения» – 14-17 марта 2005 г, Москва – М, 2005 – С 69 - 70
- 5 Комиссаров, А В Разработка конструктивной схемы тест-объектов и методики для исследования точности наземных лазерных сканеров [Текст]/ А В Комиссаров, Т А Широкова, Д В Комиссаров// ГЕО-Сибирь-2005 Т 5 Геодезия, картография, маркшейдерия сб материалов науч конгр , 25-29 апр 2005 г, Новосибирск – Новосибирск СГГА, 2005 – С 197 - 201
- 6 Комиссаров, А В Исследование лазерного сканера RIEGL LMS-Z360

[Текст]/ А В Комиссаров// ГЕО-Сибирь-2005 Т 5 Геодезия, картография, маркшейдерия сб материалов науч конгр , 25-29 апр 2005 г , Новосибирск – Новосибирск СГГА, 2005 – С 202 - 204

7 Комиссаров, А В Исследование стабильности работы блока лазерного дальномера сканера Riegl LMS Z-360 [Текст]/ А В Комиссаров// Сб науч тр аспирантов и молодых ученых Сиб гос геодез акад Вып 2/ Под общ ред Т А Широковой, СГГА -- Новосибирск, 2005 – С 62 - 66

8 Комиссаров, А В Определение метрических характеристик об объектах архитектурного наследия по данным наземного лазерного сканирования [Текст]/ А В Комиссаров, Д В Комиссаров// Материалы конф Междунар промышл форума GEOFORM+ «Геопространств технологии и сферы их применения» – 14-17 марта 2006 г , Москва – М , 2006 -- С 43 - 45

9 Комиссаров А В Точность построения цифровой модели рельефа по данным наземного лазерного сканирования [Текст]/ А В Комиссаров// Материалы конф Междунар промышл форума GEOFORM+ «Геопространственные технологии и сферы их применения» – 14-17 марта 2006 г , Москва – М , 2006 – С 47-48

10 Комиссаров, А В Мониторинг деформаций сооружений с использованием технологии наземного лазерного сканирования [Текст]/ А В Комиссаров, Д В Комиссаров// Материалы конф Междунар промышл форума GEOFORM+ «Геопространств технологии и сферы их применения» – 14 - 17 марта 2006 г , Москва – М , 2006 – С 45 - 47

11 Производство топографо-геодезических работ по созданию топографических планов и электрошных планов земельных участков, находящихся в пользовании ОАО «Сибнефть – Ноябрьскнефтегаз» [Текст]/ А В Комиссаров и др // Отчет о НТР Новосибирск – 2006 – 183 с № гос регистрации 012005 03279

12 Комиссаров, А В Исследование точности двух методов уравнивания линейно-угловых засечек [Текст]/ А В Комиссаров// Сб науч тр аспирантов и молодых ученых Сиб гос геодез акад Вып 3/ под общ ред Т А Широковой, СГГА – Новосибирск, 2006 – С 68 - 73

13 Комиссаров, А В Исследование точности построения цифровой модели рельефа [Текст]/ А В Комиссаров// ГЕО-Сибирь-2006 Т 5 Геодезия, картография, маркшейдерия сб материалов науч конгр , 24-28 апр 2006 г , Новосибирск – Новосибирск СГГА, 2006 – С 150 - 153

14 Комиссаров, А В Получение метрической информации об объектах архитектурного наследия по данным наземного лазерного сканирования [Текст]/ А В Комиссаров, Д В Комиссаров// Изв вузов Стр-во – 2006 – № 5 – С 112 - 115

15 Мониторинг деформаций сооружений в сочетании с технологией трехмерного моделирования [Текст]/ А В Комиссаров и др // Геодезия и картография – 2006 – № 6 – С 12-14

16 Комиссаров, А В Методика калибровки цифровых камер для наземных лазерных сканеров [Текст]/ А В Комиссаров, Д В Комиссаров// Геопрофи – 2006 – № 6 – С 30 - 32