

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»  
(СГУГиТ)

На правах рукописи

Семенцов Андрей Владимирович



Усовершенствование методики калибровки неметрических цифровых съемочных камер с использованием дополнительных геометрических условий

25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель –  
кандидат технических наук  
Никитин Вячеслав Николаевич

Новосибирск – 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 КАЛИБРОВКА КАМЕР ДЛЯ РЕШЕНИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ ЗАДАЧ.....	9
1.1 Общие сведения о цифровых фотоаппаратах .....	9
1.2 Применение цифровых камер в современной фотограмметрии .....	15
1.3 Общие сведения о калибровке камер .....	16
1.4 Обзор современных технологий калибровки .....	20
1.5 Проблемы при калибровке съемочных систем .....	29
1.6 Возможности решения проблем при калибровке камер за счет использования дополнительных геометрических условий.....	31
2 АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КАЛИБРОВКИ КАМЕР ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ.....	37
2.1 Определение параметров дисторсии объективов при калибровке камер .....	37
2.2 Обоснование возможности калибровки по плоскому тест-объекту .....	42
2.3 Исключение систематических погрешностей, вызванных нестрогим соблюдением геометрических условий в процессе калибровки .....	60
2.4 Технология исследования методик калибровки на основе использования макетных снимков.....	68
2.5 Разработка тест-объекта для калибровки цифровых съемочных систем .....	70
3 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ КАЛИБРОВКЕ СЪЕМОЧНЫХ СИСТЕМ .....	75
3.1 Проверка корректности усовершенствованной методики калибровки по плоскому тест-объекту с использованием макетных снимков.....	75
3.2 Проверка предложенной методики калибровки с использованием математической модели смещения центра фотографирования .....	78
3.3 Создание тест-объекта для калибровки съемочных систем .....	90

3.4 Экспериментальная проверка методик калибровки на основе реальных снимков тест-объекта.....	93
3.5 Общий анализ проведенных исследований.....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	106
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВКИ КАМЕРЫ ПО ПЛОСКОМУ ТЕСТ-ОБЪЕКТУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАКЕТНЫХ СНИМКОВ.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВКИ КАМЕРЫ SONY NEX-5R С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕАЛЬНЫХ СНИМКОВ .....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СРАВНЕНИЯ ВАРИАНТОВ КАЛИБРОВКИ.....	128

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность темы исследования.* В настоящее время для крупномасштабной аэрофотосъемки с применением беспилотных летательных аппаратов и наземной фотограмметрической съемки широкое применение находят неметрические цифровые съемочные камеры (НЦСК). Такие камеры характеризуются малой стоимостью и массой, компактностью, оперативностью построения изображения и контроля его качества, однако снимки, получаемые цифровыми съемочными камерами, особенно подвержены влиянию систематических погрешностей, возникающих из-за искажения связки проектирующих лучей, и потому изначально не предназначены для решения измерительных задач. Для учета таких искажений выполняется калибровка камер.

Калибровка съемочной камеры предполагает определение параметров дисторсии объектива и элементов внутреннего ориентирования.

Метод полевой калибровки по снимкам горного испытательного полигона является наиболее надежным и точным. Однако создание и поддержка в рабочем состоянии такого полигона сопряжены с огромными трудовыми и финансовыми затратами, а часто – и с отсутствием необходимого ландшафта в пределах комфортной досягаемости. Существующая методика не позволяет выполнить полную калибровку НЦСК по снимкам равнинного полигона. Использование малых калибровочных тест-объектов, размещаемых внутри помещений, не в полной мере соответствует условиям производственной съемки, поэтому не все факторы, влияющие на искажения снимков, могут быть учтены.

Таким образом, упрощение процесса проведения калибровки НЦСК, сокращение объемов работ и снижение затрат на ее выполнение на данном этапе развития фотограмметрии является актуальной научной задачей, решение которой может быть найдено при помощи дополнительно вводимых геометрических условий.

*Степень разработанности темы.* Изучением решения задачи калибровки съемочных камер занимались отечественные ученые: Амромин П. Д., Антипов И. Т., Гук А. П., Дубиновский В. Б., Журкин И. Г., Лобанов А. Н., Малявский Б. К.,

Михайлов А. П., Погорелов В. В., Тюфлин Ю. С., Чибуничев А. Г. и др. Большой вклад в развитие теории и практики процесса калибровки внесли зарубежные ученые: Brown D., Grun A., Jacobsen K., Ackermann F., Norton C. и др.

В настоящее время предложено множество способов полной и частичной калибровки съемочных систем. Особое внимание уделено полевым методам калибровки, так как определение главных параметров непосредственно в полете выполняется при температурных, барометрических, вибрационных и прочих условиях, соответствующих съемке на реальном объекте работ. Если положение центра проектирования неизвестно, полная калибровка возможна только по снимкам горного испытательного полигона. По снимкам полигона, расположенного в равнинной местности, осуществима лишь частичная калибровка – определение параметров дисторсии при известных элементах внутреннего ориентирования. В ряде работ профессором Дубиновским В. Б. высказана идея калибровки путем совместного ориентирования нескольких снимков с большими взаимными углами наклона. Однако корректное математическое обоснование этой идеи отсутствует.

*Цель и задачи исследования.* Целью исследования является усовершенствование методики калибровки НЦСК на основе использования дополнительных геометрических условий для снятия ограничений на пространственные характеристики лабораторного тест-объекта или испытательного полигона.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие основные научно-технические задачи:

- выполнить анализ современных методик калибровки тест-объектов и испытательных полигонов, применяемых для калибровки НЦСК;
- теоретически обосновать возможность калибровки НЦСК по снимкам плоского тест-объекта;
- усовершенствовать существующую методику калибровки НЦСК на основе использования дополнительных геометрических условий;
- разработать тест-объект для реализации усовершенствованной методики калибровки НЦСК;

– произвести апробацию усовершенствованной методики калибровки НЦСК на основе макетных и реальных снимков.

*Объект и предмет исследования.* Объектом исследования является процесс калибровки НЦСК.

*Предметом исследования* является методика калибровки НЦСК с использованием дополнительных геометрических условий.

*Научная новизна* диссертационного исследования заключается в следующем:

– усовершенствована существующая методика калибровки НЦСК на основе использования дополнительных геометрических условий, отличающаяся от существующей возможностью использования плоских лабораторных тест-объектов и испытательных полигонов, расположенных в равнинной местности;

– разработана математическая модель штативной головки, позволяющая исключить влияние смещения центра фотографирования на точность определения параметров калибровки по снимкам плоского тест-объекта, полученным из одной точки пространства.

*Теоретическая и практическая значимость работы.*

*Теоретическая значимость* исследований состоит в том, что теоретически обоснована возможность и определены условия съемки для калибровки НЦСК по снимкам плоского тест-объекта; усовершенствована методика и разработан алгоритм калибровки НЦСК, основанные на использовании дополнительных геометрических условий, что позволяет снять ограничение на перепад высот точек тест-объекта; разработана математическая модель штатива, обеспечивающая калибровку НЦСК по серии снимков плоского тест-объекта, полученных из одной точки пространства.

*Практическая значимость* работы заключается в том, что применение усовершенствованной методики калибровки НЦСК позволяет сократить затраты и объем работ на создание испытательного полигона за счет снятия ограничений на перепад высот точек тест-объекта, а также использовать имеющиеся геодези-

ческие полигоны. Разработанный алгоритм калибровки НЦСК реализован в программном комплексе на языке Object Pascal.

*Методология и методы исследования.* Для решения поставленных задач использованы теория линейной и матричной алгебры, теория фотограмметрической обработки снимков, теория вероятностей и математической статистики, методы математического моделирования и статистической обработки результатов измерений. Эмпирической базой исследований служили макетные и реальные снимки.

При проведении экспериментальных работ применялось программное обеспечение: система компьютерной алгебры Mathcad, вычислительная среда программирования Equilibrium, программный продукт MonoSDS, средства Microsoft Office.

*Положения, выносимые на защиту:*

– усовершенствованная методика калибровки НЦСК с использованием дополнительных геометрических условий;

– математическая модель штативной головки, описывающая смещение центра фотографирования при получении нескольких снимков плоского тест-объекта с разными углами наклона из одной точки пространства.

*Соответствие диссертации паспорту научной специальности.*

Диссертация соответствует областям исследования: 1 – Теория получения изображений; 2 – Разработка и исследование технических средств и технологий, фиксирующих в виде изображений различные элементы объектов исследований паспорта научной специальности 25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

*Степень достоверности и апробация результатов исследования.* Достоверность полученных результатов подтверждена корректной математической обработкой макетных и реальных снимков.

Результаты выполненных исследований и основные положения диссертации обсуждались и были одобрены на международных научных конгрессах «Интер-экспо ГЕО-Сибирь» (2012–2015 гг., Новосибирск).

Разработанная методика калибровки НЦСК по снимкам плоского тест-объекта внедрена в производственный процесс в ООО «Беспилотные технологии» и в ООО Геофизическое предприятие «Сибгеотех», где применяется для калибровки неметрических камер фотограмметрического стереофотодалъномера.

*Публикации по теме диссертации.* Основные результаты исследований представлены в 10 научных работах, три из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

*Структура диссертации.* Общий объем диссертации составляет 130 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы, включающего 72 наименования, содержит 7 таблиц, 54 рисунка и 3 приложения.

# 1 КАЛИБРОВКА КАМЕР ДЛЯ РЕШЕНИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

## 1.1 Общие сведения о цифровых фотоаппаратах

*Краткое сравнение цифровых и аналоговых фотоаппаратов.* Благодаря современному развитию технологий цифровые камеры повсеместно, как в производстве, так и в быту, практически полностью заменили традиционные пленочные фотоаппараты [6]. Это обусловлено рядом факторов. Так, для получения изображения высокого качества (которое может обеспечить выбранная модель фотоаппарата), необходимо выполнить предварительную настройку параметров съемки – установить скорость срабатывания затвора, задать апертуру диафрагмы, настроить режим вспышки или выбрать оптический фильтр при необходимости и так далее. Однако итоговое качество изображения в значительной степени зависит и от возможностей светочувствительной поверхности – носителя информации. Пленка, как правило, неоднородна по полю тона и подвержена деформации (особенно в широкоформатных камерах). Такие изображения плохо поддаются корректировке. Кроме того, в настоящее время фотограмметрическая обработка снимков производится на цифровых фотограмметрических станциях (ЦФС), поэтому для цифровой обработки требуется сканирование пленки, что часто приводит к потере качества, информации и точности [53].

Процесс получения снимков с помощью цифровых камер, в сравнении с аналоговыми, отличается гораздо большей гибкостью [6]. Так, оператор может вносить изменения в качество получаемых изображений непосредственно в ходе съемки, например, выполнять виньетирование, т. е. исправлять колебание яркости по полю изображения и другое, в зависимости от изменяющихся условий съемки. Длительность полного цикла обработки цифровых изображений сокращается до нескольких часов, в то время как обработка пленки может продолжаться несколько дней. Также следует отметить, что измерения в автоматическом режиме по снимкам, полученным цифровой камерой, выполняются с большей точностью, чем по отсканированным аналоговым снимкам.

Все это обусловило постепенное замещение аналоговых фотоаппаратов цифровыми и сейчас этот процесс практически завершен.

*Классификации цифровых камер.* Существует несколько классификаций цифровых камер. Одна из наиболее употребляемых на сегодняшний день – это классификация по размеру результирующего изображения (по формату кадра) [61]:

- крупноформатные – камеры с размером матрицы или результирующего кадра от 150 до 200 мегапикселей;

- среднеформатные – как правило, односенсорные камеры, имеющие размер матрицы от 60 до 80 мегапикселей;

- камеры с промежуточным размером матрицы от 90 до 140 мегапикселей, например, UltraCamLp (Microsoft-Vexcel) или RMK-DX (Z/I Imaging), можно отнести к суперсреднеформатным. Суперсреднеформатные камеры — это более доступные по цене, облегченные версии крупноформатных камер тех же производителей;

- малоформатные – все камеры с размером матрицы менее 50 мегапикселей.

Следует отметить, что границы этих типов условны и постепенно смещаются в сторону больших значений по мере развития цифровых технологий и появления матриц большего размера.

Все фотоаппараты можно условно разделить на две большие группы: метрические и неметрические [54].

Под метрическими (фотограмметрическими) цифровыми камерами подразумеваются такие цифровые фотоаппараты, которые предназначены для получения снимков с целью создания измерительных документов и получения измерительной информации. Подобные камеры оснащаются высококачественной сменной оптикой, обладающей небольшими искажениями (дисторсией). В паспорте камеры указываются исходные (на момент создания камеры) значения элементов внутреннего ориентирования. Метрические камеры это крупноформатные, суперсреднеформатные (согласно приведенной выше классификации) и, нередко, среднеформатные камеры.

Метрические камеры можно разделить по методу съемки (по геометрической модели снимка) на [61]:

– кадровые односенсорные (рисунок 1), где результирующий кадр формируется одной матрицей (RCD30 фирмы Leica Geosystems, CS-10000 фирмы Optech Inc.);

*a)**б)*

Рисунок 1 – Примеры кадровых односенсорных камер:

*a)* RCD30 с одной головкой; *б)* CS-10000

– кадровые многосенсорные (рисунок 2), где результирующий кадр — интегрированное изображение по данным от нескольких сенсоров (Ultracam D, Ultracam X фирмы Microsoft-Vexcel, серия DMC фирмы Z/I Imaging);

*a)**б)*

Рисунок 2 – Примеры кадровых многосенсорных съемочных систем:

*a)* DMC II 230; *б)* Ultracam Eagle

– авиационные фотосканеры (рисунок 3), которые генерируют вместо снимков фиксированного размера «цифровой ковер» произвольной длины (ADS 80 и ADS 100 фирмы Leica Geosystems, 3-DAS-1 от НПП «Геосистема»).



Рисунок 3 – Примеры авиационных фотосканеров:

а) ADS 80; б) 3-DAS-1

Отдельно можно выделить аэросъемочную систему А3 фирмы Visionmap (рисунок 4) – это кадровая многосенсорная камера плавного вращения [61]. За счет вращения объективов поперек линии полета и сверхбыстрого фотографирования А3 снимает за одно вращение очень широкую полосу, используя всего два объектива и два сенсора небольшого формата.



Рисунок 4 – Камера А3 Edge

Большинство метрических камер оснащено центральным затвором.

Неметрические камеры, в свою очередь, представлены малоформатными и среднеформатными образцами. Это относительно недорогие и доступные цифровые камеры, которые по точности результатов не в состоянии конкурировать со специальной аппаратурой, но имеется широкий круг задач, где они могут успешно применяться. Например, при построении трехмерной модели объекта с использованием методов наземной съемки или при аэрофотосъемке малыми летательными аппаратами. Тут следует отметить, что неметрические цифровые камеры позволяют получать снимки, которые не являются источником измерительной информации. Такие снимки используются в художественной фотографии, для публикаций в средствах массовой информации, для бытового фотографирования и во многих других областях. Но, при необходимой фотограмметрической обработке камеры, снимки, полученные ею, можно будет использовать для решения фотограмметрических – измерительных – задач.

Неметрические камеры можно разделить на несколько типов:

– среднеформатные зеркальные фотоаппараты (Hasselblad HxD фирмы Victor Hasselblad, PhaseOne 645DF фирмы PhaseOne). Представлены камеры как с центральным затвором, так и со шторно-щелевым. Качество оптики камер этого типа колеблется от хорошего до высокого. На рисунке 5 приведены примеры таких камер;



Рисунок 5 – Примеры среднеформатных зеркальных фотоаппаратов:

а) PhaseOne 645DF; б) Hasselblad H5D-40

– малоформатные зеркальные фотоаппараты (EOS 600D фирмы Canon, D7100 фирмы Nikon) и гибридные беззеркальные (Alpha NEX-5 фирмы Sony, NX30 фирмы Samsung). Такие камеры (рисунок 6) в большинстве случаев оборудованы шторно-щелевыми затворами, качество оптики – от среднего до хорошего;



Рисунок 6 – Примеры малоформатных зеркальных и гибридных беззеркальных фотоаппаратов: *а)* Canon EOS 600D; *б)* Sony Alpha NEX-5

– малоформатные линзовые фотоаппараты с несменной оптикой (SP-820UZ фирмы Olympus, WB250F фирмы Samsung). Такие камеры (рисунок 7) оснащены электронным затвором и матрицей очень малого формата. Качество оптики – от плохого до среднего.



Рисунок 7 – Примеры малоформатных линзовых фотоаппаратов с несменной оптикой: *а)* Samsung WB250F; *б)* Olympus SP-820UZ

В настоящее время для решения ряда прикладных фотограмметрических задач очень часто применяют неметрические фотоаппараты гибридного типа и малоформатные зеркальные фотоаппараты [37].

## 1.2 Применение цифровых камер в современной фотограмметрии

Традиционно камеры используются в фотограмметрии для топографической аэросъемки [13, 14]. Аэрофотосъемка выполняется метрическими камерами, которые создаются именно для этой цели. Однако благодаря развитию технологий крупномасштабное аэрофотографирование малых объектов все чаще выполняется с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [5, 30, 52, 55]. Понятно, что использовать фотограмметрические камеры на БПЛА нецелесообразно в плане затрат и попросту невозможно из-за их габаритов и массы. Уменьшить стоимость съемочного оборудования позволяет использование неметрических цифровых камер, которые также характеризуются простотой и оперативностью получения цифрового изображения, оперативным контролем качества изображения, малой массой и компактностью [16, 17].

Благодаря широкому распространению цифровых съемочных систем наземная фотограмметрия пережила второе рождение. Она все чаще используется для решения задач по построению трехмерных моделей объектов [1]. Этот метод съемки по сравнению с другими методами, такими как, например, наземное лазерное сканирование, фасадная съемка с помощью электронных тахеометров, является наиболее доступным, так как не требует применения дорогостоящего оборудования, но при этом позволяет построить модель объекта с заданной точностью.

Часто наземную фотосъемку комбинируют с другими методами сбора информации, например с наземным лазерным сканированием.

Наземная фотограмметрия применяется не только в топографии, но и в других областях науки и техники, что объясняется быстротой фотосъемки в сочетании с объективностью и высокой точностью получаемых результатов [28]. На-

пример, успешно используется при строительных изысканиях в горных условиях – при съемке крутых горных склонов и скальных утесов по берегам рек [2]. По снимкам можно успешно определять объемы выработки материалов, оценивать ситуацию на угольных карьерах, выполнять анализ деформации сооружений [57].

Также наземная фотограмметрия оказалась точным методом, позволяющим быстро определить траекторию полета снаряда и его скорость движения на различных участках траектории [27]. При испытании моделей гидротехнических сооружений измеряются основные характеристики водного потока (глубина потока, скорость и траектория движения струй) – все эти параметры также можно определить с помощью стереофотограмметрической съемки. Наиболее быстрым и объективным методом проверки состояния железнодорожного пути является наземная маршрутная стереофотограмметрическая съемка с небольшой высоты во время движения поезда. Наземная стереофотограмметрическая съемка применяется в измерительной технике при определении микрогеометрии и дефектов деталей машин и приборов и во многих других областях для решения задач топографии, кадастра, мониторинга линейных объектов, архитектуры и строительства.

Применение неметрических съемочных систем для решения фотограмметрических задач требует их предварительной калибровки, т. е. определения параметров внутреннего ориентирования и дисторсии.

### 1.3 Общие сведения о калибровке камер

Точность фотограмметрических работ значительно ограничивается систематическими погрешностями используемых снимков. К числу таких погрешностей относятся искажения снимков, вызванные нарушением центральной проекции [4, 24]. В большей степени речь идет о дисторсии объектива и несоответствии главной точки снимка центральной точке. Обработывая результаты измерений, выполненных по снимкам, важно правильно учесть эти искажения.

Отклонения фактических параметров центральной проекции от принятых приводят к одинаковым искажениям центральной проекции всех снимков, полу-

ченных камерой в одинаковых условиях, и носят систематический характер [15]. Также присутствует случайная составляющая погрешностей.

В различных оптических системах поперечное увеличение несколько изменяется по мере удаления от оптической оси, что приводит к аберрации точек изображения, называемой дисторсией. В результате дисторсии прямые на краях поля зрения изображаются кривыми. Дисторсию с возрастающим от оптической оси увеличением называют подушкообразной, а с убывающим – бочкообразной (рисунок 8), по характеру смещения подразделяют на радиальную и тангенциальную [19].

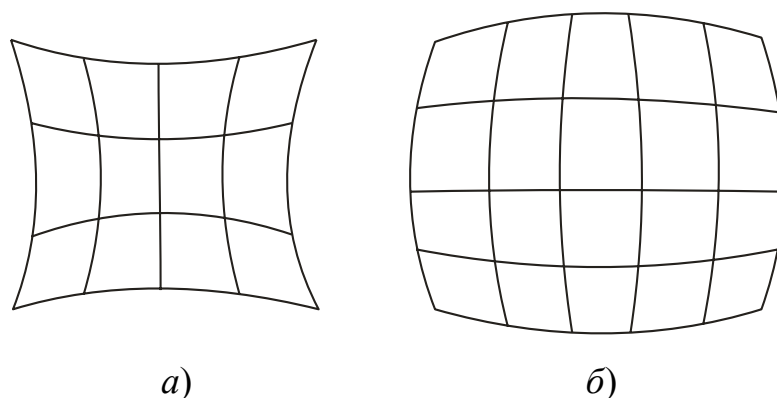


Рисунок 8 – Дисторсия объектива: а) подушкообразная; б) бочкообразная

Анализ погрешностей в координатах точек снимков свидетельствует о том, что систематические погрешности  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  центральной проекции всех снимков, полученных в одних и тех же условиях (например, при маршрутной или площадной аэрофотосъемке) будут практически одинаковы. Это значит, что систематические искажения координат всех точек, которые имеют одно и то же положение на снимках, будут равны. Изменение величины искажений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  при переходе от одной точки снимка к другой происходит хотя и по сложному закону, но, как правило, монотонно. Определить систематические искажения для каждой точки каждого снимка, имеющей свои координаты, невозможно из-за того, что при решении любой фотограмметрической задачи для каждой точки снимка будет добавляться по два новых неизвестных в решаемые уравнения и в любом случае число неиз-

вестных будет больше числа уравнений, и, следовательно, такую систему решить невозможно.

Для решения этой ситуации традиционно используется один из двух способов: параметрический (способ полиномов) и зонный.

Способ зон основан на том, что искажения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  для всех точек снимка, расположенных в пределах некоторой его области, могут быть приняты равными. Эти области называются зонами (рисунок 9). При этом количество зон может быть определено на основе анализа законов возникновения некоторых известных систематических погрешностей и предполагаемой их количественной оценки.

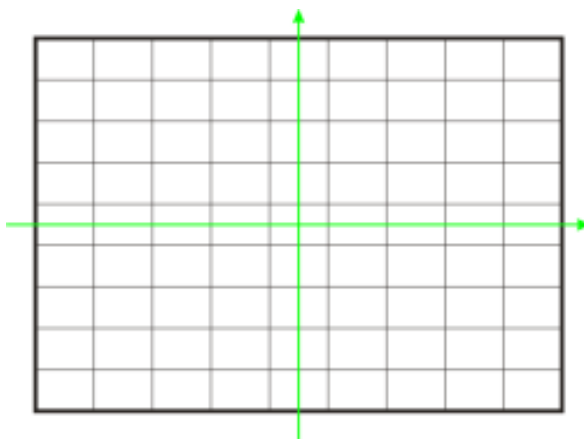


Рисунок 9 – Пример деления снимка на зоны

Недостатком принципа зон является то, что при переходе к смежной зоне искажения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  изменяются скачкообразно, но в пределах заданного допуска, что может сказаться на учете сложного характера распределения искажений. Несмотря на это, способ зон позволяет наилучшим образом учесть несимметричные в пределах всего снимка искажения.

Наиболее широко распространен полиномиальный вариант учета дисторсии снимка. Он основан на определении коэффициентов полиномов, характеризующих искажения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  координат точек в пределах снимка.

В общем виде полином дисторсии может быть описан следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \sigma x &= \varphi_x(c_x, x, y); \\ \sigma y &= \varphi_y(c_y, x, y), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $c_x, c_y$  – коэффициенты полинома.

Вид полиномов и число членов в нем зависят от характера систематических искажений точек снимков, количества и расположения опорных и определяемых точек.

Но в большинстве случаев практически невозможно точно установить вид и число членов интерполяционной функции, соответствующей реальным, чаще несимметричным, искажениям снимков. Поэтому полиномы имеют разнообразные виды, подходящие для конкретных случаев. Стоит помнить, что при неверно подобранной математической модели описания дисторсии результатом обработки могут стать параметры, которые приведут к еще большим искажениям снимков [64].

Помимо учета искажений, вызванных дисторсией, при фотограмметрической обработке снимков важной задачей является восстановление связки проектирующих лучей, существовавшей в момент фотографирования. Для этого нужно найти положение центра проекции относительно снимка, т. е. определить элементы внутреннего ориентирования – координаты главной точки  $x_0, y_0$  и фокусное расстояние  $f$  объектива (рисунок 10).

Существуют такие понятия, как полная калибровка и неполная (частичная) калибровка камеры. При выполнении полной калибровки определяются параметры дисторсии объектива и элементы внутреннего ориентирования камеры. В процессе частичной калибровки в качестве неизвестных выступают не все параметры, а лишь часть.

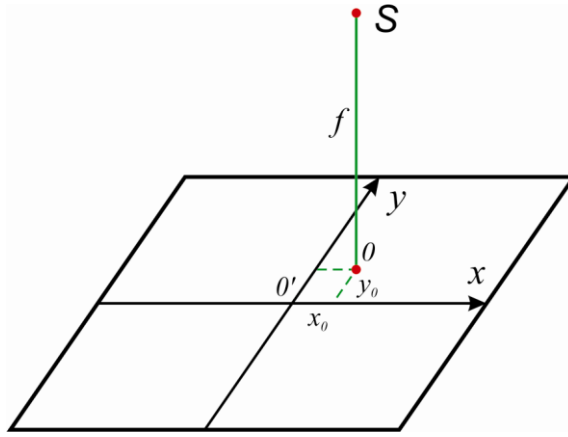


Рисунок 10 – Элементы внутреннего ориентирования камеры

Принципиально калибровку можно производить при решении всех известных задач: обратной пространственной засечки, построения одиночной модели, маршрутной и блочной фотограмметрических сетей, трансформирования одиночных и пары снимков (взаимное ориентирование).

#### 1.4 Обзор современных технологий калибровки

Вариантов калибровки существует довольно много [15, 25], но все они в конечном счете делятся на две группы: лабораторные и полевые. К лабораторным, как правило, относятся методы, использующие для решения задачи пространственные оптические скамьи, фотогониометры, системы коллиматоров и т. п. Положение пучка проецирующих лучей в этом случае определено априори, так как известно относительное положение центра фотографирования и марок (целей). Однако параметры калибровки камеры, полученные в лабораторных условиях, часто не являются в достаточной степени достоверными. Это объясняется различием условий лабораторной калибровки и реальных условий фотографирования (особенно если речь идет об использовании камер для аэрофотосъемки).

В свою очередь, при выполнении полевой калибровки внешние условия учитываются в большей степени. Если говорить об аэрофотосъемке, то к таким условиям можно отнести температуру, давление, нагрузки на основные узлы камеры и вибрацию.

Известно также, что дисторсия напрямую связана с фокусным расстоянием, поэтому для повышения точности определения параметров калибровки следует использовать настройки камеры, идентичные или максимально приближенные к реальным условиям фотографирования. При калибровке камер, оснащенных объективом с трансфокатором, следует отключать возможность автофокусировки и физически фиксировать положение объектива.

Известна технология калибровки, суть которой заключается в учете систематических искажений координат аэроснимка в процессе уравнивания сети фото-триангуляции, построенной по способу связок. Такой подход называется самокалибровкой. Сущность его состоит в том, что в процессе уравнивания с использованием условия коллинеарности проектирующих лучей одновременно определяются поправки к приближенным элементам внешнего ориентирования, координатам точек местности, элементам внутреннего ориентирования и суммарные поправки к координатам точек за влияние всех источников систематических погрешностей [23].

Главным достоинством способа самокалибровки является отсутствие необходимости создавать специальный калибровочный полигон, так как все измерения производятся по полевым снимкам, для которых подбирается аппроксимационная модель, призванная исключить систематические погрешности из координат точек, измеренных на снимках.

Большинство же существующих технологий калибровки предполагают получение снимков тест-объектов (калибровочных полигонов) с замаркированными метками, координаты которых определяются с высокой точностью. Затем производится определение координат марок, отобразившихся на снимках, в системе координат цифрового изображения. После чего выполняется процесс уравнивания полученных данных на основе условия коллинеарности проектирующих лучей.

К таким технологиям в первую очередь следует отнести калибровку камер по снимкам испытательного полигона, который представляет собой участок на местности с большим количеством равномерно распределенных по всей площади специальных марок, координаты которых определены геодезическим путем. Вза-

имное превышение между высотами точек полигона должно превышать 20 % от высоты фотографирования. Результаты калибровки, выполненной по калибровочному полигону, обладают, как правило, высокой точностью и надежностью.

Кроме того, в процессе съемки можно определять положения центров фотографирования с использованием ГНСС-технологий, что снимет ограничение на перепад высот точек полигона, однако возникнет задача измерения параметров эксцентриситета фазового центра антенны относительно центра фотографирования. Это может быть сопряжено с определенными сложностями, особенно если речь идет об аэрофотосъемке малыми летательными аппаратами.

Еще одна технология калибровки, подразумевающая получение снимков по калибровочному полигону, представлена в Западно-Сибирском филиале ОАО «Госземкадастрсъемка» – ВИСХАГИ, г. Омск. Сотрудниками этого предприятия предложен вариант калибровки по плоскому калибровочному полигону с двух высот фотографирования, при этом вычисляется разность этих высот с помощью бортовой системы спутниковой навигации [22, 40]. При обработке данных решаются совместно уравнения коллинеарности, составленные для пар разномасштабных снимков, в сочетании с уравнениями разности высот фотографирования. Авторами технологии был создан и поддерживается в рабочем состоянии полигон размером  $1 \times 1$  км, составленный из 441 точки со средним превышением около двух метров.

В случае отсутствия возможности (или потребности) создать калибровочный полигон на местности калибровка выполняется по снимкам стационарных тест-объектов, располагаемых в помещениях. Перепад глубины дальностей точек (рельефность) тест-объектов достигается геометрией поверхности (размещение марок на поверхностях основных конструктивных частях помещений, выступающих частях тест-объекта).

Существует мнение, что технологии калибровки камер по снимкам тест-объектов, расположенных в помещениях, следует использовать для определения параметров калибровки камер, предназначенных для выполнения наземной съем-

ки, так как условия фотографирования несколько отличаются от условий производственной аэрофотосъемки.

Одна из таких технологий представлена компанией Vexcel [70]. Тест-объект, используемый для калибровки камер, изображен на рисунке 11. Съемка выполняется из трех точек пространства. При этом из каждой точки съемки получают несколько снимков с разными углами наклона, а также снимки с разворотом в  $90^\circ$ . Измерения координат марок тест-объекта на снимках осуществляются в автоматическом режиме. Уравнивание выполняется в программном комплексе BINGO.

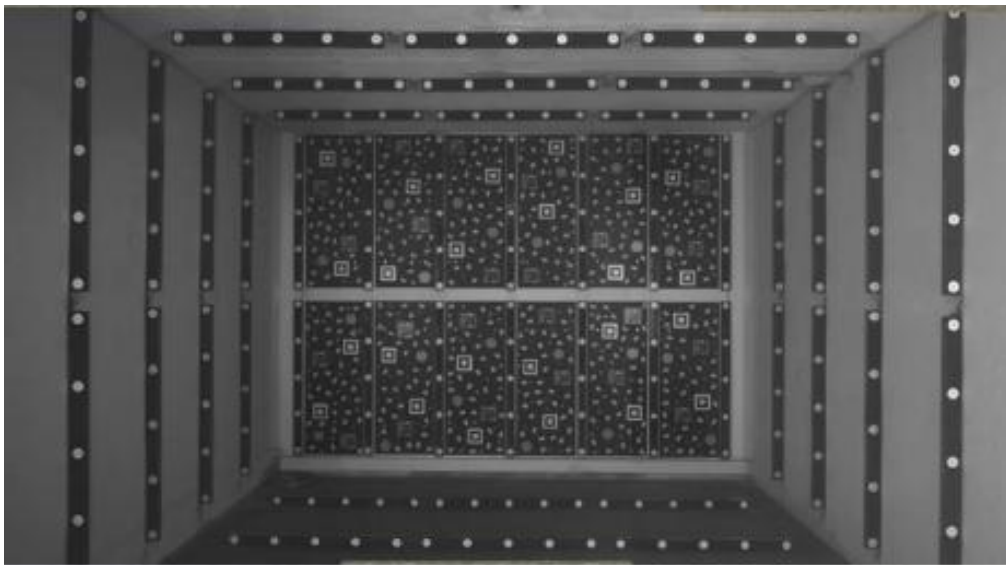


Рисунок 11 – Тест-объект компании Vexcel

Особенность технологии калибровки, применяемой в МИИГАиК, состоит в том, что все параметры определяются в результате многократного совместного решения обратной фотограмметрической засечки по способу наименьших квадратов по снимкам пространственного тест-объекта (представленного на рисунке 12) с избыточностью измерений порядка 20 раз, что обеспечивает высокую точность определений [31]. Обработка выполняется в программе Calibration. Измерения плоских координат марок тест-объекта выполняются в ручном режиме.



Рисунок 12 – Тест-объект МИИГАиК

В ДонНТУ для калибровки цифровых камер используется тест-объект, показанный на рисунке 13 [45, 7].



Рисунок 13 – Тест-объект ДонНТУ

Фотографирование выполняется из нескольких точек (порядка 10). На каждой точке получают по два снимка – прямой и с поворотом на  $90^\circ$ . Полученные стереопары обрабатываются на цифровой фотограмметрической станции Delta фирмы GeoSystem. Дальнейшая обработка выполняется в программном комплексе DONETSKFOTO по методу связок (то есть с применением условия коллинеарности) [39].

Технология калибровки цифровых камер НПП «Фотограмметрия» также подразумевает получение снимков пространственного тест-объекта (рисунок 14), координаты марок которого определены с высокой точностью геодезическим путем [56]. Обработка данных выполняется в программном комплексе PhotoTransformer Professional [10].

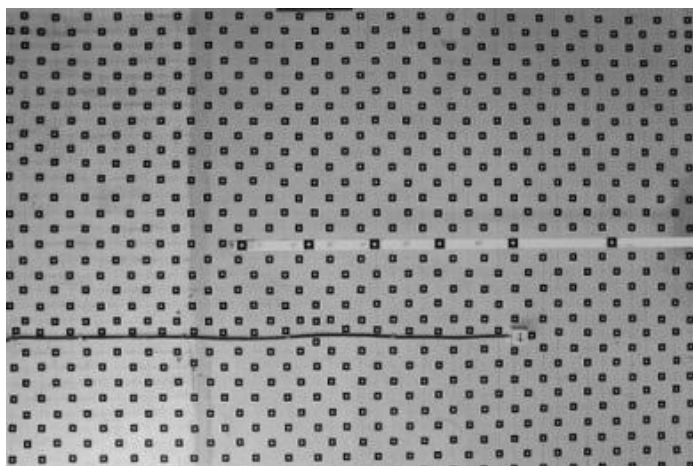


Рисунок 14 – Тест-объект НПП «Фотограмметрия»

В лаборатории аэрокосмических методов при МГУ имени М. В. Ломоносова для калибровки используются как пространственный, так и плоский тест-объект [11]. При малых значениях дисторсии калибровка выполняется по одному снимку рельефного тест-объекта, а для цифровых неметрических камер с большой дисторсией необходимы два снимка – плоского и рельефного тест-объекта. Для контроля используется дополнительная стереопара. Причем два вида тест-объектов могут сочетаться вместе, как это показано на рисунке 15.

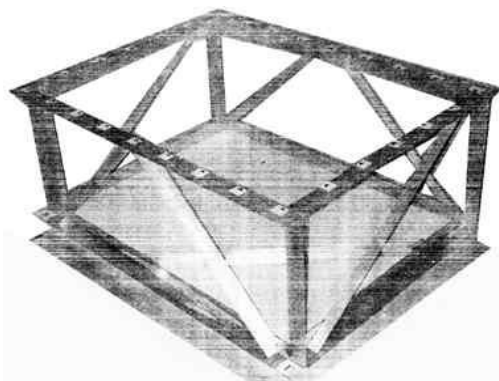


Рисунок 15 – Пример тест-объекта лаборатории аэрокосмических методов

В Западно-Сибирском филиале ОАО «Госземкадастрсъемка» – ВИСХАГИ помимо технологии калибровки по полигону, расположенному на местности, схожим образом выполняется калибровка и по тест-объекту в лабораторных условиях. Для этого фотографируется калибровочная сетка плоского тест-объекта и в программе Photomod ScanCorrect создается модель искажений снимка. Как и в случае с калибровкой по полигону, используются снимки, полученные на разных расстояниях от тест-объекта. Для выполнения данного условия используется фотоувеличитель «Беларусь».

В соответствии с полученной моделью искажений выполняется исправление материалов аэросъемки (рисунок 16).

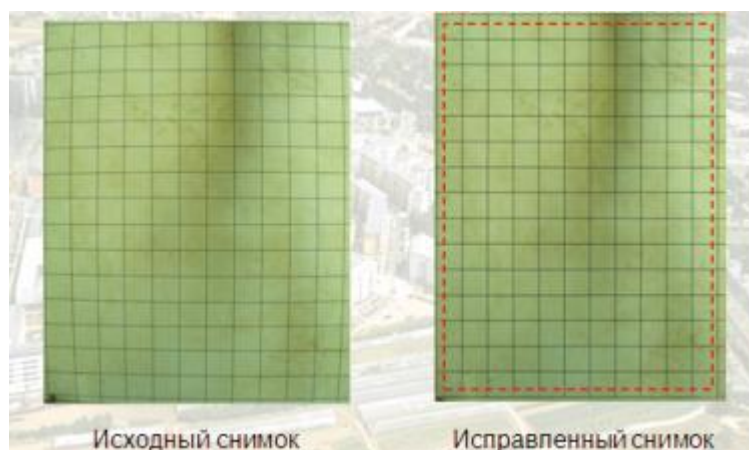


Рисунок 16 – Пример исправления искажений снимка калибровочной сетки

Существует ряд технологий, предполагающих получение снимков плоских тест-объектов. При этом измерение точек тест-объекта во внешней системе координат не выполняется.

Одна из таких технологий предлагается компанией «Eos Systems Inc.» (Канада) [71]. Разработчики программного комплекса PhotoModeler предлагают использовать тест-объект, распечатанный на обычной бумаге формата от А4 до А1. Как вариант, изображение тест-объекта может проецироваться на экран с помощью проектора. В зависимости от «класса» камеры выбирается размер тест-объекта и количество марок (рисунок 17). Тест-объект размещается на полу и фо-

тографируется со штатива с четырех разных точек по три приема с поворотом камеры на  $90^\circ$  вправо и влево. Благодаря наличию уникальных марок на тест-объекте, программа обработки автоматически определяет ориентацию тест-объекта на снимке и выполняет измерения точек.

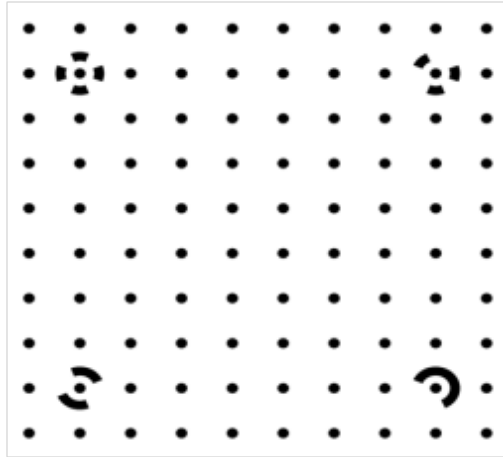


Рисунок 17 – Один из вариантов шаблона тест-объекта PhotoModeler

Подобный подход используется в технологии калибровки, предлагаемой разработчиками программного комплекса Topcon Image master [42]. Съемка выполняется по тест-объекту, представленному на рисунке 18.

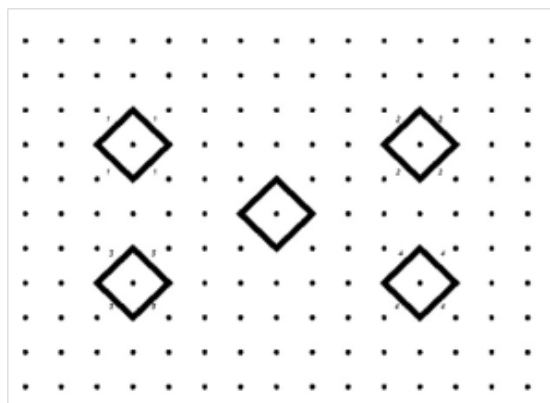


Рисунок 18 – Тест-объект Topcon Image master

Разработчики программного комплекса GML Camera Calibration Toolbox (сотрудники лаборатории компьютерной графики и мультимедиа при факультете

ВМК МГУ) [26], а также сотрудники компании Datumate (Израиль) [20], предлагают аналогичные технологии, но в качестве тест-объекта рекомендуют использовать лист, имеющий шашечную структуру, как это показано на рисунке 19.

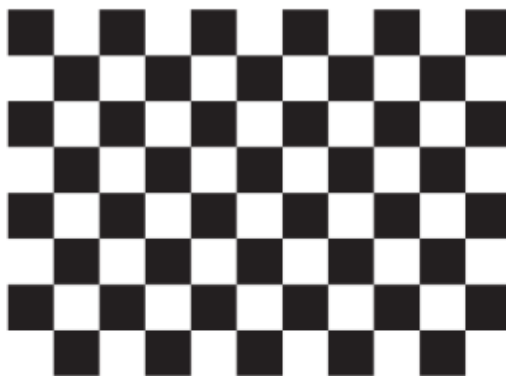


Рисунок 19 – Пример тест-объекта с шашечной структурой

В обоих случаях предлагается выполнять съемку с нескольких точек вокруг поверхности тест-объекта с разным разворотом камеры – 0, 45 и 90°.

Технология калибровки, представленная разработчиками программного продукта Agisoft Lens [65], также предполагает использование тест-объекта с шашечной структурой, но его не распечатывают, а съемку выполняют непосредственно с экрана монитора. Математические принципы обработки результатов измерений в таких способах калибровки не раскрываются.

Помимо вышеперечисленных технологий калибровки существуют и технологии, в основу которых положена съемка естественных тест-объектов, таких как звездное небо [67, 72], где в качестве точек тест-объекта выступают отобразившиеся на снимке звезды [34]. Из каталогов звезд получают необходимые данные, такие как прямое восхождение и склонение, значения которых впоследствии пересчитываются в прямоугольную систему координат. Далее измеряются координаты звезд на снимках и выполняется уравнивание на основе условия коллинеарности проектирующих лучей.

Несмотря на все многообразие существующих технологий калибровки камер, все они имеют определенные границы применимости и не всегда позволяют достоверно, оперативно и эффективно решать задачу калибровки.

### 1.5 Проблемы при калибровке съемочных систем

При выполнении процесса калибровки зачастую существует ряд факторов, которые могут негативно повлиять на результат работы. Как правило, эти ограничения заложены в соответствующих технологиях калибровки. Однако определенные проблемы при калибровке могут проявиться и при неточном соблюдении условий выбранной технологии калибровки и при недостаточно точном определении опорных данных или идентификации точек снимаемых тест-объектов.

Так, наиболее распространенная проблема при калибровке съемочных систем – это невозможность выполнения полной калибровки, т. е. определения как параметров дисторсии объектива, так и значений элементов внутреннего ориентирования камеры. Примером может служить описанная в предыдущем пункте методика выполнения двухъярусной съемки плоского испытательного полигона с использованием ГНСС [8], где координаты главной точки исключаются из состава неизвестных и принимаются равными координатам центральной точки кадра [3, 9]. Также известно, что при использовании калибровочного полигона с недостаточным перепадом высот точек выполнение полной калибровки станет невозможным из-за неоднозначности определения элементов внутреннего ориентирования [4, 25]. Существует ряд примеров (приведенных, в том числе, в 1.4), когда калибровка выполняется по плоскому тест-объекту без использования координат точек снимаемого тест-объекта, определенных геодезическим путем, однако ряд ученых ставят такие методы калибровки под сомнение с научной точки зрения [4]. Также стоит отметить, что малый размер ( $A1$ ,  $A0$ ) используемых тест-объектов нарушает подобие условий фотографирования при калибровке и при выполнении аэрофотосъемки или наземной съемки, что также в некоторой степени может сказаться на результатах калибровки.

Некоторые способы, как, например, способ калибровки по снимкам звездного неба, зависят от погодных условий и места съемки (звездный небосвод, отсутствие городской засветки, луны, облачности и различной дымки и другое). Кроме того, для получения снимков звездного неба съемочная система должна обладать достаточно хорошей оптикой и возможностью осуществления длительных выдержек в процессе фотографирования.

В случае калибровки составных съемочных систем возникает вопрос синхронизации срабатывания затворов, что, в свою очередь, может быть связано с рядом трудностей. Если синхронизация не достигнута, то качество выполнения калибровки таких систем в полете может снижаться. Если речь идет о способах калибровки, подразумевающих получение нескольких снимков из одного центра фотографирования, то калибровка камеры в полете вовсе не представляется возможной.

При создании полигонов больших площадей для выполнения калибровки в полете, как предусмотрено одним из основных способов калибровки аэрофото-съемочных камер под условием коллинеарности проектирующих лучей, требуется обеспечить разность превышений точек полигона в 0,2 высоты фотографирования. То есть даже при съемке с высоты 500 м превышение составит 100 м, а с высоты 1 000 м – соответственно 200 м. При этом следует отметить, что при создании такого полигона должна обеспечиваться высокая плотность точек. Создание и дальнейшее поддержание в рабочем состоянии такого полигона представляется крайне сложным, ресурсоемким и трудоемким процессом. Затратным также является процесс порожнего перелета самолетов-аэрофотосъемщиков (таких как АН-2) до места расположения калибровочного полигона.

Все вышеперечисленное усложняет или существенно ограничивает процесс калибровки камер. Однако часть проблем может быть решена, если при калибровке использовать дополнительные требования к условиям фотографирования или особенностям расположения точек тест-объекта, т. е. вводить дополнительные геометрические условия.

## 1.6 Возможности решения проблем при калибровке камер за счет использования дополнительных геометрических условий

### *Дополнительные геометрические условия в геодезии и фотограмметрии.*

Вопрос надежности полученных результатов является главным в геодезии и фотограмметрии. Из-за невозможности непосредственного измерения определяемых величин и неизбежных погрешностей измерений всегда возникает задача их уравнивания. Вычислительные задачи в области геодезии и фотограмметрии решаются при избыточном числе измерений под каким-либо условием, например минимума суммы квадратов невязок параметрических уравнений (метод наименьших квадратов). Сумма квадратов является одной из наиболее распространенных мер близости для векторов, так как соответствует евклидовой метрике в конечномерных пространствах.

Как правило, системы уравнений имеют нелинейный характер, поэтому их необходимо предварительно линеаризовать и для получения решения использовать метод последовательных приближений (итерационный метод).

Для устойчивого решения задачи необходимо:

- знать приближенные значения определяемых параметров;
- исключить грубые и систематические погрешности измерений;
- знать корреляционную матрицу измеренных величин или уравниваемых функций;
- иметь хорошо обусловленную систему уравнений.

Слабо обусловленные системы при решении фотограмметрических задач могут появиться вследствие различных причин [41]:

- при отсутствии точек в одной из стандартных зон стереопары;
- если опорные или связующие точки расположены на равных высотах или на одной прямой;
- при взаимном ориентировании стереопары слабая обусловленность системы может быть вызвана характером рельефа местности, если он близок к цилиндрической или гиперболической поверхности.

Плохая обусловленность систем уравнений часто связана с сильной взаимной корреляцией измеренных величин или уравниваемых функций. Таким образом, для повышения обусловленности системы уравнений необходимо использовать дополнительные условия, не коррелируемые с уже имеющимися.

В качестве дополнительных условий будут рассматриваться различные виды отношений между измеренными величинами и определяемыми параметрами, не предусмотренные традиционным (базовым) методом решения геодезической или фотограмметрической задачи. Дополнительные условия, связанные с положением объектов в евклидовом пространстве, назовем дополнительными геометрическими условиями.

Влияние использования дополнительных геометрических условий на точность вычисления определяемых параметров отмечалось многими исследователями. Так, в экспериментальной работе Поляковой В. А. по макетным снимкам высокогорной местности ( $f = 100$  мм,  $H = 5\ 800$  м) были смоделированы показания статоскопа и высотомера [41]. В результате точность определения координат точек местности при построении сети пространственной фототриангуляции (в 22 базиса) методом частично-зависимых моделей возросла на 66 %.

В трудах д.т.н., профессора Антипова И. Т. указывается, что при построении сетей пространственной аналитической фототриангуляции, помимо плановых координат и высот опорных точек и/или центров проектирования, могут успешно применяться измеренные на местности длины линий между точками, включенными в сеть, дирекционные углы линий, превышения между отдельными точками и другие данные, частично характеризующие взаимное положение каких-то элементов фототриангуляционной сети, но не связывающие эти элементы с системой координат местности [4].

Наиболее распространенными приборами для получения дополнительных данных при решении фотограмметрических задач являются GNSS/INS – системы. Гораздо реже используются показания дальномеров, высотомеров, статоскопов, гироскопических систем, профилографов, солнечных перископов, звездных камер, камер горизонта и др.

При решении геодезических задач также широко используются различные виды геометрических условий [29]:

- условие фигуры (в замкнутой фигуре, имеющей  $n$  внутренних углов, сумма этих углов должна быть равна  $180^\circ \times (n - 2)$ );
- условие горизонта (сумма измеренных углов на пункте по всему горизонту должна равняться  $360^\circ$ );
- условие дирекционных углов (для вычисления параметров сети достаточно знать исходный дирекционный угол какой-либо одной ее стороны);
- условие суммы углов;
- условие полюса (возникает в фигуре, одна сторона которой может быть вычислена дважды; для этого достаточно иметь точку, связанную со всеми точками замкнутого контура – полюс);
- условие координат (если в сети имеются исходные пункты, избыточно определяющие ее положение, то вычисленные значения координат таких пунктов после уравнивания должны соответствовать их исходным значениям);
- условие исходных дирекционных углов (если в сети имеются две или несколько сторон с исходными дирекционными углами, то вычисленные по уравненным значениям углов дирекционные углы этих сторон должны быть равны их исходным значениям) и др.

В зависимости от выбранного метода решения геодезической задачи, одно из перечисленных условий будет являться основным, другие – дополнительными.

Таким образом, использование дополнительных геометрических условий при решении задач в геодезии и фотограмметрии позволяет:

- уменьшить количество определяемых неизвестных, т. е. ускорить процесс обработки систем уравнений;
- повысить устойчивость процесса решения систем уравнений, а значит повысить точность работ, или убрать некоторые ограничения на технологию их выполнения.

*Применение дополнительных геометрических условий при калибровке камер.* Калибровка, как одна из задач, решаемых в фотограмметрии, так же может выполняться с использованием дополнительных геометрических условий.

Так, профессор Дубиновский В. Б. отмечал, что в качестве опорных данных при калибровке снимков кроме координат  $X_{г}$ ,  $Y_{г}$ ,  $Z_{г}$  опорных точек полигона (тест-объекта) также могут быть использованы: высоты  $Z_{г}$  опорных точек и расстояния  $D_{г}$  между ними; координаты  $X_{г}$ ,  $Y_{г}$  точек полигона; высоты  $Z_{г}$  опорных точек, имеющих равные абсциссы  $X_{г}$  и ординаты  $Y_{г}$ ; углы  $\theta$ , измеренные в пространстве объектов; расстояния  $D_{лв}$  между точкой фотографирования и одной из точек полигона. При этом повышается надежность решения системы уравнений [15].

Примером использования дополнительных геометрических условий для калибровки камер служит метод, основанный на использовании координат точек фотографирования и точек местности (рисунок 20).

Такой метод предложен профессором Халлертом Б. и реализован для калибровки аэрофотоаппаратов путем фотографирования полигона с вышки, координаты которой определены геодезическими методами, и камер, используемых для решения нетопографических задач, путем фотографирования тест-объекта из точки с известными координатами.

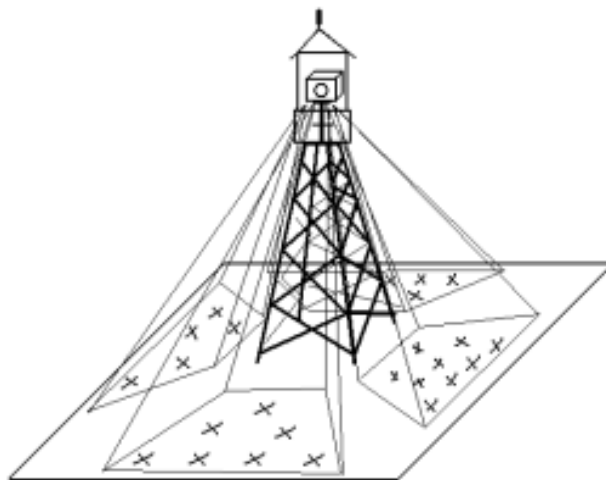


Рисунок 20 – Способ калибровки, основанный на использовании координат точек фотографирования и точек местности

Эффективность данного способа зависит от точности определения координат колеблющейся в значительных пределах вышки, на которой установлен аэрофотоаппарат, и синхронности геодезических определений и фотографирования, а также от точности определения положения узловой точки объектива с выбранной для фотографирования точкой или определения ее пространственных координат.

Дополнительные геометрические условия, которые можно использовать в процессе калибровки цифровых камер путем фотографирования тест-объекта, весьма обширны, и их можно условно разделить на условия, относящиеся к тест-объекту, и условия, относящиеся к съемочной системе.

В зависимости от вида тест-объекта могут быть применены следующие геометрические условия:

- точки тест-объекта расположены на одной прямой;
- точки тест-объекта расположены в одной плоскости;
- точки тест-объекта соответствуют шаблону (связаны с шаблоном шестью элементами внешнего ориентирования этого шаблона);
- известны координаты точек тест-объекта;
- известно расстояние между точками тест-объекта;
- выполняются условия параллельности/перпендикулярности/сопряжения под известным углом между линиями или плоскостями и др.

В зависимости от используемой схемы съемки могут быть применены следующие геометрические условия:

- съемка выполняется с одной точки;
- съемка выполняется со штатива;
- съемка выполняется многокамерной съемочной системой;
- известно расстояние между центрами фотографирования;
- известны координаты центра фотографирования;
- известны углы внешнего ориентирования снимка;
- известен угол между осями фотографирования и др.

Также в качестве совместного условия может использоваться расстояние от съемочной системы до тест-объекта.

Таким образом, правильный выбор дополнительного геометрического условия может позволить улучшить процесс калибровки камер. Однако при наличии дополнительных геометрических условий алгоритмы уравнивания, как правило, усложняются, что является одной из главных причин их относительно редкого использования при уравнивании в современных программных комплексах.

По результатам первого раздела диссертационного исследования можно заключить, что из всего многообразия фотограмметрических задач и условий, которые могут использоваться для решения задачи калибровки, в настоящее время находит применение, как правило, лишь одно подмножество из этих вариантов, а именно условие коллинеарности и задача внешнего ориентирования одиночного снимка. Другие подходы либо не используются вовсе, либо условия их использования не раскрываются и не обосновываются, если говорить о способах калибровки по плоским тест-объектам без определения координат точек в пространственной системе координат. Дополнительные геометрические условия используются нечасто.

Все это требует проведения дополнительных исследований с целью выработки новых принципов калибровки камер, математически обоснованных и подтвержденных на практике.

## 2 АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КАЛИБРОВКИ КАМЕР ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

### 2.1 Определение параметров дисторсии объективов при калибровке камер

Как отмечалось в 1.3, в процессе выполнения полной калибровки съемочных систем определяются значения элементов внутреннего ориентирования и параметры дисторсии используемых объективов. Для учета систематических искажений по полю снимка чаще всего применяются полиномиальные функции [23]. При этом для оптимального учета искажений в разных съемочных системах, вид полиномиальной функции должен подбираться для каждого конкретного случая.

Существует два принципиально разных подхода к описанию модели искажений снимков с помощью полиномов [4]. Один из этих подходов основан на стремлении обеспечить устойчивое решение задачи при определенном размещении точек на снимках, т. е. добиться некоррелируемости определяемых параметров. Подобные полиномы были описаны такими учеными, как Grun A. [69] и Ebner H.:

$$\left. \begin{aligned} \sigma x &= c_1 x + c_2 y - c_3 \left(2x^2 - \frac{4}{3}b^2\right) + c_4 xy - c_5 \left(y^2 - \frac{2}{3}b^2\right) + \\ &+ c_7 x \left(y^2 - \frac{2}{3}b^2\right) + c_9 \left(x^2 - \frac{2}{3}b^2\right) y + c_{11} \left(x^2 - \frac{2}{3}b^2\right) \left(y^2 - \frac{2}{3}b^2\right); \\ \sigma y &= -c_1 y + c_2 x + c_3 xy + b_4 \left(2y^2 - \frac{4}{3}b^2\right) + c_6 \left(x^2 - \frac{2}{3}b^2\right) + \\ &+ c_8 \left(x^2 - \frac{2}{3}b^2\right) y + c_{10} x \left(y^2 - \frac{2}{3}b^2\right) + c_{12} \left(x^2 - \frac{2}{3}b^2\right) \left(y^2 - \frac{2}{3}b^2\right). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Другой подход основан на логическом представлении природы систематических искажений и математическом описании суммарного воздействия всех факторов, деформирующих изображение. Пример такой модели предложен канад-

ским специалистом Brown D. [66]. Модель прошла достаточную проверку и дает хорошие результаты:

$$\left. \begin{aligned} \sigma x &= a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^2y + a_7xy^2 + \\ &+ \frac{x}{f}(c_1x^2 + c_2xy + c_3y^2 + c_4x^3 + c_5x^2y + c_6xy^2 + c_7y^3) + \\ &+ x(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + p_1(y^2 + 3x^2) + 2p_2xy; \\ \sigma y &= b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 + b_6x^2y + b_7xy^2 + \\ &+ \frac{y}{f}(c_1x^2 + c_2xy + c_3y^2 + c_4x^3 + c_5x^2y + c_6xy^2 + c_7y^3) + \\ &+ y(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2p_1xy + p_2(3y^2 + x^2), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $a_i, b_i$  – параметры деформации снимка независимо вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно;

$c_i, k_i$  – параметры радиального смещения точек изображения под влиянием дисторсии объектива;

$p_1, p_2$  – параметры, описывающие децентрацию радиальной дисторсии третьего порядка.

В настоящее время существует большое количество различных полиномов, описывающих систематические искажения снимков, но чаще всего находят применение полиномы высоких степеней, реализованные в современных программных продуктах для обработки снимков (таких как ЦФС PHOTOMOD, PhotoModeler и др.). Полиномиальные функции, используемые в ЦФС PHOTOMOD, представлены в формуле

$$\left. \begin{aligned} \sigma x &= -k_1 x r^2 - k_2 x r^4 - k_3 x r^6 - P_1(2x^2 + r^2) - 2P_2 xy - b_1 x - b_2 y; \\ \sigma y &= -k_1 y r^2 - k_2 y r^4 - k_3 y r^6 - P_2(2y^2 + r^2) - 2P_1 xy - a_1 x - a_2 y, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $r^2 = x^2 + y^2$ ;

$k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты радиальной дисторсии;

$P_1, P_2$  – коэффициенты тангенциальной дисторсии;

$a_1, a_2, b_1, b_2$  – коэффициенты равномерной деформации снимка.

Некоторые полиномы позволяют определять смещение центра дисторсии относительно центра изображения. В ряде программных продуктов предлагается возможность принять за центр дисторсии координаты главной точки снимка.

Одним из сложных вопросов остается обоснование методов калибровки, так как не всегда можно провести полноценный анализ систем уравнений, положенных в их основу. Поэтому желательно выработать какой-либо критерий оценки достоверности исследуемых методов.

С измерительной точки зрения фотоаппарат является угломерным инструментом, т. е. измеряет направления на все точки, изобразившиеся на снимке. Это обстоятельство подчеркнуто в термине «связка лучей», т. е. изображение на снимке это всего лишь фиксация направлений на объекты местности («проектирующих лучей») на носителе («снимке»). Конечно, виды связок лучей бывают разные, как и поверхности, на которые изображение проектируется, но для центральной проекции все проектирующие лучи пересекаются в одной точке («центре проекции», «центре фотографирования») и, по существу, фотоаппарат является аналогом теодолита, только без ориентирующих устройств в виде уровней и компенсаторов.

Согласно определению, калибровка измерительных приборов заключается в установлении зависимости между показаниями средства измерительной техники (прибора) и размером измеряемой (входной) величины. Так как фотокамера явля-

ется угломерным инструментом, то в качестве эталона должны выступать углы. В пределе это совокупность всех угловых измерений, т. е. связка лучей.

Отличительной особенностью калибровки с использованием эталонной связки лучей следует отметить возможность определения неравномерной дисторсии, в пределе для каждой измеренной точки снимка.

Идеальными, согласно данной точке зрения, являются способы калибровки по звездному небу (огромное количество «эталонных» углов) и способ, в котором координаты центра фотографирования и точек на местности известны (это позволяет перейти к направлениям на точки). Также эталонную связку лучей можно получить с помощью гониометров.

Следует отметить, что широко распространенный способ калибровки по пространственному тест-объекту не использует эталонную связку лучей: связка лучей восстанавливается в соответствии с моделью дисторсии, соответственно данный способ в каноническом виде (по одному снимку) не способен определить неравномерную дисторсию.

Таким образом, учитывая угломерную функцию фотоаппарата, можно предположить способ сравнения результатов определения параметров дисторсии (включая элементы внутреннего ориентирования) на основе сопоставления связок лучей [51].

Алгоритм сравнения связок лучей при этом выглядит следующим образом:

- переход от координат точек снимка к пространственным векторам с учетом модели дисторсии (рисунок 21, *a–в*);
- совмещение связок лучей путем «дворота» одной из связок в соответствии с оптимизирующей функцией (рисунок 21, *г*);
- для оценки точности совмещения связок лучей предлагается использовать среднее квадратическое отклонение (СКО) соответственных лучей, выраженных в секундах.

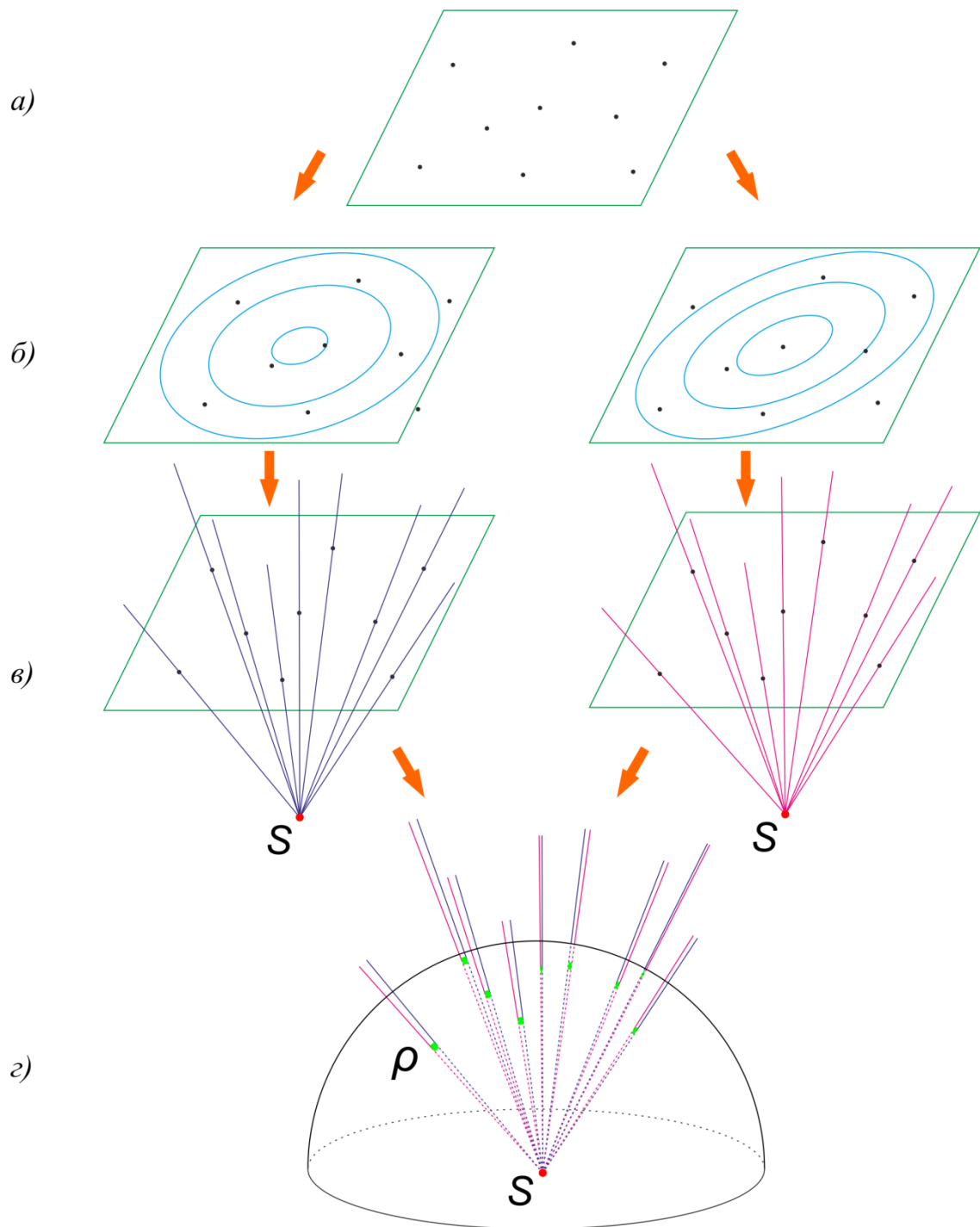


Рисунок 21 – Схема сравнения параметров калибровки по этапам:  
 а) определение расположения точек на снимке; б) исправление координат точек с учетом параметров дисторсии; в) восстановление связок лучей;  
 г) сравнение полученных связок лучей

Для малых значений углов можно использовать упрощенную формулу, основанную на разности нормированных векторов:

$$m''_{\Delta\alpha} = \sqrt{\frac{\sum \left\| \frac{\bar{X}_{2i}}{\|\bar{X}_{2i}\|} - \frac{\bar{X}_{1i}}{\|\bar{X}_{1i}\|} \right\|^2}{n}} \cdot \rho'' , \quad (5)$$

где  $m''_{\Delta\alpha}$  – СКО совмещения двух связок лучей;

$\bar{X}_{1i}, \bar{X}_{2i}$  – векторы направления на точку  $i$  для первой и второй связки лучей соответственно;

$\rho''$  – константа, необходимая для перехода от радиан к угловым секундам;

$n$  – количество лучей в связке лучей.

## 2.2 Обоснование возможности калибровки по плоскому тест-объекту

В 1.4 было отмечено, что одним из самых надежных и эффективных вариантов полевой калибровки (особенно для целей аэрофотосъемки) принято считать калибровку камеры по снимкам испытательного полигона [4, 25], представляющего собой участок местности с опорными точками, равномерно и в большом количестве распределенными по всей площади, координаты которых определены геодезическими методами (рисунок 22).

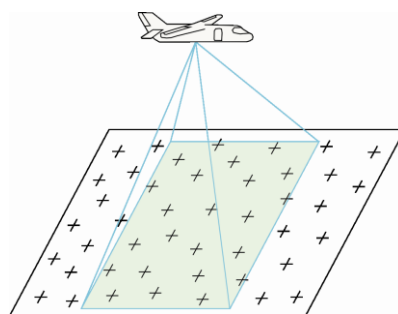


Рисунок 22 – Схематичное представление калибровочного полигона

При этом математическая трактовка задачи по таким снимкам основана на уравнении коллинеарности проектирующих лучей. Такой метод хорошо зарекомендовал себя на производстве в прошлые годы и сейчас находит свое применение благодаря высокой точности и достоверности определения параметров калибровки.

Недостатками таких калибровочных полигонов являются, прежде всего, их сложность и дороговизна. Постоянная поддержка полигона в рабочем состоянии требует больших усилий и материальных вложений, что может позволить себе далеко не каждое производственное предприятие. Кроме того, теоретически и экспериментально было доказано, что при плановой аэрофотосъемке полная калибровка (определение значения дисторсии и элементов внутреннего ориентирования) возможна только по снимкам полигона, точки которого имеют взаимное превышение не менее  $0,2H$ , где  $H$  – высота фотографирования [4, 25]. Это связано с тем, что между парами коэффициентов при поправках в линейные элементы внешнего ориентирования и в элементы внутреннего ориентирования снимков возникает пропорциональность. Такая зависимость между фокусным расстоянием и высотой фотографирования обуславливает эффект преобразования связки лучей [27].

Как видно из рисунка 23, из-за этого эффекта возникает множественность решений при определении фокусного расстояния и высоты фотографирования.

Кроме того, при фотографировании плоского (либо относительно плоского) объекта, неопределенность возникает и при определении координат главной точки снимка. Так, все отображенные на схеме (рисунок 24) случаи съемки имеют равноточные решения.

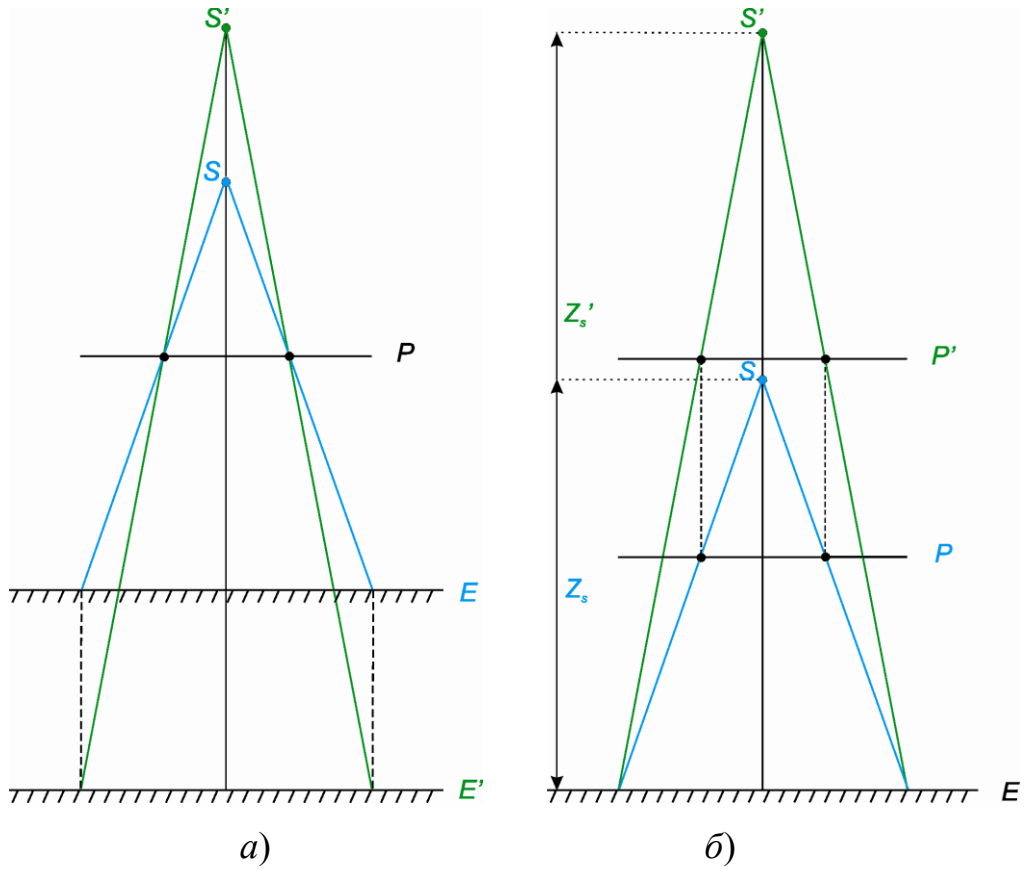


Рисунок 23 – Влияние эффекта преобразования связки лучей на фокусное расстояние и высоту фотографирования: а) при совмещении картинных плоскостей; б) при совмещении предметных плоскостей.

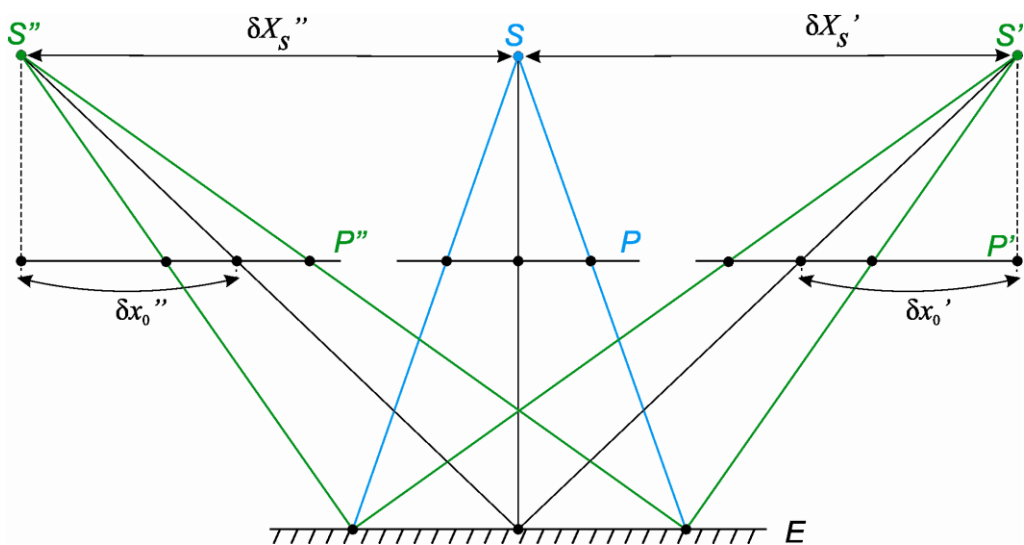


Рисунок 24 – Вариативность определения положения главной точки и центра фотографирования

Вопрос повышения эффективности производства аэрофотосъемочных работ наталкивает на мысль, что наилучшим вариантом калибровки камеры была бы калибровка непосредственно при выполнении реальной, производственной аэрофотосъемки. Однако из-за влияния эффекта преобразования связки лучей полная калибровка возможна лишь при условии, что на фотографируемой территории обеспечен необходимый перепад высот. На снимаемых территориях такое условие, очевидно, будет выполняться далеко не всегда. В целях поиска решения вопроса выполнения калибровки в полете, без привязки к конкретной территории, рассматривались идеи использования дополнительных геометрических условий при фотографировании [9, 32], в частности, изменение самой схемы фотографирования.

Приведенная на рисунке 24 схема влияния эффекта преобразованной связки лучей на определение элементов внутреннего и внешнего ориентирования снимков относилась к случаю классической, плановой аэрофотосъемки, когда плоскость снимка параллельна плоскости объекта (предметной плоскости). При этом непонятно, какими свойствами будет обладать преобразованная связка лучей, если снимок будет наклонен по отношению к объекту (рисунок 25).

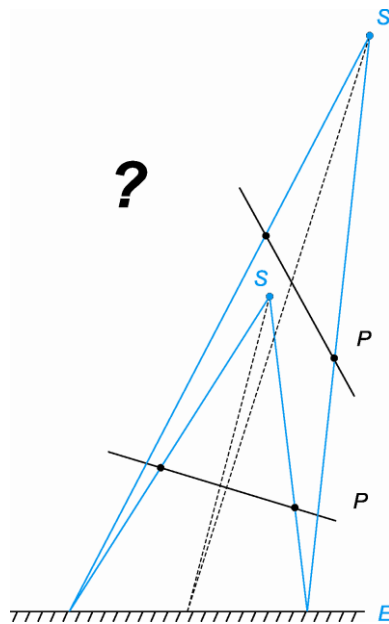


Рисунок 25 – Неопределенность свойств преобразованной связки лучей наклонного снимка

Начиная с 40-х гг. XX в. изучением свойств преобразованной связки лучей занимались Дробышев Ф. В., Романовский Г. В., Лобанов А. Н., Коншин М. Д. и др. [58]. Полученные закономерности использовались при создании аналоговых фотограмметрических приборов, а также дифференциальных фототрансформаторов [27]. Подход данной группы исследователей был основан на геометрическом анализе сопряженных плоскостей.

В данной работе для исследования свойств преобразованной связки лучей предлагается использовать условие коллинеарности [33]:

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 &= (-f) \frac{(X - X_S)a_1 + (Y - Y_S)b_1 + (Z - Z_S)c_1}{(X - X_S)a_3 + (Y - Y_S)b_3 + (Z - Z_S)c_3}; \\ y - y_0 &= (-f) \frac{(X - X_S)a_2 + (Y - Y_S)b_2 + (Z - Z_S)c_2}{(X - X_S)a_3 + (Y - Y_S)b_3 + (Z - Z_S)c_3} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $x, y$  – плоские координаты точек снимков в системе координат снимка;

$x_0, y_0$  – координаты главной точки снимка в этой же системе;

$X_S, Y_S, Z_S$  – линейные элементы внешнего ориентирования снимков;

$a_i, b_i, c_i$  – направляющие косинусы, вычисленные через угловые элементы внешнего ориентирования снимков  $\alpha, \omega, \kappa$ .

Рассмотрим условие коллинеарности в упрощенном виде. Всегда можно перейти к такой внешней системе координат и системе координат снимка, что: плановые координаты центра фотографирования будут равны нулю ( $X_S = Y_S = 0$ ), объект съемки плоский, с нулевыми высотами точек ( $Z = 0$ ), из углов внешнего ориентирования ( $\alpha, \omega, \kappa$ ) ненулевым останется только продольный угол наклона снимка  $\alpha$ :

$$\left. \begin{aligned} X_S = Y_S = 0, & \quad Z = 0, \\ \alpha \neq 0, & \quad \omega = 0, \quad \kappa = 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Тогда условие коллинеарности (6) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 &= (-f) \frac{X \cos \alpha - Z_S \sin \alpha}{-X \sin \alpha - Z_S \cos \alpha}; \\ y - y_0 &= (-f) \frac{Y}{-X \sin \alpha - Z_S \cos \alpha}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Выполним преобразование связки лучей, умножив значение фокусного расстояния  $f$  на коэффициент преобразования связки  $k$ , при этом, для обеспечения тождественности левой и правой частей условия коллинеарности, могут измениться координаты главной точки  $(x_0, y_0)$  и элементы внешнего ориентирования снимков. Изменение координат главной точки снимка, называемое децентрацией, обозначим через  $\delta x_0, \delta y_0$ , продольный угол наклона преобразованной связки лучей обозначим как  $\alpha'$ , изменение плановых координат центра фотографирования  $\delta X_S, \delta Y_S$ , а новую высоту фотографирования как  $Z'_S$ . Тогда

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 - \delta x_0 &= k(-f) \frac{X \cos \alpha' - \delta X_S \cos \alpha' - Z'_S \sin \alpha'}{-X \sin \alpha' + \delta X_S \sin \alpha' - Z'_S \cos \alpha'}; \\ y - y_0 - \delta y_0 &= k(-f) \frac{Y - \delta Y_S}{-X \sin \alpha' + \delta X_S \sin \alpha' - Z'_S \cos \alpha'}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Приравнивая координаты точек снимка подобной (формула (8)) и преобразованной (формула (9)) связок лучей с последующим приведением к общему знаменателю и раскрытием скобок, получим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{X \cos \alpha - Z_S \sin \alpha}{-X \sin \alpha - Z_S \cos \alpha} - \frac{\delta x_0}{(-f)} &= k \frac{X \cos \alpha' - \delta X_S \cos \alpha' - Z'_S \sin \alpha'}{-X \sin \alpha' + \delta X_S \sin \alpha' - Z'_S \cos \alpha'}; \\ \frac{Y}{-X \sin \alpha - Z_S \cos \alpha} - \frac{\delta y_0}{(-f)} &= k \frac{Y - \delta Y_S}{-X \sin \alpha' + \delta X_S \sin \alpha' - Z'_S \cos \alpha'} \end{aligned} \right\}$$

из которой следует

$$\left. \begin{aligned}
 & (X \cos \alpha - Z_S \sin \alpha)(-X \sin \alpha' + \delta X_S \sin \alpha' - Z'_S \cos \alpha') - \\
 & - \frac{\delta x_0}{(-f)} (-X \sin \alpha - Z_S \cos \alpha)(-X \sin \alpha' + \delta X_S \sin \alpha' - Z'_S \cos \alpha') = \\
 & = k(-X \sin \alpha - Z_S \cos \alpha)(X \cos \alpha' - \delta X_S \cos \alpha' - Z'_S \sin \alpha'); \\
 & Y(-X \sin \alpha' + \delta X_S \sin \alpha' - Z'_S \cos \alpha') - \\
 & - \frac{\delta y_0}{(-f)} (-X \sin \alpha - Z_S \cos \alpha)(-X \sin \alpha' + \delta X_S \sin \alpha' - Z'_S \cos \alpha') = \\
 & = k(-X \sin \alpha - Z_S \cos \alpha)(Y - \delta Y_S),
 \end{aligned} \right\}$$

следовательно

$$\left. \begin{aligned}
 & -X^2 \cos \alpha \sin \alpha' + X \delta X_S \cos \alpha \sin \alpha' - X Z'_S \cos \alpha \cos \alpha' + X Z_S \sin \alpha \sin \alpha' - \\
 & - Z_S \delta X_S \sin \alpha \sin \alpha' + Z_S Z'_S \sin \alpha \cos \alpha' + \frac{\delta x_0}{f} X^2 \sin \alpha \sin \alpha' - \\
 & - \frac{\delta x_0}{f} X \delta X_S \sin \alpha \sin \alpha' + \frac{\delta x_0}{f} X Z'_S \sin \alpha \cos \alpha' + \frac{\delta x_0}{f} X Z_S \cos \alpha \sin \alpha' - \\
 & - \frac{\delta x_0}{f} Z_S \delta X_S \cos \alpha \sin \alpha' + \frac{\delta x_0}{f} Z_S Z'_S \cos \alpha \cos \alpha' = \\
 & = -k X^2 \sin \alpha \cos \alpha' + k X \delta X_S \sin \alpha \cos \alpha' + k X Z'_S \sin \alpha \sin \alpha' - \\
 & - k X Z_S \cos \alpha \cos \alpha' + k Z_S \delta X_S \cos \alpha \cos \alpha' + k Z_S Z'_S \cos \alpha \sin \alpha'; \\
 & -XY \sin \alpha' + Y \delta X_S \sin \alpha' - Y Z'_S \cos \alpha' + \frac{\delta y_0}{f} X^2 \sin \alpha \sin \alpha' - \\
 & - \frac{\delta y_0}{f} X \delta X_S \sin \alpha \sin \alpha' + \frac{\delta y_0}{f} X Z'_S \sin \alpha \cos \alpha' + \frac{\delta y_0}{f} X Z_S \cos \alpha \sin \alpha' - \\
 & - \frac{\delta y_0}{f} Z_S \delta X_S \cos \alpha \sin \alpha' + \frac{\delta y_0}{f} Z_S Z'_S \cos \alpha \cos \alpha' = \\
 & = -k XY \sin \alpha + k X \delta Y_S \sin \alpha - k Z_S Y \cos \alpha + k Z_S \delta Y_S \cos \alpha.
 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Полученные равенства являются степенными полиномами относительно координат точек на местности. Поэтому равенства можно разложить согласно степени членов в многочлене по методу неопределенных коэффициентов [63]:

$$\begin{aligned}
 X^2: & \quad -X^2 \cos \alpha \sin \alpha' + \frac{\delta x_0}{f} X^2 \sin \alpha \sin \alpha' = -kX^2 \sin \alpha \cos \alpha'; \\
 X: & \quad X \delta X_S \cos \alpha \sin \alpha' - X Z'_S \cos \alpha \cos \alpha' + X Z_S \sin \alpha \sin \alpha' - \\
 & \quad - \frac{\delta x_0}{f} X \delta X_S \sin \alpha \sin \alpha' + \frac{\delta x_0}{f} X Z'_S \sin \alpha \cos \alpha' + \frac{\delta x_0}{f} X Z_S \cos \alpha \sin \alpha' = \\
 & \quad = kX \delta X_S \sin \alpha \cos \alpha' + kX Z'_S \sin \alpha \sin \alpha' - kX Z_S \cos \alpha \cos \alpha'; \\
 C: & \quad -Z_S \delta X_S \sin \alpha \sin \alpha' + Z_S Z'_S \sin \alpha \cos \alpha' - \frac{\delta x_0}{f} Z_S \delta X_S \cos \alpha \sin \alpha' + \\
 & \quad + \frac{\delta x_0}{f} Z_S Z'_S \cos \alpha \cos \alpha' = kZ_S \delta X_S \cos \alpha \cos \alpha' + kZ_S Z'_S \cos \alpha \sin \alpha'; \\
 \\
 X^2: & \quad \frac{\delta y_0}{f} X^2 \sin \alpha \sin \alpha' = 0; \\
 XY: & \quad -XY \sin \alpha' = -kXY \sin \alpha; \\
 X: & \quad -\frac{\delta y_0}{f} X \delta X_S \sin \alpha \sin \alpha' + \frac{\delta y_0}{f} X Z'_S \sin \alpha \cos \alpha' + \frac{\delta y_0}{f} X Z_S \cos \alpha \sin \alpha' = \\
 & \quad = kX \delta Y_S \sin \alpha; \\
 Y: & \quad Y \delta X_S \sin \alpha' - Y Z'_S \cos \alpha' = -kZ_S Y \cos \alpha; \\
 C: & \quad -\frac{\delta y_0}{f} Z_S \delta X_S \cos \alpha \sin \alpha' + \frac{\delta y_0}{f} Z_S Z'_S \cos \alpha \cos \alpha' = kZ_S \delta Y_S \cos \alpha.
 \end{aligned}$$

Или, исключив из системы уравнений координаты точек на местности, получаем

$$\left.
\begin{aligned}
X^2: & -\cos \alpha \sin \alpha' + \frac{\delta x_0}{f} \sin \alpha \sin \alpha' = -k \sin \alpha \cos \alpha'; \\
X: & \delta X_S \cos \alpha \sin \alpha' - Z'_S \cos \alpha \cos \alpha' + Z_S \sin \alpha \sin \alpha' - \\
& - \frac{\delta x_0}{f} \delta X_S \sin \alpha \sin \alpha' + \frac{\delta x_0}{f} Z'_S \sin \alpha \cos \alpha' + \frac{\delta x_0}{f} Z_S \cos \alpha \sin \alpha' = \\
& = k \delta X_S \sin \alpha \cos \alpha' + k Z'_S \sin \alpha \sin \alpha' - k Z_S \cos \alpha \cos \alpha'; \\
C: & -Z_S \delta X_S \sin \alpha \sin \alpha' + Z_S Z'_S \sin \alpha \cos \alpha' - \frac{\delta x_0}{f} Z_S \delta X_S \cos \alpha \sin \alpha' + \\
& + \frac{\delta x_0}{f} Z_S Z'_S \cos \alpha \cos \alpha' = k Z_S \delta X_S \cos \alpha \cos \alpha' + k Z_S Z'_S \cos \alpha \sin \alpha'; \\
\\
X^2: & \frac{\delta y_0}{f} \sin \alpha \sin \alpha' = 0; \\
XY: & -\sin \alpha' = -k \sin \alpha; \\
X: & -\frac{\delta y_0}{f} \delta X_S \sin \alpha \sin \alpha' + \frac{\delta y_0}{f} Z'_S \sin \alpha \cos \alpha' + \frac{\delta y_0}{f} Z_S \cos \alpha \sin \alpha' = \\
& = k \delta Y_S \sin \alpha; \\
Y: & \delta X_S \sin \alpha' - Z'_S \cos \alpha' = -k Z_S \cos \alpha; \\
C: & -\frac{\delta y_0}{f} Z_S \delta X_S \cos \alpha \sin \alpha' + \frac{\delta y_0}{f} Z_S Z'_S \cos \alpha \cos \alpha' = k Z_S \delta Y_S \cos \alpha.
\end{aligned}
\right\} \quad (11)$$

Ключевым моментом, позволяющим значительно упростить получившиеся зависимости, является пятое уравнение системы (11), соответствующее степени многочлена  $XY$ , записанного для координат точек снимка по оси  $y$ :

$$-\sin \alpha' = -k \sin \alpha,$$

или

$$\sin \alpha' = k \sin \alpha. \quad (12)$$

Полученная зависимость между углом наклона снимка и коэффициентом преобразования связки лучей позволяет упростить уравнения системы (11). Так, из четвертого уравнения системы (11) с учетом равенства (12) следует, что

$$\frac{\delta y_0}{f} \sin \alpha \sin \alpha' = 0,$$

следовательно

$$k \frac{\delta y_0}{f} \sin^2 \alpha = 0. \quad (13)$$

Данное равенство будет выполняться, если децентрация снимка  $\delta y_0$  по оси  $y$  будет отсутствовать, либо если снимок горизонтален ( $\alpha = 0$ ). Таким образом, выражение (13) подтверждает наличие неопределенности, возникающей при определении положения главной точки по горизонтальному снимку плоского тест-объекта.

Из шестого уравнения системы (11) с учетом равенств (12) и (13) следует наличие неопределенности в определении координаты  $Y_S$  центра фотографирования горизонтального снимка.

Из первого уравнения системы (11) с учетом равенства (12) получаем функцию децентрации  $\delta x_0$  по оси  $x$  в зависимости от угла наклона снимка  $\alpha$  и коэффициента преобразования связки лучей:

$$\frac{\delta x_0}{f} = \frac{\cos \alpha - \cos \alpha'}{\sin \alpha}. \quad (14)$$

Из второго уравнения системы (11) с учетом (12) и (14) получим соотношение между высотой фотографирования для снимков с подобной и преобразованной связкой лучей:

$$Z'_S = k Z_S. \quad (15)$$

Как видно из уравнения (15), зависимость между коэффициентом преобразования связки лучей и высотой фотографирования полностью аналогична таковой для горизонтального случая съемки.

Из седьмого уравнения системы (11) с учетом равенств (12), (14) и (15) получим зависимость для определения смещения координаты центра фотографирования  $\delta X_S$ :

$$\delta X_S = -\delta x_0 \frac{Z_S}{f}. \quad (16)$$

Нужно отметить, что формула связи децентрации главной точки с изменением координат центра фотографирования отличается знаком от подобной формулы связи для случая горизонтальной съемки.

Из восьмого уравнения системы (11) с учетом равенств (12), (13) и (15) можно установить очевидную функциональную зависимость между смещением координаты центра фотографирования  $\delta Y_S$  и децентрацией снимка  $\delta y_0$  для горизонтального случая съемки, так как при наклонной съемке указанные смещения будут отсутствовать.

В результате проведенного анализа с учетом равенств (12)–(16) получим следующую систему:

$$\left.
\begin{aligned}
X^2: \quad \frac{\delta x_0}{f} &= \frac{\cos \alpha - \cos \alpha'}{\sin \alpha}; \\
X: \quad Z'_S &= kZ_S; \\
C: \quad 0 &= 0; \\
\\
X^2: \quad k \frac{\delta y_0}{f} \sin^2 \alpha &= 0 \Rightarrow \delta y_0 = 0 \quad \text{или} \quad \alpha = 0; \\
XY: \quad \sin \alpha' &= k \sin \alpha; \\
X: \quad 0 = k \delta Y_S \sin \alpha &\Rightarrow \delta Y_S = 0 \quad \text{или} \quad \alpha = 0; \\
Y: \quad \delta X_S &= -\delta x_0 \frac{Z_S}{f}; \\
C: \quad \frac{\delta y_0}{f} Z'_S \cos \alpha' &= k \delta Y_S \Rightarrow \delta Y_S = \delta y_0 \frac{Z'_S}{kf} = \delta y_0 \frac{Z_S}{f} \quad \text{при} \quad \alpha = 0.
\end{aligned}
\right\} \quad (17)$$

Таким образом, по результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- при выполнении преобразования связки лучей наклонного снимка плоской местности будет получен также наклонный снимок, но под другим углом;
- высота центра фотографирования такого снимка будет определяться также, как и в случае горизонтального снимка с преобразованной связкой лучей;
- в плоскости угла наклона снимка произойдет смещение главной точки снимка и центра фотографирования;
- в направлении, перпендикулярном к плоскости наклона снимка, смещения главной точки снимка и центра фотографирования будут отсутствовать.

Диапазон возможных координат центра фотографирования будет лежать на кривой в плоскости угла наклона снимка, т. е. произошел переход от неопределенности в трехмерном пространстве (в случае горизонтального снимка) к неопределенности в одномерном.

Для определения вида кривой используем первую, вторую, третью, четвертую и пятую зависимости системы:

$$\delta X_S = \frac{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \alpha} - \cos \alpha}{\sin \alpha} Z_S,$$

из чего следует

$$\frac{\delta X_S \sin \alpha}{Z_S} - \cos \alpha = \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \alpha},$$

отсюда

$$\frac{\delta X_S - Z_S \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha}}{\frac{Z_S}{\sin \alpha}} = \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \alpha}$$

и далее

$$\frac{\left( \delta X_S - Z_S \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \right)^2}{\left( \frac{Z_S}{\sin \alpha} \right)^2} + k^2 \sin^2 \alpha = 1,$$

следовательно

$$\frac{\left( \delta X_S - Z_S \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \right)^2}{\left( \frac{Z_S}{\sin \alpha} \right)^2} + \frac{k^2 Z_S^2}{\left( \frac{Z_S}{\sin \alpha} \right)^2} = 1,$$

из чего получаем

$$\frac{\left(\delta X_S - Z_S \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha}\right)^2}{\left(\frac{Z_S}{\sin \alpha}\right)^2} + \frac{Z_S'^2}{\left(\frac{Z_S}{\sin \alpha}\right)^2} = 1. \quad (18)$$

Полученное уравнение соответствует уравнению окружности в системе координат  $\delta X_S - Z_S'$  с радиусом  $\frac{Z_S}{\sin \alpha}$ .

Такое решение для модельного случая представлено на рисунке 26.

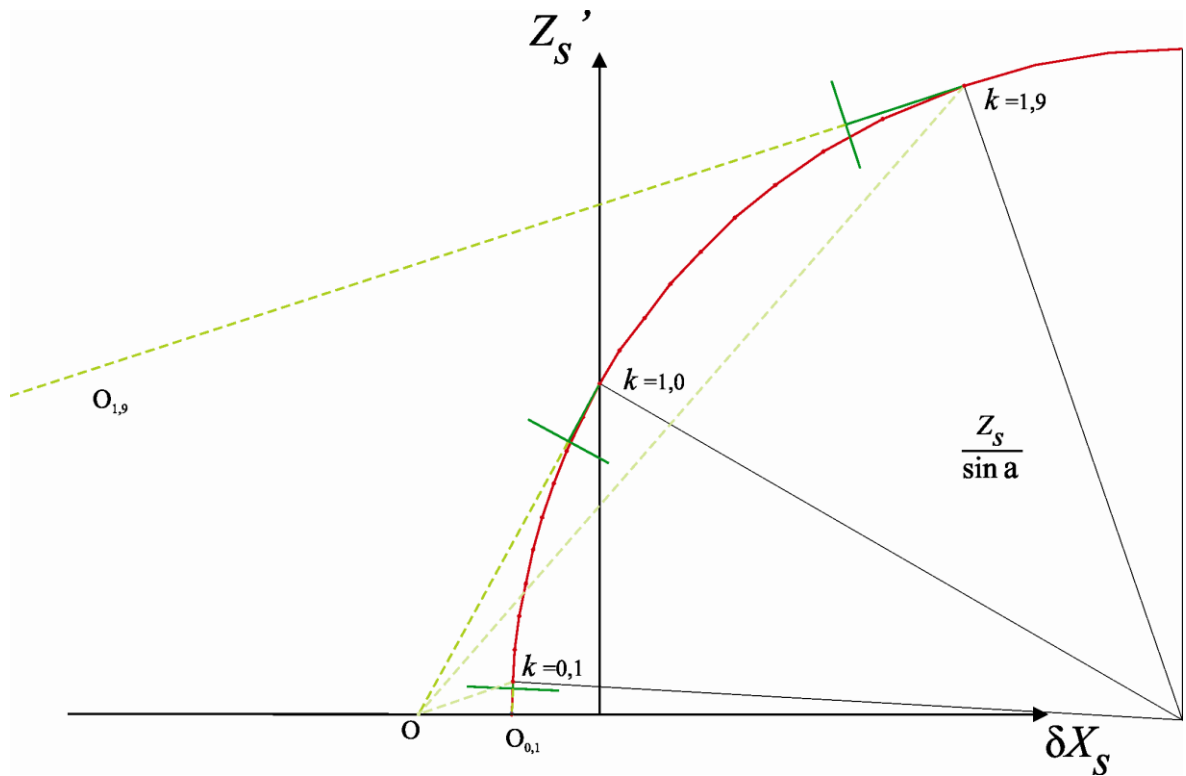


Рисунок 26 – Изменение координат центра фотографирования для снимков с преобразованной связкой лучей

Таким образом, диапазон возможных положений центра фотографирования лежит на четверти окружности, которая ограничена значением коэффициента преобразования связки лучей  $k$  в пределах от 0 до  $1/\sin \alpha$ . В верхней части кривой угол наклона снимка равен  $90^\circ$ , в нижней соответствует  $0^\circ$ .

Полученные результаты в целом согласуются с результатами, описанными Лобановым А. Н., Дубиновским В. Б. и др. в учебнике «Фототриангуляция с применением электронной цифровой вычислительной машины» [58], хотя и выявлены определенные различия, связанные с обнаруженными опечатками.

Таким образом, поведение наклонного снимка с преобразованной связкой лучей, согласно формуле (17) обобщенно можно записать в следующем виде

$$\left. \begin{aligned} \alpha &\neq 0; \\ f' &= \varphi_f(k); \\ Z'_S &= \varphi_{Z_S}(k); \\ \delta x'_0 &= \varphi_{\delta x_0}(k, \alpha); \\ \delta X'_S &= \varphi_{\delta X_S}(k, \alpha); \\ \alpha' &= \varphi_\alpha(k, \alpha); \\ \delta y'_0 &= 0; \\ \delta Y'_S &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Если продольный угол наклона снимка не равен нулю, то:

– фокусное расстояние  $f'$  и высота центра фотографирования  $Z'_S$  для преобразованной связки лучей являются функциями от коэффициента преобразованной связки лучей  $k$ ;

– изменение децентрации снимка  $\delta x'_0$  по оси  $x$ , изменение абсциссы центра фотографирования  $\delta X'_S$  и продольного угла наклона снимка  $\alpha'$  для преобразованной связки лучей являются функциями от коэффициента преобразованной связки лучей  $k$  и продольного угла наклона снимка  $\alpha$ ;

– в плоскости, перпендикулярной к плоскости наклона снимка, децентрация снимка  $\delta y'_0$  и изменение ординаты центра фотографирования  $\delta Y'_S$  равны нулю.

На основе полученных зависимостей можно сформулировать три основных методики калибровки по плоскому тест-объекту:

Согласно *методике 1*, калибровка НЦСК предполагает использование одного наклонного снимка и независимое определение одного из параметров  $k$ :  $f_{\text{ист}}$ ,  $Z_{\text{Сист}}$ ,  $x_{0\text{ист}}$ ,  $X_{\text{Сист}}$  или  $\alpha_{\text{ист}}$ , функционально связанных с параметрами преобразованной связки лучей через коэффициент преобразования  $k$ . Данная методика реализована, например, в работе [9], где координаты центра фотографирования определяются с помощью глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Другой вариант, заключающийся в определении  $\alpha_{\text{ист}}$ , может быть получен путем модификации метода калибровки фототеодолитов, предложенного Лобановым А. Н. [15] таким образом, чтобы с помощью ориентирующего устройства измерялся угол между оптической осью фототеодолита и перпендикуляром к плоскости тест-объекта.

*Методика 2* калибровки НЦСК предусматривает использование двух снимков с разными ненулевыми углами наклона ( $\alpha_1 \neq \alpha_2$ ), лежащими в одной плоскости, полученных при выполнении одного из следующих условий съемки:

– в методике 2.1 абсциссы центров фотографирования равны

$$X_{S_1} = X_{S_2},$$

тогда

$$\varphi_{\delta X_s}(k, \alpha_1) = \varphi_{\delta X_s}(k, \alpha_2).$$

Данное условие можно графически изобразить так, как представлено на рисунке 27.

Как видно из рисунка 27, решение существует только для коэффициента преобразования связки лучей  $k = 1$ . При этом можно одновременно определять параметры калибровки разных НЦСК. Эта методика оптимальна для калибровки многообъективных камер, например, панорамных или сферических;

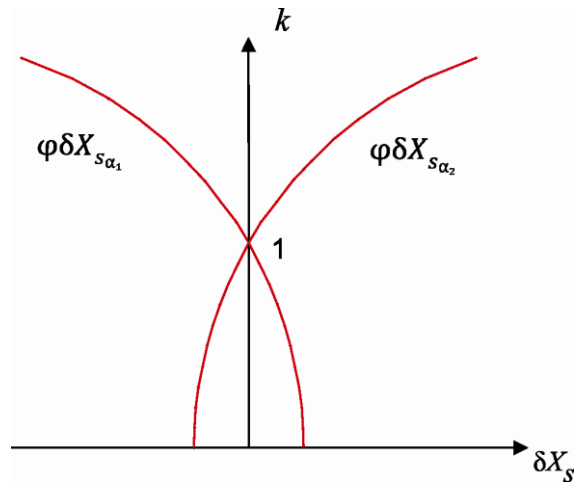


Рисунок 27 – Графическое решение системы уравнений из функций зависимости изменения координат центра фотографирования двух снимков от величины коэффициента преобразования связки лучей

– в методике 2.2 координаты главных точек двух снимков равны:

$$\varphi_{\delta x_0}(k, \alpha_1) = \varphi_{\delta x_0}(k, \alpha_2).$$

Это условие выполняется, если снимки получены одной камерой (рисунок 28).

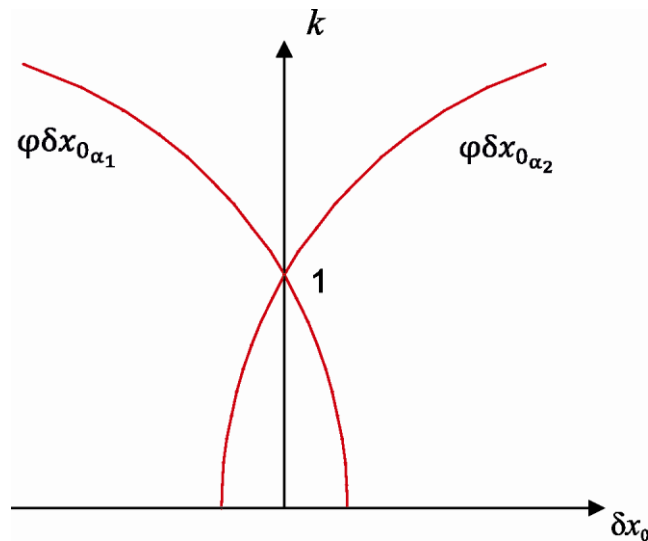


Рисунок 28 – Графическое решение системы уравнений из функций зависимости децентраций двух снимков от величины коэффициента преобразования связки лучей

Решение существует, когда  $k = 1$ .

Данный вариант калибровки можно использовать для калибровки НЦСК по аэрофотоснимкам.

*Методика 3* калибровки НЦСК предполагает получение двух снимков с ненулевыми углами наклона, лежащими в разных плоскостях (предпочтительнее во взаимно-перпендикулярных).

Тогда в одной плоскости децентрация снимка по оси  $x$  будет равна нулю ( $\delta x'_0 = 0$ ), по другой плоскости – децентрация снимка по оси  $y$  будет равна нулю ( $\delta y'_0 = 0$ ). Совместное решение также будет найдено при  $k = 1$ :

$$\left. \begin{array}{l} \delta x_0 = 0; \\ \delta y_0 = 0, \end{array} \right\} \text{ следовательно } k = 1.$$

Графическое решение системы уравнений представлено на рисунке 29.

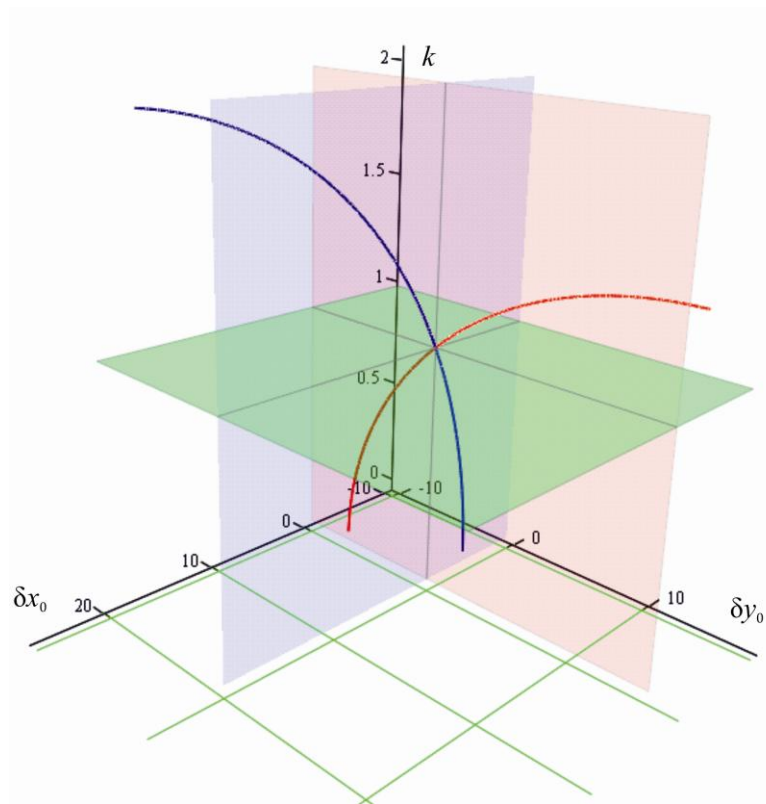


Рисунок 29 – Графическое решение системы уравнений децентраций для снимков со взаимно-перпендикулярными плоскостями наклона

Данная методика калибровки будет предпочтительнее второй методики, если точность определения координат главной точки в плоскости угла наклона снимков будет ниже, чем во взаимно-перпендикулярном направлении. Эта методика может использоваться при калибровке НЦСК по снимкам наземной съемки или для калибровки аэрофотосъемочных систем, оснащенных камерой с управляемым подвесом.

Исходя из всего описанного выше можно сделать следующий вывод: калибровка камер по снимкам плоского тест-объекта возможна, причем по трем разным методикам, а также различными их комбинациями. Для практического использования разработанных методик калибровки необходимо оценить точность определяемых таким образом элементов внутреннего ориентирования и ее зависимость от условий съемки.

Следует отметить, что существующий в настоящее время способ калибровки по плоскому полигону с использованием разномасштабных снимков, предложенный Быковым В. Л и Быковым А. Л. в работах [9, 18, 21] и описанный в 1.4, не обеспечивает возможность полной калибровки камеры, что также отражено в 1.5.

### 2.3 Исключение систематических погрешностей, вызванных нестрогим соблюдением геометрических условий в процессе калибровки

Существуют разные подходы к калибровке, но все они предполагают соблюдение определенных условий, налагаемых конкретными методами [32].

При реализации способов калибровки неизбежны случаи, когда геометрические условия выдержаны недостаточно точно [15]. Нарушение геометрических условий, необходимых для того или иного способа калибровки, может снизить точность определения параметров или не позволить определить их вовсе. Поэтому, с точки зрения эффективности способов калибровки и сферы их применения, крайне важно знать степень влияния нестрогого соблюдения геометрических условий в конкретных способах, а также определить возможность компенсации подобных нарушений.

Так, к примеру, использование плоского тест-объекта (полигона) для калибровки традиционным способом (с получением одного-двух относительно горизонтальных снимков и обработкой данных под условием коллинеарности проектирующих лучей) приведет к возникновению неопределенности при нахождении параметров калибровки из-за влияния возникающего эффекта преобразования связки лучей, и полная калибровка будет невозможна [4]. Однако если увеличить количество снимков и задать их наклон по определенной схеме, измерить координаты центра фотографирования, либо обеспечить взаимное превышение точек тест-объекта не менее 20 % от высоты фотографирования, то задача полной калибровки будет решена.

В то же время неизвестно как изменится эффективность метода, обеспечивающего возможность калибровки по плоскому тест-объекту за счет использования нескольких снимков, полученных при разных углах наклона оптической оси, если перепад высот все же будет присутствовать. Впрочем, можно предположить, что результаты калибровки улучшатся, так как произойдет совмещение двух различных вариантов калибровки.

Рассмотрим влияние нестрогого соблюдения геометрических условий на конкретном примере. Так, методика 2.1 в качестве обязательного условия предполагает, что съемка тест-объекта производится из одной точки пространства [15]. При использовании данного условия в других методиках уменьшается количество определяемых параметров, что позволит повысить точность определения элементов внутреннего ориентирования и параметров дисторсии. Понятно, что обеспечить данное условие при фотографировании «с рук» невозможно и смещение будет присутствовать.

Простым, на первый взгляд, решением этой проблемы является использование дополнительных фиксирующих устройств, а именно штативов. Штативы также используются для исключения смаза изображения при больших выдержках фотоаппарата. Так, например, штатив применяется при экспонировании звездного неба – как в одном из способов калибровки [34].

Но даже при использовании штатива, из-за несовпадения точки фотографирования и точки крепления камеры на штативе (рисунок 30), при изменении положения оптической оси фотоаппарата происходит смещение центра фотографирования и условие съемки нарушается (рисунок 31). Однако такое смещение подчиняется геометрическим законам и его можно математически описать, в отличие от смещения, возникающего при съемке «с рук».

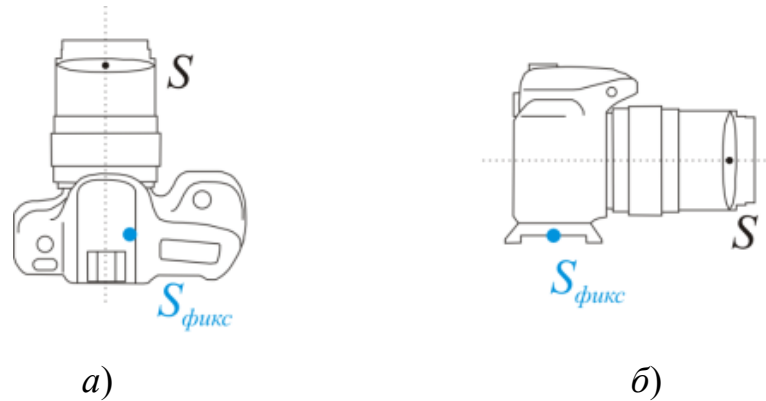


Рисунок 30 – Несовпадение центра фотографирования и точки крепления камеры на штативе: *a)* вид сверху; *б)* вид сбоку

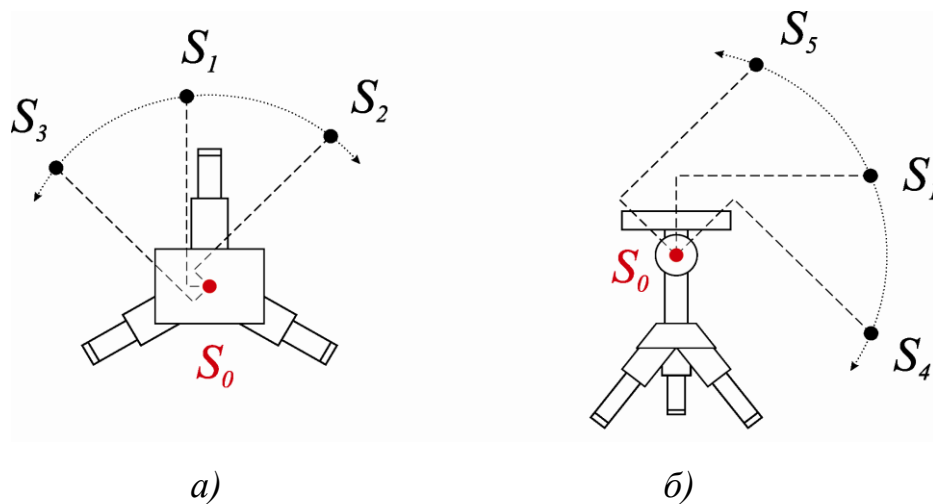


Рисунок 31 – Смещение центра фотографирования относительно точки поворота камеры на штативе: *a)* в горизонтальной плоскости; *б)* в вертикальной плоскости

Логично предположить, что влияние, оказываемое смещением ( $l$ ) центра фотографирования, будет линейно зависеть от расстояния ( $H$ ) между объектом съемки (калибровочным полигоном) и центром вращения штативной головки ( $S_0$ ), на которую крепится камера (рисунок 32), а именно уменьшаться при увеличении этого расстояния. Аналогичная зависимость будет прослеживаться и при изменении величины смещения камеры, т. е. при уменьшении смещения будет уменьшаться и влияние, вызванное им. Экспериментальное подтверждение описанного влияния приведено в 3.3.

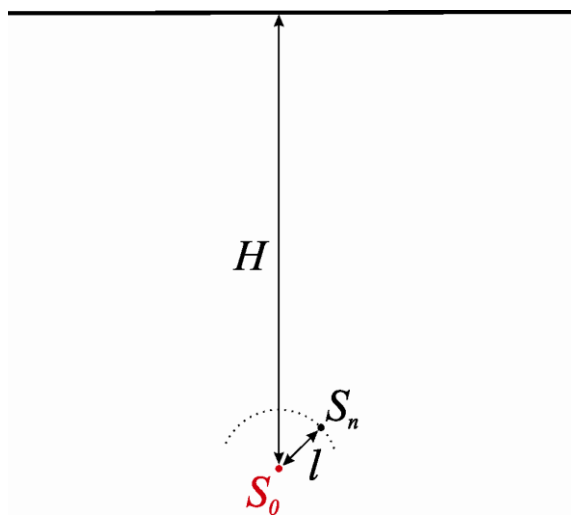


Рисунок 32 – Схема съёмочной системы с указанием расстояния до объекта  $H$  и величины смещения центра фотографирования  $l$

Уменьшить или вовсе исключить влияние смещения центра фотографирования можно либо уменьшив смещение, либо значительно увеличив расстояние от съёмочной системы до снимаемого тест-объекта. Можно расчетным или экспериментальным путем определить такое расстояние, при котором влияние смещения центра фотографирования станет минимальным и незначимым (рисунок 33).

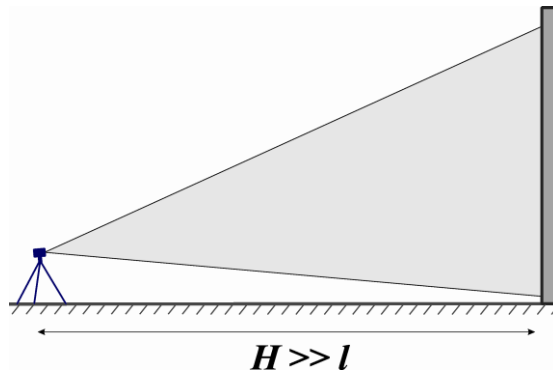


Рисунок 33 – Увеличение расстояния до снимаемого тест-объекта как один из способов сокращения влияния смещения центра фотографирования

Такой, казалось бы, простой способ решения обозначенной проблемы, в свою очередь, имеет собственные особенности и зачастую сложен в практической реализации [46]. Осложняющим фактором является тот факт, что значимое увеличение (в пять-десять раз) расстояния между съемочной системой и тест-объектом, как правило, невозможно, если речь идет о тест-объекте, находящемся в помещении. При калибровке важно, чтобы марки тест-объекта заполняли центральный снимок по всему полю, а при увеличении расстояния до тест-объекта это условие не удастся выполнить, тем более при калибровке камеры с короткофокусным широкоугольным объективом с большим углом поля зрения, как это зачастую необходимо.

Увеличить указанное расстояние можно, если использовать в качестве тест-объекта поверхность большого размера, например, стену кирпичного строения достаточных размеров. Наличие кирпичной текстуры снимаемого объекта позволит на снимках выполнить измерения координат большого количества точек-марок, которыми могут служить углы кирпичей.

Еще одним способом устранения влияния смещения точки фотографирования на точность определения параметров калибровки является использование штатива с панорамной сферической головкой (рисунок 34). Главным отличием этих головок является наличие трех направляющих, благодаря которым возможно установить камеру так, чтобы ее вращение совершалось вокруг передней узловой точки объектива [59].



Рисунок 34 – Панорамная сферическая штативная головка (Manfrotto 303 SPH)

Для этого камера сначала устанавливается приблизительно (рисунок 35), и затем ее положение на панорамной сферической головке штатива уточняется по серии тестовых снимков. На тестовых снимках, полученных при крайних положениях камеры, сравниваются продольные и поперечные параллаксы между парой объектов, находящихся на разном расстоянии от объектива. После корректировки положения камеры выполняется следующая серия снимков.

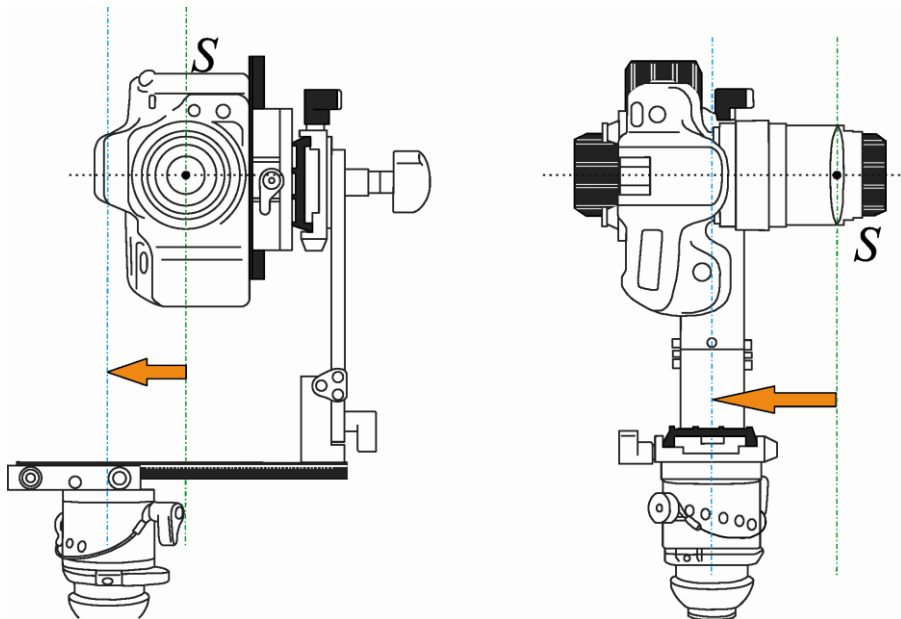


Рисунок 35 – Предварительное центрирование камеры

К недостаткам использования штативов с панорамной сферической головкой является их сравнительно высокая стоимость (в 10–15 раз выше стоимости обычных штативов).

Еще одним способом уменьшения влияния смещения центра фотографирования на результат калибровки является математическое описание такого смещения [49]. Если смещение описано с высокой степенью достоверности, то систематические погрешности определения элементов внутреннего ориентирования камеры будут минимальны и не отразятся на результате калибровки.

Для этого предполагается использовать геометрическую модель штатива [49].

Математически это можно записать следующей формулой:

$$S_i = S_0 + A_i l, \quad (20)$$

где  $S_i$  – координаты  $i$ -го центра фотографирования;

$S_0$  – координаты точки вращения штативной головки;

$A_i$  – матрица перехода из пространственной системы координат снимка во внешнюю систему координат;

$l$  – вектор смещений точки фотографирования относительно точки вращения штативной головки в пространственной системе координат снимка.

Известно, что камера закреплена на штативе, поэтому можно выделить центр вращения штативной головки. Вращение происходит вокруг двух координатных осей, при этом передняя узловая точка объектива отстоит от этого центра на определенном расстоянии, постоянное для конкретной системы камера-штатив. В результате добавления математической модели штатива углы разворота камеры не меняются, а центры фотографирования лежат на сферической поверхности, как показано на рисунке 36, т. е. на поверхности, которую очерчивает оптический центр объектива при развороте камеры.

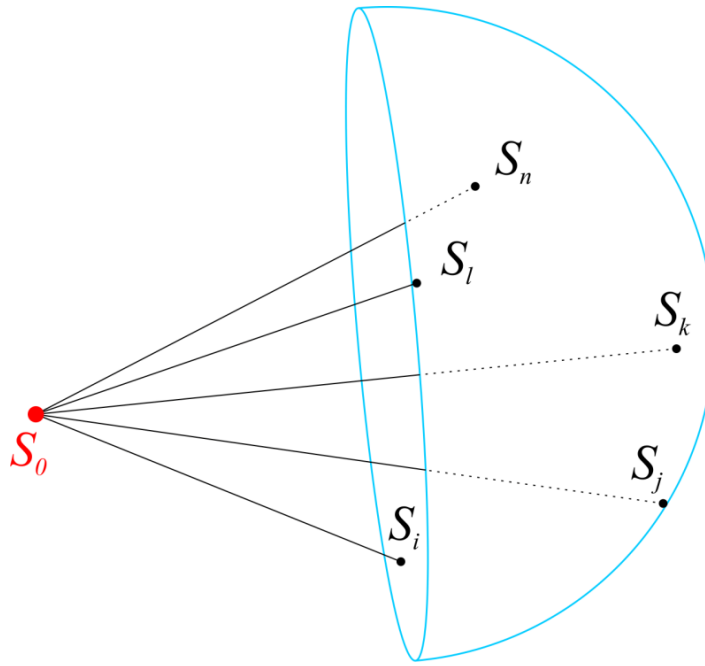


Рисунок 36 – Положение центров фотографирования относительно точки вращения штативной головки

Сфера – есть совокупность равноудаленных точек от одной точки, в данном случае от центра вращения штативной головки. Радиусом этой сферы будет выступать расстояние от центра вращения штативной головки до передней узловой точки объектива, т. е. все центры фотографирования будут лежать на этой сфере. Причем, согласно законам геометрии, для того чтобы определить пространственное положение сферы (по сути, построить ее), необходимо иметь минимум четыре точки. Поэтому для методов, предполагающих получение из одной точки пространства менее четырех снимков, выполнить математическое описание смещения центра фотографирования с большой точностью вряд ли удастся.

В качестве основной выбрана схема фотографирования из пяти снимков, что вполне отвечает описанным требованиям.

Однако в случае, когда фактически центры фотографирования не совпадают, а их положение изменяется по определенному закону из-за использования штативной головки, алгоритм такой методики калибровки будет выглядеть следующим образом:

а) обеспечение и описание условий фотографирования: камера закреплена на штативе, по выбранной схеме фотографирования с определенными углами наклона создается пять снимков;

б) выполнение процесса решения, состоящего из трех этапов:

- 1) вычисление пространственных координат точки съемки и угловых элементов ориентирования снимков по координатам точек тест-объекта и результатов измерения координат этих точек на снимках под условием получения снимков из одной точки пространства;
- 2) добавление в систему уравнений математической модели штативной головки с последующим уточнением ориентации снимков и параметров штатива;
- 3) определение элементов внутреннего ориентирования и параметров дисторсии.

Описанные способы учета систематических погрешностей требует подтверждения своей состоятельности в ходе проведения экспериментальных работ.

#### 2.4 Технология исследования методик калибровки на основе использования макетных снимков

Применение макетных снимков – это удобный и надежный способ решения ряда задач, возникающих в фотограмметрии. Макетные снимки можно разделить на несколько типов, каждый из которых соответствует определенной проблеме. Так, например, можно создать макетные снимки с внесенными искажениями для отработки алгоритмов калибровки съемочных систем или тестирования цифровых фотограмметрических станций (ЦФС). Такие снимки создаются для решения конкретной задачи и недоступны широкому кругу пользователей.

Для тестирования работоспособности вариантов калибровки, описанных в 2.2 и 2.3, также могут быть использованы макетные снимки. Разные способы

предъявляют разные требования к особенностям создания макетных снимков, но общая схема макетирования для всех случаев выглядит одинаково:

- задаются параметры камеры (размер кадра, номинальное значение фокусного расстояния и др.);
- формируется снимаемый тест-объект (полигон) требуемых размеров с определенным набором точек-марок;
- задается положение точек фотографирования и углы наклона оптической оси в соответствии с количеством снимков;
- в ходе решения обратной фотограмметрической задачи по условию коллинеарности проектирующих лучей определяются координаты точек на снимке, выходящие за его пределы – отфильтровываются;
- вносятся случайные ошибки в значения координат точек для имитации случайных погрешностей при измерении точек.

По полученным данным выполняется калибровка, проводится анализ результатов. Макетные снимки используются для исключения влияния неконтролируемых источников погрешностей, которые могут возникнуть при полевых измерениях в процессе выполнения реальных экспериментов. Также использование макетных снимков позволяет максимально достоверно оценивать погрешности, так как известно истинное положение точки фотографирования относительно плоскости снимка, в системе координат снимка.

Создание макетных снимков для тестирования способов калибровки в данной работе будет выполняться в вычислительной среде программирования – Equilibrium (рисунок 37), разработанной к.т.н., доцентом кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования Никитиным В. Н.

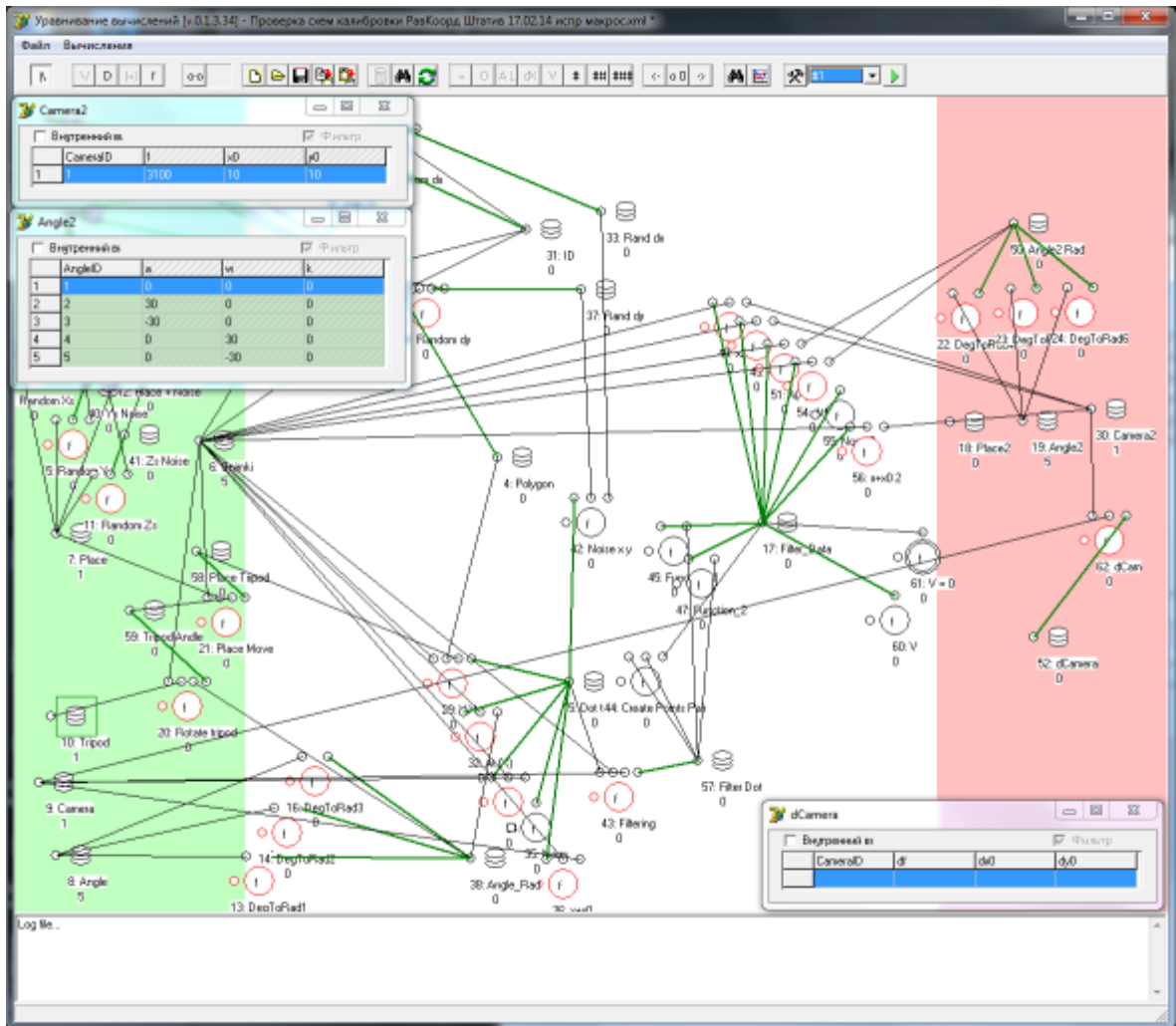


Рисунок 37 – Рабочий процесс тестирования алгоритма калибровки в вычислительной среде программирования Equilibrium

## 2.5 Разработка тест-объекта для калибровки цифровых съемочных систем

Качество и надежность калибровки зависят как от выбора условий съемки и метода, используемого для обработки данных, так и от выбора калибровочного тест-объекта [50].

Согласно проведенному обзору в 1.4, существующие тест-объекты можно условно разделить на:

– тест-объекты, размещаемые в помещениях;

- испытательные полигоны;
- особый вид тест-объектов.

К особому виду можно отнести тест-объекты, которые имеют естественное происхождение, например звездное небо. Главным достоинством калибровки по звездам является соответствие реальным условиям фотографирования (используется фокусировка на бесконечность, как и в случае аэрофотосъемки [12, 21]). Однако применение данного метода затруднено из-за требований к условиям съемки (отсутствие городской засветки и засветки от луны, отсутствие облаков, дымки и т. д.).

Испытательные полигоны, как правило, представляют равнинные территории с относительно небольшим перепадом высот и предназначены в основном для калибровки специальной съемочной аппаратуры [21]. Создание и обслуживание такого полигона требует больших затрат. При этом, как отмечалось в 2.2, не всегда возможно выполнить полную калибровку камеры, используя классические условия съемки и методы обработки данных. Рельефные же полигоны крайне сложны и их создание требуют больших затрат времени и средств. Еще одним недостатком использования таких тест-объектов является сравнительно низкая плотность точек. Следует отметить, что калибровка камер по испытательным полигонам соответствует реальным условиям аэросъемки.

Тест-объекты, размещаемые в помещениях, представляют собой разные маркированные поверхности. Могут быть как пространственными, так и плоскими.

Плоские – как правило, компактные тест-объекты, представленные шаблонами [20, 26, 42, 65] или проекциями на стену, как в одном из вариантов калибровки, предлагаемых разработчиками программного продукта Photomodeler [71]. По таким тест-объектам полную калибровку можно выполнить только при использовании большого количества снимков, полученных при различном положении съемочной камеры или невозможно вовсе [15]. Точность определения координат марок тест-объекта будет снижаться из-за деформации листов бумаги и дрейфа изображения, формируемого проектором.

В пространственных тест-объектах к точкам, замаркированным на плоскости, добавляются точки, вынесенные из нее – например, путем использования сопряженных плоскостей или пространственной рамы [12, 31, 45, 62]. За исключением возможности калибровки камер с использованием условия коллинеарности проектирующих лучей, пространственные тест-объекты обладают теми же недостатками, что и плоские.

В результате анализа рассмотренных материалов, были сформулированы следующие требования к созданию тест-объекта:

- большое количество равномерно расположенных точек;
- высокая скорость создания тест-объекта и его компактность (возможность размещения в помещении);
- возможность использования для калибровки различных типов фотограмметрических задач;
- возможность полной калибровки, т. е. определение элементов внутреннего ориентирования снимков и дисторсии объектива;
- возможность измерений координат точек в интерактивном и автоматическом режимах;
- наличие системы, контролирующей точность измерений;
- возможность использования дополнительных геометрических условий;
- наличие системы идентификации точек.

При калибровке камеры важно, чтобы марки тест-объекта заполняли все поле снимка. При этом съемка не должна производиться с очень близкого расстояния (как в случае использования тест-объектов на основе одного шаблона стандартного формата А3 или А4), так как условия съемки будут значительно отличаться от реальных условий, вследствие чего изменятся параметры калибровки (в частности, фокусное расстояние и зависящие от него коэффициенты дисторсии объектива) [68].

Для выполнения качественной калибровки тест-объект должен иметь большое количество марок. Печатать тест-объект большого формата – сложно, создавать каждую марку отдельно – займет много времени. Использовать тест-объект

малого формата (А4–А0, экран монитора и т. п.) – не имеет смысла по причинам, описанным выше.

Исходя из сказанного, логично предположить, что один из лучших вариантов тест-объекта для калибровки – это тест-объект, размещенный по всей высоте стены (для стандартных помещений). Для создания такого тест-объекта следует использовать листы шаблона, которые могут быть оперативно развернуты для последующих измерений.

На основе выявленных требований к созданию тест-объекта и в соответствии с описанными рекомендациями, был разработан и подготовлен в графическом редакторе шаблон тест-объекта, который представлен на рисунке 38.

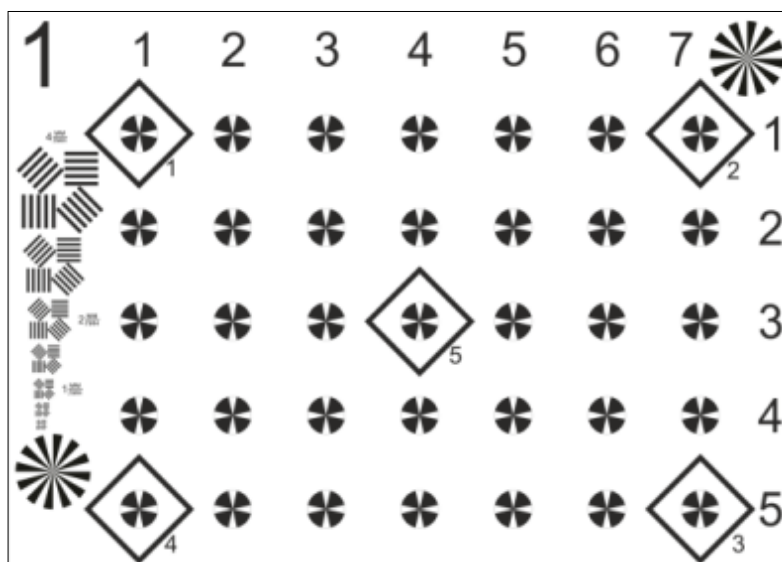


Рисунок 38 – Шаблон тест-объекта

Стоит отметить, что конфигурация тест-объекта на основе шаблонов может меняться в зависимости от помещения.

Как правило, большое количество точек на тест-объектах затрудняет их координирование. Координаты точек тест-объекта, состоящего из таких шаблонов, предлагается определять с использованием тахеометра только для точек с особой маркировкой. Зная расположение специальных точек на шаблонах, можно рассчитать координаты всех остальных точек. Все листы, а также ряды и строки на этих

листах, пронумерованы, что позволяет достоверно идентифицировать марки на снимках.

В качестве формы точки тест-объекта (рисунок 39) используется круглая марка, которая оптимально подходит для автоматической идентификации, совмещенная с мальтийским крестом, удобным для идентификации точек на снимке в ручном режиме. На листе находятся по 35 марок в виде мальтийского креста, пять из которых имеют специальную маркировку.



Рисунок 39 – Форма марки тест-объекта

На листе помимо марок и нумерации расположены две радиальные миры и набор штриховых мир, что позволяет параллельно с калибровкой определять разрешение съемочной системы и его распределение по полю снимка для того, чтобы корректно определять точность измерений по снимкам и корректно рассчитывать параметры наземной съемки или аэрофотосъемки [36, 60].

В заключение второго раздела диссертационного исследования следует отметить, что в ходе теоретических исследований и проведенного анализа была математически обоснована возможность выполнения полной калибровки камер по снимкам плоского полигона. Выполнен анализ и предложен подход к учету влияния нестрогого соблюдения геометрических условий, предъявляемых методом калибровки. Обосновано использование макетных снимков для выполнения оценки предложенных вариантов калибровки камер, а также предложен подход к созданию калибровочного тест-объекта в одной из учебных аудиторий Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ). Все предложенные подходы к калибровке камер и учету систематических смещений при использовании штативной головки при съемке тест-объекта нуждаются в экспериментальной проверке, которая будет представлена в следующем разделе.

### 3 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ КАЛИБРОВКЕ СЪЕМОЧНЫХ СИСТЕМ

#### 3.1 Проверка корректности усовершенствованной методики калибровки по плоскому тест-объекту с использованием макетных снимков

Для проверки работоспособности описанных в 2.2 методик калибровки были выполнены численные эксперименты с использованием макетных снимков [35, 38].

Для этого в вычислительной среде программирования Equilibrium моделировались ситуации калибровки с разными параметрами съемки для цифровой камеры Sony Alpha NEX-5 (объектив E 16mm F2.8). Цифровой тест-объект представлял собой плоскую поверхность размером  $2 \times 2$  км, на которую нанесены опорные точки с шагом 50 м. Координаты главной точки  $x_0$ ,  $y_0$  заданы равными 10 пикселям. Центры фотографирования  $S$  заданы в соответствии с условиями эксперимента (таблица 1), высота фотографирования  $Z_S$  принята 300 м.

Таблица 1 – Параметры макетных снимков

Вариант	Методика калибровки	Вариант макетных снимков
0-1	эталонная методика	1 снимок, $\alpha = 0^\circ$ , горизонтальный снимок; $X_S, Y_S, Z_S$ известны из ГНСС-измерений
1-1	методика 1	1 снимок, $\alpha = 30^\circ$ , $X_S, Y_S, Z_S$ известны из ГНСС-измерений
1-2		1 снимок, $\alpha = 30^\circ$ , $X_S$ и $Y_S$ известны из ГНСС-измерений
1-3		1 снимок, $\alpha = 30^\circ$ , $Z_S$ известно из ГНСС-измерений
1-4		1 снимок, $\alpha = 30^\circ$ , $X_S$ известно из ГНСС-измерений
2-1	методика 2	1 камера, 2 снимка, $\alpha_1 = 30^\circ$ , $\alpha_2 = -30^\circ$ ; $S_1 = S_2$
2-2		1 камера, 2 снимка, $\alpha_1 = 30^\circ$ , $\alpha_2 = -30^\circ$ ; $S_1 \neq S_2$
2-3		2 камеры, 2 снимка, $\alpha_1 = 30^\circ$ , $\alpha_2 = -30^\circ$ ; $S_1 = S_2$
3-1	методика 3	1 камера, 2 снимка, $\alpha_1 = 30^\circ$ , $\omega_2 = 30^\circ$ ; $S_1 = S_2$
3-2		1 камера, 2 снимка, $\alpha_1 = 30^\circ$ , $\omega_2 = 30^\circ$ ; $S_1 \neq S_2$

Для каждого варианта калибровки с использованием генератора случайных чисел сформировано 30 различных макетов, в рассчитанные координаты точек

макетных снимков внесены случайные ошибки, имитирующие погрешности измерений со средней квадратической ошибкой (СКО) 0,5 пикселя.

Эксперименты отражали различные варианты методик калибровки, рассмотренные в 2.2. Для сравнения результатов в качестве эталонного варианта принята калибровка по плоскому тест-объекту с известными координатами центра фотографирования, полученными с помощью ГНСС [9]. Точность определения плановых координат центров фотографирования была задана средней квадратической погрешностью 0,1 м, высот – 0,3 м.

Оценка качества калибровки выполнена на основе погрешностей определения фокусного расстояния  $\sigma_f$  и координат главной точки  $\sigma_{x_0}$  и  $\sigma_{y_0}$ . После обработки макетных снимков определены максимальная и минимальная погрешности, среднее значение погрешности и средняя квадратическая ошибка определения фокусного расстояния и координат главной точки.

Результаты обработки макетных снимков представлены на рисунке 40.

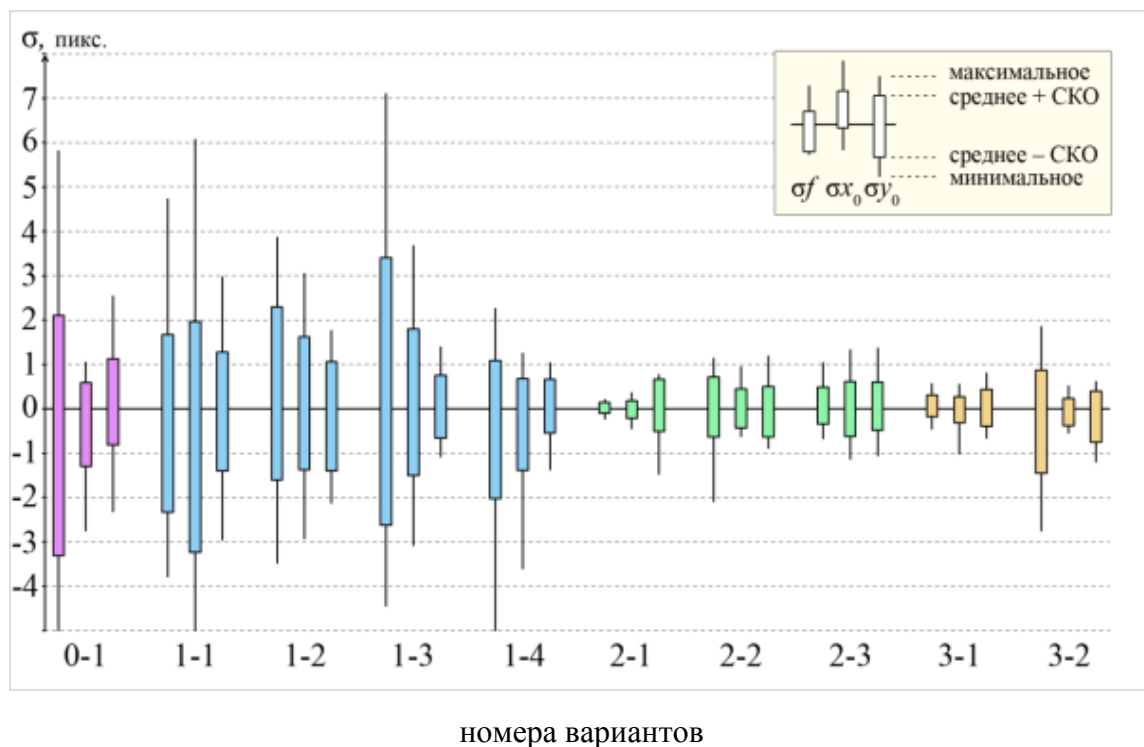


Рисунок 40 – Результаты различных вариантов калибровки снимков по плоскому тест-объекту

Численные результаты экспериментов представлены в приложении А.

Результаты моделирования показали, что все предложенные в таблице 1 методики работоспособны. Использование для калибровки НЦСК пары наклонных снимков (варианты 2-1, 2-2, 2-3, 3-1, 3-2) предпочтительнее использования одного снимка и данных ГНСС для определения координат центра фотографирования (варианты 0-1, 1-1, 1-2, 1-3, 1-4), если точность измерения координат точек снимка (0,5 пикселя по осям  $x$  и  $y$ ) выше точности ГНСС-измерений (приведенная СКО по осям  $X$  и  $Y$  – 1 пиксель, по оси  $Z$  – 3 пикселя).

Использование для калибровки даже одного наклонного снимка (варианты 1-1, 1-2, 1-3, 1-4) позволяет проконтролировать точность определения с помощью ГНСС координат центра фотографирования благодаря избыточности геометрических условий.

При использовании методик 2 и 3, отличающихся положением плоскостей главного вертикала снимков, получены аналогичные результаты, что дает основания объединить две методики в одну, сняв ограничения на взаимное расположение плоскостей наклона двух снимков, и рекомендовать ее как основную методику калибровки НЦСК.

Для калибровки НЦСК осуществляется фотографирование тест-объекта или испытательного полигона при наклонном положении оптической оси съемочной камеры серией не менее двух снимков. Углы наклона снимков относительно тест-объекта должны составлять не менее  $30^\circ$ , углы между главными лучами снимков – не менее  $60^\circ$ . Тогда на тест-объект не накладываются ограничения, связанные с превышением точек над его средней плоскостью.

Варианты 2-1 и 3-1, соответствующие случаю калибровки НЦСК по двум снимкам из одной точки пространства, показали наилучшую точность определения элементов внутреннего ориентирования.

### 3.2 Проверка предложенной методики калибровки с использованием математической модели смещения центра фотографирования

Для оценки влияния смещения точки фотографирования на точность определения элементов внутреннего ориентирования также был проведен ряд численных экспериментов по макетам снимков.

Моделируемый тест-объект, как и в предыдущих исследованиях, представляет собой плоскую поверхность, на которую нанесены точки с шагом 25 см. Съемка моделировалась для фотоаппарата Sony Alpha NEX-5 с размером кадра  $4\,592 \times 3\,056$  пикселей (физический размер матрицы  $23,4 \times 15,6$  мм) и фокусным расстоянием 3 100 пикселей (объектив 16 мм). Координаты главной точки были заданы как  $x_0 = y_0 = 10$  пикселей. Расстояние от съемочной системы до тест-объекта составило 2 м.

Следует отметить, что в представленных ниже экспериментах использована система координат, согласно которой оси  $S_0X$  и  $S_0Y$  расположены параллельно плоскости тест-объекта, а ось  $S_0Z$  перпендикулярно к ней и направлена в противоположную сторону от тест-объекта, как это показано на рисунке 41.

В ходе экспериментов было сформировано 10 вариантов съемочных систем с разным значением величины смещения центров фотографирования относительно центра вращения штативной головки – от 0,000 1 до 0,1 м по оси  $S_0X$  и столько же по оси  $S_0Z$ .

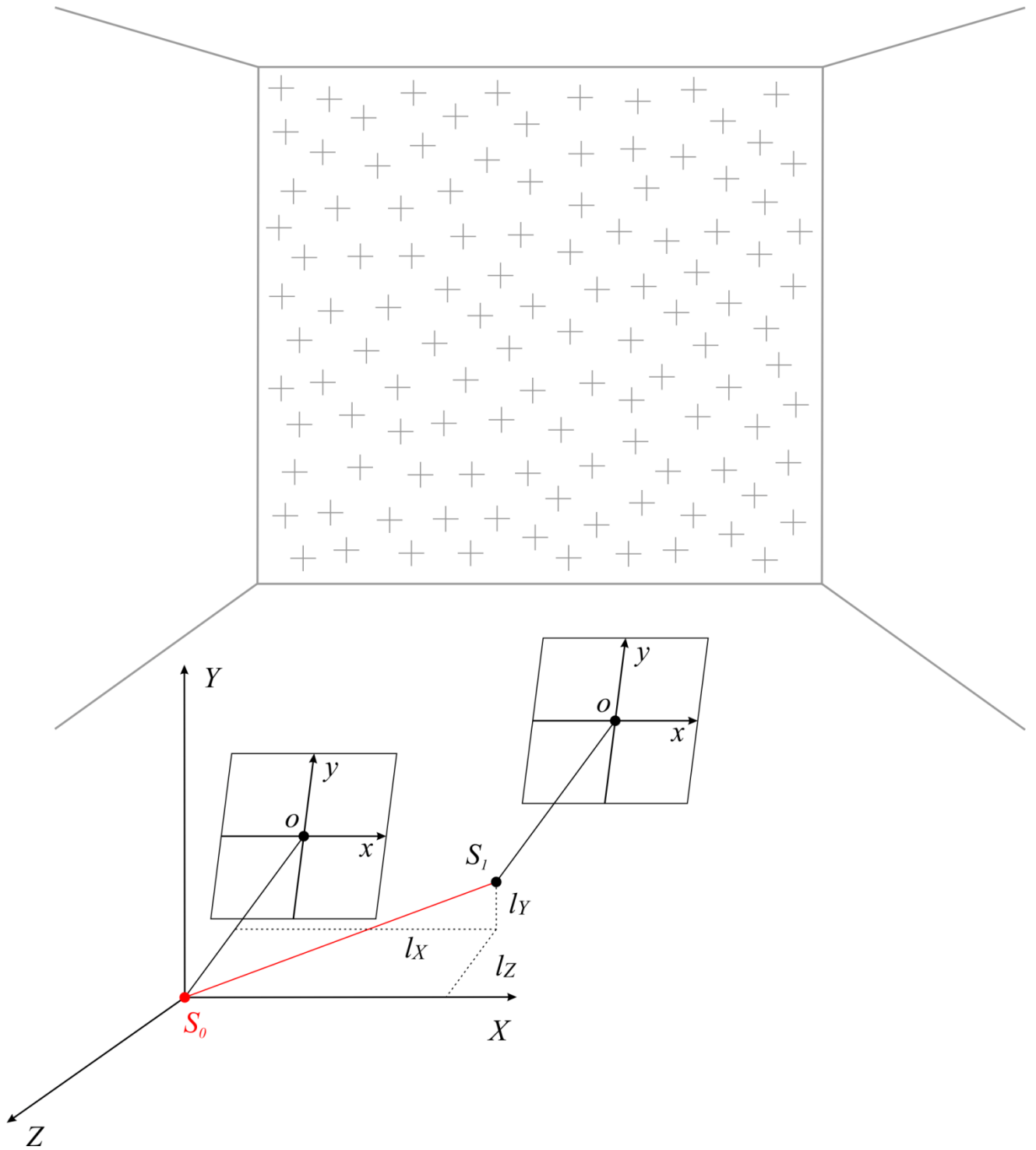


Рисунок 41 – Система координат при калибровке  
по макетным снимкам

В каждом варианте, для повышения надежности результатов, получаемых в ходе экспериментов, создавалось по 20 наборов макетных снимков. Каждый набор включает в себя пять снимков с разной ориентацией оптической оси камеры (таблица 2).

Таблица 2 – Углы наклона и разворот снимков

Снимок	Продольный угол наклона ( $\alpha$ )	Поперечный угол наклона ( $\omega$ )	Угол разворота ( $\kappa$ )
1	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$
2	$30^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$
3	$-30^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$
4	$0^\circ$	$30^\circ$	$0^\circ$
5	$0^\circ$	$-30^\circ$	$0^\circ$

В рассчитанные координаты точек макетных снимков были внесены случайные ошибки, имитирующие погрешности измерений со средним квадратическим отклонением по осям  $ox$  и  $oy$  0,5 пикселя в первой и второй сериях, и 0,1 пикселя в третьей и четвертой сериях. Разная величина случайных ошибок задавалась для определения влияния погрешности измерений на описанные выше зависимости. Во всех экспериментах на центральном снимке определялись координаты 74 точек, равномерно распределенных по полю изображения. При уравнивании результатов макетирования формировалось около 500 связей между соответственными точками, отобразившимися на всех снимках. Анализируемыми величинами были погрешности определения фокусного расстояния  $\sigma_f$  и координат главной точки  $\sigma_{x_0}$  и  $\sigma_{y_0}$ .

Исходная информация по каждой серии экспериментов представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры макетных снимков

Серия	Децентрация камеры	Точность измерений
1	$l_x$ от 0,0001 до 0,1 м – 10 вариантов	$m_x = m_y = 0,5$ пикс.
2	$l_z$ от 0,0001 до 0,1 м – 10 вариантов	$m_x = m_y = 0,5$ пикс.
3	$l_x$ от 0,0001 до 0,1 м – 10 вариантов	$m_x = m_y = 0,1$ пикс.
4	$l_z$ от 0,0001 до 0,1 м – 10 вариантов	$m_x = m_y = 0,1$ пикс.

Результаты проведенных экспериментов представлены на рисунке 42.

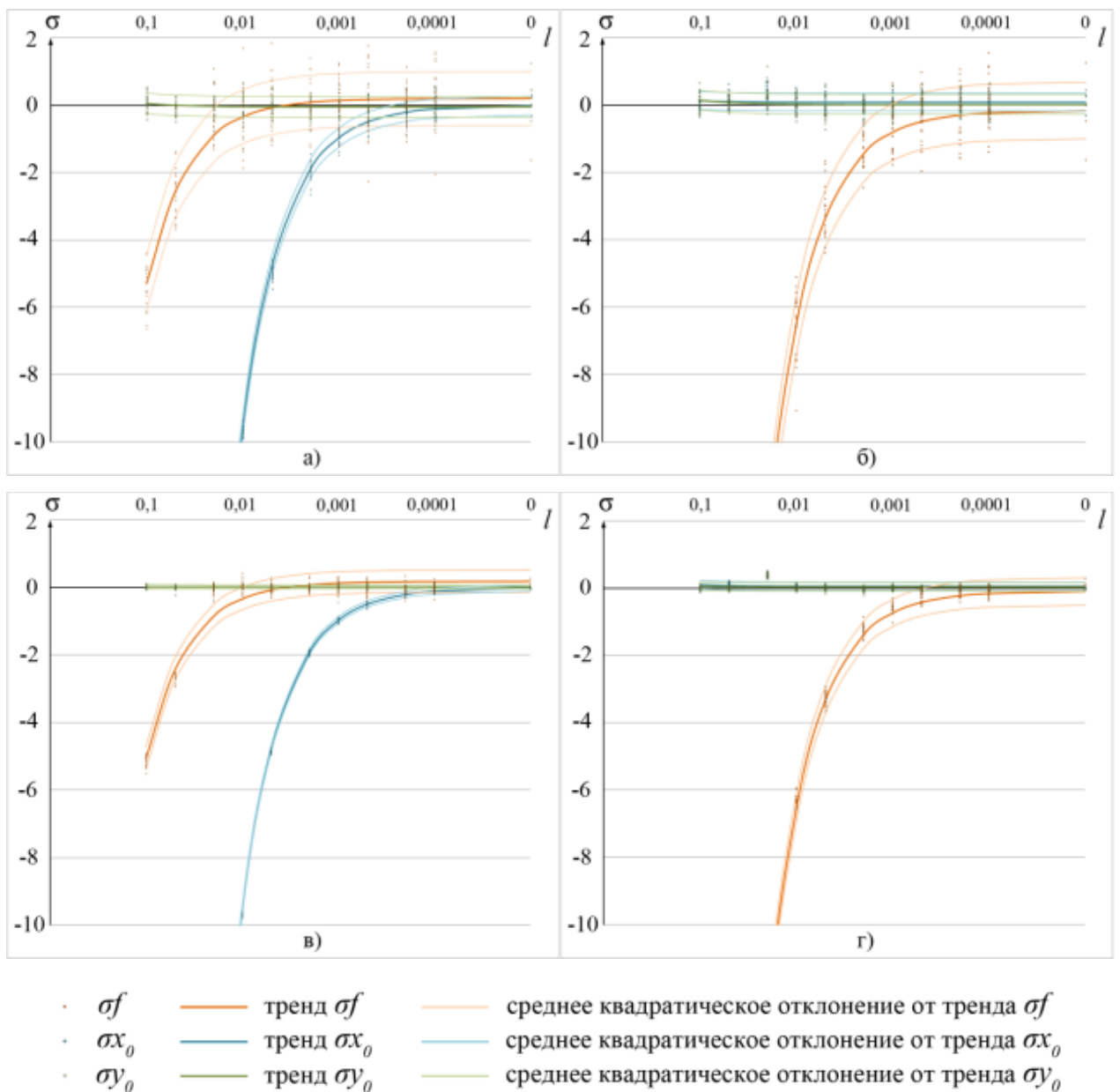


Рисунок 42 – Визуализация результатов экспериментальных исследований:

а) серия 1; б) серия 2; в) серия 3; г) серия 4

На представленных выше графиках на вертикальной оси отображены значения погрешностей определения элементов внутреннего ориентирования  $\sigma_f$ ,  $\sigma x_0$  и  $\sigma y_0$ , которые складываются из систематических  $\Delta$  и случайных погрешностей  $\xi$ :

$$\sigma = \Delta + \xi.$$

На горизонтальной оси – значения децентрации камеры  $l$ . Стоит отметить, что один набор измерений был контрольным – децентрация отсутствовала, т. е.  $l_X = l_Y = l_Z = 0$ . Для значений погрешностей координат главной точки и фокусного расстояния были определены тренд (систематическая погрешность  $\Delta$ ) и среднее квадратическое отклонение от линии тренда (случайная погрешность  $\xi$ ).

Коридор отклонений показан в виде линий значений суммы и разности элементов линии тренда и средних квадратических отклонений случайных погрешностей  $m_\xi$ . Горизонтальная ось – логарифмическая.

Результаты моделирования подтвердили линейную зависимость между величиной смещения центра фотографирования съёмочной системы относительно центра вращения штативной головки и погрешностями определения элементов внутреннего ориентирования. При этом тренд (систематическая погрешность  $\Delta$ ) изображен в виде кривой, так как шкала по горизонтальной оси имеет логарифмический вид.

Точность измерений координат точек на снимке при отсутствии систематических погрешностей определения элементов внутреннего ориентирования хорошо коррелирует со значениями ошибки единицы веса согласно формуле

$$m_{x,y} \approx \frac{\mu}{\sqrt{2}}. \quad (21)$$

При этом существует зависимость между значением ошибки единицы веса и величиной смещения центра фотографирования, которая проявляется при смещении центра фотографирования более чем на 15 пикселей.

Систематическая погрешность определения координат главной точки  $(x_0, y_0)$  увеличивается только при наличии соответственно децентрации по оси  $S_0X$ ,  $S_0Y$ . При этом возникает систематическая погрешность определения фокусного расстояния, но ее величина меньше погрешности по оси, относительно которой произошло смещение, более чем в 15 раз, например, для децентрации по оси  $S_0X$  ( $l_X$ ) была выявлена зависимость следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{0\text{пикс}} &\approx -0,6 l_{X\text{пикс}}; \\ \Delta y_{0\text{пикс}} &\approx 0; \\ \Delta f_{\text{пикс}} &\approx -0,035 l_{X\text{пикс}}. \end{aligned} \right\}$$

В то же время децентрация по вертикальной оси ( $l_Z$ ) приводит к снижению точности определения только фокусного расстояния – погрешность определения координат главной точки практически не меняется:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{0\text{пикс}} &\approx 0; \\ \Delta y_{0\text{пикс}} &\approx 0; \\ \Delta f_{\text{пикс}} &\approx -0,4 l_{Z\text{пикс}}. \end{aligned} \right\}$$

Среднее квадратическое отклонение определяемых параметров от линии тренда (случайных погрешностей) не зависит от смещения центра фотографирования  $l_X$ ,  $l_Y$ , или  $l_Z$ , а зависит только от средних квадратических погрешностей определения плоских координат точек на снимках  $m_x$  и  $m_y$ . Характер этой зависимости пропорционален  $m_{x,y}$ :

$$\left. \begin{aligned} m_{\xi f} &\approx 1,7 m_{x,y}; \\ m_{\xi x_0} &\approx 0,4 m_{x,y}; \\ m_{\xi y_0} &\approx 0,35 m_{x,y}. \end{aligned} \right\}.$$

Если взять за основу условие, что систематическая погрешность определения элементов внутреннего ориентирования не должна превышать случайную, можно определить предельно допустимые величины децентрации для определения фокусного расстояния при смещении в вертикальной плоскости (перпендикулярно плоскости снимка):

$$\left| -0,4 l_{Z \text{ доп\_пикс}} \right| \approx 1,7 m_{x,y \text{ пикс}}$$

или

$$l_{Z \text{ доп\_пикс}} \approx \frac{1,7 m_{x,y \text{ пикс}}}{0,4} \approx 4,25 m_{x,y \text{ пикс}}.$$

Для определения допустимой величины смещения центра фотографирования в пространстве, необходимо полученное значение в пикселах помножить на величину GSD (в англоязычной литературе GSD – ground sample distance) – «размер пикселя» на местности [50], где

$$GSD = \frac{H_M}{f_{\text{пикс}}}. \quad (22)$$

Таким образом, согласно формуле (22) получим

$$l_{Z \text{ доп}_M} \approx 4,25 m_{x,y \text{ пикс}} \cdot \frac{H_M}{f_{\text{пикс}}} \quad (23)$$

Аналогично для определения значений координат главной точки при смещении в горизонтальной плоскости (плоскости снимка):

$$\left| -0,6 l_{X,Y \text{ доп}_\text{пикс}} \right| \approx 0,4 m_{x,y \text{ пикс}},$$

или

$$l_{X,Y \text{ доп}_\text{пикс}} \approx \frac{0,4 m_{x,y \text{ пикс}}}{0,6} \approx 0,67 m_{x,y \text{ пикс}},$$

или

$$l_{X,Y \text{ доп}_M} \approx 0,67 m_{x,y \text{ пикс}} \cdot \frac{H_M}{f_{\text{пикс}}} \quad (24)$$

В качестве примера по полученным формулам (23) и (24) рассчитаем допустимое значение децентрации при расстоянии от центра фотографирования до тест-объекта равном 2 м и 20 м при заданной точности определения плоских координат соответственных точек на снимках равной 0,5 пикселей и известном фокусном расстоянии 3 100 пикселей (таблица 4).

Таблица 4 – Расчетные значения допустимых значений децентрации

Расстояние от съемочной системы до тест-объекта, м	Допустимое значение смещения центра фотографирования	
	$l_{X,Y \text{ доп}}, \text{ мм}$	$l_{Z \text{ доп}}, \text{ мм}$
2	0,22	1,37
20	2,15	13,71

Из полученных допустимых значений смещения точки фотографирования видно, что использование штатива с обычной штативной головкой даже при удалении на 20 м от снимаемого объекта будет вносить систематическую погрешность в определяемые параметры, так как обеспечить смещение не более 2,15 мм на таком штативе невозможно.

Следует отметить, что данные расчеты актуальны для фотоаппарата Sony Alpha NEX-5 с объективом 16 мм.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили необходимость точного соблюдения условий фотографирования геометрическим условиям, налагаемым соответствующим методом калибровки снимков. Анализ эмпирических данных позволил выявить зависимости между смещением центра фотографирования и погрешностями определения элементов внутреннего ориентирования камеры.

Как видно из таблицы 4, даже при расстоянии в 20 м значение смещения центра фотографирования не должно превышать 13,7 мм, притом, что, как правило, на обычных штативах расстояние между точкой фотографирования и точкой вращения камеры на штативе (идеальное положение точки фотографирования) составляет несколько сантиметров, в зависимости от используемого объектива (рисунок 43).

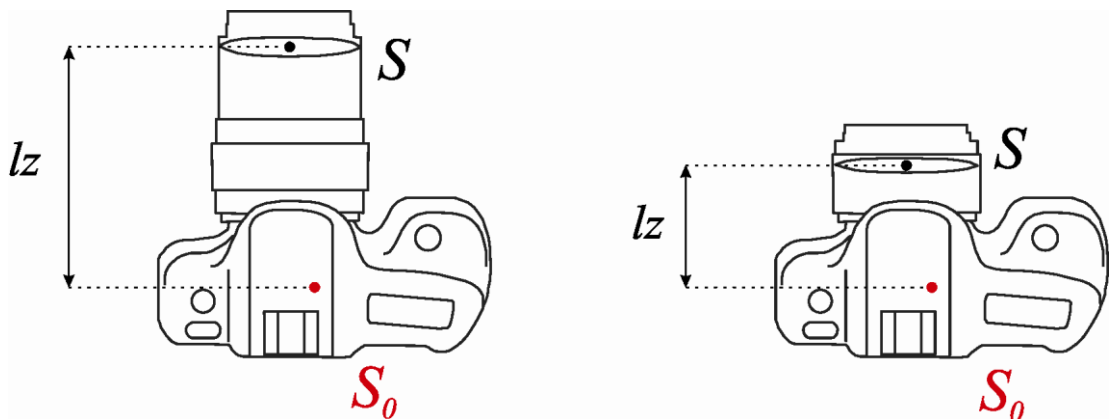


Рисунок 43 – Смещение центра фотографирования относительно центра вращения камеры на штативе для разных объективов

Если использовать расстояние как фактор уменьшения влияния смещения центра фотографирования, рассчитывая полностью избавиться от систематических погрешностей, то величина этого расстояния (съёмочная система – тест-объект) должна быть на несколько порядков больше, чем величина смещения точки фотографирования. Один из лучших вариантов – использование в качестве тест-объекта звездного неба. Однако и такой способ имеет набор требований и ограничений.

Учитывая невозможность достижения максимально высокой (для выбранного способа калибровки) точности решения задачи калибровки при использовании штатива с обычной штативной головкой, рекомендуется применять указанный подход ограниченно, а именно для решения таких практических задач, для которых точность определения значений элементов внутреннего ориентирования будет достаточной.

Для проверки возможности *математического учета* систематических погрешностей, возникающих вследствие смещения центра фотографирования при изменении положения оптических осей, согласно 2.3 были проведены дополнительные эксперименты. По аналогии, и для обеспечения возможности сравнения и совместного анализа, эксперименты проводились с использованием макетных снимков, как и предыдущие исследования.

Прежде всего, с целью моделирования условий создания макетных снимков, соответствующих реальным условиям съёмки, использовались значения смещения центра фотографирования относительно центра вращения штативной головки (идеальный центр фотографирования), аналогичные реальным. Так, для системы камера-штатив, смещение точки фотографирования камеры Sony Alpha NEX-5 с объективом SEL-16f28 (рисунок 44, *а*) относительно центра вращения штативной головки Era ECSA-3110 (рисунок 44, *б*), составляет приблизительно 0,005 м по  $l_x$ , 0,065 м по  $l_y$  и  $-0,04$  м по  $l_z$  (в соответствии с рисунком 41).



Рисунок 44 – Элементы съемочной системы: а) Камера Sony Alpha NEX-5 с объективом SEL-16f28; б) штативная головка Era ECSA-3110

Погрешности измерений также имитировались внесением случайных ошибок в координаты точек снимков со СКО по осям  $ox$  и  $oy$  0,5 пикселя. Для всех вариантов экспериментов создавалось по 20 наборов, имитирующих получение пяти снимков и обработку данных.

Первый вариант в серии экспериментов выполнялся для общей проверки возможности математического описания смещения центра фотографирования на штативной головке, с целью показать наилучший результат, достижение которого возможно в данных условиях. Поэтому приближенные значения положения и ориентации плоскости тест-объекта задавались в соответствии с истинными значениями в данной модели. А именно, наклон плоскости составил  $0^\circ$ , расстояние 2 м. На графике (рисунок 45) показаны погрешности определения элементов внутреннего ориентирования, с указанными выше значениями смещения точки фотографирования, без математического описания смещения и после учета, согласно таблице 5.

Таблица 5 – Параметры вариантов калибровки до и после учета смещения

Вариант	Описание варианта
1	$l_X = 0,005$ м, $l_Y = 0,065$ м, $l_Z = -0,04$ м, без учета смещения
2	$l_X = 0,005$ м, $l_Y = 0,065$ м, $l_Z = -0,04$ м, с учетом смещения

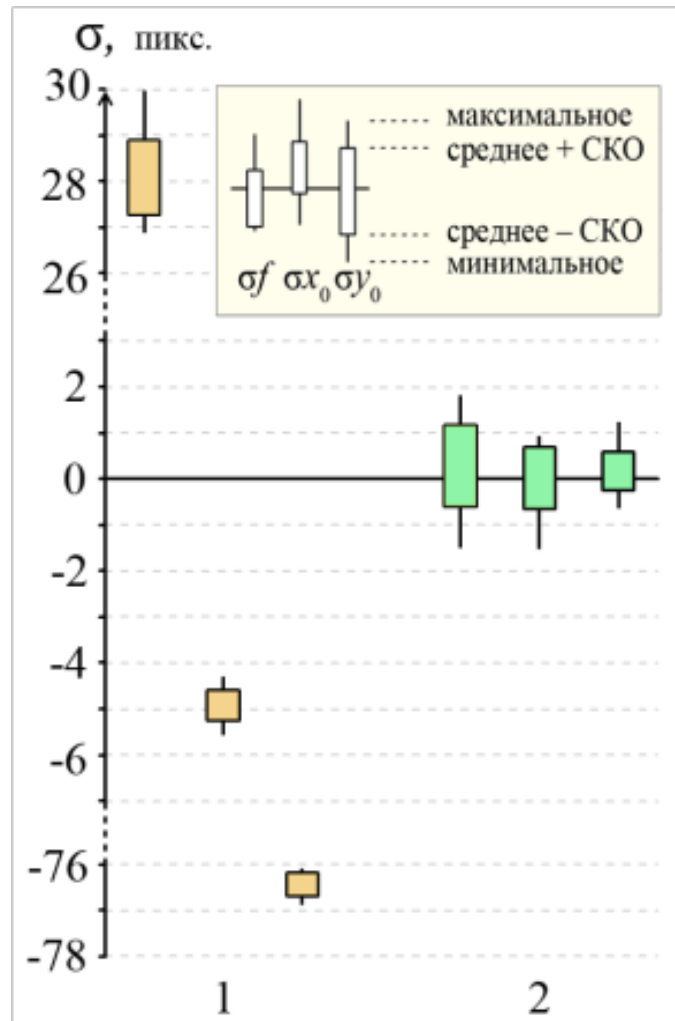


Рисунок 45 – Результаты калибровки до учета смещения центра фотографирования и после

На рисунок 46 для сравнения показаны результаты вариантов калибровки без смещения центра фотографирования на штативной головке (идеальный теоретический возможный вариант) и с указанным смещением, но после математического учета, согласно таблице 6.

Таблица 6 – Параметры вариантов калибровки без смещения и с учетом смещения

Вариант	Описание варианта
1	$l_x = l_y = l_z = 0$ м, эталонный вариант – смещение отсутствует
2	$l_x = 0,005$ м, $l_y = 0,065$ м, $l_z = -0,04$ м, с учетом смещения

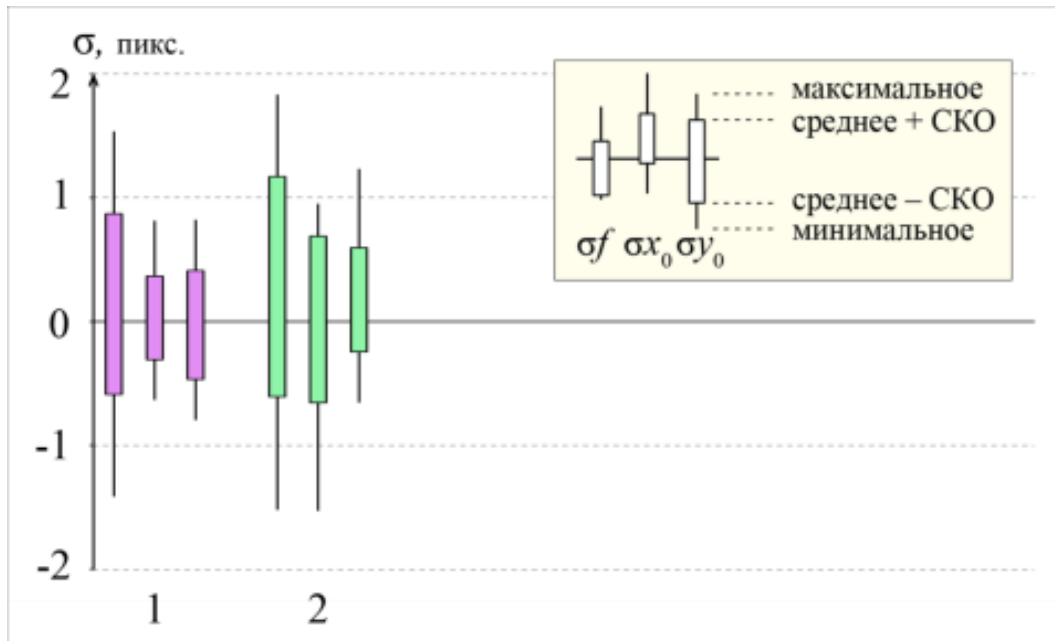


Рисунок 46 – Результаты калибровки без смещения центра фотографирования и после учета смещения

Совершенно очевидно, что предложенный способ позволяет успешно исключить систематические погрешности, вызванные смещением точки фотографирования, из результата калибровки. Результаты практически соответствуют идеальному случаю калибровки при использовании выбранной методики.

### 3.3 Создание тест-объекта для калибровки съемочных систем

В 2.5 был определен подход к созданию тест-объекта на основе разработанных шаблонов. Такой подход был реализован при создании тест-объекта СГУГиТ. Полученный тест-объект (рисунок 47) расположен на двух сопряженных плоскостях примерно под прямым углом.

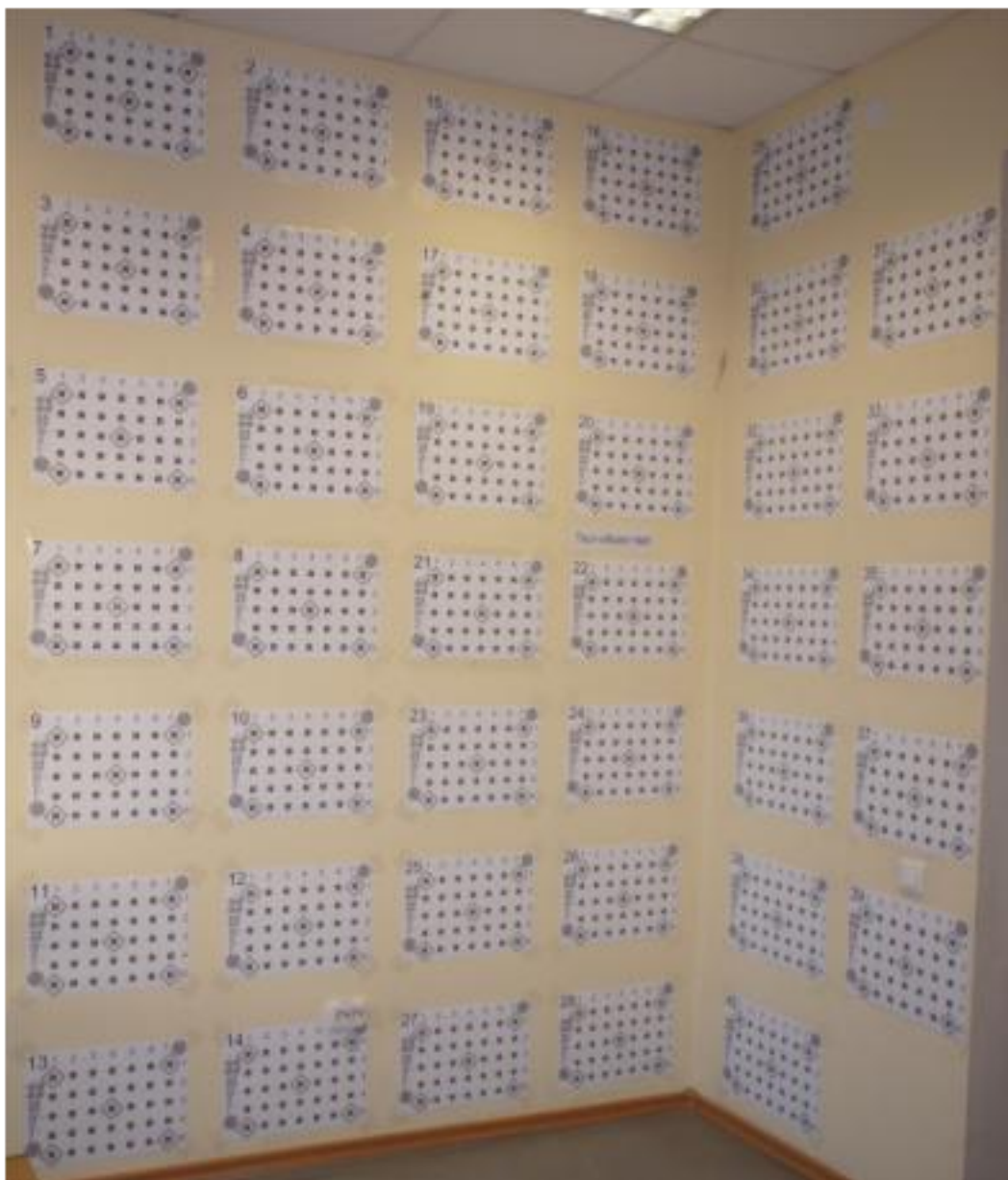


Рисунок 47 – Калибровочный тест-объекта

Схема тест-объекта с указанием размеров элементов показана на рисунке 48.

Преимущество быстрого развертывания и компактность данного тест-объекта достигаются тем, что он представляет собой набор листов формата А3 (плотная бумага  $140 \text{ г/м}^2$ ). Всего на 40 листах содержится 1 400 марок в виде мальтийского креста, из них 200 марок «особые».

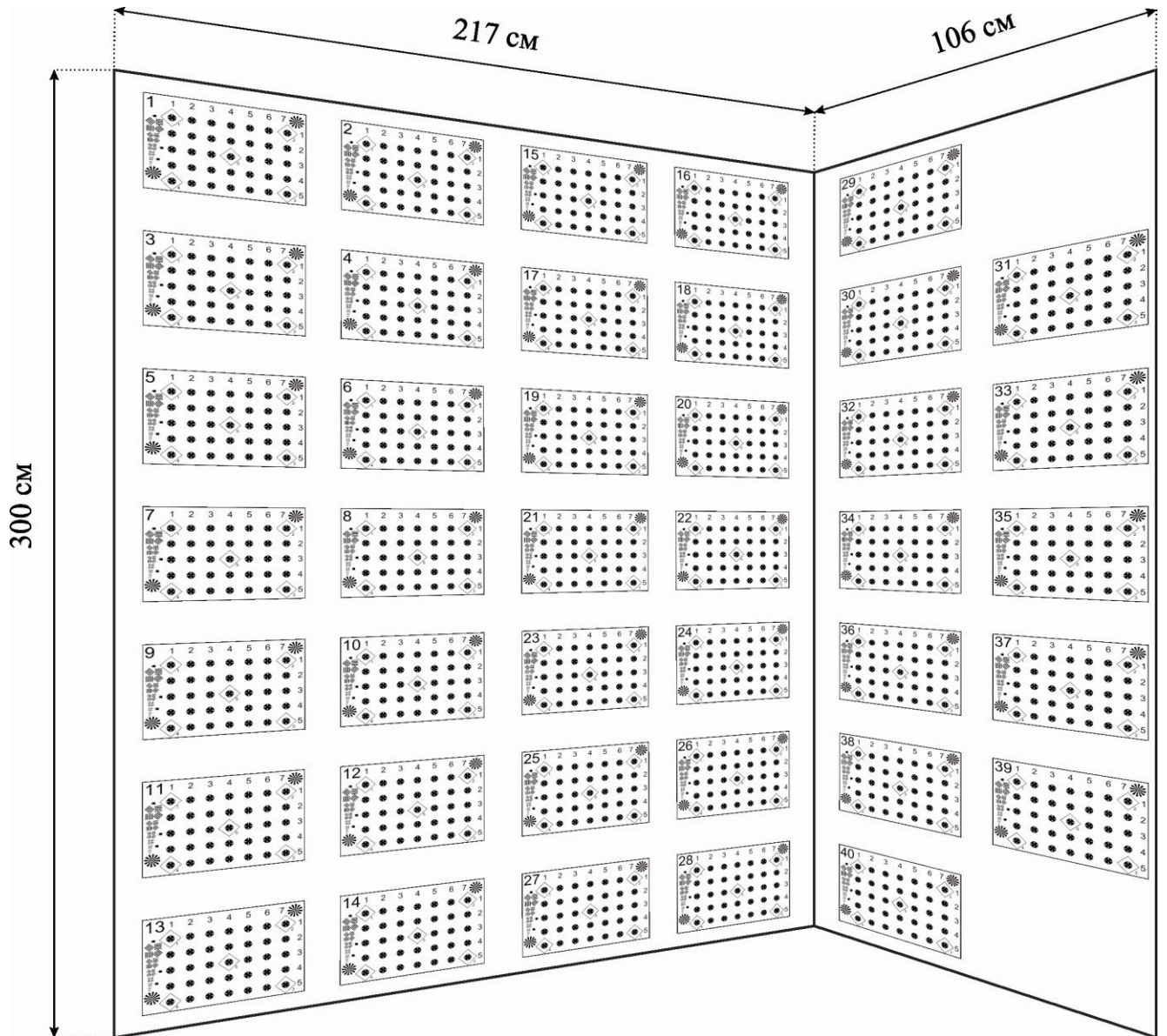


Рисунок 48 – Схема тест-объекта

В результате был создан тест-объект, отвечающий предъявленным в 2.5 требованиям:

- создание и поддержание в рабочем состоянии не требует больших трудовых и финансовых затрат;
- быстро разворачивается (по опыту – достаточно двух часов для создания тест-объекта и около трех часов для измерения координат опорных точек). Таким образом, результаты калибровки можно получить с нуля в течение рабочего дня.
- обеспечивает большую плотность точек (1 400 марок, 200 из которых имеют особую маркировку);

– расположение листов на стыке стен создает необходимый перепад расстояний до точек для обеспечения возможности полной калибровки рядом методов.

Потенциальные возможности тест-объекта не исчерпываются использованием стандартного метода калибровки на основе коллинеарности проектирующих лучей. Взаимное расположение марок в пределах шаблона также может быть использовано в качестве дополнительного геометрического условия.

### 3.4 Экспериментальная проверка методик калибровки на основе реальных снимков тест-объекта

С целью подтверждения работоспособности и корректности предложенных методик калибровки помимо численных экспериментов по макетным снимкам выполнялась полная калибровка камеры с использованием реальных снимков с определением всех параметров калибровки – как элементов внутреннего ориентирования, так и значений коэффициентов дисторсии.

Калибровка осуществлялась для камеры Sony Alpha NEX-5R с размером кадра  $4\,912 \times 3\,264$  пикселей (матрица APS-C с физическим размером  $23,4 \times 15,6$  мм) и широкоугольным объективом E 16mm F2.8 (16 мм или 24 мм в эквиваленте 35 мм пленки) с семилепестковой круговой диафрагмой.

В качестве основного тест-объекта для съемки выступал комбинированный калибровочный тест-объект, созданный в СГУГиТ, описание которого приведено в 3.3.

Для определения пространственных координат точек тест-объекта использовался тахеометр Leica TS02 power 5". Паспортная точность линейных измерений без отражателя составляет  $2\text{ мм} + 2\text{ ppm}$ . Точность угловых измерений составляет 5".

Измерения координат точек выполнялось из двух точек пространства (ст. 1 и ст. 2), как это показано на схеме ниже (рисунок 49).

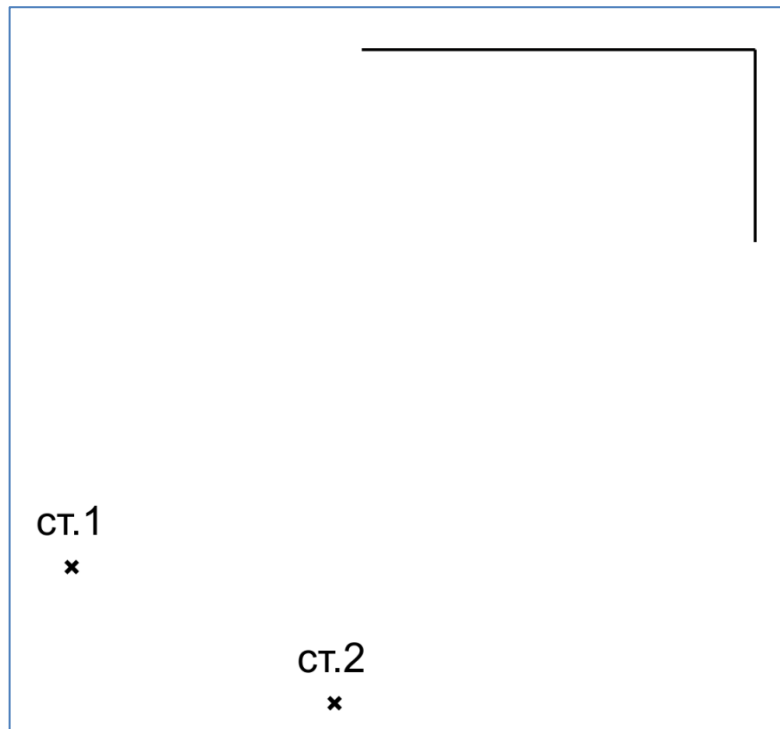


Рисунок 49 – Схема измерения координат точек совмещенного тест-объекта с использованием тахеометра

Координаты точек тест-объекта определялись путем прямой засечки, так как точность дальномерных измерений в данном случае значительно хуже угловых. Максимальная невязка по высоте составила 0,5 мм.

Следует отметить, что выполнялись измерения только тех точек тест-объекта, которые имеют особую маркировку или расположение. Количество таких точек на весь совмещенный тест-объект составило 230 шт.

Настройки камеры при съемке данного тест-объекта были следующие: выдержка 1/60 с, светочувствительность ISO 320, диафрагменное число F10, вспышка – принудительная. Различные режимы коррекции были отключены, а снимки сохранялись в формате «.ARW» (Sony Digital Camera RAW image file – формат, основанный на стандарте TIFF, содержит необработанные данные, полученные прямо с матрицы фотоаппарата). Съемка проводилась с расстояния примерно 2 м. Измерение координат точек на снимке осуществлялось в программе MonoSDS.

Калибровка камеры осуществлялась с использованием различных вариантов схем фотографирования и обработки данных, как в рамках предлагаемых методик, так и уже существующих.

Первым из них стал *вариант калибровки по снимкам пространственного тест-объекта* – общепринятый (назовем его классическим) вариант калибровки, предполагающий наличие перепада высот точек, координаты которых измерены во внешней системе координат, с использованием условия коллинеарности проектирующих лучей при уравнивании данных.

Было получено три снимка тест-объекта, причем второй и третий снимки имели разворот (на угол  $\kappa$ )  $90^\circ$  и  $180^\circ$  соответственно. На рисунке 50 показан процесс измерения координат точек снимков.

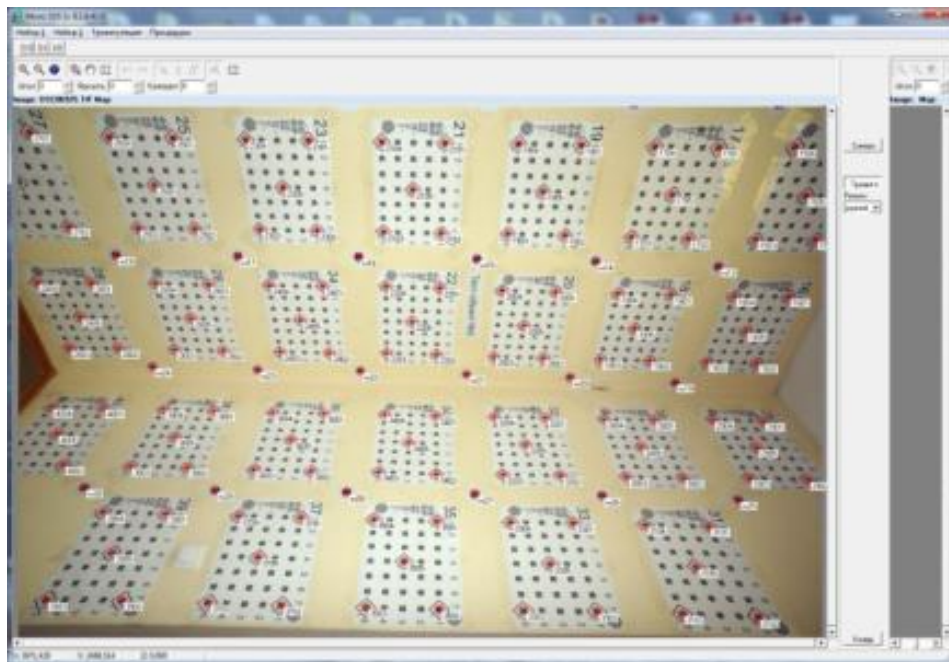


Рисунок 50 – Пример сбора данных со снимков в программе MonoSDS

Съемка для варианта калибровки согласно усовершенствованной методике – *по снимкам плоского тест-объекта* выполнялась на плоскую часть (длинную сторону) тест-объекта с получением двух снимков с разными углами наклона –  $\alpha_1 = +60^\circ$ ,  $\alpha_2 = -60^\circ$  относительно снимаемой поверхности. Такой вариант калиб-

ровки показал один из лучших результатов на тестовых макетных снимках среди других вариантов данной методики.

Процесс измерения координат точек по полученной паре снимков показан на рисунке 51.

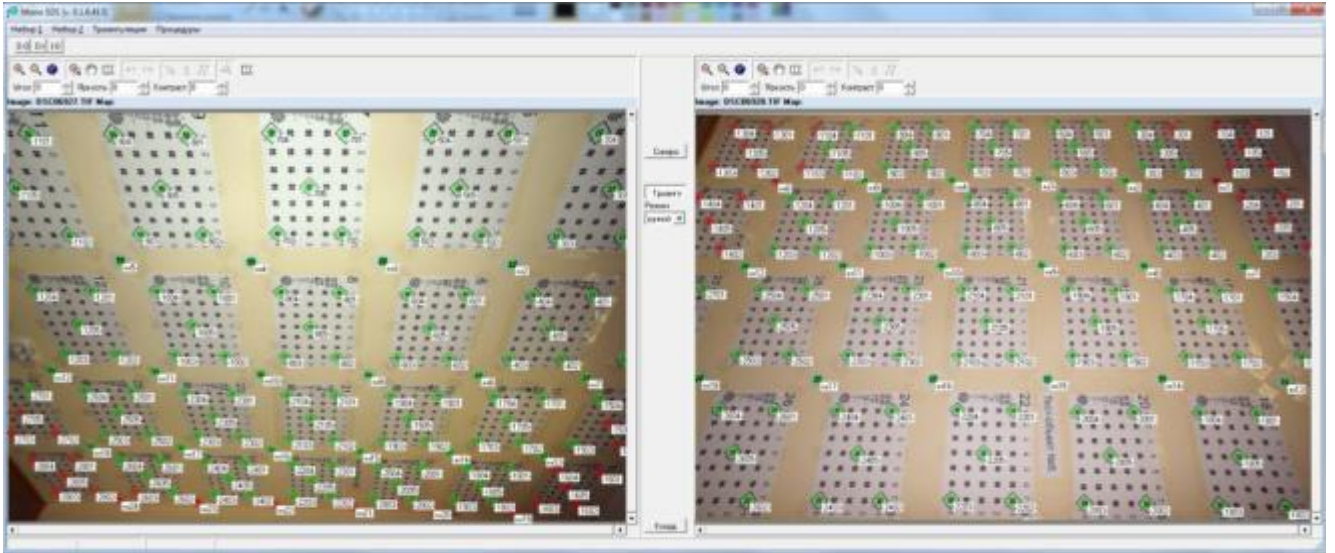


Рисунок 51 – Измерение координат точек снимков плоского тест-объекта

Еще один вариант калибровки выполнялся по снимку северной части звездного неба. Настройки камеры соответствовали следующим значениям: выдержка 4 с, светочувствительность ISO 800, диафрагменное число F2,8. Съемка выполнялась 30.08.2014 в 22:34. Облачность была незначительная. Для фиксации положения камеры использовался штатив.

Скорость углового движения звезд  $\omega$  относительно полярной звезды за счет вращения Земли составляет  $360^\circ$  за 24 ч или  $15''$  за 1 с. Линейная скорость смещения звезды при этом будет зависеть от ее удаления от полярной звезды пропорционально косинусу склонения  $\delta$ .

Если поставить условие, что максимальное смещение положения звезды за время экспонирования  $\tau$  не должно превышать размер одного пикселя, то максимально допустимое значение выдержки составит

$$\tau = \frac{\alpha''_{\text{п}}}{\omega'' \cdot \cos \delta},$$

где  $\tau$  – время экспонирования;

$\alpha''_{\text{п}}$  – размер пикселя в угловых секундах;

$\delta$  – склонение звезды.

У камеры Sony Alpha NEX-5R с объективом E 16mm F2.8 ориентировочное значение размера центрального пикселя  $60''$ . То есть при размере пикселя в  $60''$  выдержка не должна превышать 4 с.

Полученный снимок, представлен ниже (рисунок 52).

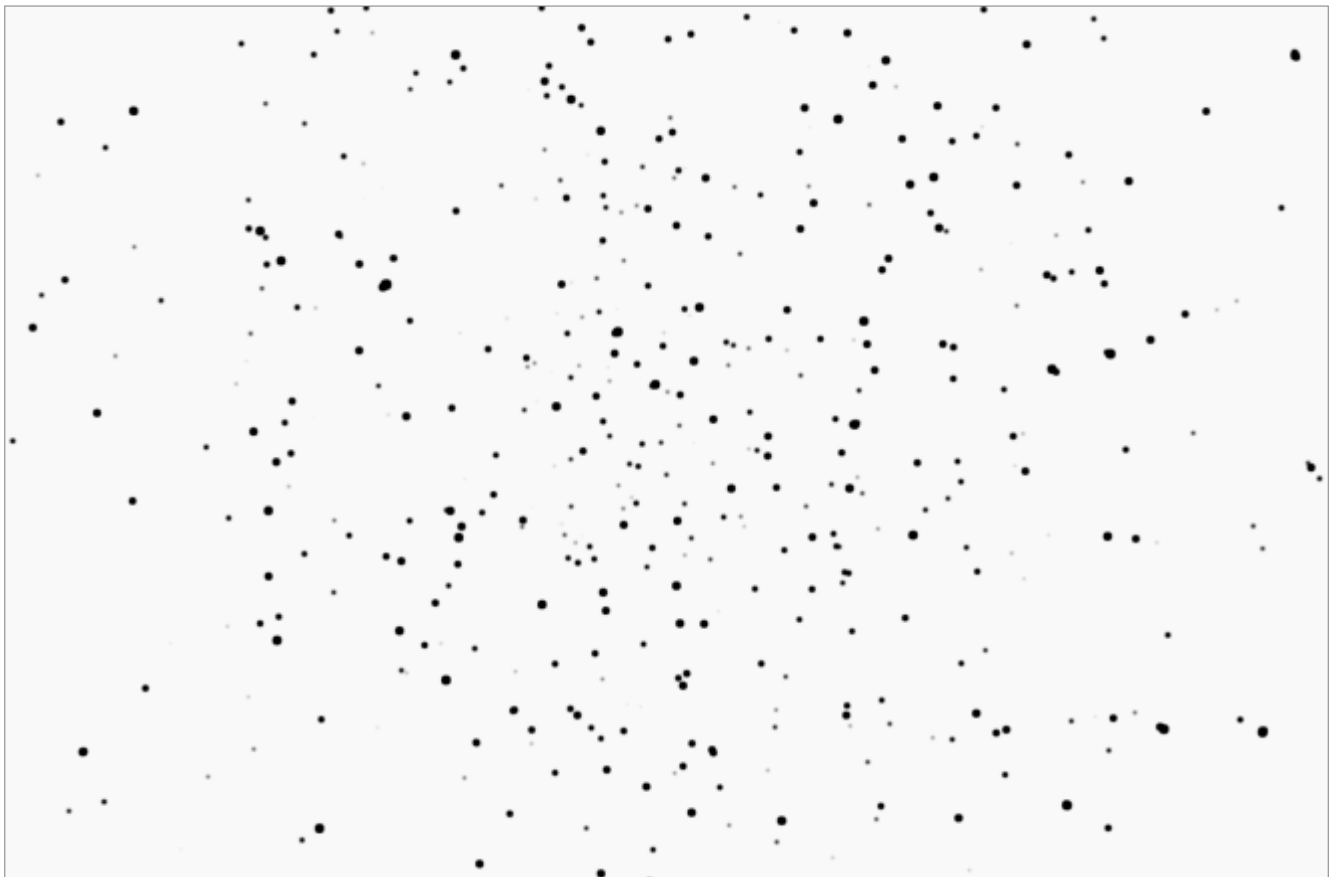


Рисунок 52 – Инвертированный снимок звездного неба с выделенным положением звезд

По данному снимку для целей калибровки было измерено положение 262 звезд. Координаты звезд во 2-й экваториальной системе координат были получены из виртуального планетария Stellarium и пересчитаны в прямоугольную систему координат, согласно следующим формулам

$$\left. \begin{aligned} e_x &= \cos \delta \cos \alpha; \\ e_y &= \cos \delta \sin \alpha; \\ e_z &= \sin \delta, \end{aligned} \right\}$$

где  $e_x, e_y, e_z$  – компоненты вектора единичной длины направления на звезду в инерциальной геоцентрической системе координат;

$\alpha$  – прямое восхождение звезды;

$\delta$  – склонение звезды.

По реальным снимкам было выполнено три эксперимента с использованием различных вариантов калибровки:

- по снимку звездного неба;
- по пространственному тест-объекту (классическая методика);
- по плоскому тест-объекту (усовершенствованная методика).

Обработка данных по каждому варианту калибровки выполнялась в вычислительной среде Equilibrium. Пример уравнивания данных представлен на рисунке 53.

В качестве модели искажений во всех вариантах калибровки использовалась полиномиальная модель радиальной дисторсии, принятая в ЦФС PHOTOMOD.

Результаты калибровки в виде значений элементов внутреннего ориентирования и параметров модели дисторсии объектива по всем проведенным экспериментам представлены в таблице Б.1 приложения Б.

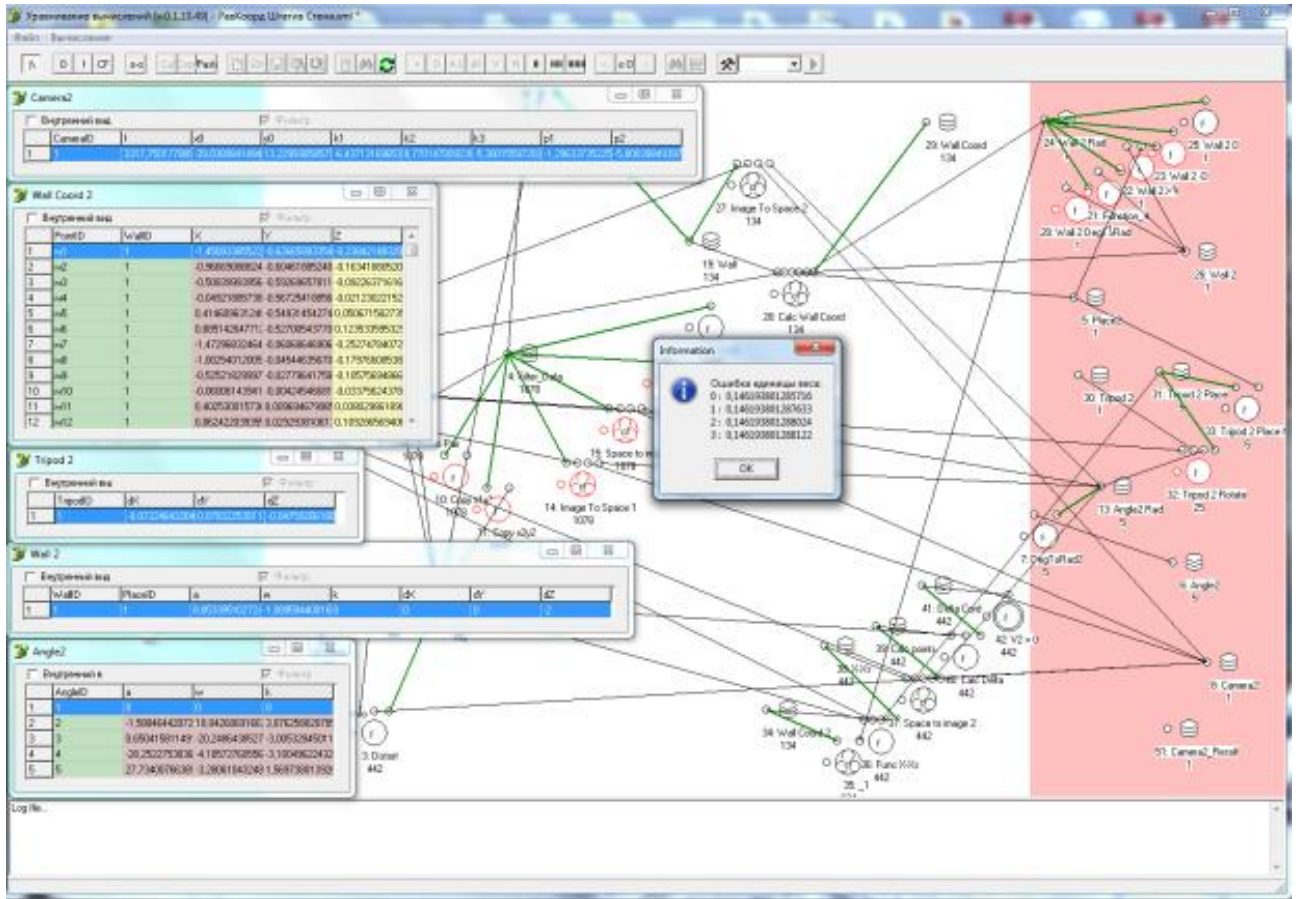


Рисунок 53 – Уравнение данных по варианту калибровки на основе функциональных связей с использованием математического описания смещения точки фотографирования при съемке со штатива

Согласно подходу, описанному в 2.1, сравнение результатов разных вариантов калибровки выполнялось путем сопоставления полученной связки лучей с эталонной. В качестве эталонной связки лучей использовались направления на звезды, относительное положение которых, как известно, отличается высокой стабильностью.

Пример схемы расчета сравнения связок лучей представлен на рисунке 54.

Графические результаты сравнения связок лучей представлены на рисунках В.1–В.3 в приложении В.

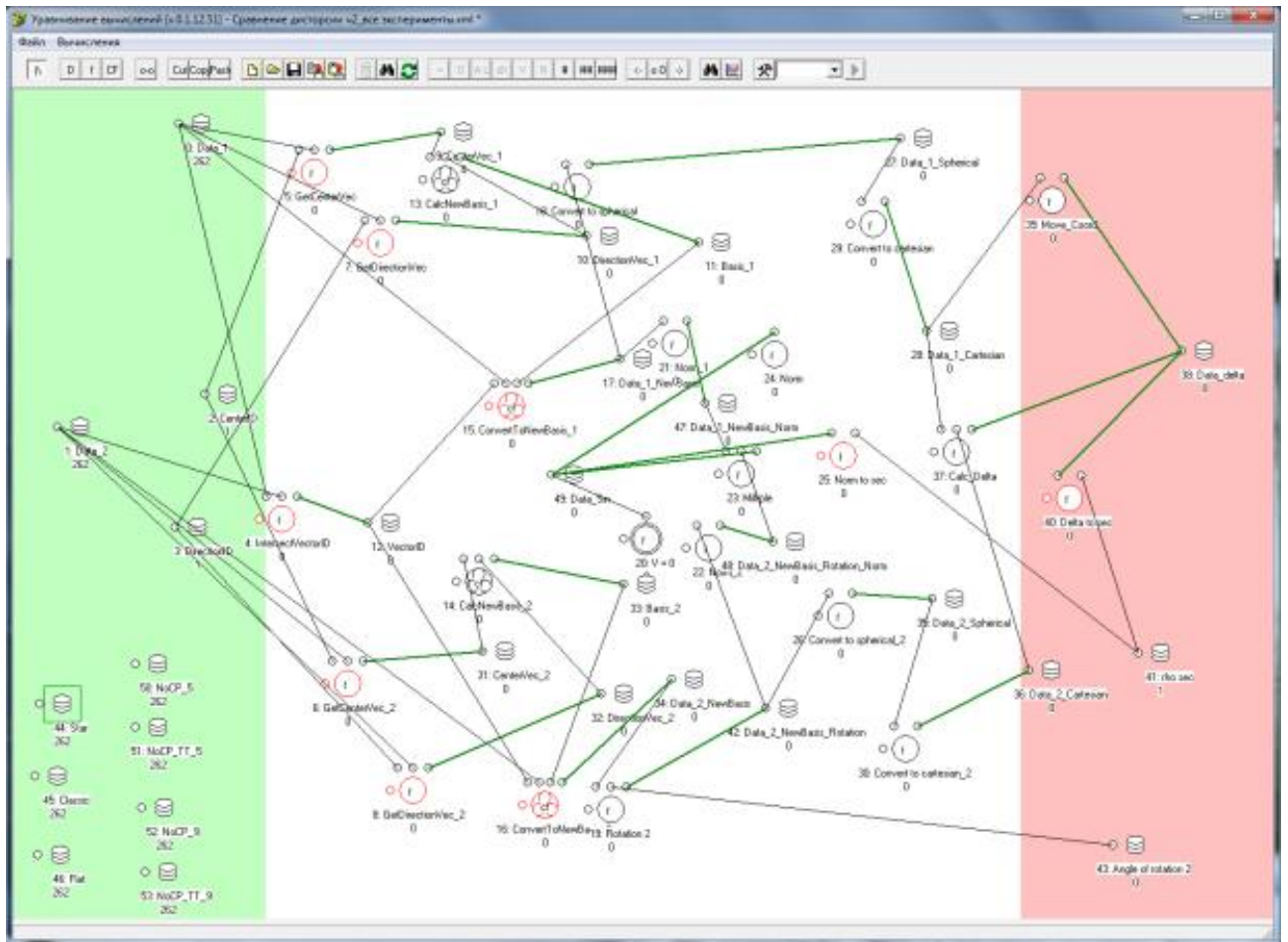


Рисунок 54 – Схема расчета сравнения связок лучей в программе Equilibrium

Численные результаты сравнения связок лучей, полученных разными вариантами калибровки, с эталонной связкой лучей представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты сравнения полученных связок лучей с эталонной

Вариант калибровки	Количество снимков	Количество точек на снимках	Ошибка единицы веса $\mu$ , пикс	СКО совмещения двух связок лучей, $m_{\Delta\alpha}$
По снимку звездного неба	1	262	0,51	38,1"
По пространственному тест-объекту (классическая методика)	3	436	0,48	75,8"
По плоскому тест-объекту (усовершенствованная методика)	2	277	0,40	87,0"

Примечание – угловой размер центрального пикселя согласно расчетам составляет  $\approx 62''$ .

Из таблицы 7 следует, что наилучшие результаты показал вариант калибровки НЦСК по снимку звездного неба. Классический вариант калибровки по пространственному тест-объекту и разработанный вариант по плоскому тест-объекту показали близкие результаты: среднее квадратическое отклонение связок лучей от эталонной составило 75" и 87" соответственно.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов с использованием реальных снимков свидетельствуют о возможности применения разработанной методики калибровки для определения элементов внутреннего ориентирования и параметров дисторсии цифровых съемочных камер.

Стоит отметить, что физический размер пикселя на матрице составляет примерно 4,8 мкм, однако это не имеет существенного значения, так как современные ЦФС и другие программные продукты позволяют осуществлять ввод данных о калибровке камеры как в метрических единицах (как правило, миллиметры либо микрометры), так и в пикселях.

### 3.5 Общий анализ проведенных исследований

В диссертационной работе анализировались современные подходы к калибровке камер и оценивались возможности использования дополнительных геометрических условий для повышения эффективности процесса калибровки и решения возникающих при калибровке проблем. Акцент в данной работе делался на возможность определения значений элементов внутреннего ориентирования калибруемой камеры, так как эти параметры более сложны в определении, в отличие от данных о дисторсии объектива, что зачастую и является причиной невозможности выполнения полной калибровки.

В рамках теоретических исследований было выполнено математическое обоснование возможности полной калибровки камер по плоскому тест-объекту за счет обработки нескольких снимков, полученных под разным углом наклона к поверхности снимаемого тест-объекта. Такой подход позволил исключить влияние эффекта преобразования связки лучей на определение элементов внутреннего

ориентирования. На основе полученных зависимостей было установлено, что калибровка камер по снимкам плоского тест-объекта возможна, причем с использованием трех различных методик, а также их комбинациями. На основе данных моделирования сформулирована обобщающая методика. Использование дополнительных снимков, а также их взаимный наклон будут в данном случае являться дополнительными геометрическими условиями.

Таким образом, можно выполнять калибровку камеры в полете, не создавая при этом специальный горный калибровочный полигон с необходимым перепадом высот между его точками. Такой подход существенно расширяет возможности калибровки камер в условиях производственной аэрофотосъемки. Так, например, калибровку возможно выполнять непосредственно на местности, подлежащей аэрофотосъемке, достаточно за несколько часов до ее выполнения выложить калибровочные марки на территории и выполнить геодезические измерения их положения в пространстве.

Кроме того, был проведен анализ влияния нестрогого соблюдения геометрического условия получения серии снимков с разными углами наклона из одной точки пространства. Предложено несколько вариантов учета смещения точки фотографирования при использовании штативной головки. Разработана методика калибровки, предполагающая применение математического описания смещения центра фотографирования для исключения систематических погрешностей, вносимых таким смещением.

Также в диссертационной работе представлена технология исследований корректности работы методик калибровки на основе использования макетных снимков, позволяющая исключить влияние неконтролируемых источников погрешностей, которые могут возникнуть при выполнении экспериментов по реальным снимкам, и достоверно оценить погрешности определения элементов внутреннего ориентирования, так как при моделировании известны их истинные значения.

Все экспериментальные исследования проводились в вычислительной среде программирования – Equilibrium. Результаты теоретических исследований по

обоснованию возможностей калибровки камер по снимкам плоского тест-объекта нашли свое практическое подтверждение. Причем в случае калибровки по снимкам плоского тест-объекта использование наклонных снимков может быть предпочтительнее использования данных ГНС-измерений.

В рамках научной работы было выполнено 1 740 численных экспериментов с использованием макетных снимков и три эксперимента по реальным снимкам созданного в СГУГиТ калибровочного тест-объекта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги диссертационного исследования заключаются в следующем:

– выполнен анализ методик калибровки НЦСК, тест-объектов и испытательных полигонов, позволивший выявить их основные достоинства и недостатки и подтвердить актуальность исследований;

– теоретически исследованы свойства преобразованной связки лучей наклонного снимка плоской местности, что позволило выявить геометрические условия, учет которых дает возможность выполнять калибровку НЦСК по снимкам плоского тест-объекта;

– усовершенствована классическая методика калибровки камер по пространственному тест-объекту за счет использования дополнительных геометрических условий, применение которых позволило снять ограничения на взаимное превышение между опорными точками и выбор территории в качестве испытательного полигона, что обеспечивает сокращение затрат на выполнение калибровки;

– разработан тест-объект с использованием шаблонов, позволяющий оперативно выполнять калибровку НЦСК с применением усовершенствованной методики по плоскому тест-объекту и классической методики по пространственному тест-объекту;

– разработан вычислительный алгоритм усовершенствованной методики калибровки НЦСК, который реализован в программном комплексе на языке Object Pascal;

– выполнена апробация усовершенствованной методики калибровки цифровых съемочных камер с использованием дополнительных геометрических условий по макетным и реальным снимкам, подтвердившая ее работоспособность и гибкость в применении.

Таким образом, поставленная цель исследований достигнута. Предложена, обоснована и исследована методика калибровки НЦСК, основанная на использовании дополнительных геометрических условий, позволяющая снять с процесса

калибровки такие существенные ограничения, как наличие стационарного тест-объекта и необходимость обеспечения перепада высот опорных точек, что приведет к сокращению стоимости и времени проведения калибровочных работ.

Усовершенствованная методика калибровки рекомендуется к использованию на предприятиях, выполняющих аэрофотосъемку и наземную съемку с применением НЦСК для определения координат точек и построения моделей объектов.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются проведение калибровки съемочных камер с использованием усовершенствованной методики калибровки в производственных условиях, выработка практических рекомендаций по применению методики калибровки, изучение возможностей использования других типов геометрических условий с целью повышения эффективности калибровочного процесса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Алчинов, А. И. Наземная цифровая фотосъемка [Текст] / А. И. Алчинов, С. В. Баландин, В. Б. Кекелидзе // Геопрофи. – 2006. – № 4. – С. 13–15.
- 2 Амромин, П. Д. Прикладная фотограмметрия [Текст] : учеб. пособие / П. Д. Амромин. – Новосибирск : НИИГАиК, 1981. – 84 с.
- 3 Антипов, И. Т. Замечания к способу калибровки камер по разномасштабным снимкам плоского полигона [Текст] / И. Т. Антипов // ГЕО-Сибирь-2008. IV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 5 т. (Новосибирск, 22–24 апреля 2008 г.). – Новосибирск : СГГА, 2008. – Т. 3, ч. 1. – С. 69–75.
- 4 Антипов, И. Т. Математические основы пространственной аналитической фототриангуляции [Текст] / И. Т. Антипов. – М. : Картгеоцентр-Геодезиздат, 2003. – 296 с.
- 5 Антипов, И. Т. Об использовании цифровых средне- и малоформатных камер для аэрофотосъемки [Текст] / И. Т. Антипов, Е. А. Кобзева // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 17–27.
- 6 Арте, Ф. Цифровые камеры среднего формата завоевывают рынок [Текст] / Франк Арте // Геопрофи. – 2005. – № 1. – С. 24–26.
- 7 Багрий, Ю. Г. Калибровка камеры мобильного телефона [Электронный ресурс] / Ю. Г. Багрий // Портал магистров ДонНТУ. – Режим доступа: <http://masters.donntu.edu.ua/2013/igg/bagriy/diss/index.htm>.
- 8 Быков, В. Л. Полевая калибровка снимков с использованием средств спутникового позиционирования [Текст] / В. Л. Быков // Геодезия и картография. – 2007. – № 8. – С. 39–43.
- 9 Быков, В. Л. Разработка и исследование способов калибровки снимков с использованием средств спутниковой навигации [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.34 / Быков Василий Леонидович. – Новосибирск, 2007. – 22 с.

10 Войнаровский, А. Е. Технология обмеров фасадов стереофотограмметрическим методом в системе AutoCAD [Текст] / А. Е. Войнаровский // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 7. – С. 31–34.

11 Гельман, Р. Н. Лабораторная калибровка цифровых камер с большой дисторсией [Текст] / Р. Н. Гельман, А. Л. Дунц // Геодезия и картография. – 2002. – № 7. – С. 23–31.

12 Гельман, Р. Н. Опыт использования и калибровки цифровых камер при совместной аэрофотосъемке с АФА [Текст] / Р. Н. Гельман, М. Ю. Никитин, А. Л. Дунц // Геодезия и картография. – 2001. – № 6. – С. 25–31.

13 Гук, А. П. Исследование возможности применения неметрических цифровых снимков для обновления топографических карт [Текст] / А. П. Гук, В. И. Тихонов, М. А. Белошапкин // ГЕО-Сибирь-2006. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 24–28 апреля 2006 г.). – Новосибирск : СГГА, 2006. Т. 3, ч. 1. – С. 79–81.

14 Гук, А. П. Развитие фотограмметрических технологий на основе имманентных свойств цифровых снимков [Текст] / А. П. Гук // Геодезия и картография. – 2007. – № 11. – С. 26–29.

15 Дубиновский, В. Б. Калибровка снимков [Текст] / В. Б. Дубиновский. – М. : Недра, 1982. – 224 с.

16 Ессин, А. С. Особенности фотограмметрической обработки материалов цифровой аэрофотосъемки с БПЛА [Текст] / А. С. Ессин, С. С. Ессин // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 80–82.

17 Ессин, А. С. Технология обработки аэрофотоснимков, полученных с БПЛА, в целях создания ортофотопланов [Текст] / А. С. Ессин, С. С. Ессин // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 72–75.

18 Исследование методики калибровки снимков на испытательном полигоне Западно-сибирского филиала «Госземкадастрсъемка» ВИСХАГИ [Текст] / А. Л. Быков [и др.] // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материа-

лов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 32–34.

19 Калантаров, Е. И. Фотограмметрическое инструментоведение [Текст] : учеб. для вузов / Е. И. Калантаров. – М. : Недра, 1986. – 126 с.

20 Калибровка камеры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.datumate.com/russian/video-tutorials-ru/>.

21 Калибровка снимков на равнинном испытательном полигоне с определением координат центров фотографирования [Текст] / А. П. Макаров [и др.] // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск : СГГА, 2009. Т. 4, ч. 1. – С. 32–34.

22 Калибровка снимков по плоскому испытательному полигону [Текст] / Б. К. Малявский [и др.] // ГЕО-Сибирь-2006. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 24–28 апреля 2006 г.). – Новосибирск : СГГА, 2006. Т. 3, ч. 1. – С. 68–73.

23 Курков, В. М. Методы учета систематических искажений аэроснимка. Самокалибровка [Текст] / В. М. Курков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1980. – № 6. – С. 75–79.

24 Кучко, А. С. Аэрофотография (основы и метрология) [Текст] / А. С. Кучко. – М. : Недра, 1974. – 271 с.

25 Лаврова, Н. П. Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемочное оборудование: учеб. для вузов [Текст] / Н. П. Лаврова, А. Ф. Стеценко. – М. : Недра, 1981. – 296 с.

26 Лазарева, Н. С. Калибровка неметрических малоформатных камер с целью применения их для решения некоторых задач фотограмметрии [Электронный ресурс] / Н. С. Лазарева // Науки о Земле. – 2011. – С. 80–91. – Режим доступа: <http://geo-science.ru/wp-content/uploads/GeoScience-01-2011-p-80-91.pdf>.

27 Лобанов, А. Н. Фотограмметрия [Текст] : учеб. для вузов / А. Н. Лобанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1984. – 552 с.

28 Лобанов, А. Н. Фототопография. Наземная стереофотограмметрическая съемка [Текст] / А. Н. Лобанов. – М. : Недра, 1983. – 224 с.

29 Машимов, М. М. Уравнивание геодезических сетей [Текст] / М. М. Машимов. – М. : Недра, 1989. – 280 с.

30 Михайлов, А. П. О применении цифровых фотокамер со шторно-щелевым затвором для выполнения аэрофотосъемки с легкомоторных и беспилотных летательных аппаратов [Текст] / А. П. Михайлов, Эдгар Рубен Монтель Андраде, Перес Вальдез Мануэль Де Хесус // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4. – С. 30–32.

31 Михайлов, А. П. Применение цифровых неметрических камер и лазерных сканеров для решения задач фотограмметрии [Текст] / А. П. Михайлов, А. Г. Чибуничев, В. М. Курков // Геодезия и картография. – 2008. – № 6. – С. 45–52.

32 Никитин, В. Н. Использование дополнительных геометрических условий при решении геодезических и фотограмметрических задач [Текст] / В. Н. Никитин, А. В. Семенцов // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 4 (20). – С. 41–45.

33 Никитин, В. Н. Калибровка камер по снимкам плоского тест-объекта [Текст] / В. Н. Никитин, А. В. Семенцов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 2. – С. 71–80.

34 Никитин, В. Н. Калибровка цифровой неметрической камеры по снимкам звездного неба [Текст] / В. Н. Никитин, Т. В. Николаева // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15-26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 7–11.

35 Никитин, В. Н. Методика моделирования цифровых реалистичных макетных снимков с использованием машинной графики [Текст] / В. Н. Никитин, А. Е. Сидякина // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 1. – С. 33–38.

36 Никитин, В. Н. Определение разрешающей способности фотоаппарата по наклонным снимкам с использованием радиальных мир [Текст] / В. Н. Никитин, А. В. Семенцов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10-20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 1. – С. 52–57.

37 Никитин, В. Н. Опыт построения ортофотоплана по данным крупномасштабной аэрофотосъемки, выполненной с использованием неметрической цифровой камеры [Текст] / В. Н. Никитин, А. В. Семенцов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15-26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 12–18.

38 Никитин, В. Н. Создание макетных снимков площадной аэрофотосъемки с использованием ArcGIS [Текст] / В. Н. Никитин, Е. Ю. Сахарова, А. Е. Червова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 95–100.

39 Олейник, С. В. Цифровые камеры для аэрофотосъемки [Текст] / С. В. Олейник, В. Б. Гайда // Геопрофи. – 2006. – № 6. – С. 98–112.

40 Пат. 2308001 Российская Федерация МПК51 G01C11/02. Способ фотограмметрической калибровки фотокамер [Текст] / Б. К. Малявский, Л. В. Быков, В. Л. Быков, А. П. Макаров ; заявители и патентообладатели Б. К. Малявский, Л. В. Быков, В. Л. Быков, А. П. Макаров. – 2006101424/28 ; заявл. 18.01.2006 ; опубл. 10.10.2007. – Бюл. № 28. – 7 с.

41 Полякова, В. А. Точность и надежность аналитической фототриангуляции [Текст] / В. А. Полякова. – М. : Недра, 1977. – 192 с.

42 Программное обеспечение Image Master [Электронный ресурс] // Сайт ЗАО Геостройизыскания – официального дистрибьютора компании TOPCON. – Режим доступа: <http://www.topcon.gsi.ru>.

43 Разработка стенда для определения характеристик шторно-щелевых затворов [Текст] / В. Н. Никитин, Д. Н. Раков, А. В. Семенцов, С. А. Арбузов, Е. П. Хлебникова // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 82–95.

44 Раков, Д. Н. Выбор цифрового неметрического фотоаппарата для беспилотного аэрофотосъемочного комплекса [Текст] / Д. Н. Раков, В. Н. Никитин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : сб. молодых ученых СГГА (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 27–36.

45 Сагайдак, Д. И. Исследование и калибровка цифровых камер [Электронный ресурс] / Д. И. Сагайдак // Портал магистров ДонНТУ. – Режим доступа: <http://www.masters.donntu.edu.ua/2007/ggeo/sagaidak/diss/index.htm>.

46 Семенцов, А. В. Влияние нестрогого соблюдения геометрических условий на точность определения элементов внутреннего ориентирования при калибровке камер [Текст] / А. В. Семенцов, В. Н. Никитин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8-18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 1. – С. 73–81.

47 Семенцов, А. В. Калибровка камер без использования твердых опорных данных [Текст] / А. В. Семенцов // Геодезия и картография. – 2014. – № 4. – С. 26–30.

48 Семенцов, А. В. О возможности калибровки камер без использования координат опорных точек [Текст] / А. В. Семенцов, В. Н. Никитин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 3–8.

49 Семенцов, А. В. Применение математической модели штатива в методике калибровки камер без использования координат опорных точек [Текст] / А. В. Семенцов, В. Н. Никитин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 8–17.

50 Семенцов, А. В. Разработка тест-объекта для калибровки цифровых камер [Текст] / А. В. Семенцов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : сб. молодых ученых СГГА (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 60–65.

51 Семенцов, А. В. Сравнение результатов калибровки камер, полученных с использованием различных методик и моделей дисторсии [Текст] / А. В. Семенцов, В. Н. Никитин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 17–24.

52 Сечин, А. Ю. Беспилотные летательные аппараты: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования (часть 2) [Электронный ресурс] / А. Ю. Сечин, М. А. Дракин, А. С. Киселева. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=699>.

53 Сечин, А. Ю. Некоторые аспекты использования современных цифровых фотограмметрических камер [Электронный ресурс] / А. Ю. Сечин. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=448>.

54 Создание обмерных чертежей с помощью цифровых фотографий [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании «Digital Architecture». – Режим доступа: <http://dproject.artrace.ru>.

55 Суворов, А. К. Отображение и анализ рельефа по данным цифровой беспилотной аэросъемки [Текст] / А. К. Суворов, В. А. Лазутин, А. С. Вахтанов // Геопрофи. – 2013. – № 4 – С. 45–49.

56 Технология фотограмметрической калибровки цифровых камер [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://photogrammetria.ru/17-tehnologija-fotogrammetricheskoyj-kalibrovki.html>.

57 Уставич, Г. А. О применении неметрических цифровых камер для инженерно-геодезических измерений [Текст] / Г. А. Уставич, Я. Г. Пошивайло // Геодезия и картография. – 2005. – № 8. – С. 19–24.

58 Фототриангуляция с применением электронной цифровой вычислительной машины [Текст] / А. Н. Лобанов [и др.] – М. : Недра, 1975. – 264 с.

59 Характеристики панорамной головки штатива «303SPH – Multi-row Panoramic Head» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.manfrotto.com/multi-row-panoramic-head>.

60 Хасенов, К. Б. Особенности анализа технических характеристик цифровых съемочных камер [Текст] / К. Б. Хасенов, В. А. Хан, Н. Б. Турганбаев // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 4, ч. 1. – С. 72–76.

61 Цифровые камеры для топографической аэрофотосъемки 2013 [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании «Ракурс». Вики-Фотограмметрия. – 2013. – Режим доступа: [http://www.racurs.ru/wiki/index.php/Цифровые\\_камеры\\_для\\_топографической\\_аэрофотосъемки\\_2013](http://www.racurs.ru/wiki/index.php/Цифровые_камеры_для_топографической_аэрофотосъемки_2013).

62 Черемушкин, А. В. Тест-объект для калибровки фотографических систем [Текст] / А. В. Черемушкин // ГЕО-Сибирь-2006. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 24–28 апреля 2006 г.). – Новосибирск : СГГА, 2006. Т. 3, ч. 1. – С. 116–118.

63 Шнейдер, В. Е. Краткий курс высшей математики [Текст] : учеб. пособие для втузов / В. Е. Шнейдер, А. И. Слущкий, А. С. Шумов. – М. : Высш. школа, 1972. – 640 с.

64 Юрченко, В. И. Об учете систематических искажений неметрических снимков [Текст] / В. И. Юрченко // Геодезия и картография. – 2002. – № 7. – С. 31–38.

65 Agisoft Lens User Manual Version 0.4.0 [Electronic resource]. – Mode of access: <http://downloads.agisoft.ru/lens/doc/en/lens.pdf>.

66 Brown, D. C. Bundle adjustment with strip- and blockinvariant parameters [Text] / D. C. Brown // *Bildmessung und Luftbildwesen*. – 1974. – № 6, 42. – P. 210–220.

67 Camera Calibration from a Single Night Sky Image [Text] / A. Klaus [et al.]. // *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* – 2004.

68 Fraser, C. S. Zoom-Dependent Camera Calibration in Digital Close-Range Photogrammetry [Text] / C. S. Fraser, S. Al-Ajlouni // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. – 2006. – № 9. – P. 1017–1026.

69 Grun, A. Progress in photogrammetric point determination by compensation of systematic errors and detection gross errors [Text] / A. Grun // *Nachrichten aus dem Karten – und Vermessungswesen*. – 1978. – № 2, 36. – P. 113–140.

70 Ladstädter, Richard Geometric aspects concerning the photogrammetric workflow of the digital aerial camera ULRTACAMx [Electronic resource] / Richard Ladstädter, Michael Gruber. – Mode of access: <http://www.ultracamx.com>.

71 PhotoModeler Technologies [Electronic resource] // Official site «PhotoModeler Technologies». – Mode of access: <http://www.photomodeler.com>.

72 Schmid, H. H. Stellar calibration of the orbigon lens [Text] / H. H. Schmid // *Photogrammetric Engineering*. – 1974. – № 40 (1). – P. 101–111.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВКИ КАМЕРЫ ПО ПЛОСКОМУ ТЕСТ-ОБЪЕКТУ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАКЕТНЫХ СНИМКОВТаблица А.1 – Погрешности определения элементов внутреннего ориентирования  
и ошибка единицы веса для каждого макета по варианту калибровки 0-1

Макет	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель	$\mu$ , пиксель
1	-0,691752724	0,227269607	0,519452633	0,525571
2	3,066852377	-1,420767047	0,997319065	0,516085
3	2,110808612	-0,485535555	0,864057396	0,590219
4	-3,288815970	-1,125192359	-0,866595610	0,564515
5	-2,409469055	-0,466005149	1,286407156	0,494310
6	1,474255777	-0,799462966	0,535983204	0,465992
7	-1,296868124	-0,453160838	0,694450182	0,531940
8	-3,942595031	-2,767372625	0,198630229	0,491582
9	-2,185963219	0,875010015	-1,766226823	0,563963
10	0,028765167	-1,810616460	-0,358022269	0,502882
11	2,634670055	0,014946610	1,647927421	0,512052
12	1,678104631	1,061875086	-0,096785524	0,442574
13	-3,991899120	-0,994599425	-0,921210518	0,467108
14	-1,018749757	-0,848832157	-0,524263294	0,442064
15	-1,591450337	-0,801971134	-0,204003960	0,532950
16	-2,779217141	0,647340545	0,892785611	0,459475
17	4,340505497	-1,062001117	0,512735002	0,501963
18	5,826527491	0,319413354	0,003555642	0,434995
19	-0,627373895	0,072963356	-0,486870173	0,444210
20	-3,738803489	0,897041694	2,550284835	0,486649
21	-1,872927203	-1,087931333	0,532514636	0,483125
22	1,326377587	-0,232937827	-0,412641594	0,476415
23	2,191291672	-0,192201653	0,747049929	0,495801
24	-1,604070505	0,238668849	-0,291968490	0,474106
25	-2,512578232	0,929667867	0,706678696	0,506015
26	-2,701092263	-1,478202998	-2,324595125	0,519762
27	-2,577243115	-0,321502346	-0,732398070	0,459433
28	-5,392976878	0,661109439	0,622834863	0,482231
29	0,194017561	0,946745481	0,194970262	0,479992
30	1,209047623	-1,309762232	0,129617960	0,465211

Таблица А.2 – Статистический анализ погрешностей определения элементов внутреннего ориентирования по варианту калибровки 0-1

Характеристики	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель
$m - \sigma$ , пиксель	-3,307198801	-1,304737034	-0,817373141
max, пиксель	5,826527491	1,061875086	2,550284835
min, пиксель	-5,392976878	-2,767372625	-2,324595125
$m + \sigma$ , пиксель	2,097690667	0,587003480	1,127484693
сред., пиксель	-0,604754067	-0,358866777	0,155055776
СКО, пиксель	2,702444734	0,945870257	0,972428917

Таблица А.3 – Погрешности определения элементов внутреннего ориентирования и ошибка единицы веса для каждого макета по варианту калибровки 1-1

Макет	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель	$\mu$ , пиксель
1	-1,175472448	-1,646363291	0,098576000	0,510648
2	1,313944685	1,648430418	0,149604766	0,476792
3	-0,811297596	-1,139785085	1,203379621	0,501054
4	-0,462029585	-2,069037479	1,725265426	0,496268
5	-2,993247754	-4,612331831	-1,740871411	0,579131
6	0,677206186	0,204270270	-0,625208590	0,464928
7	-0,248341596	0,862736545	-0,061202621	0,470524
8	0,583516914	1,180029500	0,966178544	0,476094
9	-1,069557776	-1,012425746	-1,686638933	0,476805
10	2,358154350	0,778738465	-1,095696291	0,476325
11	-2,352009764	-3,333581796	-0,273527713	0,519763
12	0,968558991	-0,283633657	0,567936203	0,484641
13	-1,829795830	-4,719031563	-0,105850768	0,537976
14	4,746588024	1,915758133	0,336668787	0,522057
15	-1,635990431	-2,939706484	2,051621149	0,523252
16	-3,105461834	-3,582468830	0,713694563	0,520577
17	-0,128038800	1,397667034	1,299000983	0,520297
18	0,115346633	-0,760851930	-0,099527149	0,484564
19	1,205266449	3,416536801	-1,831541815	0,572918
20	-1,615878157	-2,719402026	-1,050260773	0,577173
21	-1,038675400	-1,138727235	-0,664887390	0,490511
22	-0,469006330	0,918196113	-1,388659844	0,518430
23	-3,350921301	-5,551046514	1,483354620	0,594066
24	-0,071457123	0,123597743	-1,059354549	0,494700
25	2,242854078	2,279911860	0,295378832	0,472633
26	-0,604582022	-0,513603734	-1,777023964	0,495780
27	0,511145426	1,288596257	-0,319216300	0,525695
28	-1,766229040	-1,635307478	2,979944391	0,551058
29	3,770081280	6,074143415	1,005870405	0,589803
30	-3,800625637	-3,419621234	-2,963415244	0,497045

Таблица А.4 – Статистический анализ погрешностей определения элементов внутреннего ориентирования по варианту калибровки 1-1

Характеристики	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель
$m - \sigma$ , пиксель	-2,333474405	-3,230265906	-1,399396777
max, пиксель	4,746588024	6,074143415	2,979944391
min, пиксель	-3,800625637	-5,551046514	-2,963415244
$m + \sigma$ , пиксель	1,664410711	1,964378348	1,274969506
сред., пиксель	-0,334531847	-0,632943779	-0,062213636
СКО, пиксель	1,998942558	2,597322127	1,337183142

Таблица А.5 – Погрешности определения элементов внутреннего ориентирования и ошибка единицы веса для каждого макета по варианту калибровки 1-2

Макет	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель	$\mu$ , пиксель
1	-1,054318162	-1,446908183	0,818824439	0,474193
2	-1,699565912	-0,680893722	0,140713193	0,515349
3	-1,831088300	-1,026020257	-0,683952268	0,458422
4	3,851994450	3,058382240	-1,884048003	0,515220
5	1,304032122	0,444139182	0,979028157	0,517284
6	-2,343903588	-2,442840814	0,544635415	0,482906
7	0,044300525	-0,140180240	-1,885784206	0,509447
8	2,395952489	1,028125011	0,128193820	0,485520
9	-3,488516844	-2,945212158	-0,178401151	0,506437
10	-1,234572310	-1,902602977	1,574949440	0,505171
11	0,762825946	0,181182956	-1,197532757	0,507284
12	-0,802016532	-0,284020095	-0,306383674	0,491227
13	-1,651394411	-1,958942566	0,804876383	0,494357
14	0,411504331	0,819461102	-1,958438873	0,484859
15	3,359969267	1,992117625	-1,601171832	0,486211
16	-1,141478551	0,078991688	0,415946999	0,500128
17	3,582747116	2,420274017	-1,045310769	0,513206
18	2,162340207	1,518076404	1,366454123	0,508911
19	-1,018030627	-0,869999207	0,544776371	0,467754
20	1,581444236	1,109011257	-1,182923633	0,526008
21	0,653152671	1,384057016	1,529300257	0,499573
22	-0,229900765	-0,369904778	1,769721595	0,519586
23	-0,577767733	-0,791396856	-2,035861996	0,481409
24	0,010753636	-0,131045056	-2,139897312	0,529349
25	3,877527951	2,814195175	-0,814125577	0,500991
26	2,117567440	0,931532694	1,195376891	0,484017
27	-0,882553674	-0,034958004	-1,414229607	0,522715
28	-1,017944323	-0,968014238	0,326525547	0,495133
29	1,410312015	0,948446058	0,061679177	0,516614
30	1,707154155	1,021959175	1,055901454	0,538652

Таблица А.6 – Статистический анализ погрешностей определения элементов внутреннего ориентирования по варианту калибровки 1-2

Характеристики	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель
$m - \sigma$ , пиксель	-1,606692796	-1,373508169	-1,402287643
max, пиксель	3,877527951	3,058382240	1,769721595
min, пиксель	-3,488516844	-2,945212158	-2,139897312
$m + \sigma$ , пиксель	2,290727918	1,623975665	1,064210417
сред., пиксель	0,342017561	0,125233748	-0,169038613
СКО, пиксель	1,948710357	1,498741917	1,233249030

Таблица А.7 – Погрешности определения элементов внутреннего ориентирования и ошибка единицы веса для каждого макета по варианту калибровки 1-3

Макет	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель	$\mu$ , пиксель
1	0,551143107	-0,352144892	-0,645709137	0,487152
2	-1,937633378	-0,791157587	-0,600184084	0,472706
3	0,934140467	0,830940098	-0,119861842	0,500049
4	4,480897451	1,991230819	0,424163390	0,486994
5	-0,711228296	-0,046941139	-0,225723204	0,529742
6	0,647108159	-0,494525644	-0,889733330	0,543604
7	1,232120567	0,662008338	0,828547759	0,517117
8	-1,478134145	-0,139225788	-0,149716698	0,495826
9	-3,525709535	-1,579416217	0,455904541	0,485006
10	-3,890754182	-2,369670025	0,571353271	0,545491
11	-4,455358548	-1,246526801	1,123369036	0,501297
12	2,357121554	1,520772050	0,874042739	0,517924
13	-2,228329505	-0,953346318	-0,181624644	0,520998
14	-1,961402644	-1,662346882	-1,003495821	0,512050
15	-0,791522635	-0,824402590	0,281347870	0,506824
16	-4,191356088	-3,098680158	-0,109935116	0,481794
17	1,527397094	0,235681081	1,276381322	0,501065
18	0,793599603	0,485223573	0,503234057	0,508196
19	7,112682035	3,688677116	-1,088399986	0,496903
20	-0,928196840	-0,358822597	-0,711444602	0,513713
21	6,021427799	2,802673877	-0,658116466	0,467288
22	2,319995460	0,761603525	-0,539190763	0,520597
23	-0,002741623	0,058864420	-0,259701257	0,476903
24	0,993599900	0,306086986	1,402507236	0,504537
25	1,668759689	1,805665620	0,558164623	0,466330
26	3,703554987	2,253003712	-0,072823371	0,510062
27	2,714905315	1,170851312	0,199537241	0,464685
28	4,290228245	2,657059702	0,050406471	0,476846
29	-4,357028048	-2,879266132	-0,942612022	0,506971
30	0,849094562	0,094212710	0,888383292	0,551603

Таблица А.8 – Статистический анализ погрешностей определения элементов внутреннего ориентирования по варианту калибровки 1-3

Характеристики	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель
$m - \sigma$ , пиксель	-2,626195483	-1,499363333	-0,666574785
max, пиксель	7,112682035	3,688677116	1,402507236
min, пиксель	-4,455358548	-3,098680158	-1,088399986
$m + \sigma$ , пиксель	3,408754185	1,801235477	0,749179486
сред., пиксель	0,391279351	0,150936072	0,041302350
СКО, пиксель	3,017474834	1,650299405	0,707877136

Таблица А.9 – Погрешности определения элементов внутреннего ориентирования и ошибка единицы веса для каждого макета по варианту калибровки 1-4

Макет	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель	$\mu$ , пиксель
1	1,286935731	0,755532897	-0,450965278	0,456650
2	1,650214446	0,285483324	1,046949848	0,485190
3	-1,106675950	-1,394077797	0,103109525	0,511421
4	-2,457499313	-1,020712788	-0,227989919	0,487630
5	-0,841452285	-0,640537074	0,516010350	0,506747
6	-1,511964384	-0,884393817	0,020583866	0,524302
7	-1,180988646	-1,123747963	0,034275219	0,519340
8	0,133894576	0,201900306	0,820547201	0,515613
9	-1,839881694	-0,885462008	-0,759812009	0,505162
10	-1,531401061	-1,439269311	0,574024587	0,494656
11	-5,563938647	-3,617134310	-0,575319533	0,526289
12	1,870963701	1,066935033	0,747644003	0,477280
13	-0,043560642	0,238490337	-0,370011465	0,529059
14	-0,408906371	-0,018371149	-0,525096195	0,529275
15	0,072004361	0,060280913	0,455681874	0,484933
16	-0,161498657	-0,163690245	-1,387067710	0,525762
17	-0,339385895	0,189006787	0,393852246	0,495403
18	-1,282203141	-1,034607367	-0,053908223	0,503219
19	0,435652690	0,292801072	0,288665651	0,488661
20	0,702346096	1,260818130	-0,262100998	0,458416
21	-1,290686027	-1,450379135	-0,864751513	0,493133
22	-0,272571329	0,480495787	-0,769341908	0,496519
23	-0,000485150	-0,424911401	-0,037409269	0,493974
24	0,710379496	0,591041948	-0,164246033	0,511543
25	-1,233066202	-0,764723965	0,226681903	0,494988
26	-1,701406095	-0,942939083	0,437873936	0,474170
27	2,262990375	1,256395940	0,125721017	0,521881
28	-2,217883049	-1,709879785	0,747398327	0,486305
29	0,640034974	0,185920591	0,943572344	0,514429
30	0,981001194	-0,025380621	0,719840021	0,518936

Таблица А.10 – Статистический анализ погрешностей определения элементов внутреннего ориентирования по варианту калибровки 1-4

Характеристики	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель
$m - \sigma$ , пиксель	-2,030435468	-1,392368121	-0,541686372
max, пиксель	2,262990375	1,260818130	1,046949848
min, пиксель	-5,563938647	-3,617134310	-1,387067710
$m + \sigma$ , пиксель	1,081166341	0,680693804	0,658647163
сред., пиксель	-0,474634563	-0,355837158	0,058480395
СКО, пиксель	1,555800904	1,036530962	0,600166768

Таблица А.11 – Погрешности определения элементов внутреннего ориентирования и ошибка единицы веса для каждого макета по варианту калибровки 2-1

Макет	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель	$\mu$ , пиксель
1	-0,162528497	0,018735057	0,308930707	0,500354
2	-0,105020982	0,035930263	0,686812269	0,510752
3	0,109735171	0,341829376	0,556268415	0,476690
4	-0,015606384	-0,012398088	0,005418779	0,481468
5	0,007731334	0,163025457	0,653694192	0,485157
6	0,170404469	-0,092310012	-0,014583779	0,493487
7	-0,049888654	0,137044736	0,721753917	0,507135
8	0,138474986	-0,100175586	0,685790813	0,506292
9	-0,043494131	-0,332924370	0,699456973	0,480611
10	0,118403630	0,370022602	-0,244613611	0,530868
11	-0,029715043	-0,046424667	0,440903237	0,465783
12	0,147856329	-0,175753447	0,361438654	0,475249
13	0,022381133	0,192432973	-0,961659611	0,474519
14	-0,025544404	-0,072238865	-0,245464836	0,480143
15	-0,119745328	-0,170276397	0,623678588	0,483026
16	0,089934177	0,059116803	-0,470398776	0,498926
17	0,061321290	0,184983169	-1,483431278	0,496759
18	-0,061768925	-0,312002400	0,344890124	0,480290
19	0,217628645	-0,108241402	0,265307041	0,513813
20	-0,244943006	-0,144464873	0,334728895	0,499786
21	0,091195960	0,055108516	0,307834324	0,490604
22	-0,055795259	-0,044962164	0,236092615	0,506592
23	0,065330795	-0,185109510	-0,520524406	0,482538
24	0,201299943	0,252856602	-0,320540241	0,508274
25	-0,121830785	-0,088770120	-0,573359205	0,473093
26	0,037517067	-0,040933560	0,080650040	0,488815
27	0,204749046	-0,458738016	-1,082774843	0,482830
28	-0,139518229	0,202237892	0,781292902	0,500449
29	0,040361438	-0,103698737	-0,296567438	0,500616
30	0,046012257	-0,084967616	0,429323969	0,521082

Таблица А.12 – Статистический анализ погрешностей определения элементов внутреннего ориентирования по варианту калибровки 2-1

Характеристики	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель
$m - \sigma$ , пиксель	-0,098120838	-0,211135163	-0,510306556
max, пиксель	0,217628645	0,370022602	0,781292902
min, пиксель	-0,244943006	-0,458738016	-1,483431278
$m + \sigma$ , пиксель	0,137783375	0,173730738	0,664329785
сред., пиксель	0,019831268	-0,018702213	0,077011614
СКО, пиксель	0,117952107	0,192432951	0,587318171

Таблица А.13 – Погрешности определения элементов внутреннего ориентирования и ошибка единицы веса для каждого макета по варианту калибровки 2-2

Макет	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель	$\mu$ , пиксель
1	-0,599518171	-0,355781491	0,533050450	0,489370
2	0,586222496	-0,445999465	-0,535138834	0,474620
3	-0,446460737	0,520762686	0,563200562	0,491246
4	-0,321697050	-0,305233295	0,034920060	0,489709
5	-0,440161882	-0,443290903	-0,530144142	0,501518
6	0,255623738	-0,485174425	-0,523210320	0,470003
7	0,137180363	0,482428909	0,541225011	0,452620
8	0,506806654	0,065228227	1,199676339	0,504619
9	-0,480923639	0,019264917	0,396946471	0,489508
10	1,144248274	0,307570909	-0,122422726	0,467473
11	0,760207206	-0,006634411	-0,548930202	0,457612
12	0,867195889	-0,195391410	-0,573710598	0,493343
13	-0,314894982	-0,175856124	-0,311999140	0,496834
14	0,770644422	0,961754231	0,805142174	0,498605
15	0,090202703	0,153429534	-0,860935906	0,483284
16	0,313089287	0,462886380	-0,335924262	0,491439
17	-0,766767824	-0,410290253	-0,085276238	0,461536
18	-0,100460427	-0,633687481	-0,151134150	0,496953
19	-0,373671225	0,687360996	-0,163908211	0,502155
20	0,465055486	-0,374388050	0,751020700	0,485833
21	0,948018758	-0,258533858	-0,661134350	0,485615
22	0,179283849	-0,361798434	-0,902229064	0,457402
23	-0,219112204	-0,082670222	0,029599939	0,526190
24	0,992899864	-0,600339281	-0,347906173	0,485607
25	-2,094972294	0,400673549	-0,812345604	0,470116
26	0,287779197	0,473387521	0,278840432	0,488083
27	-0,330280827	0,298711916	-0,308480603	0,478297
28	-0,301986647	0,717297603	0,214005554	0,492059
29	-0,524053113	-0,236649487	0,824831839	0,469112
30	0,271439964	0,072853380	-0,602618654	0,490444

Таблица А.14 – Статистический анализ погрешностей определения элементов внутреннего ориентирования по варианту калибровки 2-2

Характеристики	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель
$m - \sigma$ , пиксель	-0,629980543	-0,426334134	-0,640787354
max, пиксель	1,144248274	0,961754231	1,199676339
min, пиксель	-2,094972294	-0,633687481	-0,902229064
$m + \sigma$ , пиксель	0,714043018	0,443126945	0,493788044
сред., пиксель	0,042031238	0,008396406	-0,073499655
СКО, пиксель	0,672011781	0,434730540	0,567287699

Таблица А.15 – Погрешности определения элементов внутреннего ориентирования и ошибка единицы веса для каждого макета по варианту калибровки 2-3

Макет	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель	$\mu$ , пиксель
1	0,035188535	-0,579715831	0,139074325	0,491250
	-0,304734358	0,124056822	0,483092823	
2	-0,466779921	-0,522143321	0,251381654	0,506626
	-0,167467042	0,640301366	-0,515244630	
3	-0,169616864	-0,524320467	0,644165419	0,489954
	-0,601383501	0,717383360	0,297588078	
4	-0,293230818	-0,757651205	0,672763130	0,471489
	-0,576875878	0,339079273	-0,101770716	
5	-0,000568536	-0,270009124	0,157165667	0,499590
	-0,131973333	-0,045011677	0,160521109	
6	0,565624983	0,962636788	0,189806729	0,503948
	0,777042804	-1,039061958	0,248353206	
7	-0,225584282	-0,325670186	0,497155144	0,486390
	-0,517607532	0,697422823	1,270235507	
8	-0,583482036	-0,249531509	0,372768836	0,487602
	-0,106354325	0,941067963	0,568446453	
9	-0,305912366	-0,482025074	0,356146196	0,482372
	-0,413881027	0,457323935	0,394489665	
10	0,496659581	-0,057077035	-0,023354536	0,495562
	0,292505544	-0,692239007	-0,068361010	
11	-0,317227620	-0,108803033	0,103002472	0,496854
	-0,334594434	0,901746811	0,237625470	
12	0,572155217	0,179956531	-0,098034528	0,463733
	0,073955286	-0,960329083	-0,266694045	
13	-0,165138609	0,325713650	0,155313218	0,480201
	0,379764828	0,330645733	0,072944185	
14	0,263513723	-0,300305895	-0,389752094	0,478568
	-0,311552320	-0,130952051	0,386982664	
15	-0,689510593	-0,814435802	0,434700824	0,481614
	-0,028033359	0,673654263	-0,693051184	

## Окончание таблицы А.15

Макет	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель	$\mu$ , пиксель
16	0,437092505	0,644839988	-0,255756898	0,505580
	0,281055670	-0,509165107	-0,018751655	
17	0,149265300	-0,177900788	-0,581488325	0,492043
	0,145100381	-0,150901692	-0,252980158	
18	0,597995307	1,153389349	0,740435102	0,489849
	0,563735012	-0,525798581	1,362724513	
19	0,715711696	0,216534445	0,123699699	0,504270
	0,572134546	-1,144555542	0,460222400	
20	0,027998716	-0,475241782	0,149913587	0,502027
	-0,335814234	-0,054009998	0,070241776	
21	0,164616927	0,673338689	-0,624303302	0,481043
	0,383015508	-0,167142880	-0,857319660	
22	-0,157438412	-0,879290807	-0,740782949	0,468525
	-0,359633151	0,200588738	-0,932022106	
23	0,366515334	1,337017492	-0,428365231	0,482390
	0,813872402	-0,842918241	-0,145785083	
24	0,174986909	0,510605865	0,314773181	0,480929
	0,262885883	0,104840059	-0,035967677	
25	0,930695625	0,817225351	0,243493171	0,491428
	0,128096053	-0,416380425	-0,640030294	
26	1,046519817	1,086062600	1,120590745	0,482887
	0,432001002	-1,103835382	0,295013033	
27	-0,050104147	0,414027450	1,376646909	0,490662
	0,230908962	0,253898804	0,297983373	
28	0,252501679	0,230682579	-1,071024152	0,492352
	-0,015389002	-0,808303941	-0,760084702	
29	-0,022077404	-0,264954497	-0,485092154	0,481387
	-0,241014387	0,096999583	-0,260052588	
30	-0,006407761	-0,060727709	-0,046143085	0,517788
	-0,125862808	0,282561558	-0,530298395	

Таблица А.16 – Статистический анализ погрешностей определения элементов внутреннего ориентирования по варианту калибровки 2-3

Характеристики	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель
$m - \sigma$ , пиксель	-0,342434376	-0,621142875	-0,477595110
max, пиксель	1,046519817	1,337017492	1,376646909
min, пиксель	-0,689510593	-1,144555542	-1,071024152
$m + \sigma$ , пиксель	0,479363231	0,616915950	0,605160080
сред., пиксель	0,068464428	-0,002113463	0,063782485
СКО, пиксель	0,410898803	0,619029412	0,541377595

Таблица А.17 – Погрешности определения элементов внутреннего ориентирования и ошибка единицы веса для каждого макета по варианту калибровки 3-1

Макет	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель	$\mu$ , пиксель
1	0,035476470	-0,116930547	0,200606218	0,502543
2	-0,103125475	-0,155854418	0,691185315	0,513950
3	0,258782470	-0,057624667	-0,440707006	0,486785
4	0,061859131	-0,138577879	-0,186292846	0,459767
5	0,022505112	-0,294871686	-0,405423243	0,494652
6	0,178741172	0,254163012	-0,038814581	0,511037
7	0,572064830	0,205464144	-0,524106780	0,485841
8	0,025643798	0,022133324	-0,676462119	0,503989
9	0,541240829	0,150450019	0,423948450	0,507882
10	0,106758597	-0,300069570	-0,636578424	0,526070
11	0,199438724	0,011566383	0,057495147	0,505931
12	-0,272031079	0,560215398	-0,088221931	0,477573
13	0,186410722	-0,008246604	0,814801685	0,512904
14	-0,032516815	0,299260730	0,731666827	0,472270
15	-0,195341064	-0,218518267	-0,144404441	0,501808
16	0,235082748	0,036291345	0,045121339	0,512726
17	-0,090222210	-0,283486709	-0,042709428	0,464943
18	0,020756593	0,028695317	-0,483229125	0,509115
19	0,039916088	-0,028543122	0,184911867	0,485754
20	-0,470735229	0,259789359	0,278330731	0,497112
21	-0,231423896	-0,237172317	0,448123435	0,479884
22	-0,002787962	-1,036943107	0,035890722	0,500191
23	0,156482397	-0,192384226	-0,294357597	0,467308
24	-0,116306267	-0,158672011	0,003342394	0,521804
25	0,017518131	0,079319220	0,300453295	0,515134
26	0,454321776	0,171285045	0,315252364	0,476402
27	-0,247247205	0,350185934	0,481918215	0,491920
28	0,161258571	-0,373157800	0,141956229	0,482125
29	0,406511836	0,039946527	0,065234303	0,487250
30	0,000495653	0,332806144	-0,617236494	0,500891

Таблица А.18 – Статистический анализ погрешностей определения элементов внутреннего ориентирования по варианту калибровки 3-1

Характеристики	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель
$m - \sigma$ , пиксель	-0,174547199	-0,323287208	-0,390191235
max, пиксель	0,572064830	0,560215398	0,814801685
min, пиксель	-0,470735229	-1,036943107	-0,676462119
$m + \sigma$ , пиксель	0,302515762	0,269988473	0,432970870
сред., пиксель	0,063984282	-0,026649368	0,021389817
СКО, пиксель	0,238531481	0,296637840	0,411581052

Таблица А.19 – Погрешности определения элементов внутреннего ориентирования и ошибка единицы веса для каждого макета по варианту калибровки 3-2

Макет	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель	$\mu$ , пиксель
1	0,361374583	-0,189609211	-0,052998216	0,467274
2	-0,587257695	-0,231931765	-1,018597645	0,483034
3	-0,956409431	-0,456169318	-1,066976126	0,471151
4	-0,489938092	0,039998273	0,098722379	0,480483
5	-1,186981679	-0,499341411	-0,905769543	0,493716
6	0,837714059	0,080973011	0,536555763	0,488994
7	-0,020065165	0,427513544	-0,257311776	0,525521
8	-0,739238179	-0,334461007	0,030225545	0,472638
9	1,136464202	-0,296789389	0,631724056	0,480223
10	1,867712980	0,311301299	0,322089809	0,496446
11	-2,151229968	-0,040847655	-0,745606927	0,478386
12	0,980431339	0,519418520	0,301611852	0,473762
13	0,011881289	0,065910750	-0,220843608	0,474786
14	-0,170475599	0,028332331	0,541525931	0,499956
15	-1,618887051	-0,083992236	-0,300283133	0,494572
16	-1,063309707	-0,197558353	0,375030122	0,497402
17	1,288577907	0,068396503	-0,090076707	0,497032
18	-1,027979553	-0,352467351	-0,678046320	0,543237
19	-0,558268597	0,357067425	-0,338716307	0,501134
20	-0,495942875	0,182397351	0,041379613	0,503396
21	-0,143369857	-0,200988831	0,538081508	0,489705
22	-0,332972169	-0,078684906	0,078948446	0,490426
23	-1,825241085	-0,432088671	-0,802641042	0,514358
24	0,354111035	0,215498200	-0,842114696	0,512218
25	-1,439694535	-0,203368754	-0,179906924	0,506293
26	-1,510292365	-0,561062809	-1,124357712	0,451658
27	1,319624817	-0,235185516	0,481821679	0,489938
28	0,589056405	-0,017877903	0,290645436	0,486557
29	1,504794034	0,404996741	0,349779756	0,490755
30	-2,76427534	-0,552584365	-1,207822331	0,487501

Таблица А.20 – Статистический анализ погрешностей определения элементов внутреннего ориентирования по варианту калибровки 3-2

Характеристики	$\sigma_f$ , пиксель	$\sigma_{x_0}$ , пиксель	$\sigma_{y_0}$ , пиксель
$m - \sigma$ , пиксель	-1,454734252	-0,377015063	-0,749398199
max, пиксель	1,867712980	0,519418520	0,631724056
min, пиксель	-2,764275340	-0,561062809	-1,207822331
$m + \sigma$ , пиксель	0,866061833	0,226134697	0,401803057
сред., пиксель	-0,294336210	-0,075440183	-0,173797571
СКО, пиксель	1,160398042	0,301574880	0,575600628

Таблица А.21 – Корреляция погрешностей определения элементов внутреннего ориентирования по каждому варианту калибровки по плоскому тест-объекту

Вариант	$kr$		
	$\sigma_f - \sigma_{x_0}$	$\sigma_f - \sigma_{y_0}$	$\sigma_{x_0} - \sigma_{y_0}$
0-1	-0,005956914	0,171656268	0,222262191
1-1	0,867754703	0,087802674	-0,007302686
1-2	0,944601534	-0,206896329	-0,267516519
1-3	0,954035664	-0,056452133	0,030656143
1-4	0,927043561	0,281973651	0,138001288
2-1	0,061081287	-0,332082325	-0,014543461
2-2	-0,084333873	-0,014218239	0,262196924
2-3	0,052367815	-0,015557729	0,075204977
3-1	0,016311873	-0,141120330	0,097244536
3-2	0,585068841	0,680317789	0,456785052

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВКИ КАМЕРЫ SONY NEX-5R  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕАЛЬНЫХ СНИМКОВ

Таблица Б.1 – Сводная таблица результатов, полученных разными вариантами калибровки

Параметры	Варианты калибровки		
	по снимку звездного неба	по пространственному тест-объекту (классический вариант)	по плоскому тест-объекту (разработанная методика)
$\mu$ , пиксель	0,511	0,483	0,397
$f$ , пиксель	3324,848	3321,289	3325,539
$x_0$ , пиксель	-30,463	-28,015	-25,442
$y_0$ , пиксель	8,423	12,999	8,589
$k_1$	-7,221E-009	-6,326E-009	-6,350E-009
$k_2$	1,079E-015	8,589E-016	8,488E-016
$k_3$	-1,943E-023	-4,101E-024	-3,459E-024
$P_1$	-1,751E-007	2,007E-007	1,454E-007
$P_2$	-1,988E-007	-1,648E-007	-1,540E-007

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

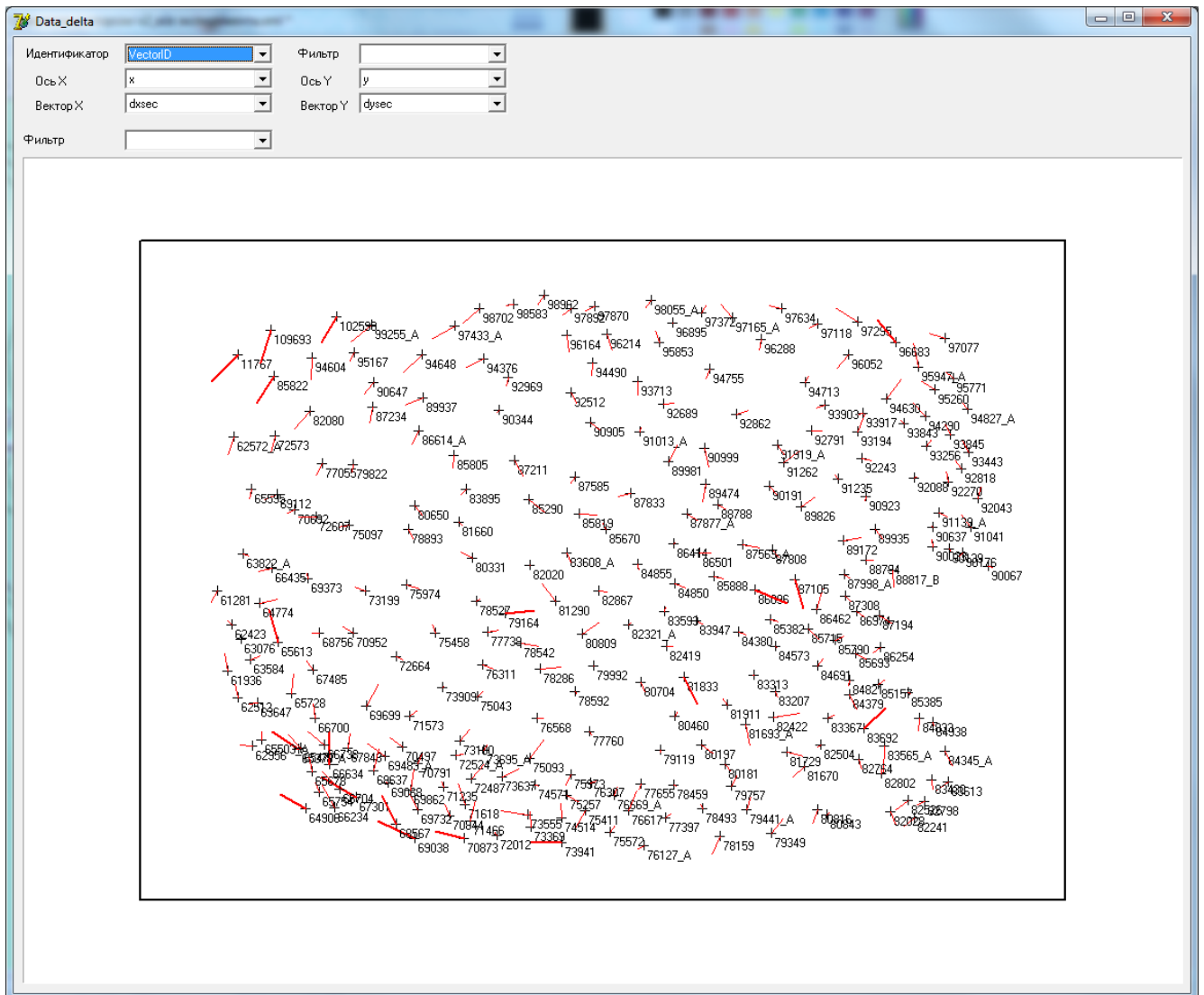
ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СРАВНЕНИЯ  
ВАРИАНТОВ КАЛИБРОВКИ

Рисунок В.1 – Сравнение связки лучей, полученной при калибровке  
по снимку звездного неба с эталонной связкой лучей

Максимальное отклонение: 98,0".

Среднее квадратическое отклонение: 38,1".

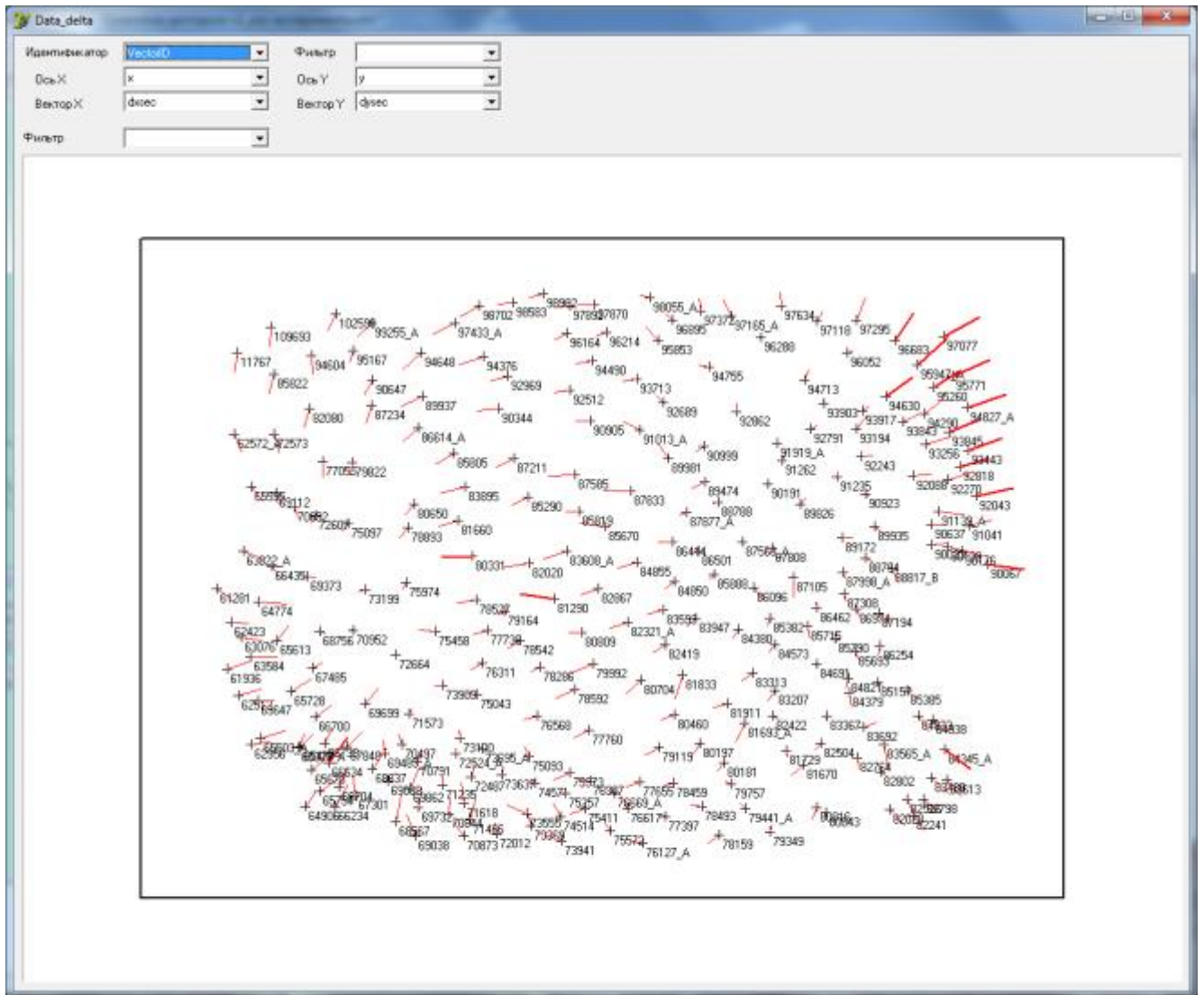


Рисунок В.2 – Сравнение связки лучей, полученной при калибровке традиционным способом (по пространственному тест-объекту) с эталонной связкой лучей

Максимальное отклонение: 167,7".

Среднее квадратическое отклонение: 75,8".

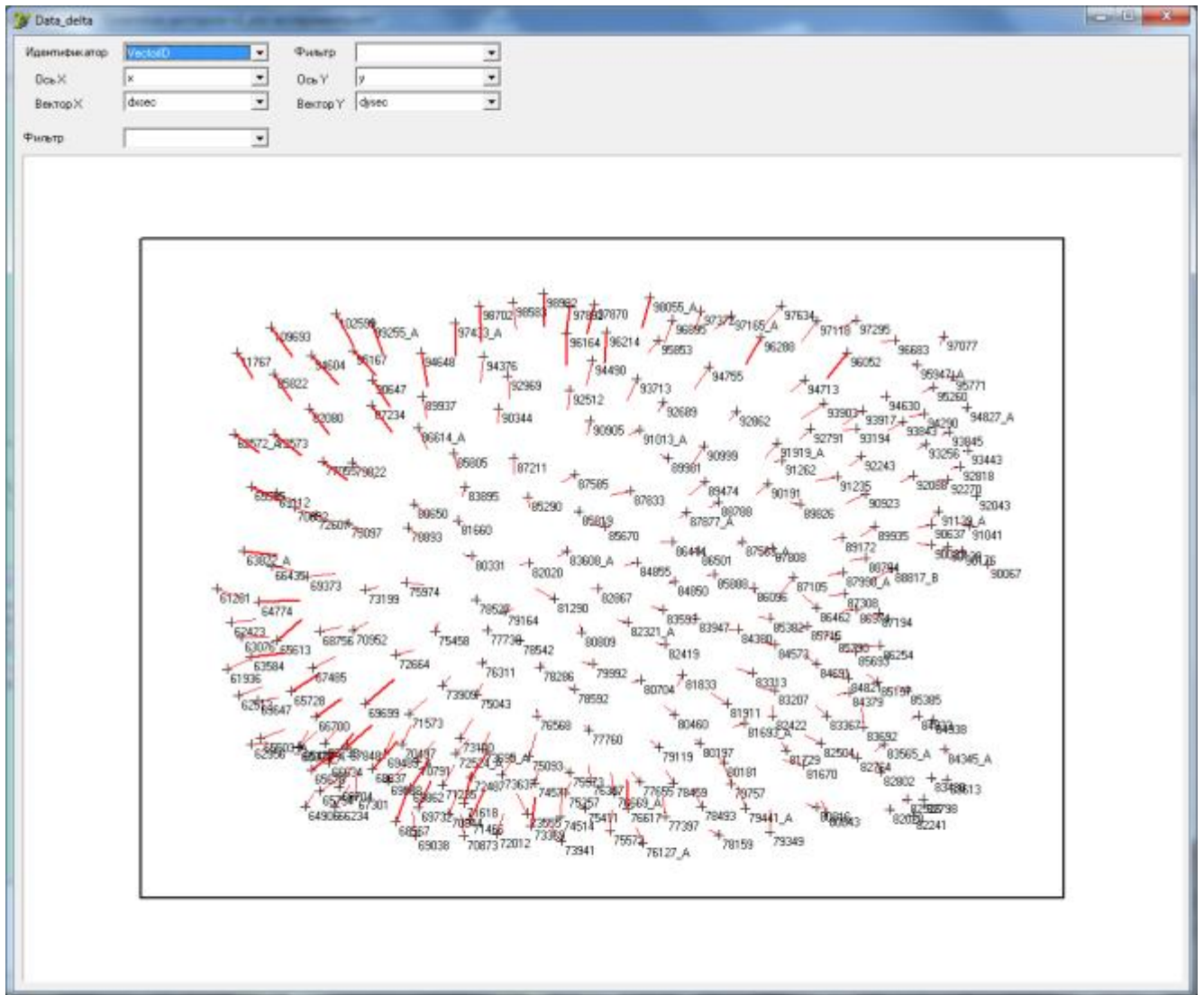


Рисунок В.3 – Сравнение связки лучей, полученной при калибровке по плоскому тест-объекту с эталонной связкой лучей

Максимальное отклонение: 169,2".

Среднее квадратическое отклонение: 87,0".