

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

На правах рукописи



Червова Анастасия Евгеньевна

Математическое моделирование процессов построения цифровых битовых
макетных аэроснимков для тестирования цифровых
фотограмметрических станций

25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук,
доцент
Коркин Вадим Сергеевич

Новосибирск – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ, ЗАЛОЖЕННЫХ В СОВРЕМЕННЫЕ ЦИФРОВЫЕ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ (ЦФС).....	9
1.1 Обзор тест-объектов, применяемых для исследования ошибок универсальных оптико-механических и аналитических приборов и ЦФС.....	9
1.2 Методики создания макетных снимков для универсальных оптико-механических и аналитических приборов и анализ возможности их применения при создании цифровых макетов.....	12
1.3 Анализ современных методик моделирования цифровых макетных снимков.....	21
1.4 Понятие ЦФС и общие требования к программному обеспечению ЦФС.....	25
1.5 Виды и особенности современных ЦФС.....	29
2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИК МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ МАКЕТНЫХ АЭРОСНИМКОВ.....	40
2.1 Метрологическое обеспечение ЦФС.....	40
2.2 Классификация цифровых макетных снимков по виду и точности.....	42
2.3 Особенности моделирования цифровых реалистичных макетных снимков.....	43
2.4 Особенности моделирования цифровых битовых макетных снимков...	45
2.5 Математические модели формирования цифровых макетных снимков.....	46
2.6 Методика моделирования битовых макетных снимков стереопары.....	60
2.7 Методика моделирования битовых макетных снимков маршрута.....	62
2.8 Методика моделирования битовых макетных снимков блока.....	67

2.9	Методика маркировки точек на цифровых макетных снимках с подпиксельной точностью.....	69
3	РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИК МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ БИТОВЫХ МАКЕТНЫХ СНИМКОВ.....	73
3.1	Параметры формирования цифровых битовых макетных снимков.....	73
3.2	Обработка стереопар, маршрутов и блоков цифровых битовых макетных снимков на ЦФС PHOTOMOD.....	74
3.3	Сравнительный анализ результатов исследования ЦФС PHOTOMOD с помощью стереопар цифровых битовых макетных снимков с различными параметрами моделирования.....	79
3.4	Сравнительный анализ результатов исследования ЦФС PHOTOMOD с помощью маршрутов цифровых битовых макетных снимков с различными параметрами моделирования.....	84
3.5	Сравнительный анализ результатов исследования ЦФС PHOTOMOD с помощью блоков цифровых битовых макетных снимков с различными параметрами моделирования.....	96
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	102
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	104
	ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) ЭЛЕМЕНТЫ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ МАКЕТНЫХ АЭРОСНИМКОВ.....	114
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ МАКЕТНЫХ СТЕРЕОПАР.....	115
	ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КООРДИНАТЫ ТОЧЕК, ЗАМАРКИРОВАННЫХ НА СТЕРЕОПАРАХ № 1, № 2 И № 3.....	118
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное) РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ МАРШРУТА МАКЕТНЫХ СНИМКОВ.....	119

ПРИЛОЖЕНИЕ Д	(обязательное) ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КООРДИНАТЫ ТОЧЕК, ЗАМАРКИРОВАННЫХ НА МАРШРУТАХ № 1, № 2 И № 3	124
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	(обязательное) РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ МАРШРУТА МАКЕТНЫХ СНИМКОВ С БОЛЬШИМИ УГЛАМИ НАКЛОНА СНИМКОВ.....	126
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж	(обязательное) РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ МАКЕТНЫХ СНИМКОВ БЛОКОВ.....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ И	(обязательное) ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КООРДИНАТЫ ТОЧЕК, ЗАМАРКИРОВАННЫХ В БЛОКАХ № 1 И № 2.....	134

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований. В течение многих десятилетий фотограмметрическая обработка аэрофотоснимков выполнялась сначала на универсальных оптико-механических, а затем на аналитических универсальных приборах. Для исследования и тестирования инструментальной точности таких приборов были разработаны несколько видов специальных тест-объектов: контрольные сетки, контрольные снимки, снимки-макеты Ошуркова, а для проверки алгоритмов фототриангуляции использовали аналитические снимки-макеты Лобанова А. Н., Антипова И. Т.

В 80-е гг. XX в. появилась возможность получать цифровое изображение, начала активно развиваться цифровая фотограмметрия. Для фотограмметрической обработки цифровых снимков стали создавать специальные фотограмметрические приборы – цифровые стереоплоттеры, получившие в России название «цифровые фотограмметрические станции» (ЦФС), системы или комплексы. Основа ЦФС – программное обеспечение, выполняющее все фотограмметрические процессы. Однако большинство производителей не дают описания используемых алгоритмов вычисления. Конечно, разработчики выполняют тестирование программ для проверки правильности работы системы, но не предоставляют информации об этом. Кроме того, алгоритмы, применяемые в тех или иных программах, не всегда известны. Не у всех ЦФС имеется возможность получения промежуточных результатов вычислений, позволяющих оценить точность построения модели на всех этапах фотограмметрической обработки.

В настоящее время существует большое количество различных фотограмметрических систем, однако отсутствуют сертифицированные методики оценки точности приборов такого типа.

Таким образом, в настоящее время существует необходимость независимого контроля за правильностью работы ЦФС, а также оценки точности выполнения как отдельных этапов фотограмметрических построений, так и точности обработки снимков в целом.

Одним из возможных вариантов выполнения такой оценки качества работы ЦФС является использование цифровых макетных снимков, т. е. использование исследований, аналогичных тестированию аналоговых и аналитических универсальных приборов.

Таким образом, разработка методики создания цифровых макетных аэроснимков является актуальной задачей.

Такие макетные снимки позволят оценить точность работы фотограмметрических систем, решить задачу сравнения правильности и точности работы различных цифровых станций, произвести оценку точности полученных результатов, осуществить контроль за отдельными фотограмметрическими процессами, оценить качество работы оператора.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в разработку методов и алгоритмов цифровой фотограмметрии внесли работы Журкина И. Г., Пяткина В. П., Гука А. П., Аккермана Ф., Дэвиса Е. и многих других. Разработкой макетных материалов для тестирования инструментальной точности универсальных и аналитических приборов занимались такие известные ученые, как Лобанов А. Н., Дубиновский В. Б., Лысенко Ф. Ф., Калантаров Е. И., Ошурков Г. А., Антипов И. Т., Бобряшов А. М., Булушев М. Н. и др. В настоящее время исследования по вопросу создания цифровых макетных материалов проводят как отечественные, так и зарубежные разработчики ЦФС.

Целью исследований является разработка алгоритмов и методик формирования цифровых макетных снимков маршрута и блока на основе совершенствования существующей методики получения стереопары таких снимков с целью повышения точности и расширения сферы применения макетных снимков.

Основные задачи исследований. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

– выполнить анализ методик тестирования различных фотограмметрических приборов и алгоритмов современных ЦФС;

- разработать методики создания цифровых макетных аэроснимков, образующих маршрут и блок;
- разработать методику маркировки точек на цифровых макетных аэроснимках с подпиксельной точностью;
- выполнить исследования разработанных методик создания макетных снимков с использованием современных ЦФС.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- предложена математическая модель построения макетных снимков, отличающаяся тем, что позволяет формировать непрерывные макетные снимки по цифровой модели рельефа методом обратного трассирования, исключает неоднозначность решений и позволяет работать с подпиксельной точностью, что обеспечивает возможность формировать цифровые макетные снимки для различных типов поверхностей и исследовать ЦФС различного класса точности;
- разработаны методики формирования высокоточных макетных цифровых снимков маршрутов и блоков, отличающиеся оригинальным алгоритмом моделирования, позволяющим маркировать любое количество точек на снимках.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что предложенные математические модели можно использовать для формирования аналитических непрерывных макетных снимков высокой точности на основе использования метода обратного трассирования.

Разработанные методики моделирования макетных снимков позволяют создавать цифровые макеты с реальными параметрами аэрофотосъемки для различных типов поверхностей и могут быть использованы при тестировании любых ЦФС.

Положения, выносимые на защиту:

- разработанная математическая модель, основанная на использовании метода обратного трассирования модели местности, позволяет создавать высокоточные непрерывные макетные снимки;
- разработанная методика позволяет маркировать точки макетных снимков с подпиксельной точностью;

– разработанные методики создания цифровых макетных снимков маршрутов и блоков могут быть использованы для исследования различных современных ЦФС.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты работы внедрены в учебный процесс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» при изучении дисциплин профиля «Аэрокосмические съемки, фотограмметрия» бакалаврами направления «Геодезия и дистанционное зондирование».

Результаты работы были представлены на конкурс пользовательских проектов, проводимый ЗАО «Фирма Ракурс», и отмечены дипломом III степени.

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на международных научных конгрессах «ГЕО-Сибирь» (2011 г., Новосибирск), «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (2012–2015 гг., Новосибирск).

1 ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ, ЗАЛОЖЕННЫХ В СОВРЕМЕННЫЕ ЦИФРОВЫЕ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ (ЦФС)

1.1 Обзор тест-объектов, применяемых для исследования ошибок универсальных оптико-механических и аналитических приборов и ЦФС

Применение макетных снимков – это удобный и надежный способ решения ряда задач, возникающих в фотограмметрии. В настоящее время существует несколько типов макетных снимков, каждый из которых применяется для решения проблем, связанных с определенным видом фотограмметрических систем: тест-объекты, используемые для проверок, и исследований на универсальных и аналитических универсальных приборах, а в современной фотограмметрии – на цифровых фотограмметрических станциях [12, 40, 41, 42].

Известно, что в период развития оптико-механических и аналитических фотограмметрических приборов в качестве эталонов для определения инструментальных ошибок фотограмметрических приборов широко использовались физические тест-объекты: контрольные сетки, контрольные снимки, снимки-макеты Ошуркова.

Контрольные сетки являлись наиболее распространенным видом эталонов, применяемых для тестирования фотограмметрических приборов, так как они позволяли решать широкий круг задач, связанных с их исследованиями. Кроме определения инструментальных ошибок, они использовались в процессе выполнения проверок прибора при определении отдельных параметров, нуль-пунктов шкал и счетчиков. Они позволяли быстро обнаружить причину неисправности прибора. Контрольные сетки создавались с высокой точностью – ошибка нанесения штрихов не более 3 мкм.

Контрольные снимки использовались в основном для определения инструментальной точности универсальных стереофотограмметрических приборов оптико-механического типа. В качестве контрольных снимков могли

служить реальные снимки в виде диапозитивов на стекле. Обычно их создавали из имеющихся реальных снимков хорошего фотографического качества

Снимки-макеты Ошуркова применялись в основном для определения инструментальных ошибок стереофотограмметрических приборов оптико-механического типа.

Исследования, проводимые по таким снимкам, имеют ряд преимуществ.

Во-первых, снимки-макеты позволяют установить истинную величину инструментальных ошибок, тогда как в контрольных снимках присутствуют всевозможные искажения, которые могут достигать такой величины, что превосходят значения инструментальных ошибок.

Во-вторых, при работе со снимками-макетами можно контролировать точность работы приборов по величинам элементов внешнего ориентирования и выполнять исследования инструментальной точности приборов по установочным элементам, в то время как по контрольным снимкам, элементы которых не известны или не могут быть определены достаточно точно, этого сделать нельзя.

В-третьих, точность наблюдения при измерениях по снимкам-макетам практически постоянна на данном приборе, а при измерениях по контрольным снимкам точность изменяется в зависимости от разрешающей способности фотоснимка, проработки деталей в светлых и затемненных местах, плотности и других величин.

В-четвертых, при исследовании инструментальной точности по снимкам-макетам отсутствуют ошибки опознавания точек и неточного определения координат точек макета местности, а при исследовании по контрольным снимкам возникают ошибки из-за опознавания точек и геодезической подготовки снимков, которые не позволяют определить истинные величины инструментальных ошибок.

Основное же преимущество исследования инструментальной точности фотограмметрических приборов по снимкам-макетам состоит в том, что их можно создавать с теми геометрическими характеристиками, которые имеют фотоснимки. Поэтому снимки-макеты позволяют исследовать прибор в том

режиме их работы, при котором они используются в процессе обработке фотоснимков [65].

Для оценки правильности работы алгоритмов фототриангуляции возникла необходимость использовать аналитические макетные снимки.

Аналитические дискретные макетные снимки были разработаны еще в самом начале возникновения аналитической фототриангуляции для исследования различных способов ее построения. Данные макеты представляют собой систему дискретных точек местности, в которой заданы элементы внутреннего и внешнего ориентирования снимков [4].

Второй вид аналитических макетных снимков – непрерывные снимки-макеты. Они обладают непрерывностью поля моделирования, позволяют оперативно изменять параметры моделирования снимков и точность измерений, имеют возможность одновременного сравнения различных алгоритмов обработки. При заданных элементах внутреннего и внешнего ориентирования снимков, которые образуют стереопару, в единой с цифровой моделью рельефа (ЦМР) системой координат осуществляется соответствие между снимками и моделью местности. В данных макетах изображение снимков не формируется, но на экране монитора в процессе измерений в реальном времени выдается вся необходимая информация для оценки точности обработки.

Основные исследования в этом направлении проводили Лобанов А. Н., Дубиновский В. Б., Антипов И. Т. (при тестировании программы Photocom).

При разработке стереоплоттера SDS в 1996 году на кафедре фотограмметрии и дистанционного зондирования (ФиДЗ) СГГА на первых этапах работы использовали аналитические дискретно-непрерывные макетные снимки, созданные в авторской программе [13, 29].

На современном этапе развития фотограмметрии обработка аэрофото- и космических снимков производится на ЦФС, поэтому появилась необходимость в создании цифровых макетных снимков.

В настоящее время в качестве цифровых тест-объектов можно использовать оцифрованные снимки-макеты Ошуркова или создают макетные снимки самостоятельно.

Цифровые макетные снимки можно разделить на два основных вида – битовые и реалистичные.

Впервые битовые макетные снимки были созданы при разработке цифрового стереоплоттера SDS [29]. В дальнейшем велись разработки по созданию реалистичные (полутоновых) макетных снимков. Битовые макетные снимки представляют собой поля цифровых изображений с замаркированными точками. Координаты точек вычисляются с использованием аналитических зависимостей координат точек снимка и местности с последующим переводом в систему координат цифрового изображения. Для этих макетов характерно отсутствие восприятия стереоэффекта.

Реалистичные (полутоновые) цифровые макетные снимки имеют непрерывное изображение по всему полю моделирования. Оценка точности измерений производится в любой точке изображения.

Также возможно создание реалистичных макетных снимков с основой на реальном цифровом аэроизображении.

1.2 Методики создания макетных снимков для универсальных оптико-механических и аналитических приборов и анализ возможности их применения при создании цифровых макетов

Методики создания макетных снимков были разработаны на этапе разработки первых универсальных приборов (УП) и применялись в целях тестирования правильности работы приборов. Для этих целей использовались физические тест-объекты: контрольные сетки, контрольные снимки, снимки-макеты Ошуркова.

Контрольные сетки представляют собой стеклянные пластины, на которые наносят взаимно перпендикулярные штрихи. Для изготовления сеток применяли оптическое стекло толщиной не более 4 мм. Размеры контрольных сеток

соответствовали формату снимкодержателей прибора. Расстояния d между штрихами сетки по оси X и по оси Y было одинаковым и могло быть равным: 20; 10; 5 мм и менее. Вся технология создания таких сеток сводилась к физическому и химическому воздействию на стекло. Для получения правильного результата необходимо было соблюдать все технологические процессы (покрытие стекла защитным слоем, процарапывание штрихов с помощью координатографа, травление стеклянной пластины плавиковой кислотой, окрашивание процарапанных канавок специальной краской черного цвета). Важным параметром, влияющим на точность контрольных сеток, являлась ширина процарапанных штрихов. Наиболее целесообразным является использование контрольных сеток с шириной штрихов от 0,02 до 0,03 мм. Все штрихи должны были быть четкими и иметь одинаковую толщину [65].

Если рассматривать данную методику с точки зрения современной фотограмметрии, то все технологические процессы можно считать устаревшими. При тестировании ЦФС контрольные сетки можно применять, если создать их в цифровом виде как высокоточное изображение перпендикулярных линий. Но для успешного их использования, необходимо знать координаты всех пересечений, а это приводит нас к оцифровке следующего вида физических тест-объектов – снимков-макетов Ошуркова.

Снимки-макеты Ошуркова представляют из себя стеклянные пластины с выгравированными штриховыми метками и прямыми линиями. Центры пересечения штрихов меток служат точками макетных снимков, центральные прямые – их осями X и Y . По краям снимка на расстоянии ± 70 мм нанесены прямые, параллельные осям X и Y . Все созданные снимки макеты имеют паспортные данные, которые содержат элементы внутреннего и внешнего ориентирования и координаты точек снимков. Геометрически перекрывающиеся части пластин представляют собой изображения точечного объекта, построенного по законам центрального проектирования. В зависимости от взаимной ориентации снимки-макеты могут образовывать различные стереопары. Если пластины перекрываются зонами B_1 и A_2 , то образуется стереопара, имитирующая плановую

съемку горного района. Если же пластины перекрываются зонами B_2 и A_1 , то образуется стереопара, имитирующая идеальный случай съемки горного района. Снимки-макеты Ошуркова представлены на рисунке 1.

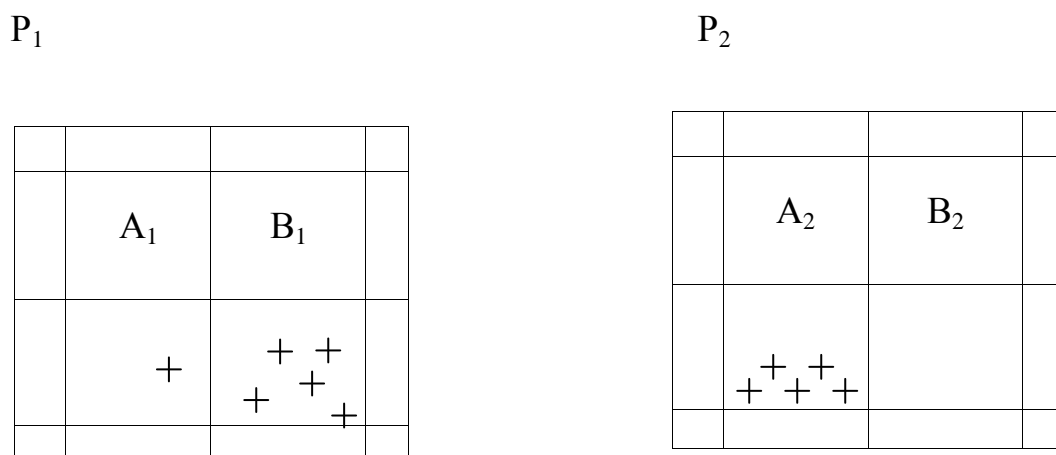


Рисунок 1 – Снимки-макеты Ошуркова

При создании снимков-макетов Ошуркова необходимо предварительно задать числовыми значениями следующие величины [65]:

- элементы внутреннего и внешнего ориентирования стереопары планового случая съемки и стереопары идеального случая съемки;
- координаты x и y точек зоны B пластины P_1 и точек $4'$, $9'$, $14'$, $19'$, $24'$ пластины P_2 ;
- высота Z всех точек цифровых макетов местности.

При этом должны выполняться условия, обеспечивающие получение снимков-макетов формата 18×18 см, а также возможность установки элементов ориентирования снимков и измерение макетных моделей на аналоговых УП

$$\left. \begin{aligned} x_0 = y_0 = 0, \quad f_1 = f_2 = f; \quad |\alpha| \leq 3^\circ, \quad |\omega| \leq 3^\circ, \quad \chi = 0; \\ X_{S_2} - X_{S_1} \approx \frac{65}{f} Z_S; \quad Y_{S_2} - Y_{S_1} = 0, \\ |Z_{S_2} - Z_{S_1}| \leq 0,05 Z_S; \quad |Z| \leq 0,15 Z_S; \\ |x| \leq 75 \text{ мм}; \quad |y| \leq 75 \text{ мм}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

При помощи уравнения коллинеарности (формула 2) вычисляют сначала координаты X, Y точек модели местности, а по ним неизвестные координаты x, y точек пластины P_1 и P_2

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 &= -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 &= -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ X - X_s &= (Z - Z_s) \frac{a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3 f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3 f} \\ Y - Y_s &= (Z - Z_s) \frac{b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3 f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3 f} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где a_i, b_i, c_i – направляющие косинусы, вычисленные через угловые элементы внешнего ориентирования снимка (α, ω, κ);

X_s, Y_s, Z_s – координаты точки фотографирования;

f – фокусное расстояние снимков;

x_0, y_0 – координаты главной точки снимка.

После этого с помощью специального компаратора осуществлялась гравировка меток на стеклянных пластинках в соответствии со значениями координат x, y . Комплекты снимков-макетов изготавливались под фокусные расстояния 70; 100; 200 мм.

Точность таких снимков-макетов в основном определялась точностью гравировки меток и прямых линий на компараторе и составляла 3 мкм. Для уменьшения влияния ошибок гравирования пластин в паспортные данные координат цифровых макетов местности вводились соответствующие поправки [22].

Методика создания снимков-макетов Ошуркова вполне применима и в настоящее время, при условии замены этапа гравировки меток на компараторе на отрисовку меток в цифровом виде в растровом редакторе. Необходимо отметить,

что оцифрованные снимки-макеты Ощуркова являются первыми цифровыми макетными снимками.

При создании контрольных снимков обычно использовалась стереопара на рельефный участок местности с четкими контурами. Углы наклона α и ω этих снимков должны были различаться между собой как можно больше, но не превышать предельных установок на исследуемом приборе. На выбранной стереопаре осуществлялось проектирование и маркировка контрольных точек. Контрольные точки выбирались вблизи четких контуров. Затем выбранная стереопара подвергалась тщательным многократным измерениям на прецизионном стереокомпараторе, при которых, кроме стереоскопических измерений координат запроектированных точек, измерялись координаты меток. Дальнейшая обработка полученных результатов осуществлялась строгими аналитическими методами с использованием ПК. Для внутреннего ориентирования снимков использовались паспортные данные элементов внутреннего ориентирования снимков, а для внешнего ориентирования модели могли быть выбраны геодезические координаты X , Y , Z для двух точек и Z – для третьей точки произвольно. Полученные в результате обработки геодезические координаты контрольных точек и элементы внешнего ориентирования снимков можно было использовать в качестве эталонных [22]. Полученные координаты контрольных точек были искажены инструментальными ошибками стереокомпаратора, влияющими на результаты еще на этапе измерения.

Величины инструментальных ошибок определялись по разностям между фотограмметрическими и геодезическими координатами. Способ исследования точности работы инструментов по результатам обработки фотоснимков не позволял получить величины инструментальных ошибок в чистом виде, так как разности между фотограмметрическими и геодезическими координатами точек, помимо инструментальных ошибок, содержат еще ошибки снимков, а также ошибки опознавания точек и полевой подготовки снимков [22].

Приведенная методика создания макетных снимков в виде контрольных снимков может быть использована в настоящее время, если перевести все

процессы в цифровой вид. Обработка выбранной стереопары на ЦФС не даст инструментальной ошибки, поэтому на точность таких макетов будут влиять только собственные ошибки снимков, ошибки опознавания точек и ошибки при полевой подготовке снимков. Но современные технологии позволяют минимизировать и некоторые из этих ошибок.

При тестировании аналитических приборов необходимо проверять как инструментальную ошибку механической части прибора, так и работу программной части – электронной вычислительной машины (ЭВМ). Наиболее простым способом отладки ЭВМ является использование аналитических макетов.

При построении аналитических макетных снимков выбор исходных данных должен быть подчинен конкретной задаче исследования, для которой создаются модели. Во всех случаях выбор исходных данных для формирования макетных снимков осуществляется в зависимости от [4]:

- вида съемки, который задают значениями элементов внешнего ориентирования снимков (α , ω , κ);
- элементов внутреннего ориентирования – фокусного расстояния снимков и координат главной точки снимка;
- формата снимков;
- масштаба съемки;
- перекрытия снимков;
- разности высот точек фотографирования;
- числа и расположения точек на снимках;
- характера рельефа местности (равнинная, всхолмленная, горная, высокогорная).

Координаты точки местности (X , Y , Z), координаты изображения этой точки на снимке (x , y) и элементы ориентирования снимка связаны уравнениями коллинеарности (формула (2)). Задавая пространственные координаты X , Y , Z точек местности, координаты X_s , Y_s , Z_s точки фотографирования, величину фокусного расстояния снимка, координаты главной точки снимка и угловые элементы внешнего ориентирования, вычисляются координаты точек снимка.

Иногда точки местности выбирали таким образом, чтобы их изображения на снимках образовывали группы точек в зонах стандартного расположения. В этом случае можно было задавать плановые координаты всех точек группы одинаковыми, а высоты – разными. А затем, выбирая в каждой группе по одной точке, можно было образовать макеты равнинной, всхолмленной или горной местности.

Для отладки программ построения аналитической пространственной фототриангуляции координаты точек макетных снимков вычисляли дважды: для наклонных снимков и для горизонтальных снимков.

При построении длинного ряда не производили вычисления координат точек всех снимков. Вычислялся маршрут, состоящий из нескольких снимков, и последнему придавались элементы внешнего ориентирования первого, а затем согласовывали координаты точек местности последней модели с соответствующими координатами точек первой, т. е. координаты связующих точек. Поэтому для построения длинных маршрутов достаточно было присоединить к концу короткого маршрута его начало, повторив исходные данные. Было необходимо лишь изменить значения абсцисс точек местности присоединяемого маршрута на величину, равную его длине.

Вычисления координат точек снимков производилось на компьютере по специальной программе. Координаты точек макетных снимков вычисляли с точностью не ниже 0,1 мкм. Вычисления макетных снимков производили дважды и в случае расхождений устанавливают их причину и выполняют контрольный счет [4].

Выделяли два метода решения задачи:

- решение задач по истинным значениям исходных данных;
- решение задач по «реальным» значениям исходных данных.

Решение задач по истинным значениям исходных данных проводилось для изучения свойств одиночного снимка и стереопары или для испытания различных способов обработки снимков. Для этого по макетам определяли значения элементов местности или снимков – координаты отдельных точек, длины линий,

углы, а затем сравнивали полученные результаты с истинными значениями исследуемых величин. При этом никаких искажений в макетные снимки не вводились.

Сравнивая истинные значения величин со значениями, вычисленными по приближенным формулам, определялась точность этих формул.

Построение одиночной модели, маршрута или блока маршрутов производили по истинным значениям координат точек снимков, используя в качестве опорных несколько точек местности. Сравнение полученных таким образом значений элементов взаимного и внешнего ориентирования снимков и координат точек сети с их истинными значениями позволяет проверить и оценить теорию обработки снимков исследуемым способом и программу вычислений на персональном компьютере [4].

Решение задач по «реальным» значениям исходных данных. Известно, что аэроснимки, материалы полевой подготовки, показания приборов, фиксирующих элементы ориентирования снимков и другая информация, используемая в фототопографии, содержат случайные и систематические ошибки. Поэтому результаты построения фотограмметрической сети и решения других задач по точным значениям исходных и определяемых величин позволяют проверить лишь формулы соответствующего способа и не характеризуют в полной мере точность обработки аэроснимков.

В целях приближения исследований к реальным условиям обработки аэроснимков перед построением сети в точные значения координат точек макетных снимков и в другие исходные данные вводились случайные и систематические ошибки, соответствующие возникающим в реальных условиях ошибкам.

Случайные ошибки координат точек снимков устанавливались в зависимости от точности построения снимков и точности измерений на фотограмметрическом приборе.

Систематические ошибки координат точек снимков, вызванные влиянием дисторсии объектива съемочной камеры, деформации фотоматериала, рефракцией

лучей в атмосфере, клиновидностью светофильтра и др., рассчитывались по соответствующим формулам и также вводились в точные значения координат и параллаксов снимков.

Ошибки, в координаты и параллаксы точек снимков вводились исходя из целей исследований. Путем сравнения полученных результатов с их истинными значениями можно было судить о влиянии различных источников ошибок на результаты построения и уравнивания сети, а также о степени учета их в процессе исправления координат точек снимков [4].

При тестировании программы Photocom (Антипов И. Т.), входящей в состав программного обеспечения ЦФС ЦНИИГАиК, применялись аналитические макетные снимки [6, 7]. Эти снимки создавались с помощью ряда вспомогательных программ, не являющихся непосредственными компонентами ЦФС ЦНИИГАиК. Они позволяли произвести расчет макетов местности и снимков на фототриангуляционный блок, подготовить входные файлы для уравнивания блока, осуществить сопоставление уравненного блока с макетом и произвести подсчет погрешностей, характеризующих истинную точность блока. Были смоделированы макеты, соответствующие изображениям, полученным с камеры формата 23×23 см и с фокусным расстоянием 150 мм. Размер пикселя на снимке принят равным 7 мкм. Данные макетные снимки представлены в аналитическом виде.

Разработчик программы Triangle 2.0 Комиссаров Д. В. (кафедра ФиДЗ, 2003 г.) использовал аналитические макетные снимки для решения задачи исследования алгоритмов на различных этапах построения сетей фототриангуляции (взаимное ориентирование снимков, построение маршрутной и блочной сети, внешнее ориентирование блочной модели и уравнивание блока методом связок) [24]. Эти аналитические макетные снимки были представлены в виде измеренных координат точек изображений. Для создания таких макетов создана программа формирования, с помощью которой было вычислено четыре макета:

- безошибочный макет;

- макет со случайными ошибками в координатах точек снимков, распределенными по нормальному закону;
- макет с систематическими ошибками в координатах точек снимков, вызванных радиальной дисторсией и ошибками элементов внутреннего ориентирования;
- макет со случайными и систематическими ошибками в координатах точек снимков.

Все представленные методики моделирования аналитических макетных снимков можно использовать при исследовании работы современных ЦФС. Применение аналитических макетов в чистом виде осложняется необходимостью создания специальных программ, предназначенных для того, чтобы ЦФС приняла для обработки вместо привычных цифровых снимков численные данные. Если же на основе полученных при расчете аналитических макетов численных значений создать цифровые макетные снимки, то точность полученных макетов будет невысока. Это связано с тем, что численные значения имеют дробную часть. В аналитических макетах Лобанова А. Н и Дубиновского Б. Д. дробная часть достигает пяти знаков после запятой. Современные растровые редакторы при создании цифровых изображений позволяют наносить только значения, равные целому пикселю.

1.3 Анализ современных методик моделирования цифровых макетных снимков

Исследования по созданию цифровых макетных снимков проводятся при создании ЦФС непосредственно разработчиками программы. Данных по этим работам очень мало, так как немногие разработчики афишируют, какими способами они проверяли созданную ими программу. Этот факт затрудняет процесс исследования по данному вопросу.

При тестировании программы Triangle 2.0, предназначенной для решения задач цифровой фототриангуляции, были созданы цифровые макетные снимки, с помощью которых проводилась проверка работоспособности программы.

Макетные цифровые снимки были созданы в программной среде 3D Studio Max 2.0. В качестве «съёмочного полигона» служила поверхность, которая представляла собой шахматное поле. Таким образом, полученные снимки подобны контрольным сеткам, которые используются при исследовании оптико-механических фотограмметрических приборов. Рельеф местности был смоделирован по случайному закону (рисунок 2) [25].

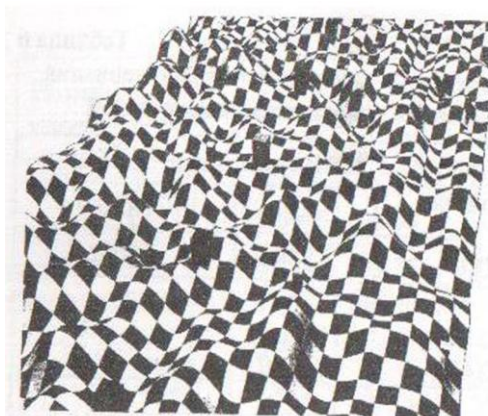


Рисунок 2 – Фрагмент модели местности, созданной в среде 3D Studio Max

Опознаки были замаркированы равномерно по всему полигону. Затем смоделирована площадная аэрофотосъемка, включающая два маршрута по семь снимков. Размер полученных цифровых снимков составлял $400 \times 3\,000$ пикселей, размер одного пикселя (разрешение сканирования) соответствовал 9 мкм.

На основании полученных данных по результатам тестирования программы цифровой фототриангуляции Triangle по макетным снимкам были сделаны выводы о правильной работе алгоритма получения подпиксельной точности при автоматическом отождествлении соответственных точек по методу наименьших квадратов [25].

Данная методика создания цифровых макетных снимков показала свою работоспособность и может быть использована в дальнейшем. К недостаткам можно отнести моделирование рельефа по случайному закону, малый размер кадра и разрешение сканирование в 9 мкм.

На базе МИИГАиК с 1994 года проводились исследования по разработке ЦФС. На определенном этапе исследований возникла необходимость в оценке качества работы этой системы [46]. Для этого была разработана методика по созданию макетных снимков, которые будут содержать фрагменты растровых изображений местности (объектов) различной текстуры и рельефа (Михайлов, А. П., 2002 г.). На рисунке 3 представлен принцип построения макетных снимков, заложенные в данной методике [47].

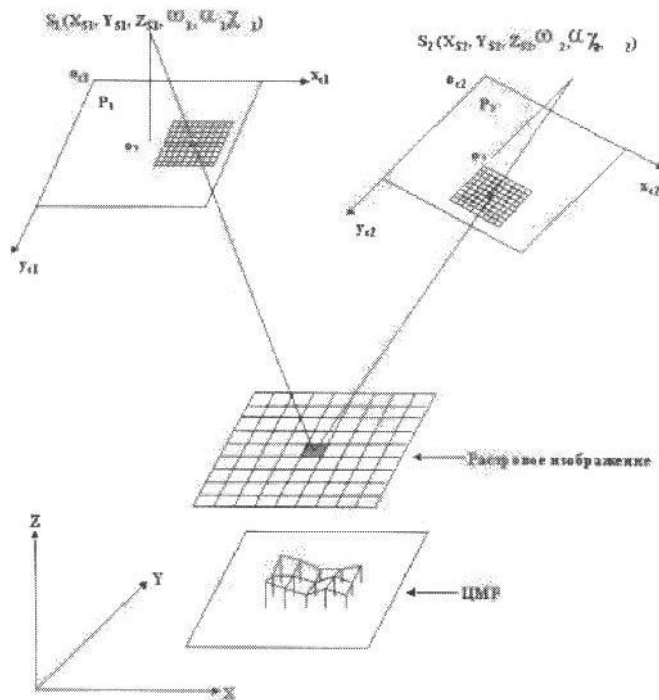


Рисунок 3 – Принцип построения цифровых макетных снимков

Исходными данными для создания таких макетов являются цифровые изображения различных ландшафтов местности (объектов), которые представляют собой фрагменты цифровых изображений оригинальных аэрофотоснимков. Фрагменты цифровых изображений привязываются в системе координат объекта $OXYZ$, причем размеры пикселя изображения задаются произвольно.

Для каждого фрагмента изображения была искусственно задана цифровая модель местности (ЦММ), моделирующая рельеф местности.

Затем по координатам X , Y , Z центров пикселей в системе координат объекта и заданным элементам внутреннего и внешнего ориентирования стереопары макетных снимков $P1$ и $P2$ формируются путем цифрового трансформирования соответствующие фрагменты растровых изображений на макетных снимках. Одновременно вычисляются пиксельные координаты точек на стереопаре снимков, которые являются изображениями центра центрального пиксела исходного фрагмента.

При тестировании системы автоматической идентификации измерительная марка выставляется на точку одного из макетных снимков стереопары по вычисленным координатам изображения центрального пиксела и производится автоматическая идентификация соответственной точки на другом снимке. Оценка точности и надежности идентификации осуществляется сравнением значений пиксельных координат, полученных в результате измерения, с их истинными значениями.

К достоинствам данной методики следует отнести возможность использования реальных ландшафтов при моделировании. Более точных сведений о практической реализации представленной методики нет и это усложняет задачу анализа ее достоинств и недостатков.

На кафедре фотограмметрии и дистанционного зондирования СГГА был разработан цифровой стереоплоттер SDS (Гук А. П., Коркин В. С.) [13, 29, 82, 88]. Для исследования точности этой фотограмметрической системы были сформированы цифровые макетные снимки: битовые и реалистичные полутоновые. Для создания битовых изображений вычислялись аналитические зависимости между точками снимков и местности, а затем полученные точки маркировались в растровом редакторе. Для моделирования стереопары полутоновых изображений использовалась программа трехмерной графики и анимации 3D Studio MAX-2. Основным недостатком таких изображений являлась их ограниченная разрешающая способность. Также проводились исследования по формированию полутоновых аэроснимков с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР) [28, 29].

Методика создания цифровых битовых макетных снимков послужила отправной точкой для исследований, проведенных в данной диссертационной работе.

При проведении исследований не было найдено сведений по разработкам макетных снимков, проведенным за рубежом. На сайтах компаний, занимающихся разработкой ЦФС, указано, что исследования по тестированию правильности работы программ были проведены, но не указано, как именно это было сделано. Неразглашение этих сведений может быть вызвано, например, коммерческой тайной.

Общим выводом, сделанным при анализе доступных сведений, является недостаточность существующих методик и отсутствие макетных материалов, созданных на их основе. На современном рынке нет макетов, которые можно было бы получить для собственных исследований. В связи с этим, разработка новой методики моделирования макетов необходима. При этом должны учитываться недостатки и достоинства уже имеющихся разработок.

1.4 Понятие ЦФС и общие требования к программному обеспечению ЦФС

Понятие «цифровая фотограмметрическая станция». Под цифровой фотограмметрической станцией (системой) понимается совокупность программных и технических средств, связанных общей функцией и обеспечивающих выполнение комплекса технологических процессов и операций, необходимых для получения продукции аэрофототопографической съемки в цифровом виде по цифровым изображениям [2, 21, 50, 51, 52, 53, 87, 90, 91, 95].

В настоящее время в фотограмметрическом производстве используется несколько коммерческих ЦФС с различной концепцией построения, определяемой предпочтениями разработчиков. Одни из них стремятся максимально приблизить технологию обработки снимков к применяемой на аналоговых и аналитических приборах; другие – максимально автоматизировать все операции; третьи – обеспечить обработку определенных наборов данных, используемых конкретными предприятиями; четвертые – создать системы,

обеспечивающие возможность обработки максимального числа типов съемочных систем и их параметров. Несмотря на различия, все ЦФС ориентированы на решение основных фотограмметрических задач и различаются эксплуатационными параметрами [49, 79, 80, 93].

Основным требованием к современным ЦФС является универсальность систем, так как они должны обрабатывать всевозможные данные, полученные с различных устройств, и предоставлять на выходе широкий спектр продуктов для картографии, ГИС, систем 3D-моделирования [57, 72].

В связи с тем, что многие ЦФС создавались по аналогии с УП и АУП, можно выделить шесть основных систем:

- координатную систему;
- наблюдательную систему;
- измерительную систему;
- проектирующую систему;
- ориентирующую систему;
- отображающую систему.

Координатная система ЦФС обычно задается направляющими сканера. При сканировании формируется система координат цифрового изображения, которая совпадает с направлением осей системы координат сканера.

Наблюдательная система позволяет рассматривать стереоскопическое изображение на экране монитора. Существует несколько способов получения стереоизображения на экране:

- способ анаглифов;
- способ «стереоскопа»;
- способ «миганий».

Измерительная система обычно реализована марками и аналитическими вычислениями. В ЦФС измеряются координаты той точки на снимке, на которую наведена марка. При стереоскопическом рассматривании ориентированных снимков изображение двух марок сливается в одну и достигается эффект

перемещения марки в пространстве. При этом изменение «высоты» марки соответствует изменению продольного параллакса действительных марок.

Ориентирующая и проектирующая системы реализуются аналитически. Ориентирование выполняется путем вычисления элементов взаимного и внешнего ориентирования. В результате получаются численные значения элементов ориентирования. С учетом элементов внутреннего ориентирования в проектирующей системе по координатам точек на снимке вычисляются координаты точек на местности и восстанавливается связка проектирующих лучей. После выполнения процесса ориентирования снимков, проектирующая система перемещает измерительные марки в такое положение, что левая и правая марки наведены на соответствующие точки на левом и правом снимках и можно получить пространственные координаты точки модели.

Отображающая система осуществляется с помощью экрана монитора, в котором графическая информация может отображаться в моно или стереорежиме. В результате всех работ по фотограмметрической обработке снимков для отображения информации может служить принтер или плоттер.

При разработке ЦФС могут быть использованы два разных подхода: модульный и интегральный. При модульном подходе программа представляет собой набор пакетов, объединенных единой графической средой. Такой подход реализован в большинстве современных ЦФС. При интегральном подходе все функции программы реализованы одновременно в одной графической среде (ЦФС Талка) [15].

Все ЦФС являются фотограмметрическим средством для ввода метрической и семантической информации и предназначены для формирования цифрового изображения сфотографированного объекта. Их основой являются аналитические фотограмметрические алгоритмы. В отличие от аналитических систем у ЦФС нет оптических и механических элементов, обеспечивающих математическое решение задачи, так как все действия осуществляются посредством компьютерной обработки цифровых изображений. ЦФС (в общем виде) представляет собой процессор с периферийным оборудованием [23]:

- монитор с высокой разрешающей способностью;
- устройство для стереонаблюдения;
- измерительные устройства различного типа: трэк-болл, роллер, специальная мышь, ручные колеса, штурвалы и педали.

Общие требования к программному обеспечению ЦФС.

Согласно инструкции по фотограмметрическим работам [18] программное обеспечение ЦФС должно основываться на строгих математических решениях различных фотограмметрических задач и использовать всю геометрическую точность обрабатываемой информации. Алгоритмы, заложенные в ЦФС, должны обеспечивать решение основных этапов при проведении фотограмметрической обработки различных снимков и оценку точности выполнения этих этапов. Алгоритмы выполнения основных процессов должны быть максимально автоматизированы.

Программное обеспечение для проведения фотограмметрических работ должно иметь полную документацию, в которой должна содержаться техническая и справочная информация. Программное обеспечение должно своевременно обновляться и полностью отвечать вновь возникающим потребностям производства.

Современные ЦФС должны выполнять обработку одиночных снимков, отдельных стереопар и групп снимков, объединенных в маршрут или блок различных размеров и конфигураций.

Инструментальная точность цифровой фотограмметрической системы определяется следующими факторами:

- геометрической точностью цифрового сканера, с помощью которого фотографическое изображение преобразуется в цифровой вид. При условии использования цифровых снимков полученных непосредственно цифровыми камерами необходимо обеспечить геометрическую точность изображения, для этого камера калибруется, определяются систематические погрешности и затем эти поправки вводятся в изображение;

– особенностью и условиями моноскопического и стереоскопического наблюдения цифровых снимков на экране монитора и в стерео очках, а также использования мыши в качестве манипулятора;

– конструктивными особенностями блоков обработки снимков.

Следовательно, можно выделить два предмета для исследования инструментальной точности.

Во-первых, это геометрическая точность, которую должен обеспечивать сканер.

Во-вторых, стереоплоттер, включающий средства отображения и наблюдение цифровых снимков, и алгоритмы работы программ обеспечивающие все процессы обработки цифровых снимков.

1.5 Виды и особенности современных ЦФС

В настоящее время существует множество ЦФС, отвечающих основным предъявляемым к ним требованиям [2, 81, 89]. Существуют как российские, так и зарубежные системы. Первые чаще всего значительно дешевле своих иностранных аналогов.

Среди российских систем можно выделить:

- ЦФС РНОТОМОД (Москва, ЗАО «Фирма Ракурс»);
- ЦФС ЦНИИГАиК (Дельта) (г. Москва, ФГУП «Центрального ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт геодезии, аэрофотосъемки и картографии им. Ф. Н Красовского»; г. Винница, ГНПП «Геосистема»);
- программный комплекс Талка (Москва, ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова» Российской академии наук);
- цифровой стереоплоттер SDS (Новосибирск, ФГБОУ ВПО «СГГА»).

К известным зарубежным ЦФС относятся:

- Leica Photogrammetric Suite (Leica Geosystems);
- Image Station (Intergraph Corp. США);
- пакет программ INPHO (Германия);

– ЦФС DSW200, DPW670, DPW770 (Leica Geosystems, Швейцария),
SOCET SET (совместная разработка Helava Associates и Leica Geosystems).

Кратко рассмотрим вышеперечисленные системы.

Цифровая фотограмметрическая станция Photomod.

ЦФС «PHOTOMOD» (рисунок 4) разработана ЗАО «Фирма Ракурс», впервые была представлена в 1994 году, прошла техническую сертификацию по международным стандартам. В настоящее время эта система используется более чем в сорока странах мира, а также во многих учебных заведениях России и стран СНГ [49].

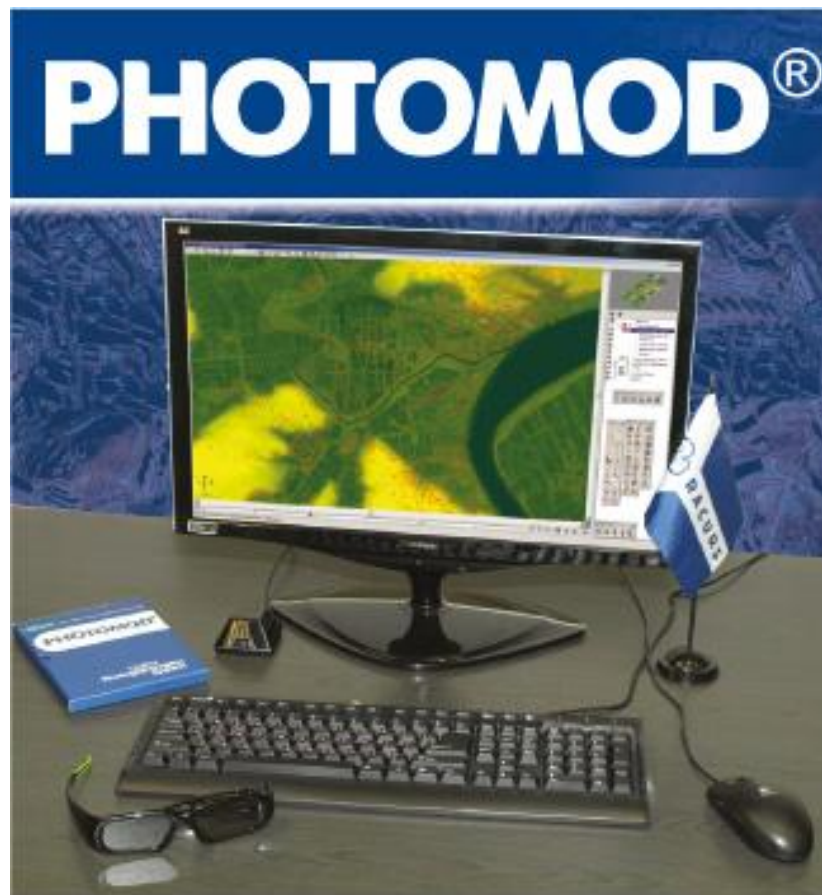


Рисунок 4 – ЦФС PHOTOMOD

ЦФС PHOTOMOD объединяет в себе широкий набор программных средств цифровой фотограмметрической обработки данных и предназначена для решения полного комплекса задач от уравнивания сети фототриангуляции до построения моделей рельефа, создания цифровых карт местности и ортофотопланов [67].

Система Photomod включает средства обработки изображений практически со всех коммерчески доступных съемочных систем, таких как кадровые цифровые и пленочные камеры, космические сканирующие системы среднего, высокого и сверхвысокого разрешения.

Система PHOTOMOD имеет гибкую модульную структуру [45], каждый модуль ориентирован на выполнение строго определенных операций. Совокупность всех модулей определяет ее общие технологические и функциональные возможности. Система может быть использована как локальная полнофункциональная цифровая фотограмметрическая станция, распределенная сетевая среда для реализации больших проектов, дополнительные рабочие места к имеющимся фотограмметрическим системам для выполнения наиболее трудоемких процессов. В состав системы входят управляющая оболочка, 10 модулей и набор управляющих утилит [63]. С помощью результатов, полученных в данной диссертационной работе, можно выполнять тестирование модулей, отвечающих за подготовку данных, сбор информации для фототриангуляции и уравнивание сети. PHOTOMOD Core представляет собой управляющую оболочку системы PHOTOMOD. Она служит для подключения функциональных возможностей различных модулей. PHOTOMOD Core реализует средства для создания и управления проектами, формирования блока изображений, управления камерами проекта, просмотра/импорта/экспорта ЦМР, векторов, точек триангуляции, просмотра данных обработки в 3D-окне, просмотра отчетов, моновекторизации, импорта элементов внешнего ориентирования и построения накидного монтажа с учетом различных входных данных [63].

Программный модуль PHOTOMOD AT используется на этапе измерения сети. В этом модуле выполняется сбор данных для построения маршрутных и блочных сетей пространственной фототриангуляции. Он включает в себя внутреннее ориентирование снимков, ввод координат и измерение опорных точек, измерение связующих точек в областях продольного и поперечного перекрытия. При анализе результатов учитываются два вида ошибок: значения остаточного поперечного параллакса на стереопарах и ошибки в зонах тройного перекрытия

(триплетные ошибки) [63]. Модуль SolverA предназначен для уравнивания сети фототриангуляции для снимков в центральной проекции. Он включает в себя три метода: независимых маршрутов, независимых стереопар и связок. Метод независимых маршрутов необходимо использовать при выявлении грубых ошибок (например, неверно заданные координаты опорных точек или ошибки позиционирования связующих точек). Метод независимых стереопар используется для повышения точностей, достигнутых первым методом уравнивания, а метод связок – для окончательного уравнивания блока.

Система PHOTOMOD может быть использована для решения основных фотограмметрических задач в геодезии, картографии, кадастре, горном деле и других отраслях производства [67].

Цифровая фотограмметрическая станция Дельта (ЦФС ЦНИИГАиК).

ЦФС Дельта на российском рынке распространяется как ЦФС ЦНИИГАиК или ЦФС-Ц, а на Украине и в странах СНГ – как ЦФС «Дельта» (рисунок 5) [49, 60].



Рисунок 5 – ЦФС «Дельта»

Основное назначение этого программного комплекса – фотограмметрическая обработка аэро- и космических снимков центральной и нецентральных проекций с целью создания и обновления цифровых топографических карт и планов [54]. В ЦФС «Дельта» выполняется только измерение координат точек снимков и их контроль; для уравнивания полученных результатов используется одна из двух внешних программ: PhotoCom (разработка НИИПГ под руководством доктора технических наук И. Т. Антипова) или BlockMSG (разработка Донецкого политехнического института под руководством проф. С. Г. Могильного) [11, 78, 83].

В основу разработки ЦФС «Дельта» положены следующие принципы [54]:

- максимальное использование лучших теоретических, методических, программных и технологических разработок;
- максимальное использование готовых технических средств при компоновке состава ЦФС;
- модульность построения, позволяющая путем изменения состава и компоновки модулей, образовывать структуру ЦФС, удовлетворяющую запросам потребителей по видам выполняемых работ и стоимости, а также обеспечивающую постепенное наращивание мощности и производительности;
- возможность постоянного повышения степени автоматизации и оптимизации фотограмметрических процессов, постепенно переходя от автоматизации решения менее сложных процессов к автоматизации в последующем более сложных задач;
- универсальность в отношении геометрии получения обрабатываемых цифровых изображений и величины их элемента разрешения с целью обеспечения возможности решения широкого круга задач пользователя.

Для обработки результатов, полученных при проведении экспериментальных исследований в данной диссертационной работе целесообразно использовать следующие модули ЦФС «Дельта»: Models, TrianPR и Triada [77]. Также возможно использование дополнительных модулей BlockMSG и PhotoCom [5, 9, 68].

Модуль Models отвечает за управление работой всей системы, за ввод данных об аэрофотоаппарате, точках опоры, за измерение снимков, обработку космических снимков, построение одиночной модели. В модуле TrianPR происходит формирование блока и вводится информация о нем. В модуле Triada измеряют снимки в ручном или полуавтоматическом режиме, а также производят контроль по результатам построения пары смежных моделей.

Основной функцией модулей BlockMSG и PhotoCom является построение и уравнивание сетей пространственной фототриангуляции [8, 14].

ЦФС «Дельта» является основной на топографо-геодезические предприятия Роскартографии.

Цифровая фотограмметрическая станция «Талка».

ЦФС «Талка» (рисунок 6) разработана в Институте проблем управления РАН под руководством доктора физико-математических наук Д. В. Тюкавкина [3, 74, 75].

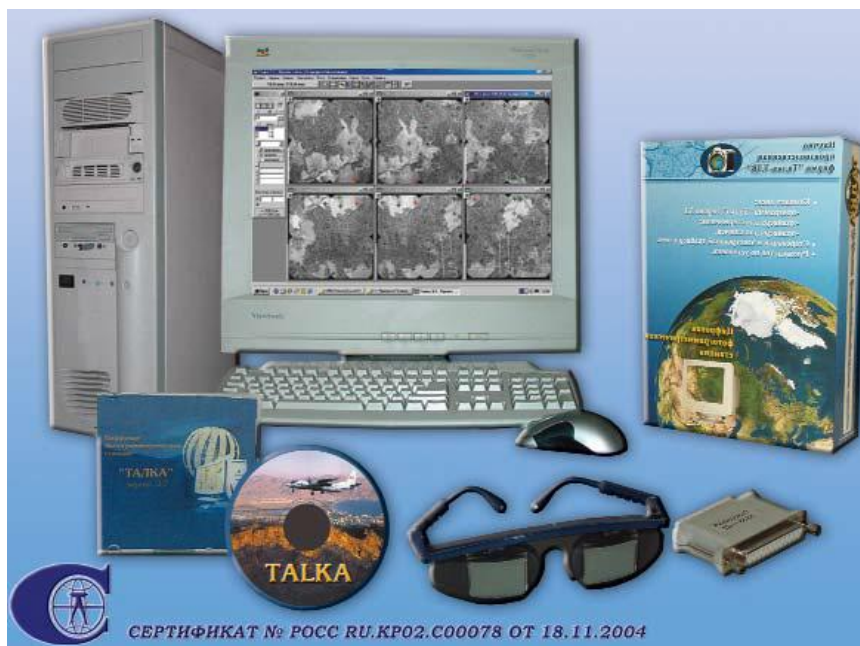


Рисунок 6 – ЦФС «Талка»

Система предназначена для создания цифровых фотопланов, ортофотопланов и фотосхем, а также цифровых моделей рельефа местности и векторизованных контуров объектов, то есть метрической составляющей цифровых карт и планов, с использованием космических и аэрофотосъемочных материалов [1]. Она

позволяет провести полный цикл обработки: от фотоснимков до готовых электронных и бумажных карт и обладает развитыми механизмами контроля и согласованного изменения проекта на любом этапе. В программу обработки включены все известные фотограмметрические процессы: внутренне и взаимное ориентирование снимков, внешнее ориентирование модели, построение ЦМР, создание ортофотопланов. Структура программы четко не выражена. Комплекс обеспечивает все процессы, отвечает производственным требованиям и хорошо приспособлен для работы с большими объемами данных [49, 94]. К особенностям ЦФС «Талка» можно отнести высокую степень автоматизации технологических процессов и проработанности математической основы.

Цифровой стереоплоттер SDS.

«Сибирский цифровой стереоплоттер» SDS (Siberian Digital Stereoplotter) разработан на кафедре фотограмметрии и дистанционного зондирования Сибирской государственной геодезической академии при участии ЗАО «ИнтерМЭП-НИИГАиК» под руководством профессора А. П. Гука [10, 13, 30, 82, 88]. Началом исследований можно назвать 1996 г.

ЦФС SDS предназначена для сбора информации по стереопаре и одиночным снимкам, составления и обновления цифровых топографических и кадастровых карт, формирование ЦМР и получение ортофотопланов. Данная система позволяет решать широкий спектр фотограмметрических задач. SDS включает несколько программных пакетов и, соответственно, технологий обработки снимков:

- основной модуль SDS;
- программный комплекс «Single PhotoImage»;
- программный комплекс «OrthoPhoto-SDS».

Основной модуль SDS позволяет обрабатывать стереопары с совместным стереоскопическим рассматриванием исходных изображений и результатов сбора графической информации. Программный комплекс «Single PhotoImage» дает возможность работать с одиночным изображением, а «OrthoPhoto-SDS» выполнять цифровое ортотрансформирование аэрофотоснимков.

Интерфейс программы простой и интуитивно понятный. К недостаткам данной программы можно отнести отсутствие в ней блока фототриангуляции.

Leica Photogrammetry Suite (LPS).

LPS – фотограмметрическая система, которая обладает широкими возможностями цифровых фотограмметрических станций и является точным и удобным инструментом для работы с изображениями [20]. Она решает весь спектр фотограмметрических задач. LPS построена по модульному принципу. Основным модулем – ядром – LPS является Leica Photogrammetry Suite Core. В нем осуществляются базовые операции по обработке снимков (импорт данных, цветовая обработка снимков, компоновка карт, ортотрансформирование и др.) и решается множество стандартных задач. Все остальные модули подключаются к основному по мере необходимости. Для применения результатов данной диссертационной работы достаточно использовать основной модуль системы.

LPS работает со стерео и с моноскопическими настройками оборудования.

Image Station.

Корпорация Intergraph является одним из крупнейших разработчиков геопространственных решений, технологий и стандартов. Ее система Image Station – программный продукт для фотограмметрической обработки аэрокосмических измерений. В область его решений входят такие задачи как создание проекта, ориентирование снимка и триангуляция, сбор данных в 3D-режиме, создание ЦМР и ее редактирование, производство ортофотопланов. Отличительными характеристиками этой системы являются [58, 61]:

- хорошо отработанная технология, проверенная на производстве;
- эффективная обработка очень больших объёмов данных;
- многопользовательский режим работы и редактирования;
- выбор систем автоматизированного проектирования (САПР) и геоинформационных (ГИС) платформ.

INPHO.

INPHO — это полнофункциональная фотограмметрическая система, решающая все стандартные задачи цифровой фотограмметрии, включая создание ЦМР, ортотрансформирование и построение 3D моделей. Модули системы INPHO позволяют выполнять все этапы фотограмметрической обработки, и в тоже время каждый модуль является самостоятельным программным решением.

В модулях INPHO поддерживается широкий спектр цифровых изображений: отсканированные аэрофотоснимки, изображения с цифровых аэросъемочных систем и космические снимки.

Фотограмметрическая система INPHO предназначена для обработки сложных фотограмметрических проектов с большим размером блока. Система имеет высокую производительность обработки информации [64]. ApplicationsMaster является ядром системы и представляет из себя пользовательский интерфейс, который позволяет работать со всеми модулями системы. Данный модуль позволяет сформировать проект в любой системе координат, задать любой вид съемочной системы, обрабатывать информацию и создавать различные виды ЦМР и ЦММ [43, 44]. MATCH&AT – модуль для автоматического процесса аэротриангуляции всех типов аналоговой и цифровой кадровой съемки. Данный модуль может обрабатывать блок любой формы, с любым количеством снимков и с любым значением перекрытия между снимками. Также в программе присутствуют модули для построения ЦМР, ортотрансформирования и др.

Цифровые фотограмметрические рабочие станции DSW200, DPW670, DPW770.

ЦФС DSW200, DPW670, DPW770 предназначены для решения широкого спектра фотограмметрических задач: для обработки результатов аэрофотосъемок, целей картографирования, создания опорных и съемочных сетей методом фототриангуляции, создания цифровых моделей местности, проведения инженерных изысканий в строительстве и в других видах фотограмметрических и стереофотограмметрических измерений.

Комплект цифровой фотограмметрической рабочей станции (рисунок 7) состоит из оптико-электронного сканера изображения (DSW200) [85, 86], набора персональных компьютеров для получения электронного моноизображения (DPW670) или стереомodelей (DPW770), графического устройства и комплекта программных средств SOCET SET.



Рисунок 7 – ЦФС DPW-770

Система SOCET SET предназначена для решения широкого круга фотограмметрических задач в составе цифровой фотограмметрической станции, применяется в производстве топографических карт [62, 96]. Эта программа имеет модульную структуру: основной модуль и большое количество дополнительных, которые можно подключать в зависимости от решаемой задачи.

Базовый модуль CORE включает в себя функции импорта, визуализации и коррекции исходных изображений, набор инструментов отображения и измерения координат, алгоритмы для автоматического и интерактивного внутреннего ориентирования снимков и др. Система имеет три модуля триангуляции: MODEL SETUP – модуль триангуляции одного или двух изображений, MULTI-SENSOR TRIANGULATION (MST) – модуль триангуляции большого количества разнообразных данных и ORIMA, который позволяет обрабатывать только традиционную аэрофотосъемку и данные авиационного сенсора ADS40 [59, 92].

Программные средства SOCET SET позволяют строить ряды и сети стереофототриангуляции аналитическим методом; определять элементы внешнего ориентирования и производить трансформирование и масштабирование стереомодели как с использованием опорных точек изображения с известными координатами, так и с использованием координат центров фотографирования, полученных при производстве съемки.

Из всего вышесказанного видно, что в настоящее время существует множество различных видов ЦФС. Они создавались разными авторами во многих странах мира, имеют различные цены и внешний вид, но по назначению и спектру решаемых задач не сильно отличаются друг от друга. Во всех системах можно обрабатывать одни и те же виды данных и в результате обработки получать одни и те же результаты – цифровую модель рельефа и местности, создавать ортофотопланы и т.д. Однако алгоритмы, заложенные в ЦФС, могут существенно различаться, часто их реализация выполнена разными методами. Для ряда современных фотограмметрических систем нет описания заложенных в них алгоритмов. В связи с этим, необходимо проводить независимое тестирование всех ЦФС по надежным материалам с известными параметрами – цифровым макетным снимкам (с известными плоскими и пространственными координатами точек).

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИК МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ МАКЕТНЫХ АЭРОСНИМКОВ

2.1 Метрологическое обеспечение ЦФС

Под понятием «метрологическое обеспечение» понимается установление научных основ, применение технических средств, правил и норм, необходимых для достижения требуемой точности измерений. Оценка качества продукции обычно проводят при предпродажном контроле, при эксплуатации или после ремонта и при сертификации. Оценка качества любой продукции проводится с помощью испытания – экспериментального определения количественных или качественных характеристик объекта при его функционировании. После получения результатов проводится процесс оценивания и контроля. При проведении любых испытаний важно задавать реальные или близкие к ним условия эксплуатации. Испытания проводятся с помощью средств измерений, вид которых зависит от объекта испытания.

Метрологическое обеспечение ЦФС сводится к двум видам испытаний: испытания технической части ЦФС и испытания программной части ЦФС. Под испытанием технической части ЦФС следует понимать оценку правильности и надежности работы всех частей системы отдельно и совместно: системного блока, стереомонитора, устройства ввода – вывода графической информации. Испытание программной части сводится к проверке точности и правильности работы алгоритмов, заложенных в ЦФС. Их целесообразно проводить на специальных макетных материалах.

В данной работе исследования направлены на второй вид испытаний.

Согласно руководящему документу РД БГЕИ 03-89 «Приборы фотограмметрические. Термины и определения» [69] к средствам метрологического обеспечения фотограмметрических приборов (универсальных и аналитических) относятся тест-объекты – технические средства для контроля метрологических характеристик. Они подразделяются на:

– контрольные сетки – тест-объекты фотограмметрического прибора, представляющий собой прозрачную пластину с нанесенной на ней системой точек, взаимное положение которых известно с заданной точностью;

– макетные снимки – тест-объекты фотограмметрического прибора, представляющий собой прозрачную пластину с нанесенной на ней системой точек, имитирующих макет объекта фотограмметрической обработки в заданной проекции с заданной точностью.

Опираясь на данную классификацию можно перейти от метрологического обеспечения фотограмметрических приборов к метрологическому обеспечению ЦФС.

Для испытания программной части ЦФС целесообразно использовать макетные снимки в цифровом виде. Они могут представлять собой набор точек или объектов на белом поле, на основе, созданной искусственно, или на реальной основе (используются фотоснимки). Макетные снимки должны иметь заданные параметры, все точки и объекты на них должны быть замаркированы с высокой точностью. В зависимости от точности маркировки точек и объектов, макетные снимки можно разделить по классам точности.

В настоящее время не существует четкого определения и параметров классификации по классам точности для тест-объектов, применяемых при тестирования ЦФС. На основе анализа результатов, полученных при обработке макетных снимков, созданных в диссертационной работе, а также опираясь на руководящий документ «Приборы фотограмметрические. Термины и определения» [69] и Инструкцию по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов [18], можно выделить два класса точности цифровых макетных снимков: средний и высокий.

Если координатные метки и точки замаркированы с точностью до целого пиксела (при размере пикселя не более 10 мкм), такие макетные снимки следует отнести к среднему классу точности – при обработке на ЦФС будут получены результаты, сравнимые с результатами, полученными при обработке реальных снимков. Если говорить о существующих макетных снимках, то такие результаты

можно получить при оцифровке снимков-макетов Ошуркова. В соответствии с инструкцией по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов [18] при проверке программного обеспечения ЦФС средние погрешности координат точек стереопары не должны превышать 0,4–0,5 элемента сканирования при его величине 10–20 мкм.

Если координатные метки и точки замаркированы так, чтобы обработку снимков на ЦФС можно производить с подпиксельной точностью – то данные макетные снимки относятся к высокому классу точности. Средняя погрешность макетных снимков этого класса точности должна составлять не более 0,1–0,2 пиксела при величине элемента сканирования 5–10 мкм.

Создание макетных снимков с размером элемента сканирования менее 5 мкм невозможно по техническим причинам.

2.2 Классификация цифровых макетных снимков по виду и точности

Цифровые макетные снимки можно разделить на битовые и реалистичные. Каждый из этих видов может быть создан с высокой и средней точностью. Точность макетных снимков зависит от способа их создания и целей, для которых предполагается их дальнейшее использование.

Если ЦФС, алгоритмы которой тестируются с помощью макетных снимков, не предполагает построения фототриангуляции, то для такой программы (например, OrtoPhoto SDS) достаточно использовать одиночную стереопару цифровых битовых макетных снимков, координаты точек которой определены до целого пикселя, т. е. макетные снимки средней точности.

Для ЦФС с блоком фототриангуляции (PHOTOMOD и др.) тестирование необходимо проводить на макетных снимках, сформированных с более высокой точностью и образующих маршрут или блок – такие битовые макетные снимки должны быть созданы с подпиксельной точностью и могут быть отнесены к высокому классу точности.

Можно сделать вывод, что на точность битовых макетных снимков влияют ошибки округления координат при маркировке точек до целых значений и разрешающая способность самих снимков.

Точность реалистичных цифровых макетных снимков зависит только от их разрешения, так как такие снимки представляют собой непрерывное изображение. Зависимость от округления координат существует в том случае, когда для маркировки опорных точек применяется аналитическое вычисление координат этих точек. Тогда вид маркировки может определять класс точности реалистичных макетных снимков: при обычной маркировке – средний класс точности, при маркировке в соответствии с методикой подпиксельной точности – высокий класс точности.

2.3 Особенности моделирования цифровых реалистичных макетных снимков

Реалистичные (полутоновые) цифровые макетные снимки имеют непрерывное изображение по всему полю моделирования. Оценка точности измерений производится в любой точке изображения. Основой для моделирования полутоновых реалистичных снимков является трехмерная сцена. Трехмерной сценой называют математическую модель пространственного объекта с указанием источника освещения. В качестве пространственного объекта задается земной ландшафт, который представляется в памяти компьютера в виде некоторой математической модели, описывающей геометрические и оптические свойства его поверхности. Если задать геометрическую модель поверхности объекта в виде ЦМР, спектральные коэффициенты яркости элементов ландшафта, условия освещения и положение съемочной камеры, то можно построить изображение трехмерной сцены.

Реалистичные макетные снимки являются наилучшими тест-объектами для исследования цифровых фотограмметрических систем. При работе с реалистичными изображениями, в отличие от других макетных снимков, возникает наиболее полная имитация наблюдений реальных стереоизображений [29, 34, 55, 56].

Формирование реалистичных изображений осуществляется путем моделирования процесса аэрофотосъемки, то есть создаются следующие модели трехмерной сцены:

- модель съемочной системы;
- модель объекта съемки (ЦМР);
- модель источника освещения;
- модель атмосферы;
- модель поверхности.

По таким снимкам можно решить следующие задачи [30]:

- контроль измерений координат в любой точке геометрической модели местности;
- контроль определяемых параметров модели или снимков на всех этапах построения;
- контроль построения ЦМР по измерениям модели;
- обучение оператора работе на цифровом стереоплоттере;
- производить априорную оценку точности;
- производить обработку снимков, полученных нестандартными съемочными системами, например, при выполнении аэрофотосъемки неметрическими цифровыми камерами с беспилотных летательных аппаратов.

Создание реалистичных цифровых макетных снимков [55] (особенно основанных на реальном аэроизображении) осложнено рядом причин:

- необходимостью создания множества точных математических моделей (особую сложность представляют модели атмосферы и источника излучения);
- необходимостью создания сложного многоуровневого программного продукта, который должен включать в себя все математические модели;
- необходимостью тщательной обработки реального аэроизображения для устранения всех свойственных ему искажений.

Для решения поставленной в диссертационной работе задачи – тестирование точности и правильности работы современных ЦФС на этапах построения

модели – достаточно остановиться на создании высокоточных битовых макетных снимков.

При тестировании ЦФС реалистичные макетные снимки целесообразно применять на более сложных этапах – построения ЦМР, создание ортофотопланов, отрисовка объектов и контуров в стереорежиме.

2.4 Особенности моделирования цифровых битовых макетных снимков

Битовые макетные снимки представляют собой поля цифровых изображений Bitmap с замаркированными точками, например, в среде растровой графики Photoshop, аналогично снимкам-макетам Ошуркова, только в цифровом виде. Оценка точности измерений производится только в замаркированных точках. Координаты точек вычисляются с использованием аналитических зависимостей координат точек снимка и местности с последующим переводом в систему координат цифрового изображения. Точность изображения ограничена из-за целого представления координат точек. Для этих макетов характерно отсутствие восприятия стереоэффекта. Преимущество таких снимков заключается в простоте создания и малом размере готовых файлов.

При создании цифровых битовых макетных снимков необходимо моделировать несколько математических моделей:

- математическая модель съемочной системы;
- математическая модель поверхности;
- модель проецирования;
- математическая модель атмосферы (при необходимости);
- математическая модель источника освещения (при необходимости).

Из приведенного выше набора математических моделей, две последние создавать необязательно. Их можно применять при создании неидеальных макетных снимков, внося различные искажения: за атмосферную рефракцию, неравномерную деформацию фотоматериала, погрешность измерений, а также

влияние различных систематических и случайных ошибок на различные фотограмметрические процессы [4].

При создании идеальных цифровых битовых макетных снимков достаточно создавать первые три математические модели.

2.5 Математические модели формирования цифровых макетных снимков

Математическая модель съёмочной системы.

На современных ЦФС возможна обработка информации, полученной как аналоговыми, так и цифровыми съёмочными системами.

Известно, что процесс внутреннего ориентирования изображений, полученных цифровыми камерами, сводится к определению координат главной точки снимка. Чаще всего он выполняется в автоматическом режиме путем ввода элементов внутреннего ориентирования из паспорта камеры.

При выполнении процесса внутреннего ориентирования при обработке аналоговых изображений, внутреннее ориентирование выполняется путем измерения координат координатных меток на полях снимков, в результате аналитически устанавливается зависимость между системами координат цифрового и аналогового снимков.

Поэтому при формировании макетных снимков было принято решение моделировать только аналоговую фотокамеру.

В реальности при сканировании аналоговых изображений качество цифрового изображения зависит от точности сканирующей системы фотограмметрического сканера. Если сканирование выполнялось фотограмметрическим сканером, то допустимое значение максимальной ошибки не должно превышать размер пиксела. В диссертационном исследовании сканирующая система принята как идеальная, т.е. не вносящую ошибки в итоговое цифровое изображение.

При моделировании макетных снимков, съемочная система представляет собой одну идеальную камеру с заданными элементами внутреннего ориентирования x_0, y_0, f .

Если в макетные снимки необходимо внести искажения, то в общем виде съемочная камера представляется системой двух сопряженных камер с общей оптической осью (рисунок 8). Нижняя камера является идеальной (не вносит никаких искажений) и служит для определения положения точки местности, заданной на снимке. В системе координат этой камеры строится ЦМР, это необходимо для быстрой идентификации точек на снимках и местности [29]. Верхняя камера служит для синтезирования цифрового изображения. Она позволяет вводить любые виды искажений снимка (дисторсия, деформация, случайные ошибки).

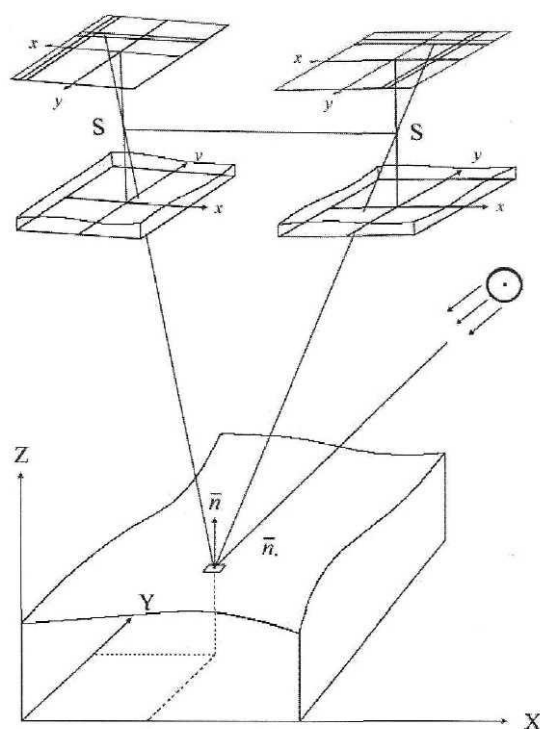


Рисунок 8 – Схема расположения системы камер

При вычислении истинных координат точек снимка все искажения должны быть учтены

$$\left. \begin{aligned} x &= x' + \sigma_x + \delta_x \\ y &= y' + \sigma_y + \delta_y \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где σ_x, σ_y – систематические ошибки точек снимков;

δ_x, δ_y – случайные ошибки точек снимков.

В этой же камере устанавливается связь между координатами точек цифрового и фотографического снимка по формулам

$$\left. \begin{aligned} x' &= [(x_p - x_{po}) \cos \nu + (y_p - y_{po_x}) \sin \nu] m_x - x_0 \\ y' &= [(x_p - x_{po}) \sin \nu + (y_p - y_{po_x}) \cos \nu] m_y - y_0 \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где x_p, y_p – координаты точек цифрового снимка в пикселях;

m_x, m_y – масштабные коэффициенты перехода от цифрового снимка к фотографическому;

x_{po}, y_{po} – перенос начала системы координат цифрового снимка;

ν – угол разворота цифрового снимка;

x_0, y_0 – координаты главной точки снимка.

Математическая модель объекта. Под математической моделью объекта в данном случае понимается цифровая модель рельефа (ЦМР).

ЦМР представляет собой математическое описание земной поверхности как совокупности расположенных на ней точек и связей между ними (дискретной информации), а также математических методов определения высот произвольных точек, принадлежащих области моделирования, по их плановым координатам [19].

ЦМР можно классифицировать по технологии сбора представлений о рельефе, по структуре первичной информации, по методу математического построения, по содержанию хранимой информации, по способу представления и

по назначению [37, 48, 80].

Для моделирования макетных снимков ЦМР лучше всего создавать по нерегулярной сетке исходных точек, с соблюдением непрерывности моделируемой поверхности. Подробно эта технология представлена в статьях [27, 28, 32].

Пусть есть некоторое количество N опорных пикетов с координатами X_i, Y_i, Z_i ($i=1... N$), расположенных хаотично, но равномерно по полю моделирования. Вся область моделирования разбивается на фрагменты с учетом сложности рельефа, а каждый фрагмент - на элементарные участки прямоугольной формы. В каждом элементарном участке аппроксимируем поверхность рельефа бикубическим полиномом

$$P^R(X, Y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \bar{a}_{ij}^R T_i(X) T_j(Y) , \quad (5)$$

где \bar{a}_{ij}^R – неизвестные коэффициенты;

$T_i(X)T_j(Y)$ – ортонормированные полиномы Чебышева, полученные путем нормирования полиномов Чебышева первого рода (номера i и j указывают на степень полинома).

Функция (5) описывает поверхность рельефа в каждом элементарном участке, но не соблюдает условие непрерывности на границах участков. Для обеспечения условия непрерывности необходимо выполнить вторичную аппроксимацию уже построенной поверхности при соблюдении условий непрерывности. Предварительно строится сетка профилей.

Для обеспечения условия непрерывности по линиям сетки в ее узлах необходимо вычислить значения Z_k функции (5) по каждому элементарному участку в узлах сетки по формуле

$$Z_k^R = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \bar{a}_{ij}^R T_i(x_k) T_j(y_k), \quad (6)$$

где $T_i(x_k)$, $T_j(y_k)$ – значения полиномов в узлах;

x_k и y_k могут принимать значения -1 или 1 , в зависимости от номера $k = 1, \dots, 4$. Вычисленные значения Z_k по всем элементарным участкам для каждого узла усредняются.

Далее вычисляются новые коэффициенты a_i и b_j с помощью полиномов

$$\left. \begin{aligned} P(x) &= \sum_{i=0}^3 a_i T_i(x) \\ P(y) &= \sum_{j=0}^3 b_j T_j(y) \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где $a_i T_i(x)$, $b_j T_j(y)$ – коэффициенты профиля при условиях непрерывности в узлах сетки.

Для получения итогового полином вида

$$P(X, Y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} T_i(X) T_j(Y), \quad (8)$$

необходимо аппроксимировать не функцию рельефа, представленную дискретно, а уже аппроксимированную функцию. В этом случае в каждом элементарном участке она непрерывна.

Запишем минимизирующий функционал

$$\Phi = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \bar{a}_{ij}^R T_i(x) T_j(y) - \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} T_i(x) T_j(y) \right)^2 dx dy = \min \quad (9)$$

и условие непрерывности на границах элементарных участков

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=0}^3 a_{ij}^R T_i(-1) - b_j^{l,r} &= 0 \\ \sum_{i=0}^3 a_{ij}^R T_i(1) - b_j^{l+1,r} &= 0 \quad (j = 0, \dots, 3) \\ \sum_{j=0}^3 a_{ij}^R T_j(-1) - a_i^{l,r} &= 0 \\ \sum_{j=0}^3 a_{ij}^R T_j(1) - a_i^{l,r+1} &= 0 \quad (i = 0, \dots, 3) \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где \bar{a}_{ij} – коэффициенты полинома, полученные из первой аппроксимации;

a_{ij} – искомые коэффициенты полинома;

$T_i(-1)T_j(1)$ – значения полиномов Чебышева на границах элементарного участка;

a_i, b_j – коэффициенты полиномов профилей, полученных по линиям сетки.

После решения мы получаем коэффициенты полинома в каждом элементарном участке.

Полином вида (8) характеризует аппроксимирующую поверхность рельефа в каждом элементарном участке при соблюдении условий непрерывности по всему полю моделирования. Точность аппроксимации будет зависеть от размера элементарного участка, плотности расположения исходных точек на поверхности рельефа и сложности самого рельефа.

ЦМР по всей поверхности непрерывна и информация хранится в виде коэффициентов полиномов, координат точек границ зоны моделирования. Для проведения экспериментальных исследований в общем случае не важна достоверность ЦМР. Исходную информацию для создания ЦМР можно получать

с карты или с геометрической модели местности, построенной по реальным аэрофотоснимкам.

В частном случае, например для априорной оценки точности планируемых работ, можно создавать ЦМР с высокой точностью по старым картам или снимкам и моделировать макетные снимки по ней. Это позволит рассчитать оптимальные параметры для проведения аэрофотосъемочных работ.

Модель проецирования.

Под моделью проецирования понимается способ получения плоских координат точек снимков (прямое трассирование) и пространственных координат соответствующих точек местности (обратное трассирование) [26, 32, 33]. Схематически этот способ показан на рисунке 9 (прямое трассирование показано линиями красного цвета, обратное – линиями синего цвета). Данный метод широкое применение находит в машинной графике [16, 66, 70, 71, 76, 84]. На основе методов машинной графики создан оригинальный алгоритм.

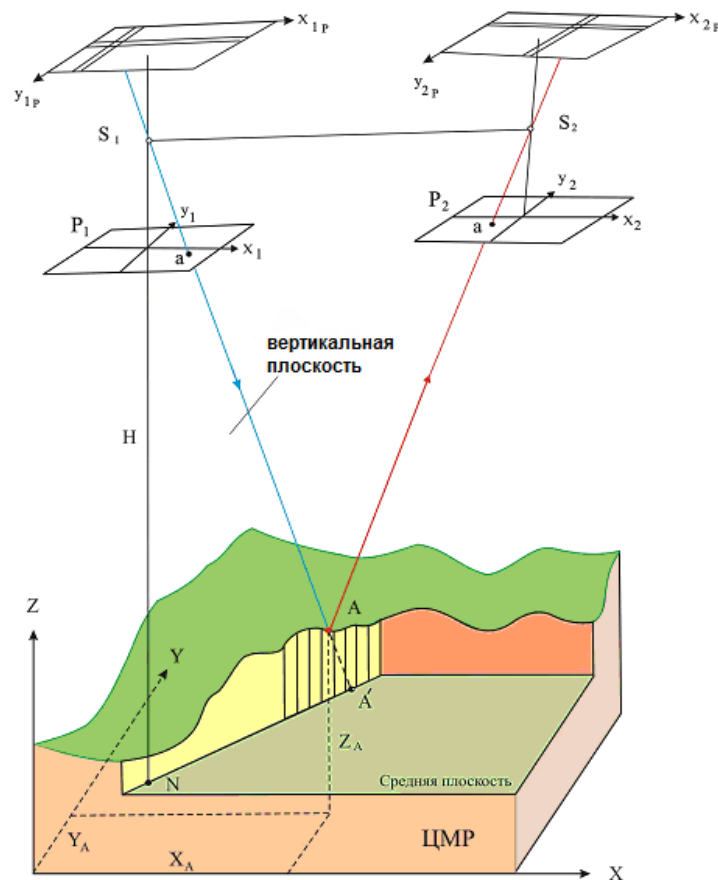


Рисунок 9 – Схема прямого и обратного трассирования лучей

$$\left. \begin{aligned} X'_{A'} - X_S &= (Z_{cp} - Z_S) \frac{a_1(x_a - x_0) + a_2(y_a - y_0) - a_3f}{c_1(x_a - x_0) + c_2(y_a - y_0) - c_3f} \\ Y'_{A'} - Y_S &= (Z_{cp} - Z_S) \frac{b_1(x_a - x_0) + b_2(y_a - y_0) - b_3f}{c_1(x_a - x_0) + c_2(y_a - y_0) - c_3f} \end{aligned} \right\} \cdot \quad (11)$$

Затем в вертикальной плоскости S_1NA' восстанавливается рельеф вдоль линии NA' с заданным шагом, обеспечивающим точность определения координат точки пересечения A на поверхности ЦМР.

Для сокращения времени вычисления необходимо ограничить зону нахождения точки A , используя формулу смещения точки снимка за рельеф

$$\delta r_h = \frac{h}{H} r, \quad (12)$$

где $r = NA'$;

h – максимальное превышение точек ЦМР над средней горизонтальной плоскостью;

H – высота фотографирования над средней плоскостью.

На следующем этапе определяются два ближайших узла, между которыми находится точка A . Данная задача решается путем перебора разности между вертикальными катетами h_k образованных треугольников и отметками рельефа Z_k в узлах сетки. Перебор начинается от точки надира N . Если полученная разность меняет знак при переходе от одного узла к другому, значит между этими смежными узлами и находится искомая точка A на поверхности ЦМР.

Математически процесс обратного трассирования можно записать формулами

$$d_k = h_k - Z_k, \quad (13)$$

где $h_k = (NA' - r_k) \cdot \operatorname{tg} U + Z_{cp}$;

$$\operatorname{tg} U = \frac{H}{NA'};$$

$$Z_k = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} T_i(r_k) T_j(r_k);$$

если $d_k > 0$ и $d_{k+1} < 0$, то точка А лежит между k и $k + 1$ (точками 1 и 2 на рисунке 10).

В целях повышения точности определения координат точки А составляются уравнения двух прямых. Первая прямая проходит через две найденные, расположенные на поверхности рельефа (рисунок 10), а вторая – через центр проекции S и A' . Уравнение прямой на плоскости XZ в общем виде выглядит

$$l + mX - Z = 0. \quad (14)$$

Тогда уравнения для двух прямых выглядят

$$\left. \begin{aligned} l_1 + m_1 X - Z &= 0 \\ l_2 + m_2 X - Z &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (15)$$

Необходимо определить коэффициенты l_1, m_1, l_2, m_2 . Координаты точки 1: X_1, Z_1 , точки 2: X_2, Z_2 , тогда можно записать уравнения прямой через точку 1 и через точку 2. Так как обе точки принадлежат одной прямой, то коэффициенты этих уравнений будут равны. Получим систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} l_1 + m_1 X_1 - Z_1 &= 0 \\ l_1 + m_1 X_2 - Z_2 &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (16)$$

Из уравнений (18) вычислим

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= Z_1 - m_1 X_1 \\ m_1 &= \frac{Z_2 - Z_1}{X_2 - X_1} \end{aligned} \right\} . \quad (17)$$

Аналогично можно записать систему уравнений для прямой, проходящей через точки S и A' (X_S, Z_S – координаты точки S , $X_{A'}, Z_{A'}$ – координаты точки A')

$$\left. \begin{aligned} l_2 + m_2 X_S - Z_S &= 0 \\ l_2 + m_2 X_{A'} - Z_{A'} &= 0 \end{aligned} \right\} . \quad (18)$$

И получить

$$\left. \begin{aligned} l_2 &= Z_S - m_2 X_S \\ m_2 &= \frac{Z_{A'} - Z_S}{X_{A'} - X_S} \end{aligned} \right\} . \quad (19)$$

Зная коэффициенты, решаем совместно уравнения двух прямых (15) и находим координаты точки пересечения проецирующего луча с поверхностью рельефа. Получим

$$l_1 + m_1 X_A - l_2 - m_2 X_A = 0. \quad (20)$$

Учтем, что $X_S = 0$, тогда

$$X_A = \frac{Z_S - l_1}{m_1 - m_2}. \quad (21)$$

$$Z_A = Z_S + m_2 X_A. \quad (22)$$

Вычисляются пространственные координаты X_A , Y_A точки A по формулам (11), в которых вместо Z_{cp} используется координата Z точки A . Затем вычисляются плоские координаты точки a на правом снимке способом прямого трассирования по формулам

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 &= -f \frac{a_1(X_A - X_S) + b_1(Y_A - Y_S) + c_1(Z_A - Z_S)}{a_3(X_A - X_S) + b_3(Y_A - Y_S) + c_3(Z_A - Z_S)} \\ y - y_0 &= -f \frac{a_2(X_A - X_S) + b_2(Y_A - Y_S) + c_2(Z_A - Z_S)}{a_3(X_A - X_S) + b_3(Y_A - Y_S) + c_3(Z_A - Z_S)} \end{aligned} \right\}. \quad (23)$$

Разработанный алгоритм обратного трассирования свободен от неоднозначности решений и не требует учета мертвых зон.

Математическая модель атмосферы.

Под атмосферой следует понимать газовую оболочку Земного шара. Структура атмосферы – вертикальное распределение температуры, давления и плотности воздуха, а также водяного пара, аэрозолей и других частиц.

Основная масса атмосферы (99,9 %) сосредоточена в слое от 0 до 50 км. Этот слой оказывает большое влияние на прохождение электромагнитной энергии оптического диапазона [36].

При моделировании атмосферы следует опираться на параметры, способные внести фотометрические и геометрические искажения в снимки.

Важными характеристиками атмосферы являются:

– индикатриса рассеяния – пространственное распределение потока излучения, который проходит через атмосферу. Она характеризуется отношением

потока излучения, рассеянного частицей в данном направлении, к потоку излучения, рассеянного во все стороны;

– прозрачность – способность атмосферы пропускать электромагнитную энергию, которая зависит от массы воздуха, проходимой лучами, а также от содержания водяного пара и пыли в воздухе [39].

Для количественной оценки атмосферы используют следующие критерии:

– коэффициент прозрачности – отношение потока радиации, прошедшего через единичный однородный слой мутной среды, к потоку, вошедшему в этот слой [39];

– метеорологическая дальность видимости – расстояние, на котором при определенной прозрачности атмосферы в светлое время суток абсолютно чёрный предмет с угловыми размерами больше 9×10^{-3} радиан, сливается с фоном у горизонта и становится невидимым;

– оптическая толщина атмосферы – величина, характеризующая ослабление прямой солнечной радиации на пути сквозь атмосферу.

При моделировании атмосферы сложно учесть все факторы, влияющие на нее в реальных условиях, т. к. по своим физическим и оптическим свойствам она неоднородна по всем направлениям. Поэтому прибегают к упрощенным моделям.

Атмосферная рефракция – это отклонение световых лучей от прямой линии при прохождении ими атмосферы из-за изменения плотности воздуха с высотой. Она влечет геометрические искажения в положении точек на снимках. Рефракция возникает из-за неоднородности атмосферы, поэтому для ее учета применяется средняя стандартная радиационная модель атмосферы – модель, близкая к реальной атмосфере. Она бывает двух видов:

– однослойная двухпараметрическая модель атмосферы – характеризуется простотой расчетов, возможностью учета фактического состояния атмосферы в конкретный момент времени и соответствием результатов расчета с экспериментальными данными;

– двухслойная двухпараметрическая модель атмосферы – особенностью является разбиение атмосферы на два слоя, в каждом из которых индикатриса рассеяния считается величиной постоянной.

Атмосферная рефракция влияет на контрастность окончательного изображения. При определении истинных координат точек снимков величина атмосферной рефракции является частью систематической ошибки

Математическая модель источника освещения.

При моделировании макетных изображений для придания им реалистичности можно учитывать условия освещения земной поверхности и объектов на ней [16]. Характеристиками условий освещения являются такие параметры как:

- лучистый поток, создаваемый источником излучения;
- спектральная характеристика;
- пространственное распределение излучения (при непрерывном спектре излучения – цветовая температура).

Под лучистым потоком, создаваемым источником излучения, следует понимать энергию, проходящую сквозь некоторый участок поверхности в единицу времени.

Цветовая температура – это температура черного тела, при которой его излучение совпадает по цвету с излучением данного реального источника [39].

Сформировать единую полноценную модель источника освещения с учетом всех параметров математически очень сложно, поэтому на практике создается несколько моделей, каждая из которых учитывает то или иное условие [36].

При моделировании макетных изображений стоит говорить только о естественном освещении, так как съемка местности в реальных условиях обычно происходит в дневное время. Главным источником естественного освещения является Солнце. Необходимо учитывать, что в каждый конкретный момент времени Солнце имеет различное положение в пространстве, поэтому при моделировании обычно либо выбирается какое-то одно положение Солнца, либо используется специальная программа, в которой можно задать дату, время и

координаты участка моделирования и узнать расположение Солнца с высокой точностью.

К естественным источникам освещения также относятся: атмосфера, рассеивающая солнечный свет, и различные объекты на местности, которые отражают падающий на них свет [38].

Поток излучения Солнца при прохождении слоя атмосферы Земли существенно изменяется по своей величине и спектральному составу. В атмосфере излучение поглощается и рассеивается молекулами газов, водяным паром, аэрозолями и озоном, кроме этого наблюдается дифракция световых волн.

При формировании модели источника освещения следует учитывать суммарную освещенность горизонтальной поверхности, которая складывается из прямой освещенности, создаваемой лучами Солнца, и рассеянной освещенности, поступающей от небесного свода и отраженной от земной поверхности.

2.6 Методика моделирования битовых макетных снимков стереопары

Для моделирования стереопары макетных снимков необходимо разработать принципиальную схему с четкой последовательностью действий [73]. Методика моделирования стереопары непрерывных макетных снимков представлена на рисунке 11. Основы данной методики были заложены в 1996 г. на кафедре фотограмметрии и дистанционного зондирования Сибирской Государственной Геодезической Академии при разработке цифрового стереоплоттера SDS. Эта методика была усовершенствована, алгоритмы автоматизированы, в результате чего полученные макеты можно использовать при работе со всеми современными ЦФС.

Исходными данными при создании макетных снимков являются элементы внутреннего и внешнего ориентирования. При создании идеальных макетных снимков (без внесения дополнительных искажений) элементы внутреннего ориентирования задают $x_0 = 0$, $y_0 = 0$, фокусное расстояние – в соответствии с выбранной камерой. Камеру выбирают в соответствии с реально существующими

цифровыми или аналоговыми аэрофотоаппаратами и в зависимости от ЦФС, тестирование которой собираются проводить полученными макетными снимками. Формат макетных снимков задается также в соответствии с камерой, которая будет использоваться при обработке. Продольное перекрытие должно соответствовать стандарту – не менее 56 %. Необходимо также задать элементы внешнего ориентирования каждого макетного снимка. К исходным данным, необходимым для моделирования макетных снимков также относится ЦМР.



Рисунок 11 – Принципиальная схема методики формирования стереопары аналитических непрерывных макетных снимков

Для моделирования стереопары аналитических макетных снимков была создана специальная программа. При создании стереопары моделирование осуществляется следующим образом:

- создается файл исходных данных: элементы внутреннего и внешнего ориентирования, размеры снимков, продольное перекрытие;
- создается файл ЦМР;
- в соответствии с выбранным форматом снимков, на аналитическом макете левого снимка создается сетка с равным шагом (например, 5 миллиметров),
- для каждого узла сетки определяются пространственные координаты точек земной поверхности, используя ЦМР (используется метод обратного трассирования);
- для каждой точки определяются плоские координаты на правом снимке (прямое трассирование лучей).

Результатом работы программы моделирования макетов является файл плоских и пространственных координат точек левого и правого снимка стереопары и файл, содержащий координаты координатных меток.

Полученная стереопара является аналитической. Для получения цифровой стереопары битовых макетных снимков необходимо создать цифровое изображение в соответствии с выбранным форматом и нанести полученные точки. Для получения хороших результатов при обработке снимков на ЦФС достаточно нанести по две – три точки в каждой стандартной зоне.

2.7 Методика моделирования битовых макетных снимков маршрута

Математическое моделирование маршрута макетных снимков имеет ряд особенностей по сравнению с моделированием стереопары [32, 33]. Графически процесс построения маршрута макетных снимков представлен на рисунке 12. Синими линиями показано получение пространственных координат точек на поверхности рельефа (алгоритм обратного трассирования), красными линиями – получение плоских координат на правом снимке (алгоритм прямого трассирования)

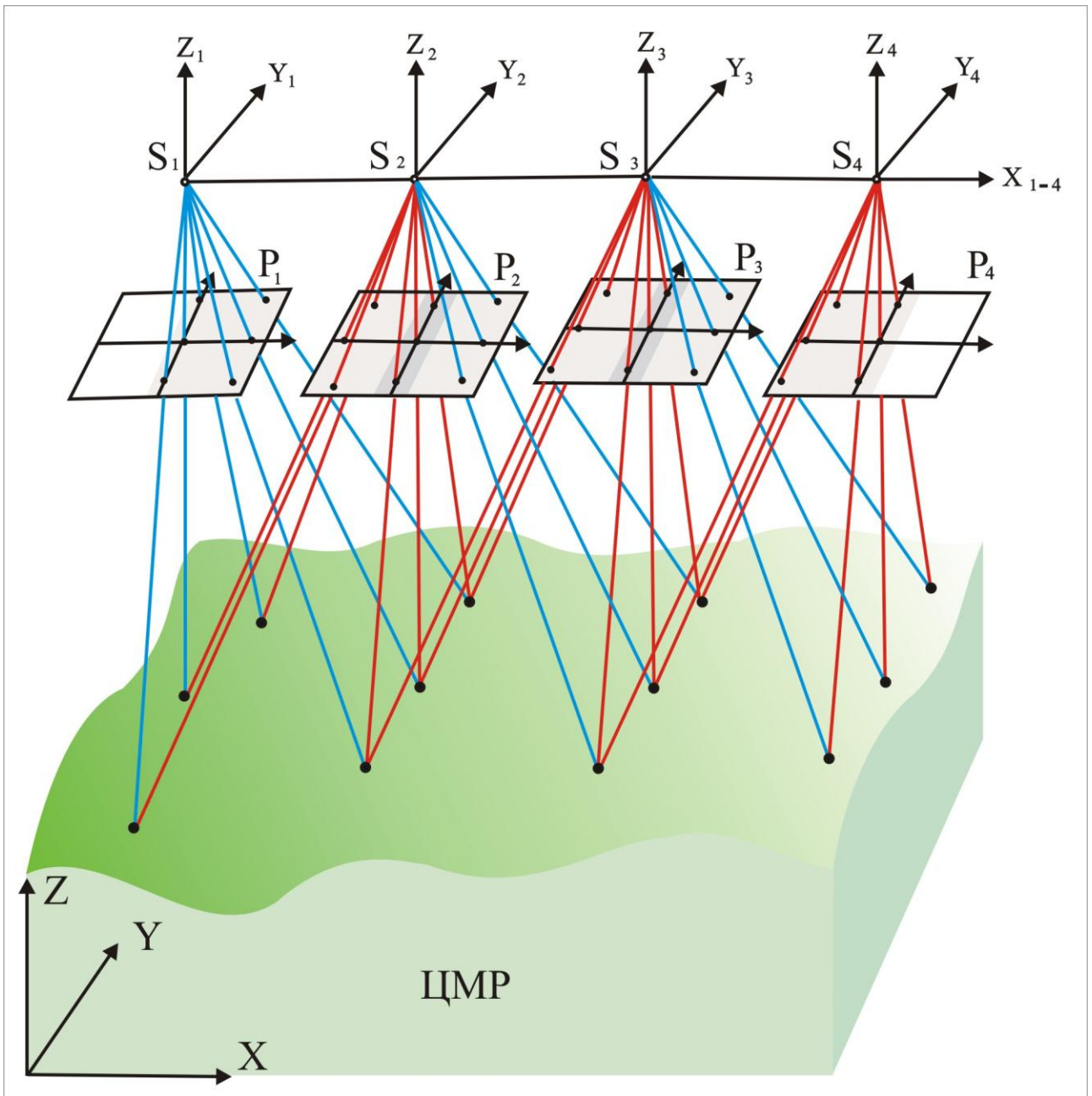


Рисунок 12 – Построение маршрута макетных снимков

Алгоритм формирования аналитических непрерывных макетных снимков маршрута представлен на рисунке 13.



Рисунок 13 – Алгоритм формирования маршрута аналитических макетных снимков

Исходные данные при создании макетных снимков маршрута задаются аналогично как и при создании стереопары. Дополнительным параметром является тройное продольное перекрытие снимков.

Программа обеспечивает аналитическое формирование макетных снимков. При создании маршрута процесс моделирования осуществляется следующим образом:

- создаются файлы исходных данных: съемочной камеры (элементы внутреннего и внешнего ориентирования, размеры снимков, продольное перекрытие) и ЦМР;

- в соответствии с выбранным форматом снимков, на аналитическом макете левого снимка создается сетка с равным шагом;
- для каждого узла сетки определяются пространственные координаты точек земной поверхности (ЦМР) – методом обратного трассирования;
- определяются плоские координаты точки на правом снимке;
- для точек, попадающих в зону тройного перекрытия (связующие точки) вычисляются плоские координаты на третьем снимке;
- процесс повторяется для каждой стереопары маршрута.

Результатом работы программы являются файлы плоских и пространственных координат точек снимков маршрута и файл координат связующих точек. Наряду с этим формируется файл координат координатных меток. Снимки получены в аналитическом виде, для получения цифровых макетных снимков необходимо замаркировать полученные в результате математических вычислений точки в растровом редакторе.

При моделировании маршрута цифровых макетных снимков алгоритм программы осложняется необходимостью расчета размера зоны тройного перекрытия.

Пусть $q_{x0}(\%)$ – заданное продольное перекрытие, а $q_{x3}(\%)$ – тройное перекрытие, тогда $q_{x3} = q_{x0} - 50\%$.

Размер зоны тройного перекрытия можно рассчитать по формуле

$$\Delta q_x = \pm \left[\frac{\Delta q_x \text{сн} - \left(\frac{l_x \text{сн} - l_x \text{м}}{2} \right)}{2} \right], \quad (24)$$

где Δq_x (мм) – размер зоны тройного перекрытия с учетом рабочей зоны снимка, так как необходимо чтобы точки не выходили за координатные метки и не располагались близко к краю снимка;

$\Delta q_{xсн} = \frac{l_{xсн} \cdot \Delta q_{x3}}{100}$, мм – тройное перекрытие из расчета размера снимка $l_{xсн}$;

$l_{xм}$, мм – расстояние между координатными метками.

Тогда

$$b_x = \frac{l_{xсн} \cdot (100 - q_x)}{100}. \quad (25)$$

На рисунке 14 графически показана зона тройного перекрытия и обозначены ее размеры.

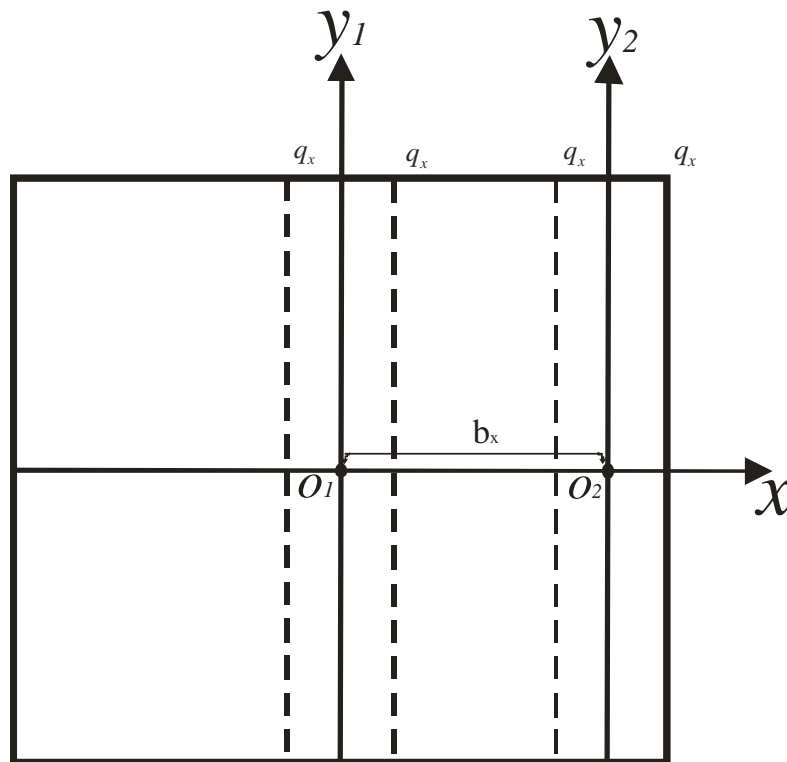


Рисунок 14 – Размер зоны тройного перекрытия

Допустим, $l_{xсн} = 180$ мм, $l_{xм} = 174$ мм (из паспорта), $q_{x0} = 60$ %. Тогда $\Delta q_x = \pm 7,5$ мм, а $b_x = 72$ мм.

2.8 Методика моделирования битовых макетных снимков блока

Известно, что для того чтобы объединить маршруты в один блок, необходимы межмаршрутные точки, расположенные в зонах поперечного перекрытия снимков. Поэтому основной задачей при разработке программы моделирования блока макетных снимков по сравнению с программой моделирования маршрута макетных снимков [32, 33], являлся расчет местонахождения межмаршрутных точек на всех снимках блока [35].

Для определения размера зоны поперечного перекрытия необходимо вычислить соответствующие параметры по оси y . Вычисления производятся аналогично параметрам по оси x (формула (24)). Расположение стандартных зон показано на рисунке 15.

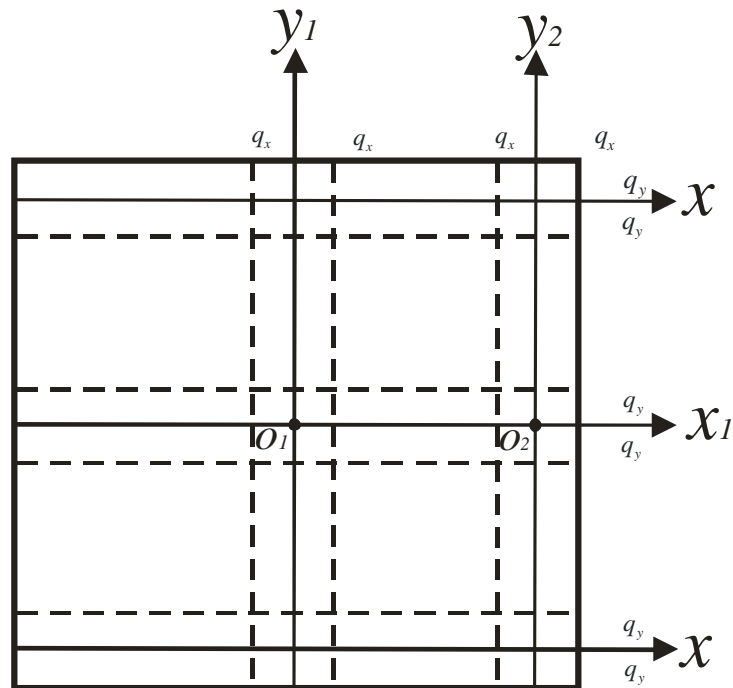


Рисунок 15 – Расположение стандартных зон при продольном и поперечном перекрытии

В соответствии с учетом необходимых условий был разработан алгоритм формирования блока макетных снимков, представленный на рисунке 16.



Рисунок 16 – Алгоритм формирования аналитических непрерывных макетных снимков блока

Из приведенной выше схемы видно, что исходные данные при создании блока макетных снимков выбираются по тем же критериям, что и при создании стереопары или маршрута. Зоны тройного перекрытия вычисляются заранее. На основе данной схемы была создана специальная программа, которая обеспечивает аналитическое формирование макетных снимков. Процесс моделирования макетных снимков для блока осуществляется аналогично процессу формирования маршрута макетных снимков, добавляется лишь процесс расчета плоских координат на соответствующих снимках для точек, попадающих в зону межмаршрутного перекрытия.

Результатом работы программы являются файлы плоских и пространственных координат точек снимков блока, файл координат связующих точек и файл плоских координат точек, попадающих в межмаршрутное перекрытие, на соответствующих снимках другого маршрута. Наряду с этим

формируется файл координат координатных меток. Макетные снимки получены в аналитическом виде. Для получения цифровых макетных снимков необходимо замаркировать полученные в результате математических вычислений точки в растровом редакторе.

2.9 Методика маркировки точек на цифровых макетных снимках с подпиксельной точностью

Результатом работы программ, созданных по представленным алгоритмам, являются макетные снимки в аналитическом виде. Для получения цифровых макетных снимков производится маркировка точек в среде растровой графики, например Photoshop. Программный продукт Photoshop дает возможность маркировки точек с точностью одного пикселя. Поэтому для создания высокоточных макетных снимков была разработана методика маркировки точек с подпиксельной точностью.

При разработке методики подпиксельной точности учитывались:

- возможность маркировки точек с подпиксельной точностью на макетном изображении;

- возможность наведение марки с подпиксельной точностью на замаркированную точку во время работы на ЦФС.

Методика маркировки заключается в следующем:

- выбирается точка снимка с известными плоскими координатами в пикселях, например координатами $x = 123,72$, $y = 455,61$;

- в программном продукте Photoshop по целым значениям координат x , y маркируется точка. Маркировка осуществляется в виде черного креста с толщиной линии равной одному пикселю. Левый верхний угол пикселя, образованного пересечением черных линий, принимается за начало системы координат пикселя (рисунок 17);

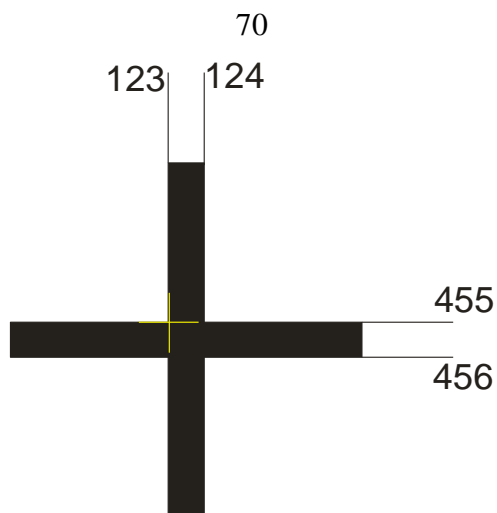


Рисунок 17 – Маркировка «крест»

– анализируется дробная часть координат точки снимка. В зависимости от того, в какую сторону округляется координата согласно дробной части, с той стороны от черного креста наносятся дополнительные линии серого цветом. Для данного примера, $x = 124$, $y = 456$;

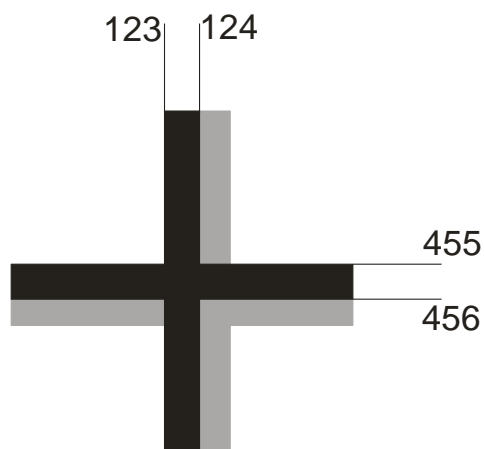


Рисунок 18 – Маркировка «крест + дополнительные линии»

– как видно из рисунка 18 серые линии пересекаются, образуя дополнительный крест. Место пересечения указывает ту четверть черного пикселя, в которой реально находится точка с заданными координатами. Данному виду маркировки было дано название «двойной крест». При работе с маркировочными знаками в виде одинарного креста наведение измерительной марки осуществляется в центр черного креста. При наличии маркировки в виде

«двойного креста» необходимо наводить марку в центр той четверти черного креста, на которую указывает дополнительный серый крест (рисунок 18). Для четкого визуального восприятия маркировочного знака при обработке макетных снимков рекомендуется убрать лишние серые линии в маркировке (рисунок 19);

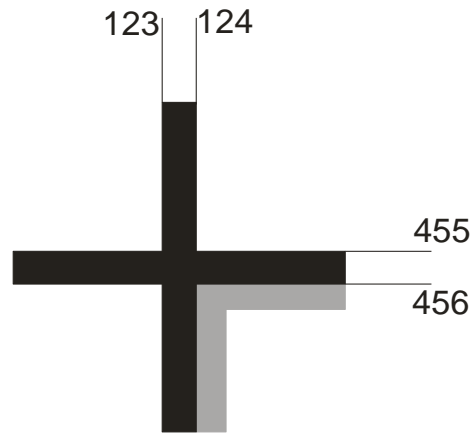


Рисунок 19 – Маркировка «двойной крест»

– для более точного наведения на точки макетных снимков следует указать численные значения дробной части координат. В данном примере у вертикальной линии рядом с маркировочным знаком указывается цифра «7», что означает, что вправо от начала системы координат пикселя необходимо переместить марку на седьмую часть пикселя. По аналогичному принципу указывается цифра «6» у горизонтальной линии. На рисунке 20 показана окончательная точка наведения измерительной марки.

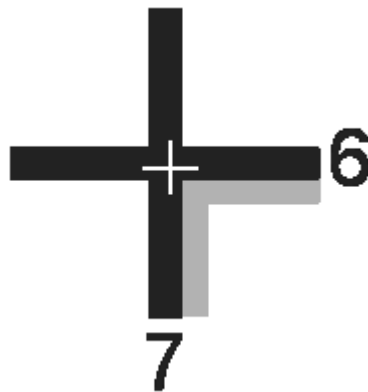


Рисунок 20 – Маркировка «двойной крест» с числовым указанием на местоположение марки

На рисунке 21 представлены различные комбинации дробной части координат и их положение при маркировке в соответствии с методикой подпиксельной точности.

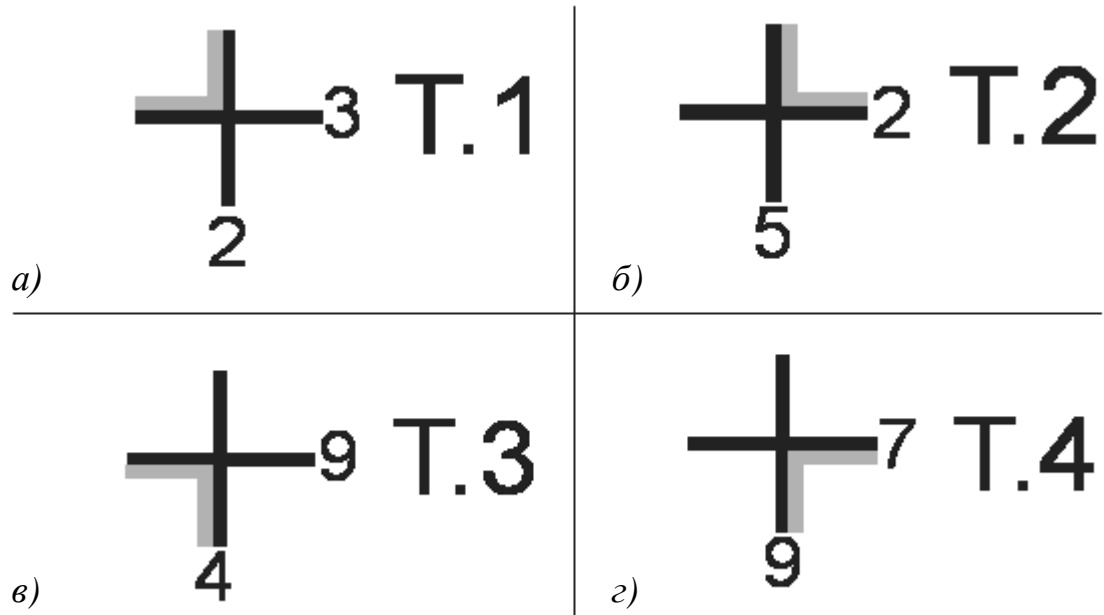


Рисунок 21 – Различные варианты нанесения «двойного креста» в зависимости от значения дробной части пиксела: *а)* точка с координатами $x = 123,21$; $y = 455,33$; *б)* точка с координатами $x = 123,49$; $y = 455,23$; *в)* точка с координатами $x = 123,41$; $y = 455,89$; *з)* точка с координатами $x = 123,92$; $y = 455,74$

Вариант нанесения маркировки точек макетных снимков «двойной крест» позволяет при обработке снимков на ЦФС навести измерительную марку именно на ту точку, значения которой были рассчитаны аналитически.

3 РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИК МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ БИТОВЫХ МАКЕТНЫХ СНИМКОВ

3.1 Параметры формирования цифровых битовых макетных снимков

Согласно приведенным во второй главе технологиям моделирования стереопары и маршрута макетных снимков работу необходимо начинать с выбора исходных данных [14, 17].

На первом этапе работы моделирование стереопары макетных снимков проводилось с использованием аналоговой камеры. Были выбраны следующие параметры: $x_0 = 0$, $y_0 = 0$, $f = 100$ мм. Процедуру сканирования будем считать процессом идеальным, т. е. в цифровое изображение не вносим никаких искажений. Формат каждого кадра в аналоговом виде считаем стандартного размера: 18×18 см. В результате сканирования в зависимости от принятого размера цифрового снимка:

- при разрешении 10 мкм: 16400×16400 пикселей;
- при разрешении 5 мкм: 32800×32800 пикселей.

Величина заданного продольного перекрытия обычно устанавливается исходя из масштаба фотографирования, колебаний рельефа местности и применяемого аэрофотосъемочного оборудования, то есть к минимальному продольному перекрытию добавляют величины различных поправок. Так как при обработке битовых снимков масштаб съемки не имеет значение, съемка производится идеальным аэрофотосъемочным оборудованием, а рельеф местности был выбран равнинный, усредним поправки и примем продольное перекрытие в 60 %. Поперечное перекрытие, которое необходимо учитывать при формировании блоков, примем в 33 %.

Элементы внешнего ориентирования определяют положение связки лучей относительно пространственной прямоугольной системы координат в момент фотографирования. Элементы внешнего ориентирования в данной работе были смоделированы. Координаты точек фотографирования заданы в соответствии с

предварительным математическим расчетом расположения данных точек. Углы наклона снимков зависят от поставленной задачи: либо приближены к нулевому значению при моделировании идеальных макетов, либо имеют реальное численное значение при моделировании макетов, приближенных к реальным снимкам (больше трех градусов). Элементы внешнего ориентирования, заданные для различных макетных данных, созданных в рамках данного исследования, приведены в приложении А.

При моделировании макетных снимков построение ЦМР осуществлялось согласно разработанной математической модели объекта. Сбор исходной информации для ЦМР осуществлялся в программном продукте MapInfo в условной системе координат. На отсканированную карту накладывалась сетка с фиксированным шагом и для каждого узла сетки определялись пространственные координаты. Также можно располагать точки на горизонталях.

При построении ЦМР выполняется разбиение все площади на элементарные участки, размер которых достаточно мал (зависит от масштаба карты).

Точность построения ЦМР в данном случае не имеет значения, т.к. целью данного исследования является не точное моделирование какого-то конкретный участка местности, а скорее моделирование характерных для реальной съемки поверхностей – равнины, всхолмленной или горной территории.

Моделирование макетных снимков осуществлялось в авторских программах, принципиальные алгоритмы работы которых представлены в 2.6 – 2.8.

3.2 Обработка стереопар, маршрутов и блоков цифровых битовых макетных снимков на ЦФС PHOTOMOD

Для исследования макетных снимков, полученных в результате моделирования, была выбрана ЦФС PHOTOMOD. Следует отметить, что в настоящее время в России она является самой доступной и используемой

системой такого класса. В ходе многочисленных работ данная ЦФС показала себя как точная и надежная система.

Обработка макетных снимков, в независимости от их параметров, на ЦФС PHOTOMOD происходит по одной и той же технологии. При работе использовались версии программы PHOTOMOD 4.4 Lite и PHOTOMOD 5 Lite. Результаты обработки одних и тех же стереопар в разных версиях программы различались незначительно. Эта минимальная ошибка вероятнее всего связана с личной ошибкой оператора. Поэтому для проведения контрольных исследований был сделан выбор в пользу версии PHOTOMOD 5 Lite, как последней версии продукта. Достоинством этой версии для проводимых исследований является возможность легкой смены размерности значений ошибок (переключение между миллиметрами и пикселями осуществляется одной кнопкой).

При обработке цифровых макетных снимков работа проводится в следующей последовательности:

- создается новый проект: тип проекта – центральная проекция, система координат – местная правая;
- загружается стереопара макетных снимков (маршрут, блок);
- осуществляется выбор камеры: камера создается самостоятельно или осуществляется ее импорт из другого проекта (рисунок 22);

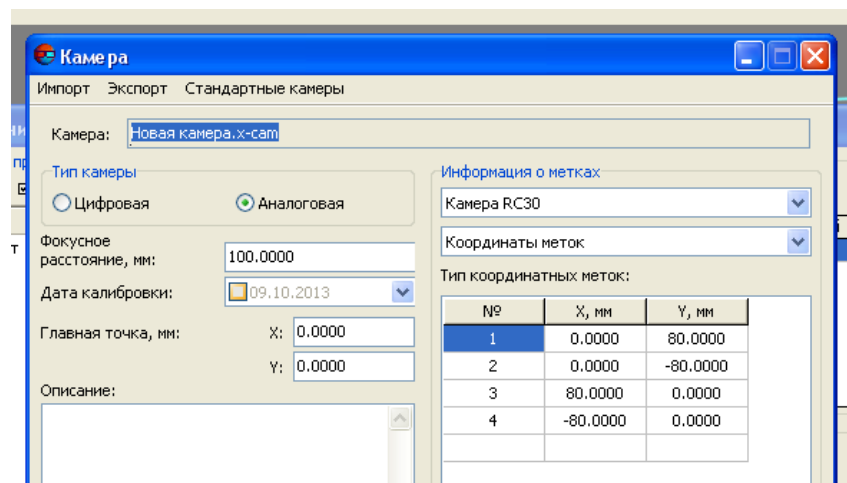


Рисунок 22 – Основные параметры камеры, задаваемые в ЦФС PHOTOMOD

- выбранная камера присваивается загруженным изображениям;
- выполняется внутреннее ориентирование снимков (рисунок 23). У каждого снимка измеряются 4 координатные метки. Тип преобразования – аффинное.

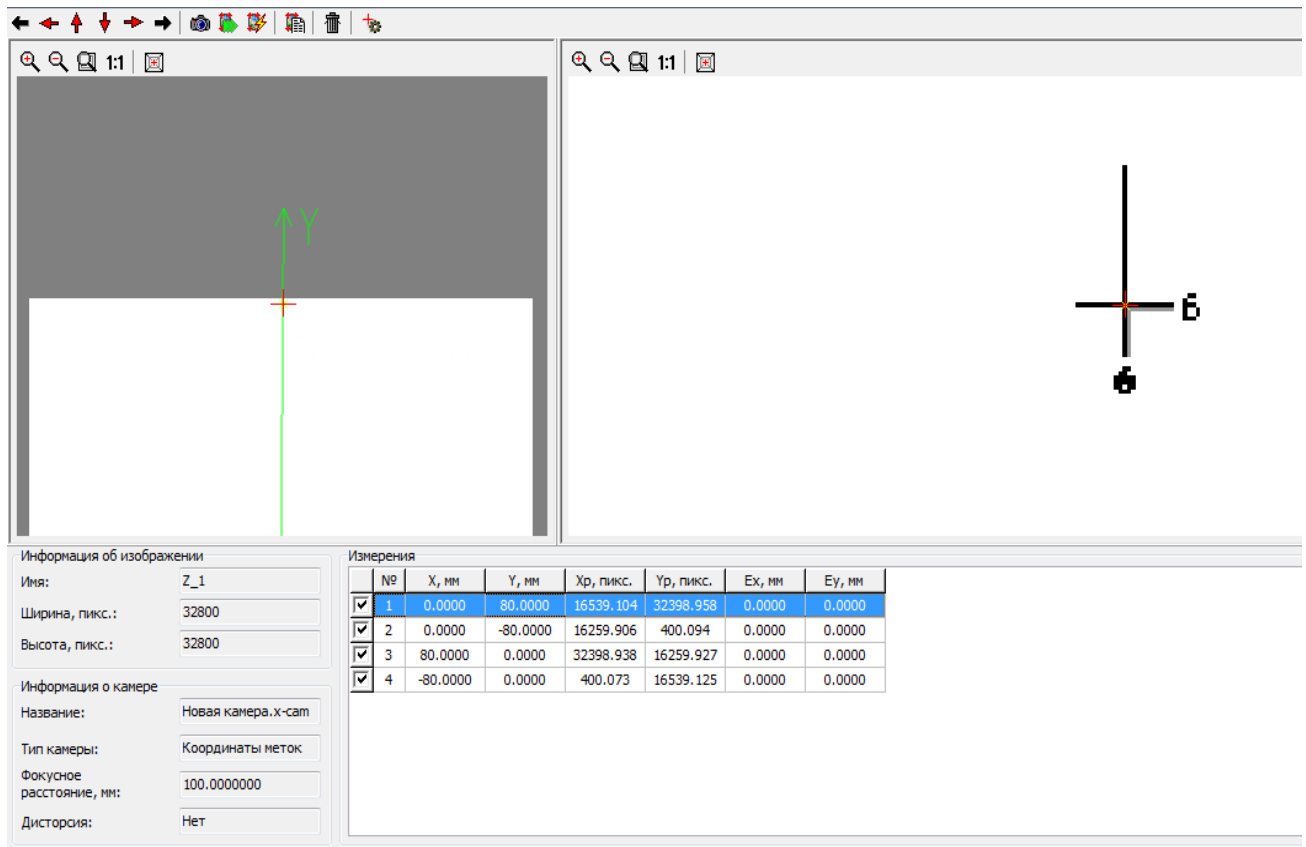


Рисунок 23 – Процесс выполнения внутреннего ориентирование на ЦФС
PHOTOMOD

- создается каталог опорных точек (впоследствии некоторые точки будут выбраны как контрольные). Координаты точек измеряются на всех изображениях проекта;
- измеряются координаты всех замаркированных точек проекта;
- выполняется взаимное ориентирование. При формировании отчета можно выбрать все необходимые для дальнейшего анализа параметры (рисунок 24);

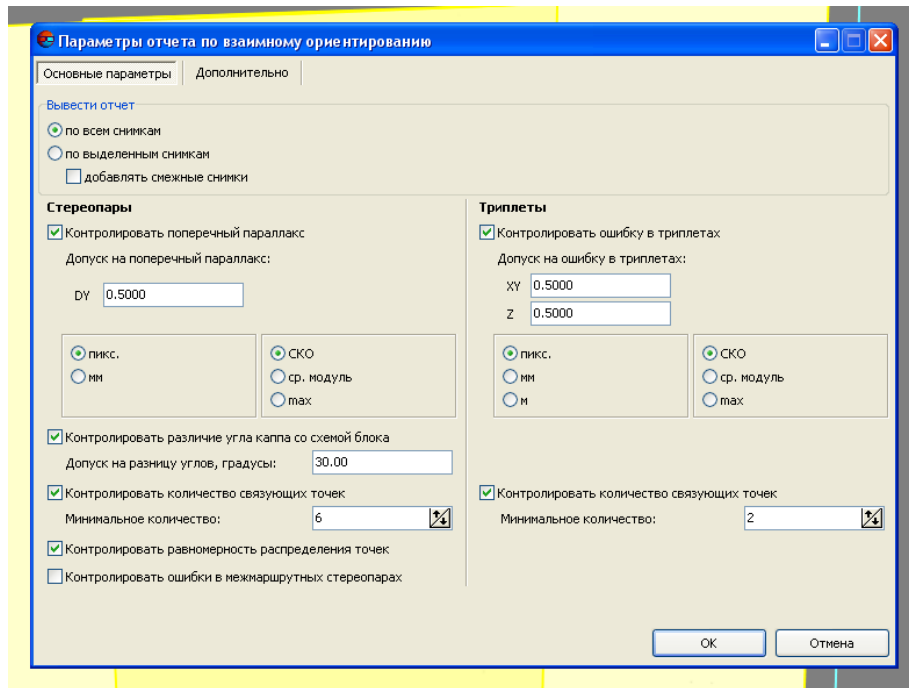


Рисунок 24 – Параметры для отчета по взаимному ориентированию снимков в ЦФС PHOTOMOD

– выполняется уравнивание – это процесс внешнего ориентирования построенной модели. Для этого необходимо задать систему координат, метод уравнивания и выбрать параметры для отчета (рисунок 25);

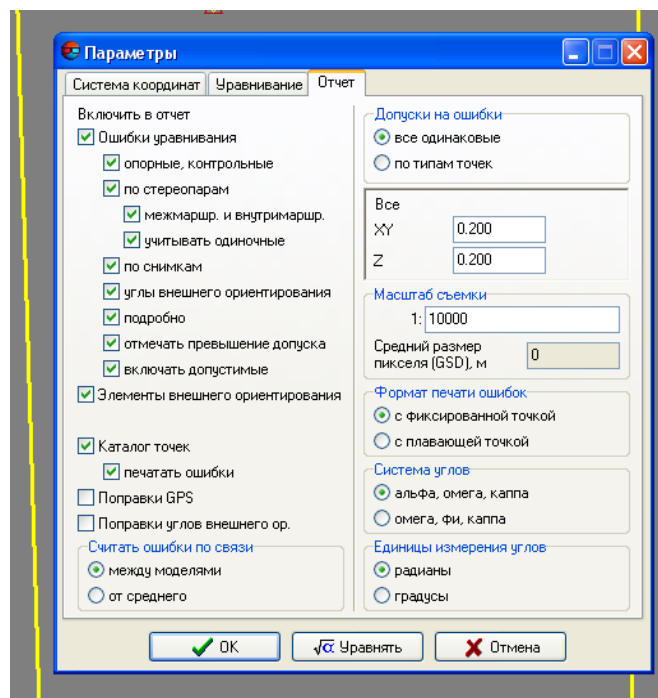


Рисунок 25 – Параметры для отчета по уравниванию в ЦФС PHOTOMOD

Схемы стереопары, маршрута и блока макетных снимков представлены на рисунках 26, 27, 28.

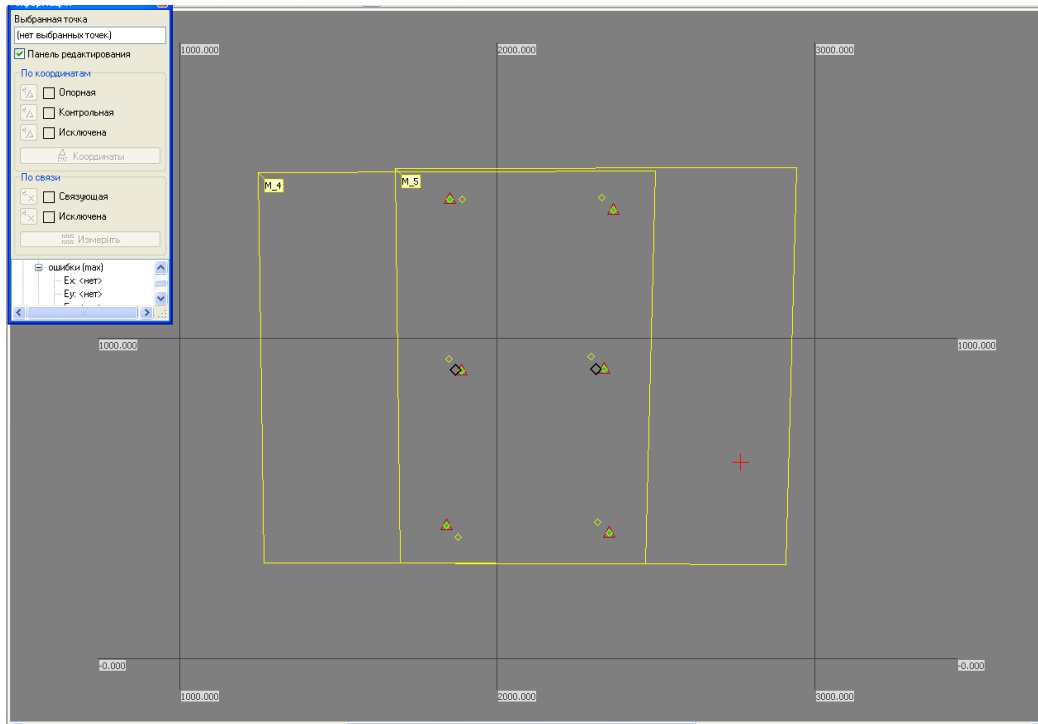


Рисунок 26 – Схема стереопары макетных снимков со всеми замаркированными точками

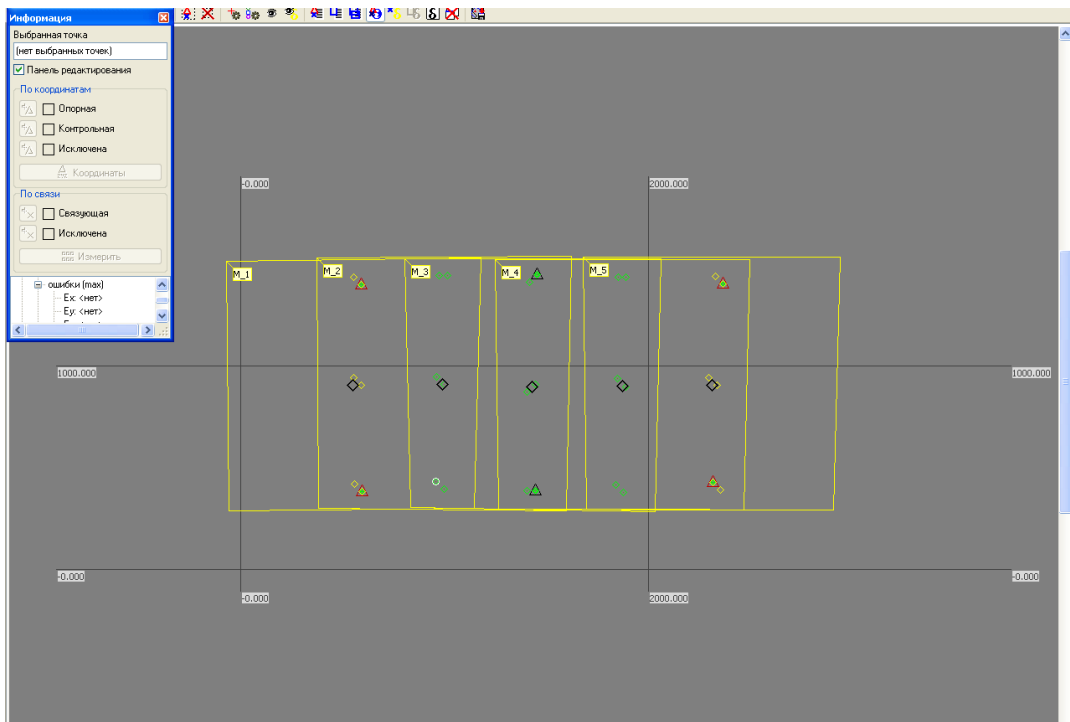


Рисунок 27 – Схема маршрута макетных снимков со всеми замаркированными точками

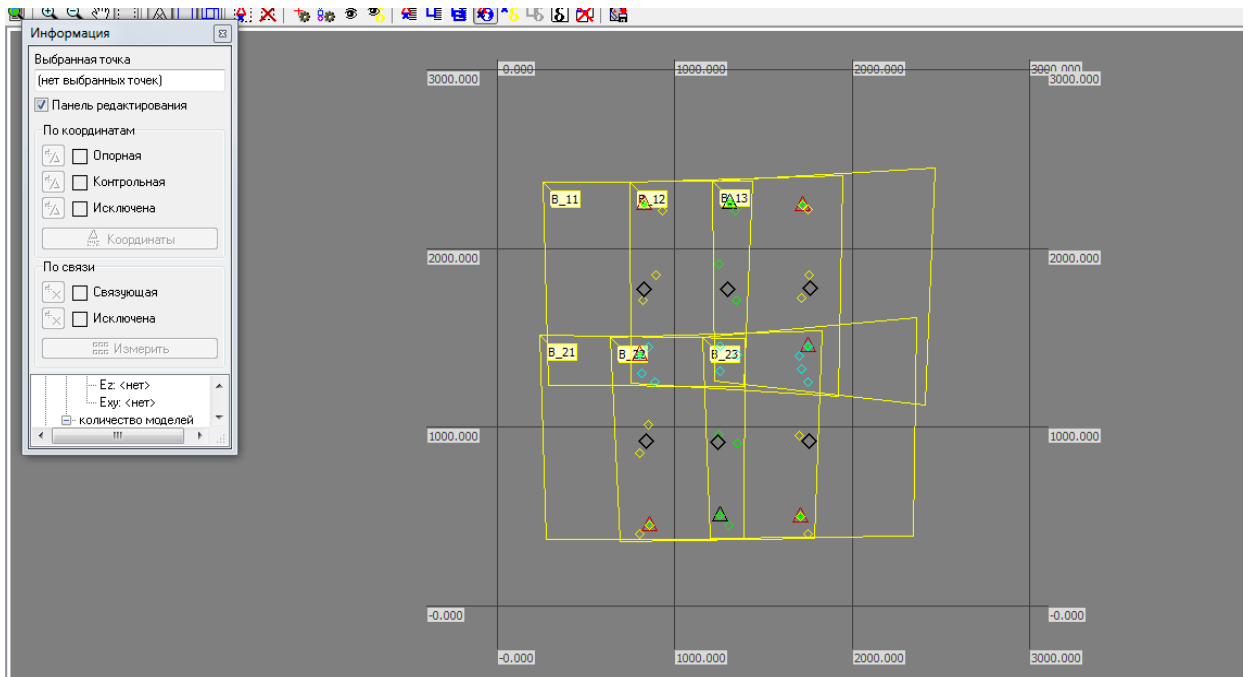


Рисунок 28 – Схема блока макетных снимков со всеми замаркированными точками

– по полученным данным выполняется анализ точности проведенных исследований.

Представленная технология обработки снимков является стандартной для ЦФС PHOTOMOD и отражает все фотограмметрические процессы необходимые для построения действующей модели. Впоследствии полученная модель может быть использована для создания карты, построения ЦМР.

3.3 Сравнительный анализ результатов исследования ЦФС PHOTOMOD с помощью стереопар цифровых битовых макетных снимков с различными параметрами моделирования

Проведем сравнительный анализ результатов исследования ЦФС PHOTOMOD с помощью смоделированных макетных снимков. Для этого воспользуемся тремя стереопарами, сформированными с различными параметрами.

Первая стереопара (№ 1) получена идеальным объективом ($x_0 = 0$, $y_0 = 0$, $f = 100$ мм) с разрешением 10 мкм. Формат снимков составляет

16400 × 16400 пикселей. Элементы внешнего ориентирования представлены в приложении А (таблица А 1).

Результаты обработки стереопары с разрешением 10 мкм приведены в приложении Б (таблица Б.1).

Стереопары № 2 и № 3 получены с форматом кадра каждого снимка 32800 × 32800 пикселей и разрешением 5 мкм. Элементы внутреннего ориентирования заданы аналогично идеальной камере: $x_0 = 0$, $y_0 = 0$, $f = 100$ мм. Продольное перекрытие снимков составляет 60 %.

Элементы внешнего ориентирования соответствуют элементам внешнего ориентирования стереопары № 1.

Различия между стереопарами заключаются в том, что в стереопаре № 2 маркировка координатных меток и точек осуществлялась обычным способом, а в стереопаре № 3 – с подпиксельной точностью. Соответственно и при обработке данных стереопар на ЦФС PHOTOMOD в первом случае марка наводилась на центр замаркированных точек, а во втором – в часть пиксела согласно маркировке. Результаты представлены в приложении Б (таблицы Б.2 и Б.3).

Для корректного проведения анализа результатов при работе со всеми стереопарами были замаркированы одни и те же соответственные точки (имеющие одинаковые пространственные координаты). Пространственные координаты точек представлены в приложении В.

Для удобства анализа результатов, представим их в графическом виде. На рисунке 29 показаны значение средней квадратической ошибки (СКО), среднее значение и максимальное значение ошибки на этапе взаимного ориентирования для каждой из сформированных стереопар.

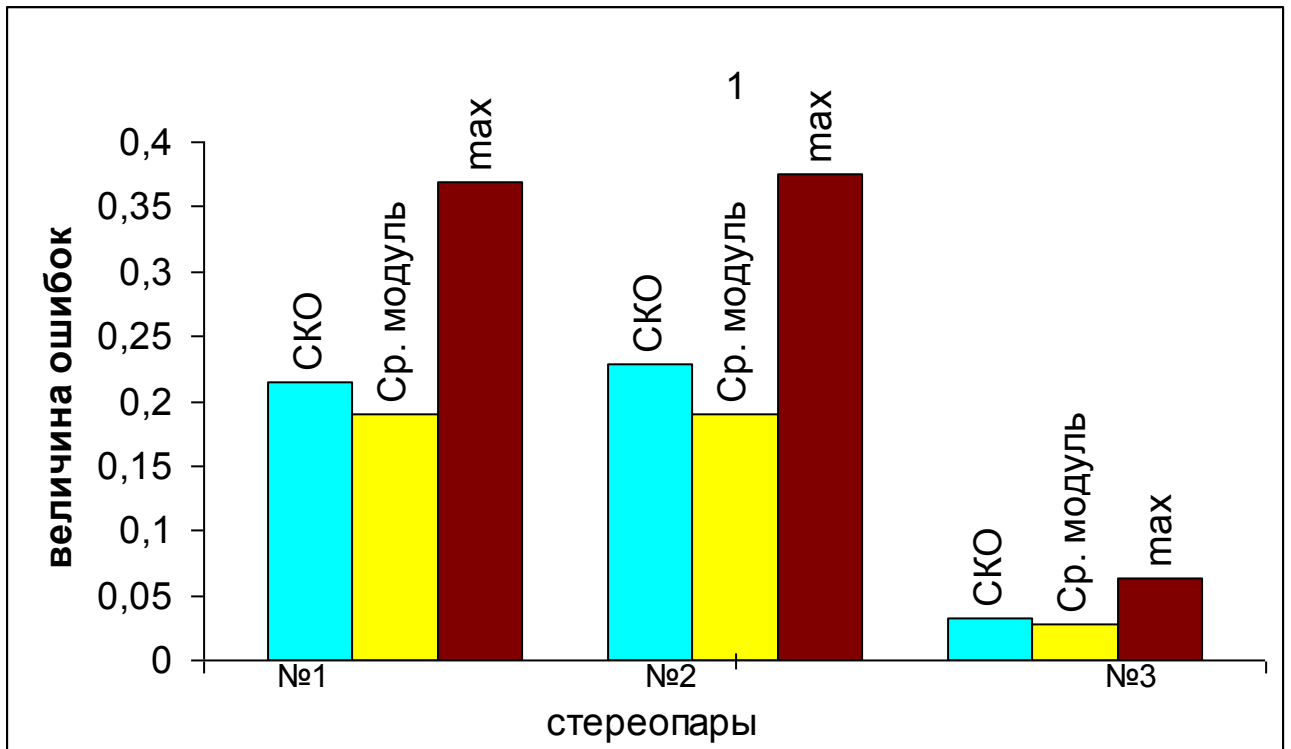


Рисунок 29 –Значение СКО, среднее значение и максимальное значение ошибок на этапе взаимного ориентирования для каждой из сформированных стереопар, мкм

Сводная таблица ошибок и график значений ошибок, возникающих на одной и той же точке в разных стереопарах, приведена в приложении Б (таблица Б.4 и рисунок Б.1).

Внешнее ориентирование выполнялось методом связок.

Результаты, полученные на этапе внешнего ориентирования можно представить целым рядом рисунков, характеризующих ошибки по составляющим X, Y, Z на опорных (рисунок 30) и контрольных (рисунок 31) точках.

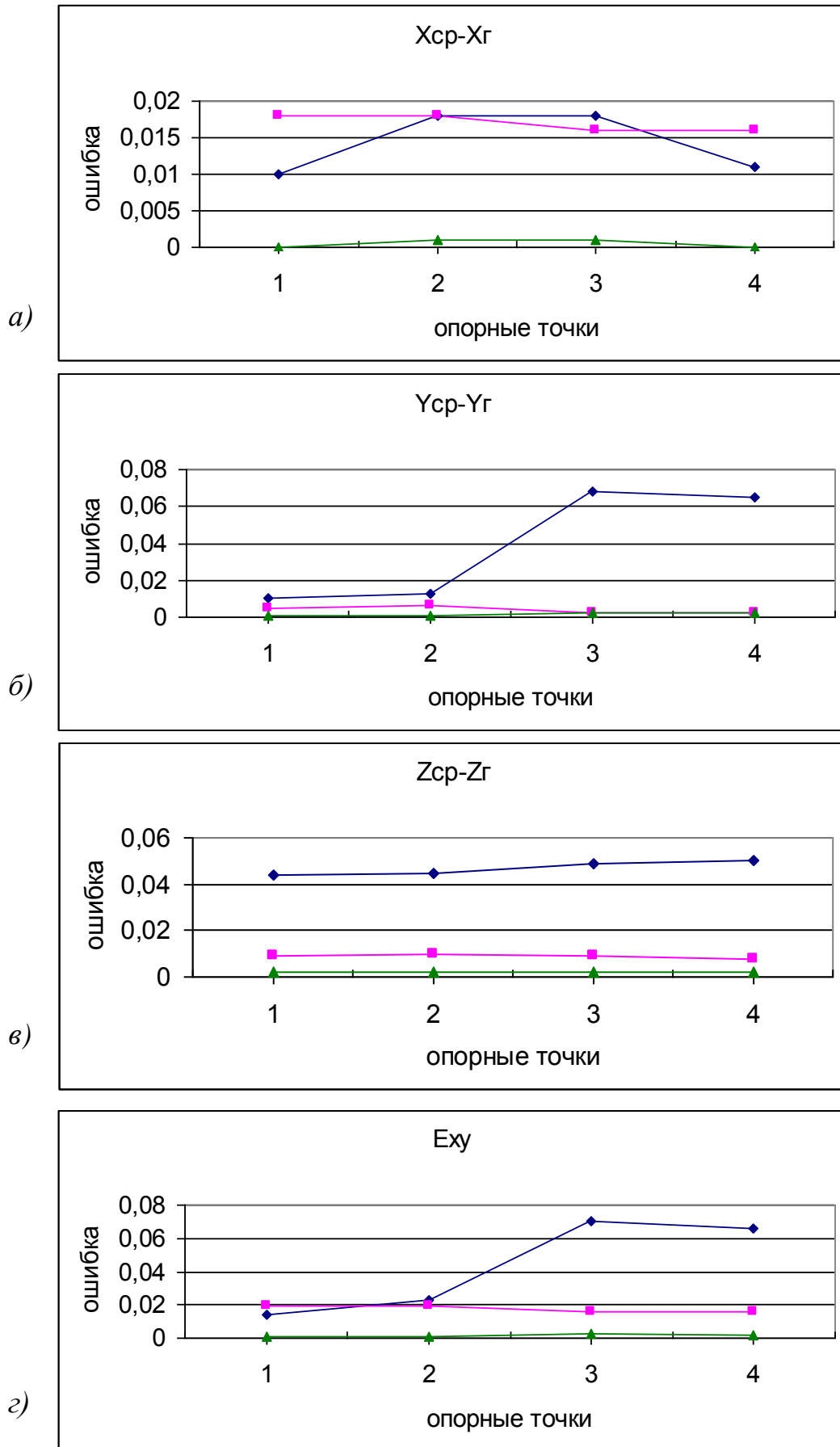


Рисунок 30 – Графики ошибок на опорных точках в стереопарах №1 (◆), №2 (■) и №3 (▲): а – г) по разным пространственным координатам точек

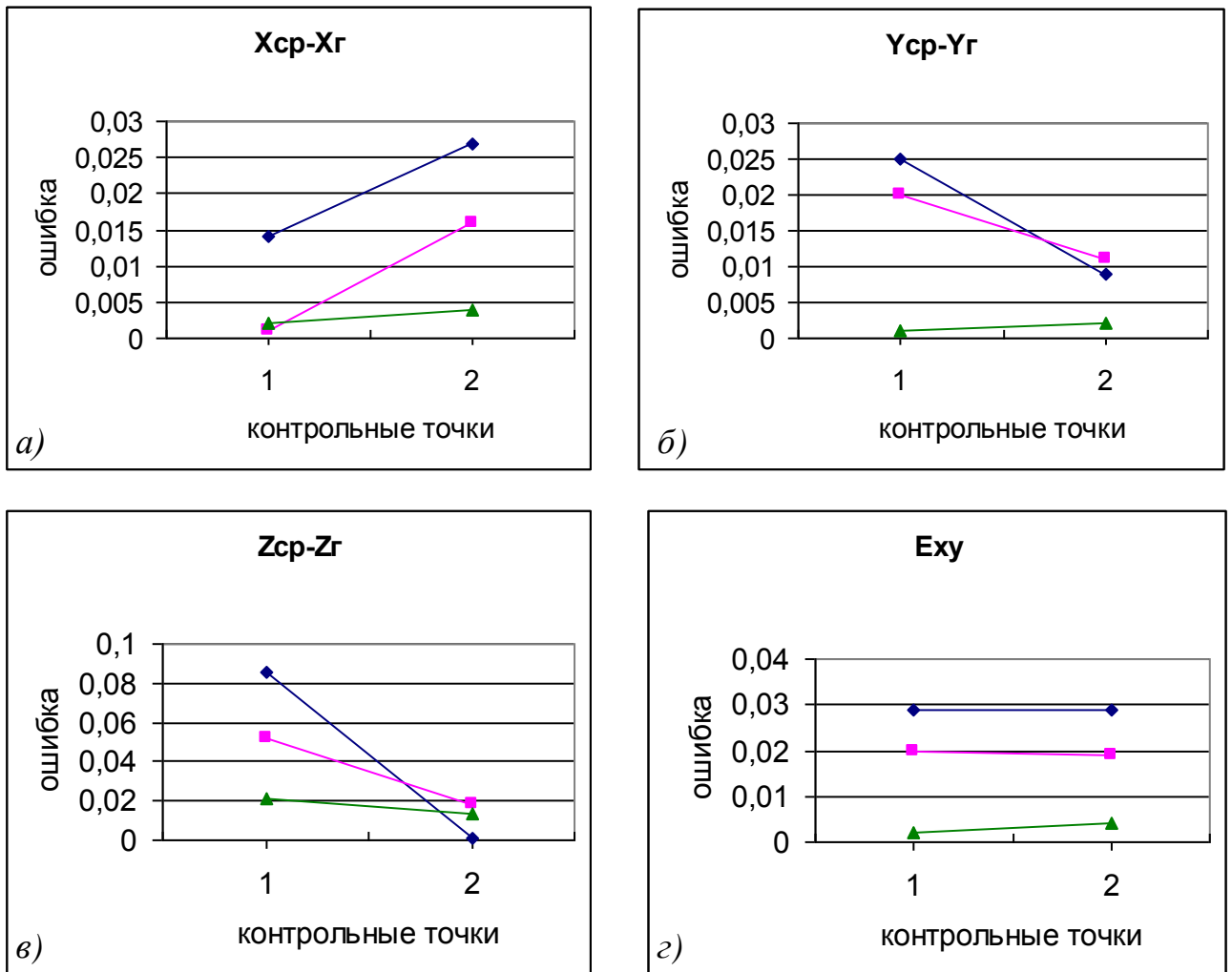


Рисунок 31 – Графики ошибок на контрольных точках в стереопарах №1 (◆), №2 (■) и №3 (▲): а – г) по разным пространственным координатам точек

Из представленных графиков и таблиц (приложение Б), видно, что:

- результаты, полученные при обработке стереопар макетных снимков с разрешением 5 мкм и 10 мкм, практически равны по точности на этапах внутреннего и взаимного ориентирования, но на этапе внешнего ориентирования видно, что предпочтительней использовать макеты с разрешением 5 мкм;

- при обработке стереопар с одними и теми же параметрами, но разными методиками маркировки точек видно, что стереопара с точками, замаркированным в соответствии с методикой подпиксельной точности дает гораздо более точные результаты, чем стереопара с точками, замаркированными обычном способом. Если результаты, представленные в таблице Б.2,

соответствуют только макетным снимкам средней точности, то результаты, показанные в таблице Б.3, относятся к категории макетных снимков высокой точности;

– для тестирования алгоритмов ЦФС по стереопаре макетных снимков можно использовать стереопары № 1 и № 2. Они соответствуют критериям среднего класса точности, а их обработка на ЦФС занимает меньше времени, чем обработка стереопары № 3.

3.4 Сравнительный анализ результатов исследования ЦФС PHOTOMOD с помощью маршрутов цифровых битовых макетных снимков с различными параметрами моделирования

Сравнительный анализ результатов исследования ЦФС PHOTOMOD с помощью маршрутов идеальных макетных снимков.

Для исследования точности и правильности работы ЦФС PHOTOMOD воспользуемся тремя маршрутами идеальных макетных снимков, каждый из которых состоит из пяти изображений:

- маршрут № 1: пространственное разрешение 10 мкм, формат кадра 16400 × 16400 пикселей;
- маршрут № 2: пространственное разрешение 5 мкм, формат кадра 32800 × 32800 пикселей;
- маршрут № 3: пространственное разрешение 5 мкм, формат кадра 32800 × 32800 пикселей, точки замаркированы с подпиксельной точностью.

Элементы внешнего ориентирования всех снимков маршрута представлены в приложении А (таблица А.2).

Для получения наиболее точных результатов и корректного их анализа, на снимках всех трех маршрутов были замаркированы одни и те же соответственные точки. Пространственные координаты точек представлены в приложении Д. Схематично маршрут и точки, замаркированные на нем, представлены в приложении Д на рисунке Д.1.

Результаты исследований каждого маршрута цифровых макетных аэроснимков представлены в приложении Г.

Для удобства анализа результатов, представим их в графическом виде. На рисунке 32 показаны значения СКО на каждой точке для трех маршрутов.

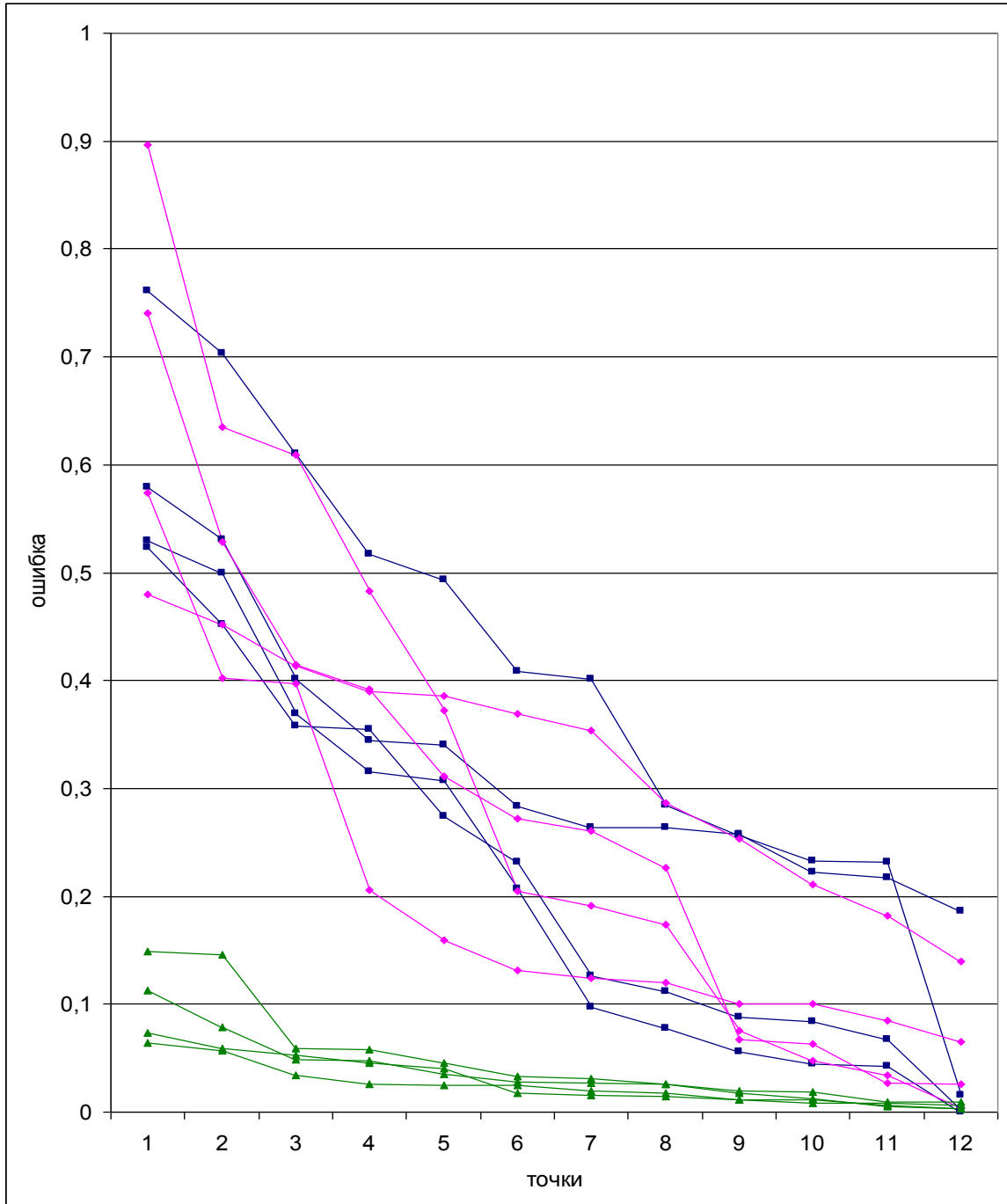


Рисунок 32 – График значений ошибок взаимного ориентирования на точках в маршрутах №1 (—◆—), №2 (—■—) и №3 (—▲—) (от ошибок с большим значениям к ошибкам с меньшими значениями)

Графики значений ошибок, возникающих на одних и тех же точках в маршрутах с разными параметрами моделирования, представлены в приложении Г (таблица Г. 4 и рисунок Г. 1). При обработке маршрута важно учитывать значения ошибок в тройном перекрытии. На рисунке 33 представлены графики ошибок в тройном перекрытии по составляющим X, Y, Z.

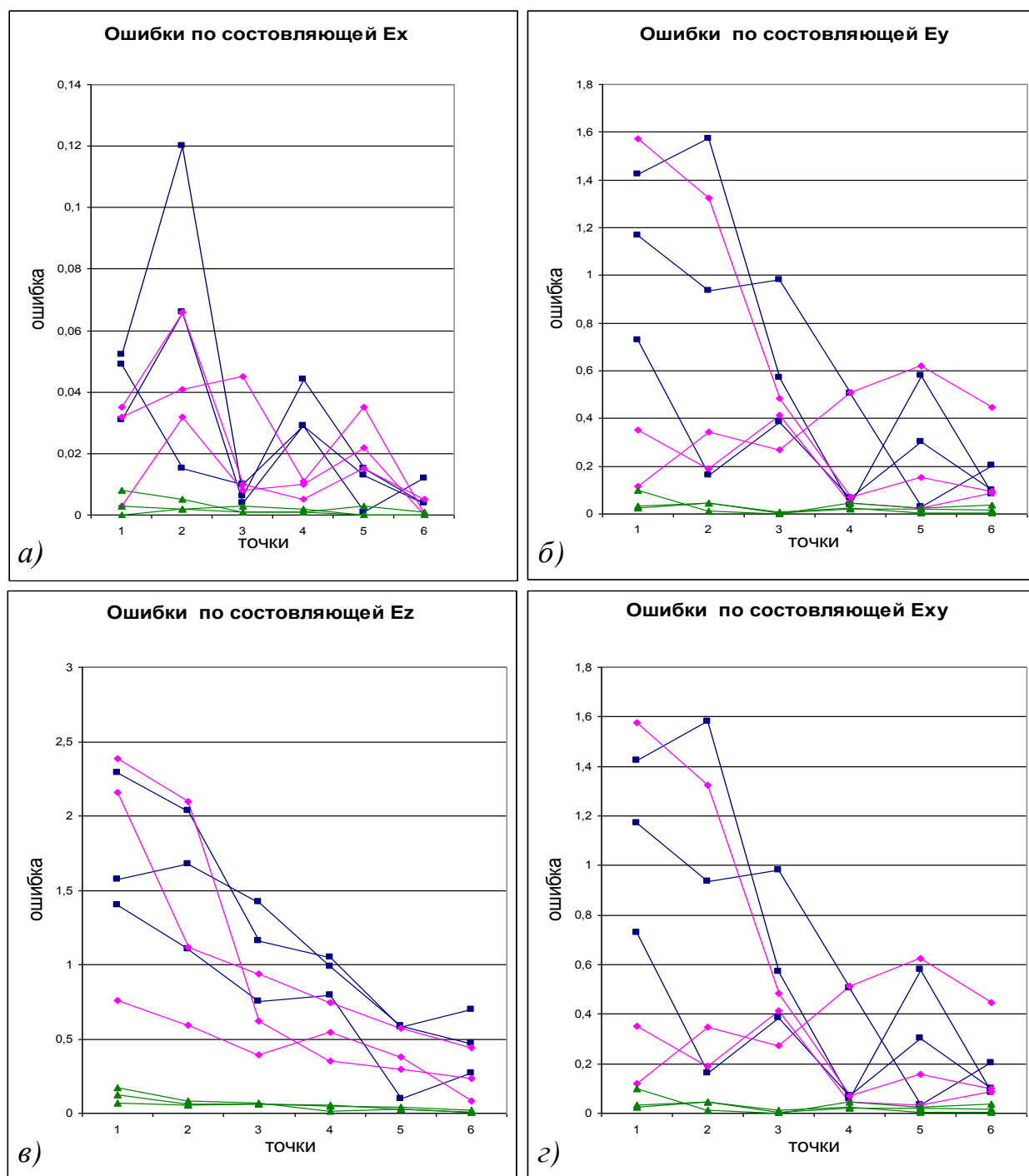


Рисунок 33 – Графики ошибок в тройном перекрытии на маршрутах №1 (—■—), №2 (—■—) и №3 (—▲—): а – г) по разным пространственным координатам

Для уравнивания был выбран метод связок, так как он позволяет получать результаты с наиболее высокой точностью, что особенно важно при работе с маршрутной фототриангуляцией. Результаты, полученные на этапе внешнего ориентирования можно представить целым рядом рисунков, характеризующих ошибки по составляющим X, Y, Z на опорных (рисунок 34) и контрольных (рисунок 35) точках.

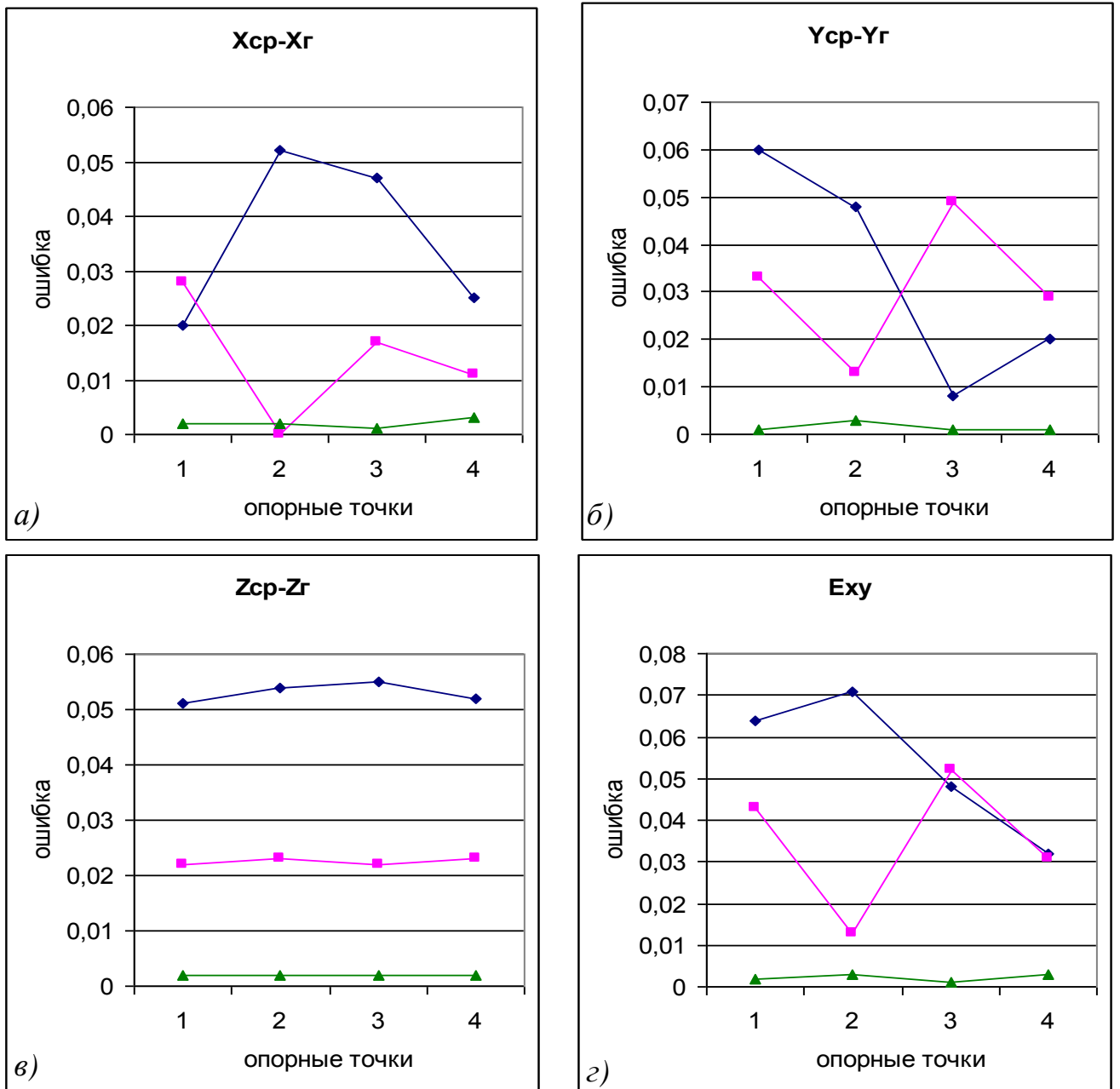


Рисунок 34 – Графики ошибок по опорным точкам на маршрутах №1 (—◆—), №2 (—■—) и №3 (—▲—): а – г) по разным пространственным координатам точек

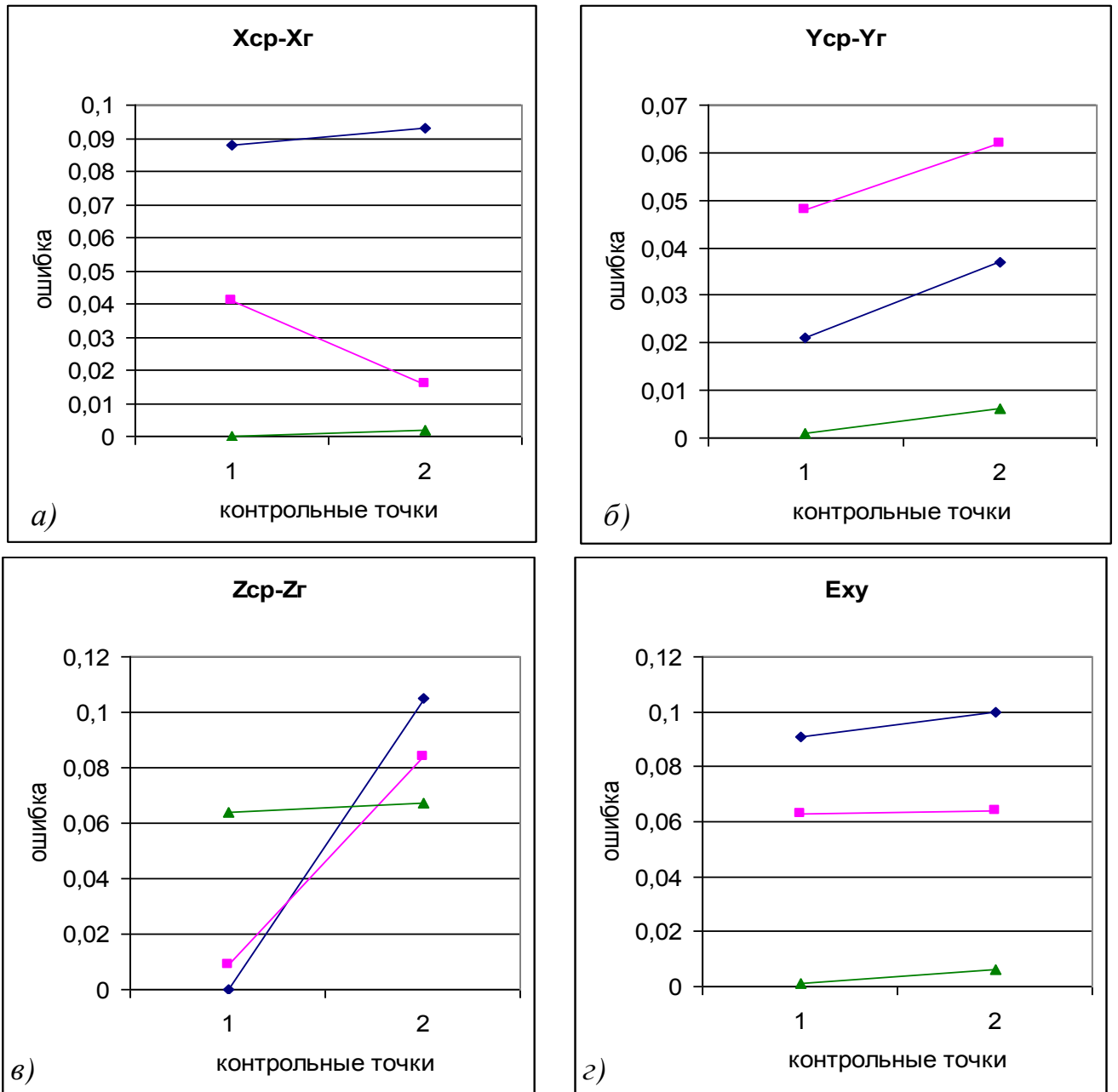


Рисунок 35 – Графики ошибок по контрольным точкам на маршрутах №1 (—♦—), №2 (—■—) и №3 (—▲—): а – г) по разным пространственным координатам

Из приведенных на рисунках графиков и таблиц (приложение Г) можно сделать следующие выводы:

– маршрут № 1 при обработке дает удовлетворительную точность на этапах внутреннего и внешнего ориентирования, а также при взаимном ориентировании стереопар, входящих в маршрут. Результаты, полученные в триплетах, не удовлетворяют необходимому классу точности. Данный маршрут не

рекомендован для использования при тестировании алгоритмов построения пространственной фототриангуляции, заложенных в ЦФС PHOTOMOD;

– результаты обработки маршрута № 2 практически входят в диапазон среднего класса точности. Из таблицы В.3 видно, что неудовлетворительными являются результаты ошибок по связи по координате Z. Данный маршрут можно использовать для быстрого тестирования фотограмметрических систем;

– результаты обработки маршрута № 3 соответствуют высокому классу точности. Ошибки обработки не превышают 0,1–0,2 пикселя. Данный маршрут цифровых макетных снимков рекомендуется использовать для проверки точности алгоритмов, заложенных в современные ЦФС.

Большие ошибки, возникающие при обработке снимков на маршрутах № 1 и № 2, вызваны округлением координат во время маркировки точек на макетных снимках. Поэтому, для получения наиболее достоверных результатов при исследовании ЦФС PHOTOMOD с использованием маршрута макетных снимков, рекомендуется использовать макеты с точками, нанесенными в соответствии с методикой подпиксельной точности.

Сравнительный анализ результатов исследования ЦФС PHOTOMOD с помощью маршрутов макетных снимков, сформированных с большими углами наклона.

В предыдущем исследовании был проведен анализ результатов обработки на ЦФС трех маршрутов идеальных макетных снимков. Для проверки работоспособности методики для неидеальных макетных снимков, смоделируем два маршрута, состоящих из изображений, каждое из которых имеет большие углы наклона. Каждый маршрут состоит из пяти снимков.

– пространственное разрешение 5 мкм, формат кадра 32800 × 32800 пикселей;

– пространственное разрешение 5 мкм, формат кадра 32800 × 32800 пикселей, точки замаркированы с подпиксельной точностью.

Опираясь на выводы, сделанные в предыдущем исследовании, маршрут, состоящий из изображений с пространственным разрешением в 10 мкм, включать

в сравнительный анализ данного экспериментального исследования считаю нецелесообразным.

Элементы внешнего ориентирования для макетных изображений приведены в таблице А.3 (приложение А).

Для получения наиболее точных результатов и корректного их анализа, точки на изображениях первого и второго маршрутов замаркированы соответственно. Результаты обработки каждого маршрута представлены в приложении Е.

Для удобства анализа результатов, представим их в графическом виде. На рисунке 36 показаны значения СКО на каждой точке для каждого из двух маршрутов. Ошибки отсортированы от большего к меньшему значению.

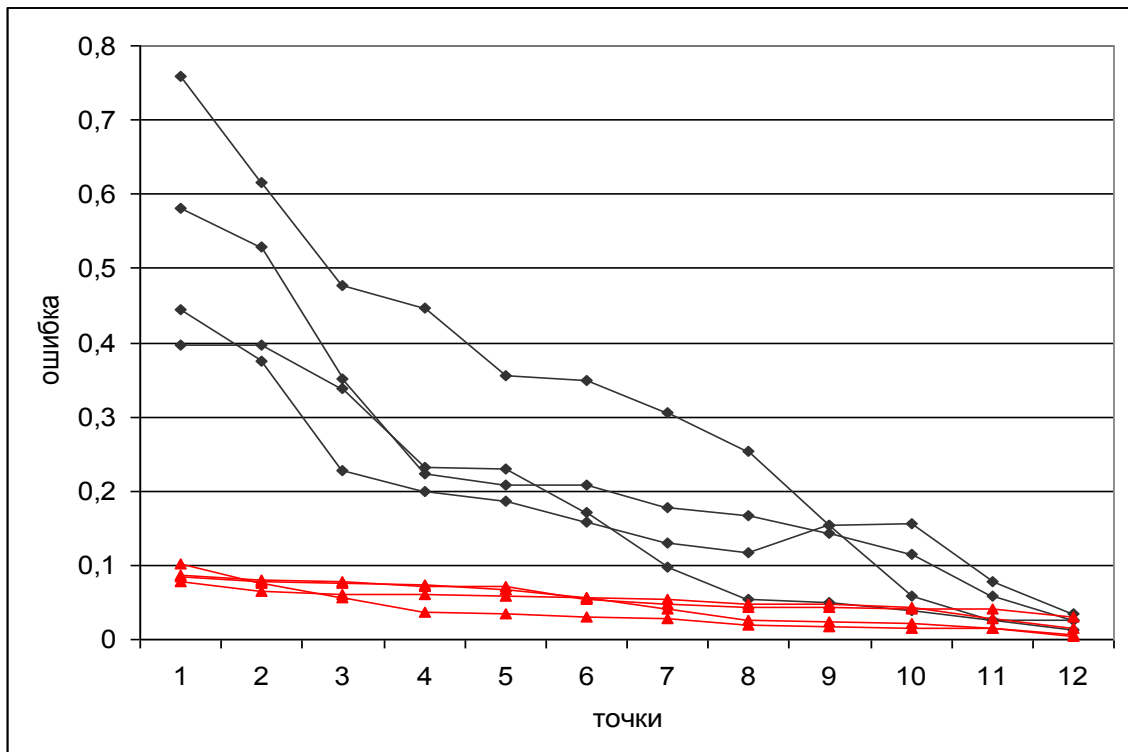


Рисунок 36 – График значений ошибок взаимного ориентирования на точках в маршрутах № 1 (—◆—) и № 2 (—▲—)

Графики значений ошибок, возникающих на одних и тех же точках в маршрутах № 1 и № 2, представлены в приложении Е (таблица Е.3 и рисунок Е.1).

На рисунке 37 представлены графики ошибок в тройном перекрытии по составляющим X, Y, Z.

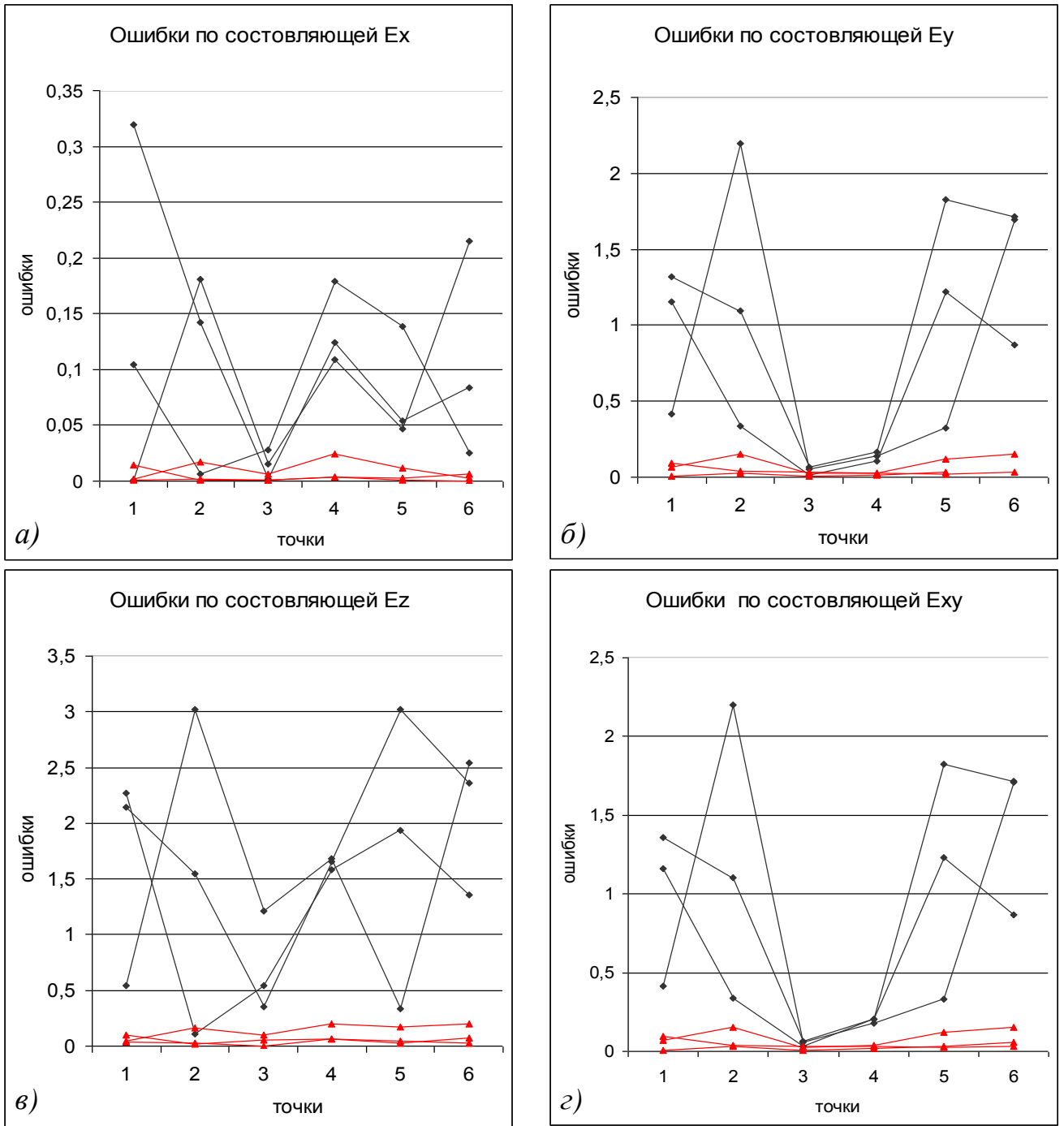


Рисунок 37 – Графики ошибок в тройном перекрытии на маршрутах № 1 (—♦—) и № 2 (—▲—): а – г) по разным пространственным координатам точек

Процесс внешнего ориентирования осуществлялся методом связей. Результаты, полученные на этом этапе, можно представить целым рядом рисунков, характеризующих ошибки по составляющим X, Y, Z на опорных (рисунок 38) и контрольных (рисунок 39) точках.

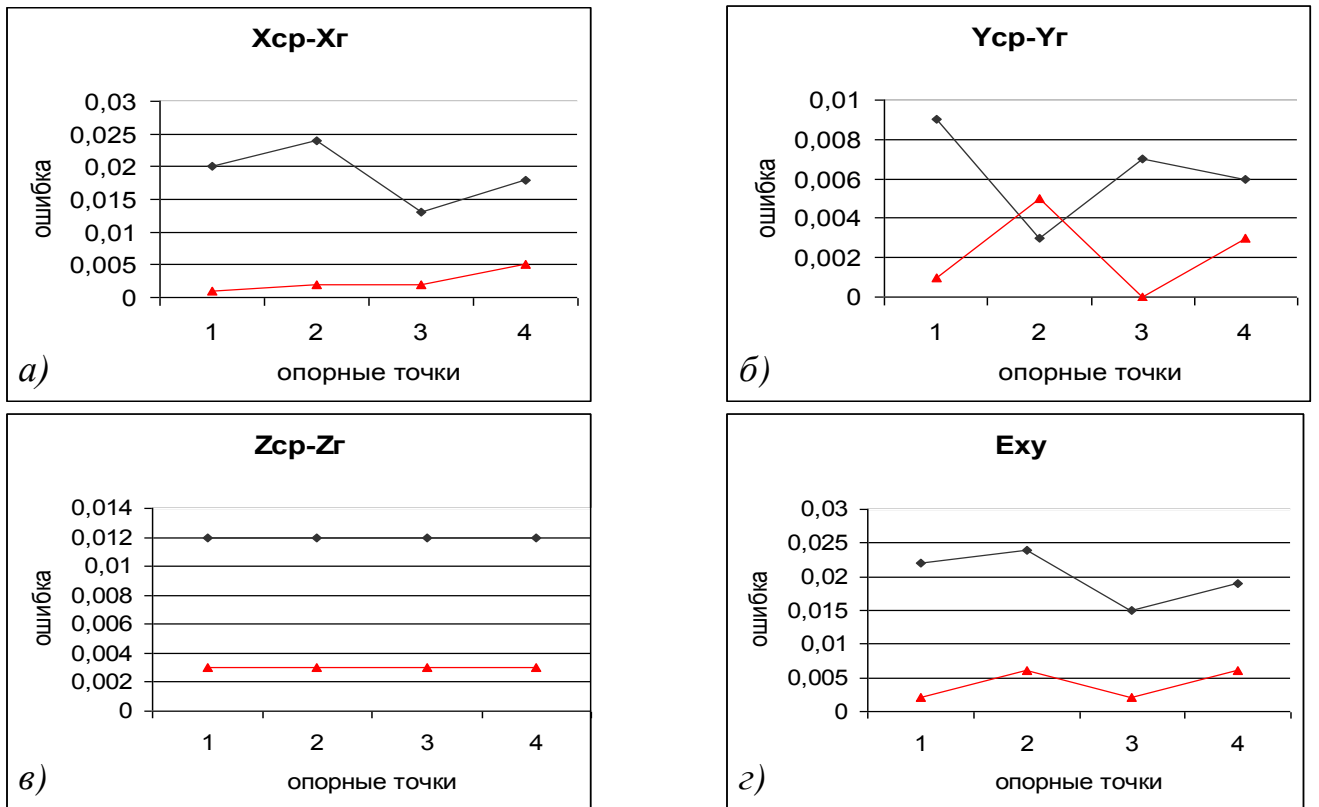


Рисунок 38 – Ошибки на опорных точках маршрутов № 1 (—♦—) и № 2 (—▲—):
а – г) по разным пространственным координатам точек

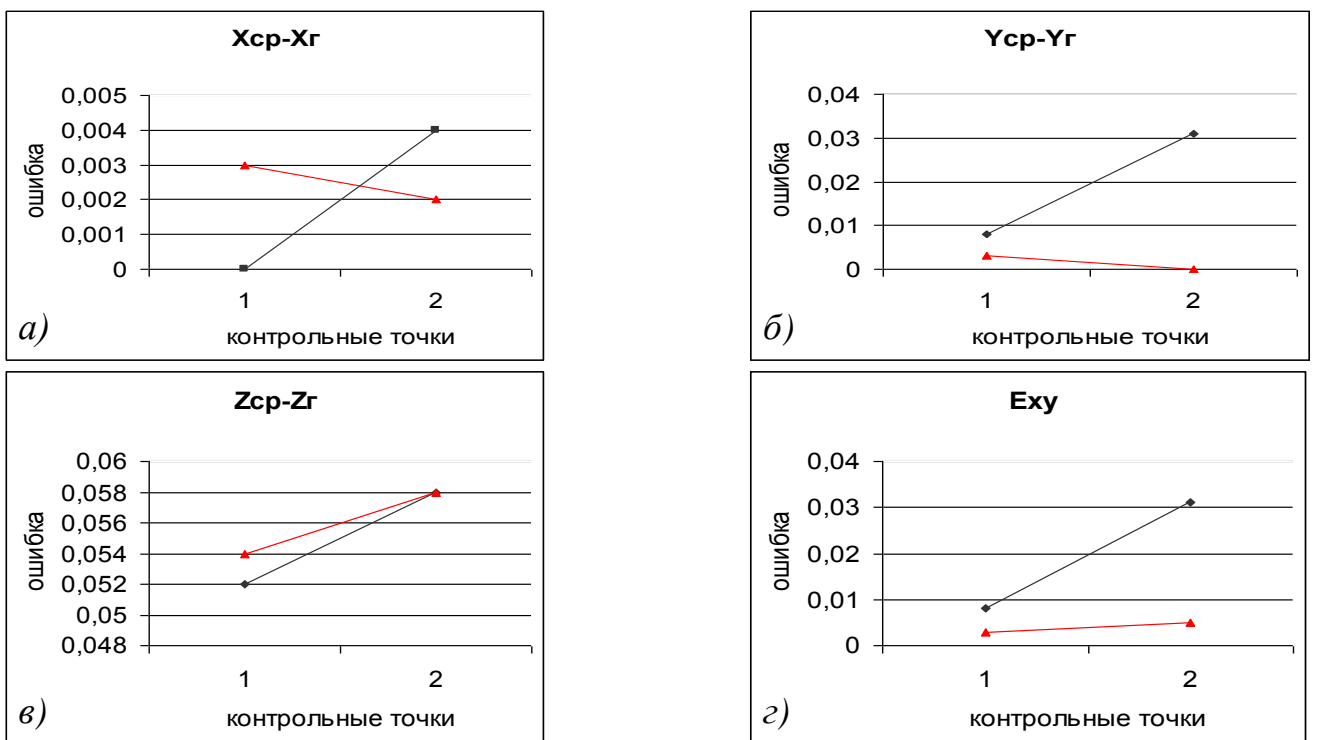


Рисунок 39 – Ошибки контрольных точек маршрутов № 1 (—■—) и № 2 (—▲—):
а – г) по разным пространственным координатам точек

Из приведенных на рисунках графиков величин ошибок на различных этапах формирования модели и таблиц (приложение Е) можно сделать следующие выводы:

– из анализа результатов обработки маршрута № 1 видно, что не смотря на то, что на этапах внутреннего и внешнего ориентирования мы получаем удовлетворительную точность, в целом использование макетов с такими параметрами при построении фототриангуляции нецелесообразно. Грубые результаты получены по следующей причине – округление координат при маркировке точек усугубляется смещением точек, вызванным большими углами наклона снимков;

– результаты обработки маршрута № 2 не превышают 0,2 пикселя на всех этапах, что соответствую высокому классу точности макетных снимках. Использование маршрута, сформированного с такими параметрами, рекомендовано при анализе работы современных ЦФС.

Сравнительный анализ результатов обработки маршрутов высокоточных макетных снимков.

В предыдущих пунктах был сделан сравнительный анализ результатов обработки идеальных и не идеальных маршрутов макетных снимков. Из проведенных исследований видно, что для корректной работы с современными ЦФС, целесообразно использовать высокоточные макеты. Рассмотрим, влияют ли внесенные в параметры моделирования искажения на точность окончательных результатов. Для этого рассмотрим два маршрута:

– маршрут с идеальными параметрами, пространственное разрешение 5 мкм, формат кадра 32800×32800 пикселей, точки замаркированы с подпиксельной точностью (Таблица Г.3);

– маршрут с большими углами наклона снимков, пространственное разрешение 5 мкм, формат кадра 32800×32800 пикселей, точки замаркированы с подпиксельной точностью (Таблица Е.3).

На рисунке 40 показаны значение СКО на этапе взаимного ориентирования для каждого маршрута.

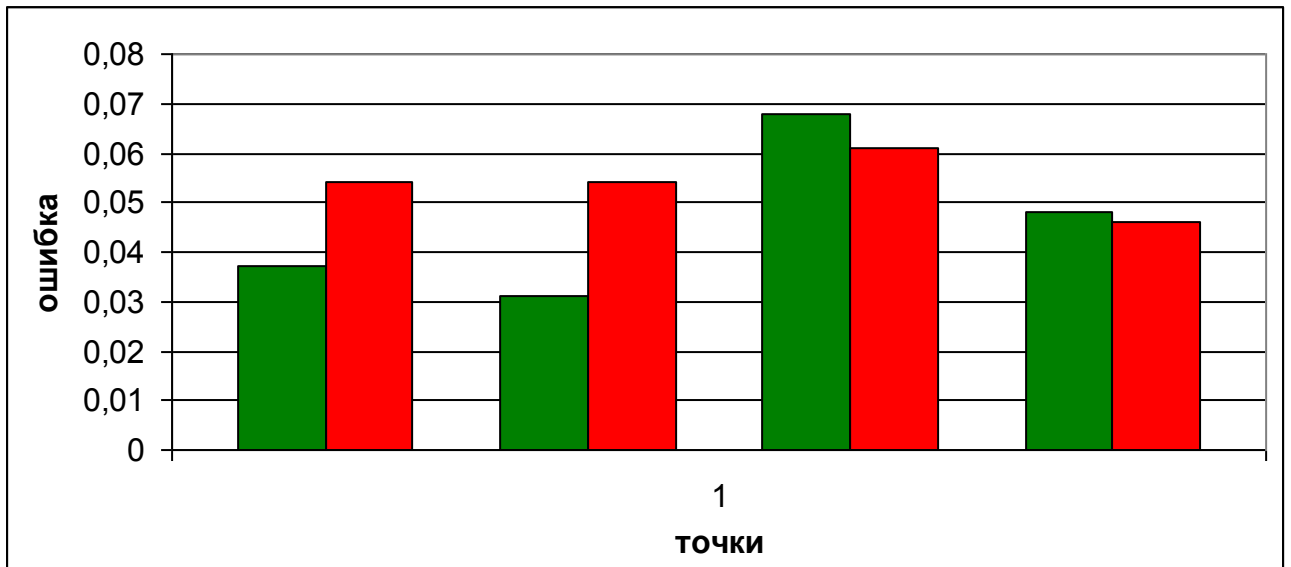


Рисунок 40 – Значение СКО на этапе взаимного ориентирования для маршрутов №1 (■) и №2 (■)

Значения СКО по составляющим E_{xy} и E_z в тройном перекрытии для обоих маршрутов представлены на рисунке 41.

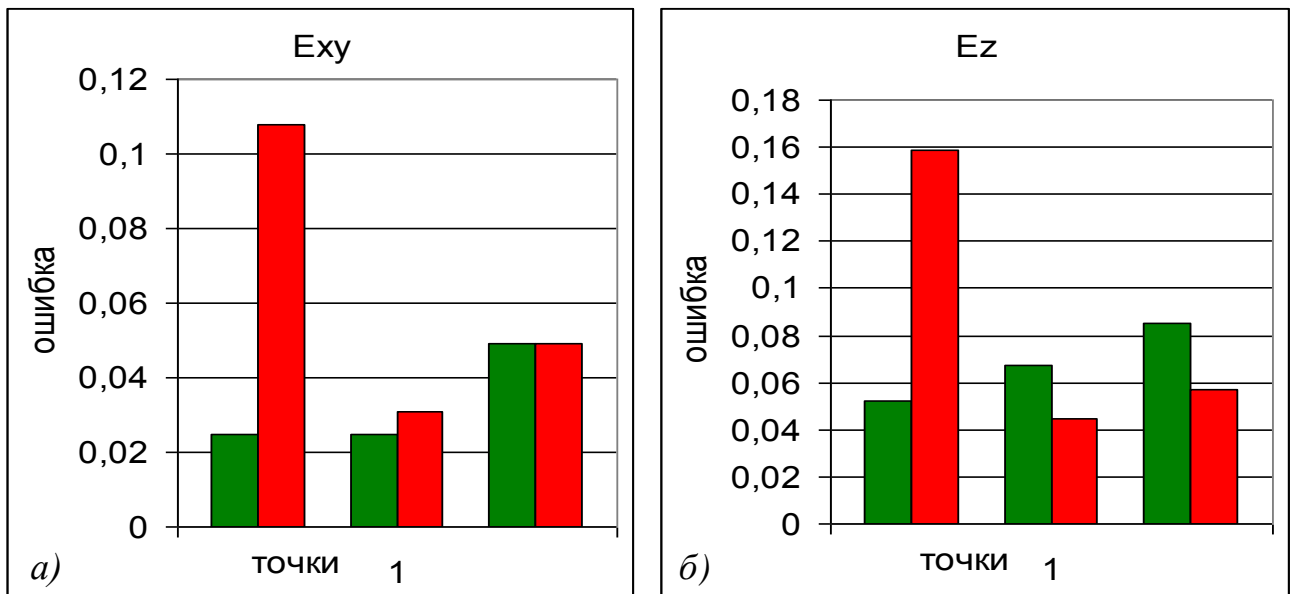


Рисунок 41 – Графики ошибок в тройном перекрытии на маршрутах №1 (■) и №2 (■): а – б) по разным пространственным координатам точек

Результаты внешнего ориентирования, выполненного по методу связей, представлены на рисунках 42 и 43.

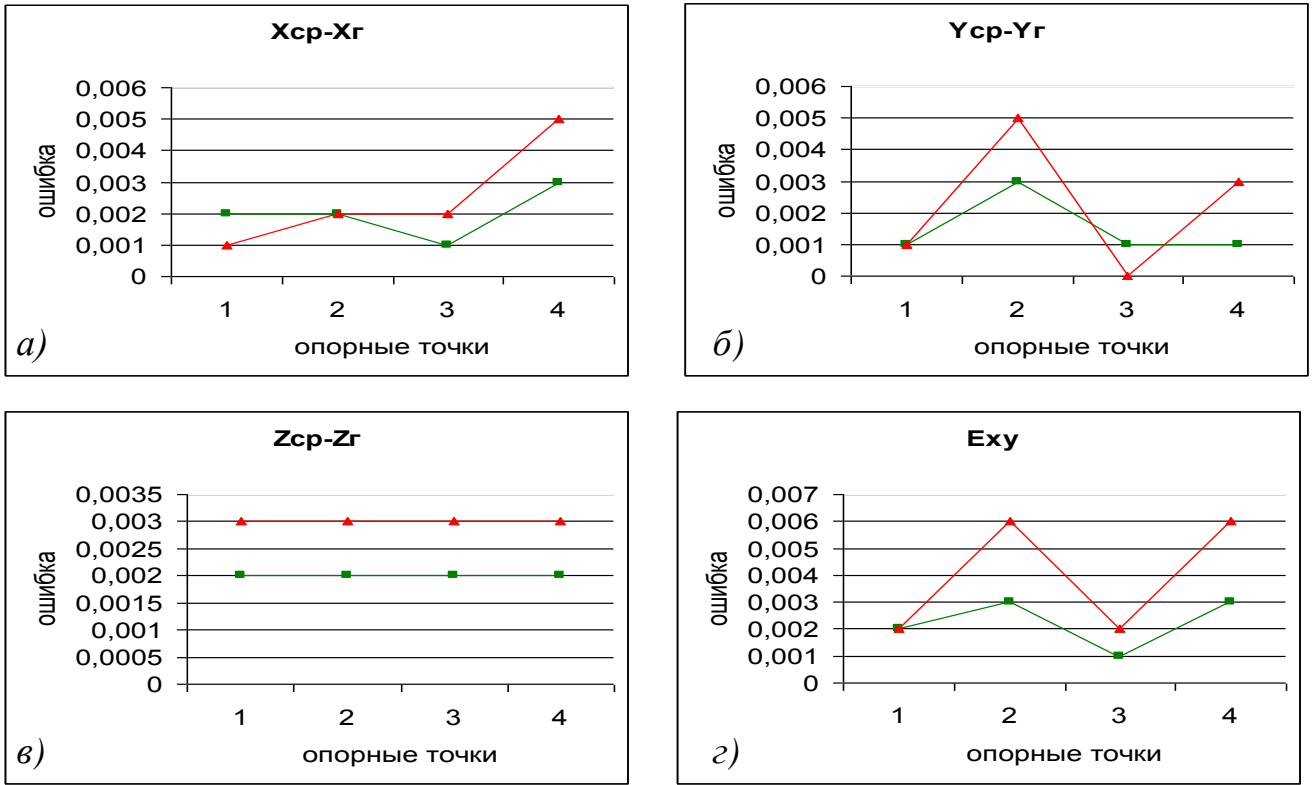


Рисунок 42 – Ошибки на опорных точках маршрутов № 1 (—■—) и № 2 (—▲—):
а – г) по разным пространственным координатам точек

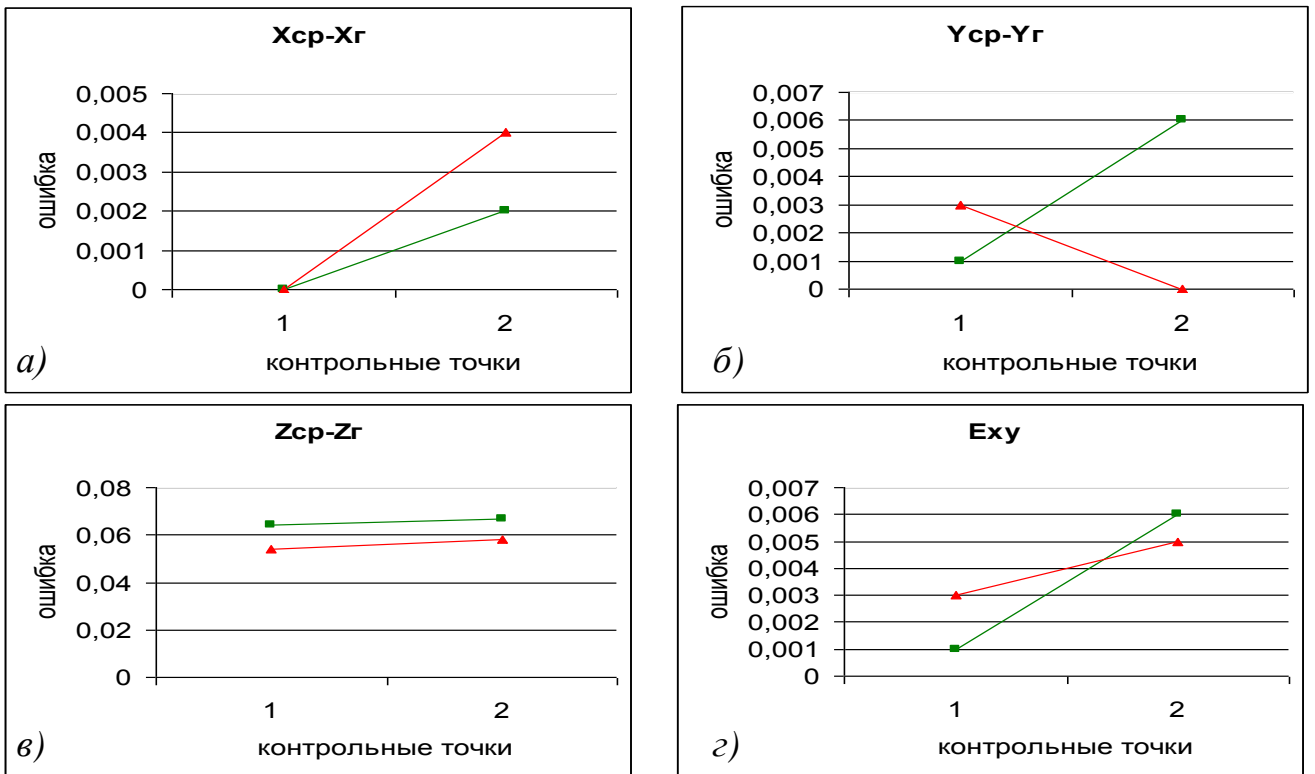


Рисунок 43 – Ошибки контрольных точек маршрутов № 1 (—■—) и № 2 (—▲—):
а – г) по разным пространственным координатам точек

Из приведенных выше результатов обработки, представленных на рисунках и в таблицах (таблица Г.3 и таблица Е.3) можно сделать следующие выводы:

– благодаря использованию методики маркировки точек с подпиксельной точностью, макетные снимки можно создавать как с идеальными параметрами моделирования, так и вводя в эти параметры дополнительные искажения. На результатах обработки введение искажений не отражается. Результаты обработки на всех этапах не превышают 0,2 пикселя, что соответствует высокому классу точности;

– оба маршрута рекомендовано использовать при анализе правильности и точности работы алгоритмов современных ЦФС.

3.5 Сравнительный анализ результатов исследования ЦФС PHOTOMOD с помощью блоков цифровых битовых макетных снимков с различными параметрами моделирования

Для исследования точности и правильности работы ЦФС PHOTOMOD воспользуемся двумя смоделированными блоками макетных снимков, каждый из которых состоит из двух маршрутов по три изображения каждый:

– блок № 1: пространственное разрешение 5 мкм, формат кадра 32800 × 32800 пикселей;

– блок № 2: пространственное разрешение 5 мкм, формат кадра 32800 × 32800 пикселей, точки замаркированы с подпиксельной точностью.

Элементы внешнего ориентирования всех снимков блока представлены в приложении А (таблица А.4)

Массивы точек, замаркированные на изображениях каждого блока, идентичны. Это позволило провести корректный сравнительный анализ полученных после обработки результатов. Схематично маршрут и точки, замаркированные на нем, представлены в приложении И (рисунок И.1).

Результаты исследований каждого блока цифровых макетных аэроснимков представлены в приложении Ж.

Для удобства анализа результатов, представим их в графическом виде. На рисунке 44 показаны максимальные значения СКО на каждой стереопаре для двух блоков.

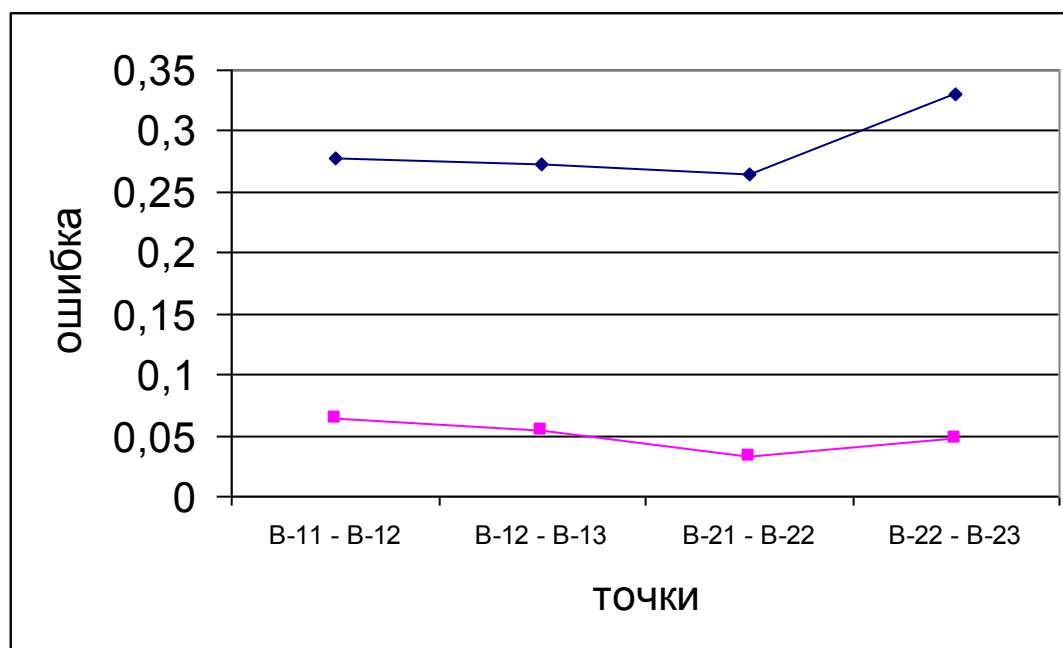


Рисунок 44 – Значение СКО на этапе взаимного ориентирования для каждой стереопары в блоках №1 (—◆—) и №2 (—■—)

Графики значений ошибок, возникающих на одних и тех же точках в маршрутах с разными параметрами моделирования, представлены в приложении Ж.

При обработке блока макетных снимков важно учитывать значения ошибок в тройном перекрытии и при межмаршрутных измерениях. На рисунке 45 представлены графики ошибок в тройном перекрытии по составляющим E_x , E_y , E_z и E_{xy} .

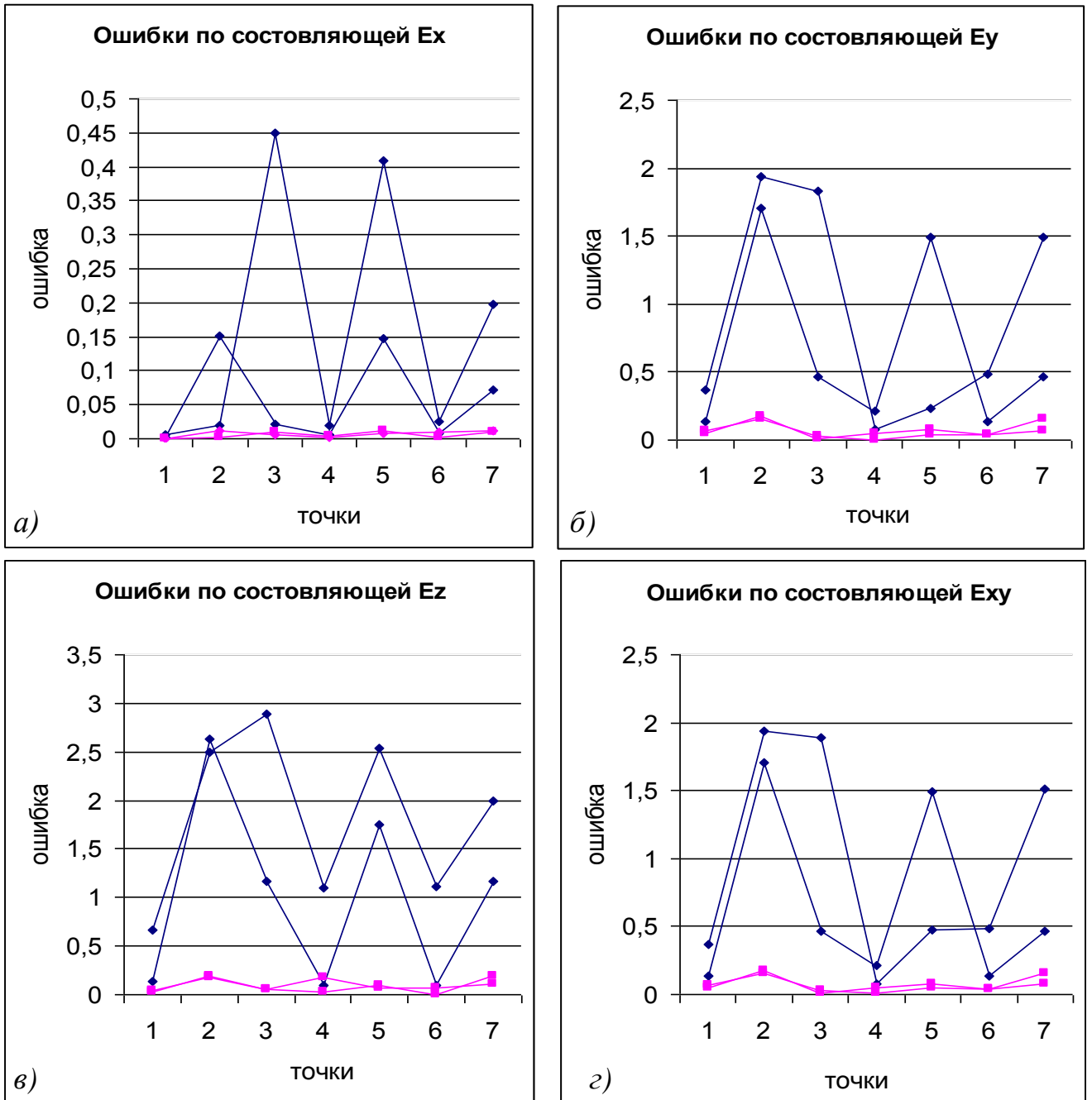


Рисунок 45 – Графики распределения ошибок на точках, образующих тройное перекрытие на маршрутах блоков №1 (—◆—) и №2 (—■—): а – г) по разным пространственным координатам точек

На рисунке 46 представлены графики распределения ошибок на точках, образующих межмаршрутные связи.

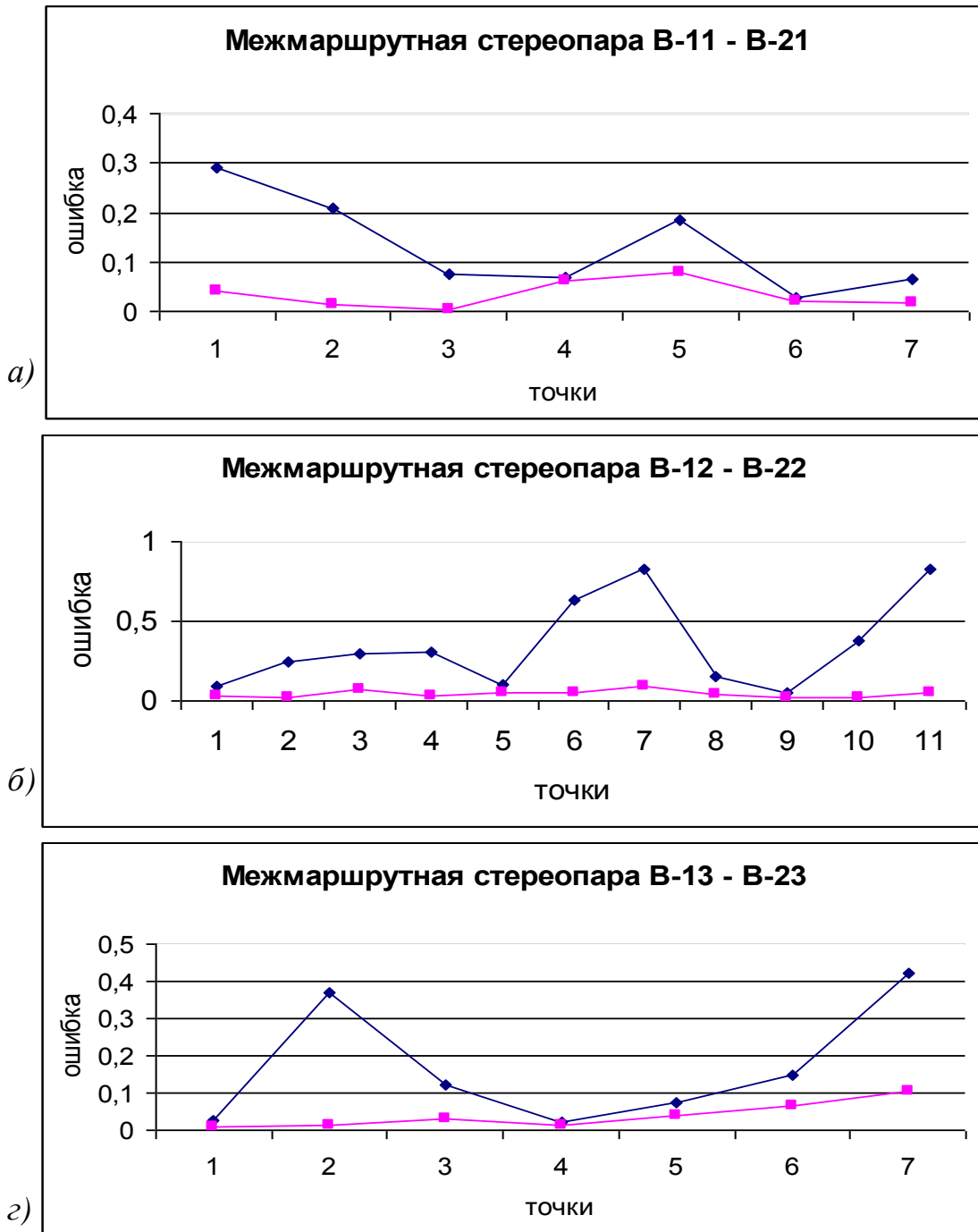


Рисунок 46 – Графики распределения ошибок на точках, образующих межмаршрутные связи в блоках №1 (—◆—) и №2 (—■—): а – в) на разных межмаршрутных стереопарах

При уравнивании блоков использовался метод связок. Результаты, полученные на этапе внешнего ориентирования можно представить целым рядом рисунков, характеризующих ошибки по составляющим X, Y, Z на опорных (рисунок 47) и контрольных (рисунок 48) точках

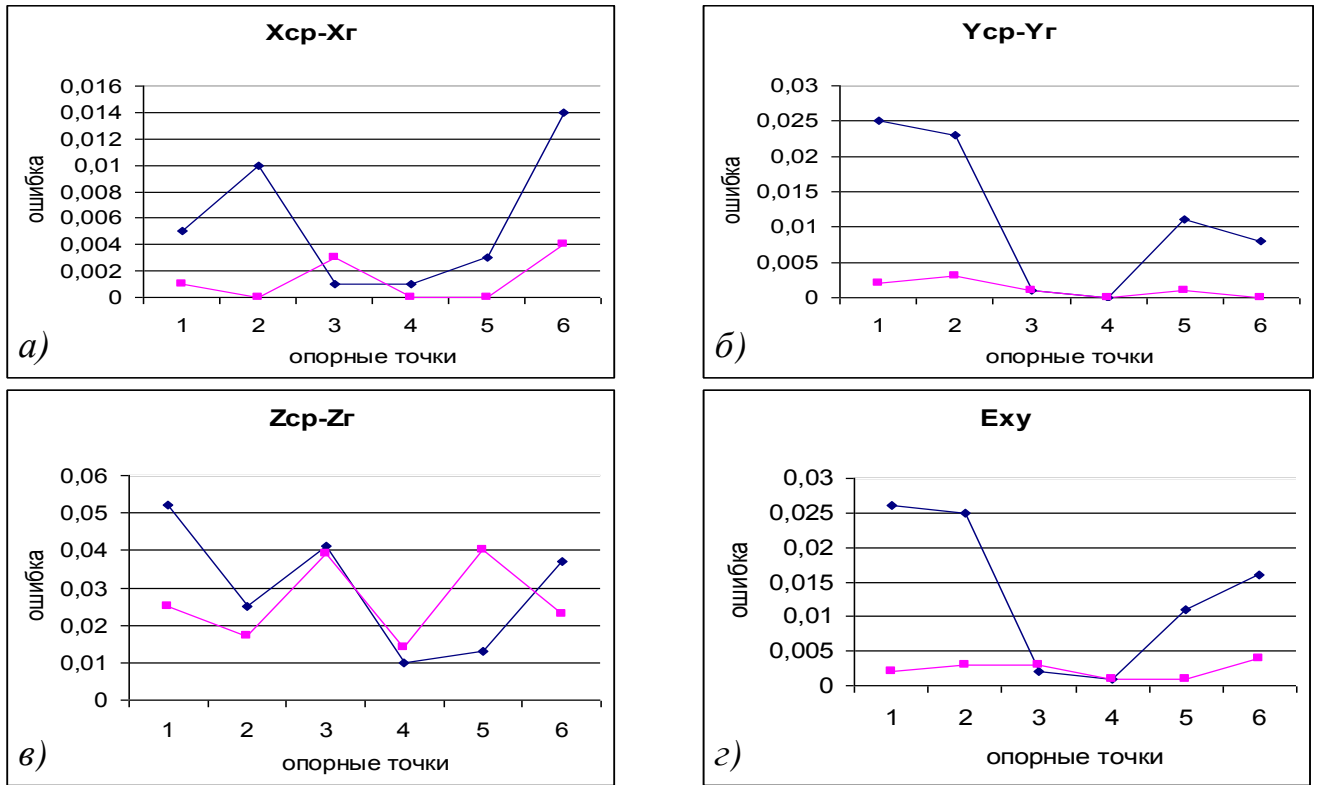


Рисунок 47 – Ошибки на опорных точках блоков №1 (—◆—) и №2 (—■—): а – г) по разным пространственным координатам точек

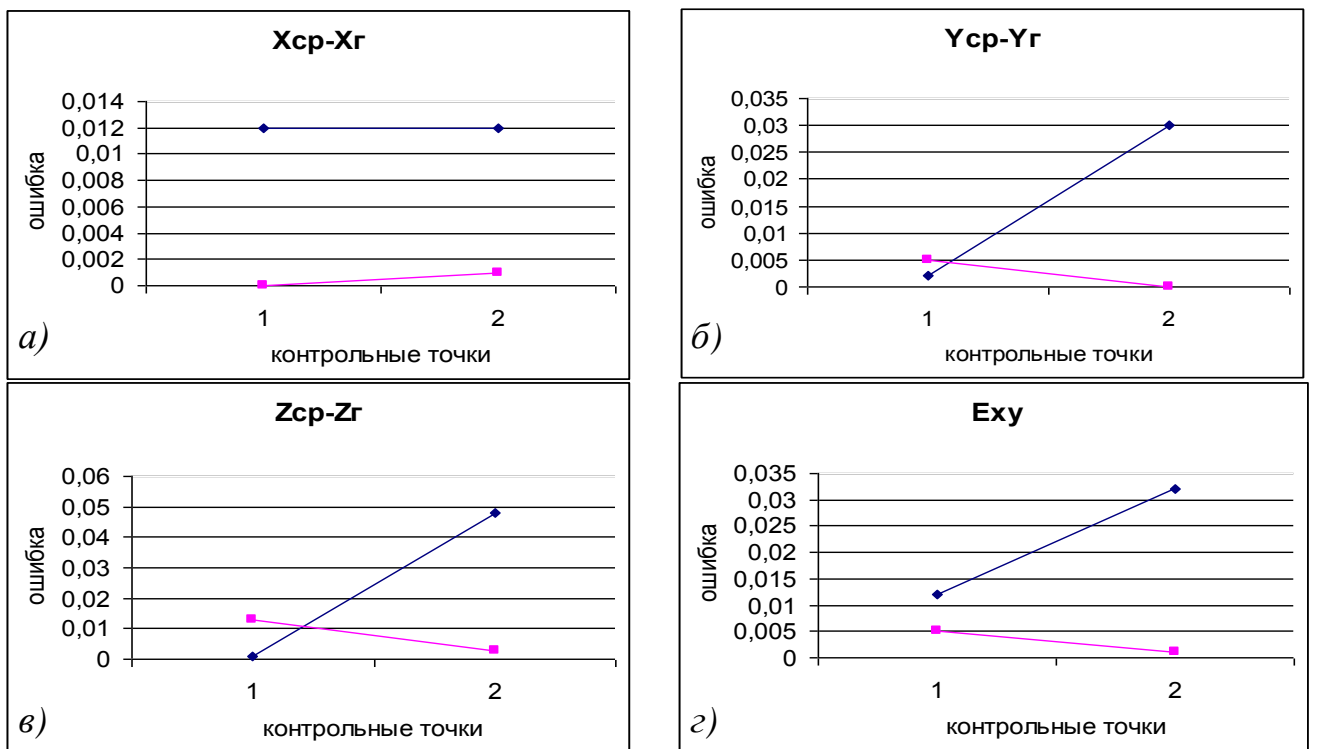


Рисунок 48 – Ошибки на контрольных точках блоков №1 (—◆—) и №2 (—■—): а – г) по разным пространственным координатам точек

Из приведенных на рисунках графиков и таблиц (приложение Ж) можно сделать следующие выводы:

– результаты обработки блока № 1 дает удовлетворительную точность на этапах внутреннего и внешнего ориентирования, а также при взаимном ориентировании стереопар, входящих в блок. Результаты, полученные в триплетах и при объединении двух маршрутов в блок (межмаршрутные связи) не удовлетворяют необходимому классу точности. Данный блок не рекомендован для использования при тестировании алгоритмов построения пространственной фототриангуляции, заложенных в ЦФС PHOTOMOD. Его можно использовать в крайних случаях, например для быстрого тестирования фотограмметрических систем;

– результаты обработки блока № 2 соответствуют высокому классу точности. Ошибки обработки не превышают 0,1–0,2 пикселя. Блок цифровых макетных снимков с такими параметрами рекомендуется использовать для проверки точности алгоритмов, заложенных в современных ЦФС;

– большие ошибки, возникающие при обработке снимков на блоках № 1, также как и при тестировании результатов обработки маршрутов, вызваны округлением координат во время маркировки точек на макетных снимках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современный уровень развития цифровой фотограмметрии привел к появлению огромного количества фотограмметрических систем разного класса. Несмотря на то, что все эти системы работают с одинаковыми исходными данными (аэроснимки), а в результате работы выдают одинаковые по виду результаты (цифровые модели рельефа и местности, ортофотопланы), алгоритмы, заложенные в них, могут существенно различаться. Для многих современных фотограмметрических систем нет описания заложенных в них алгоритмов. В связи с этим, необходимо проводить независимое тестирование всех ЦФС по надежным независимым цифровым макетным снимкам.

В результате проведенных исследований были получены следующие результаты:

- выполнен анализ методик создания макетных снимков, применяемых для тестирования различных фотограмметрических приборов;
- разработана математическая модель построения макетных снимков, позволяющая формировать непрерывные макетные снимки по цифровой модели рельефа методом обратного трассирования;
- разработанная модель исключает неоднозначность решений и позволяет работать с подпиксельной точностью, что обеспечивает возможность формирования цифровых макетных снимков для различных типов поверхностей и исследовать ЦФС различного класса точности;
- разработаны методики построения блочных и маршрутных макетных снимков, предназначенные для исследования ЦФС;
- разработанные методики моделирования макетных снимков позволяют создавать цифровые макеты с реальными параметрами аэрофотосъемки для различных типов поверхностей и могут быть использованы при тестировании любых ЦФС;
- созданные цифровые высокоточные макетные снимки апробированы при исследовании алгоритмов реальных ЦФС на примере ЦФС PHOTOMOD.

Выполненные исследования рекомендованы для дальнейшего совершенствования методик моделирования цифровых макетных снимков, предназначенных для решения различных фотограмметрических задач. Полученные в результате реализации разработанных методик тест-объекты рекомендованы к внедрению на специализированных предприятиях при работе с современными ЦФС. Их необходимо использовать при отладке работы ЦФС, при тестировании алгоритмов для подтверждения правильности их работы, для обучения операторов, при создании реальных моделей для расчета априорной оценки точности, а также при решении ряда других фотограмметрических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Агапов, В. И. Обработка космических снимков в «ЦФС-Талка» [Текст] / В. И. Агапов // Геопрофи. – 2006. – № 3. – С. 15–23.
- 2 Аковецкий, В. Г. Тенденции развития цифровых фотограмметрических систем [Текст] / В. Г. Аковецкий // Геодезия и картография. – 1995. – № 5. – С. 31–37.
- 3 Алчинов, А. И. Фирма «Талка ТДВ» и цифровая фотограмметрическая станция «Талка» [Текст] / А. И. Алчинов // Геопрофи. – 2005. – № 1. – С. 10–11.
- 4 Аналитические модели местности и снимков (макетные снимки) [Текст] / А. Н. Лобанов, В. Б. Дубиновский, А. И. Саранцев и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1989. – 96 с.
- 5 Аналитическая пространственная фототриангуляция [Текст] / А. Н. Лобанов, В. Б. Дубиновский, М. М. Машимов и др. – М.: Недра, 1991. – 256 с.
- 6 Антипов, И. Т. Новый принцип составления макетов снимков для исследования задач пространственной фототриангуляции [Текст] / И. Т. Антипов // Геодезия и Картография. – 1996. – № 9. – С. 34–39.
- 7 Антипов, И. Т. Расчеты к использованию данных инерциальной системы [Текст] / И. Т. Антипов // Вестник СГГА. – 2006. – № 11. – С. 154–167.
- 8 Антипов, И. Т. Построение фотограмметрической сети на цифровой фотограмметрической станции (ЦФС) ЦНИИГАиК [Текст] / И. Т. Антипов, Г. А. Зотов, С. С. Нехин // Геодезия и картография. – 2003. – № 11. – С. 32–37.
- 9 Антипов, И. Т. Фотоком – современный комплекс программ фотограмметрического сгущения на ПЭВМ [Текст] / И. Т. Антипов, С. С. Перлов // Геодезия и Картография. – 1996. – № 3. – С. 35–38.
- 10 Белошапкин, М. А. OrthoPhoto-SDS: фотограмметрический модуль настольной ГИС [Текст] / М. А. Белошапкин // САПР и графика. – 1997. – № 11. – С. 37–41.

- 11 Говоров, А. В. Обработка снимков на цифровой фотограмметрической системе ЦНИИГАиК [Текст]: метод. указания /А. В. Говоров, Б. В. Красноперцев. – М.: МИИГАиК, 2015. – 72 с.
- 12 ГОСТ Р 51833-2001. Фотограмметрия. Термины и определения [Текст] – М.: Госстандарт России, 2001.
- 13 Гук, А. П. Цифровой фотограмметрический комплекс для создания и обновления карт [Текст] / А. П. Гук, В. С. Коркин, М. А. Белошапкин // Геодезия и картография. – 1996. – № 12. – С. 52–61.
- 14 Гук, А. П. Современное состояние и перспективное развитие фотограмметрических технологий, дистанционных методов и мониторинга по аэрокосмической информации [Текст] / А. П. Гук, И. Т. Антипов// Гео-Сибирь – 2005: III Междунар. науч. конгр., 27 – 29 апр. 2005г. : сб. материалов в 6 т. – Новосибирск, 2005. – Т.5. – С. 3–8.
- 15 Журкин, И. Г. Цифровое моделирование измерительных трехмерных видеосцен [Текст] : монография / И. Г. Журкин, Т. А. Хлебникова. – Новосибирск: СГГА, 2012. – 245 с.
- 16 Иванов, В. П. Трехмерная компьютерная графика. [Текст] : учебник для вузов / В. П. Иванов, А. С. Батраков. – М.: Радио и связь, 1995. – 315 с.
- 17 Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500 [Текст] / ГУГК при СМ СССР. – М.: Недра, 1985. – 98 с.
- 18 Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых карт и планов [Текст] / Федеральная служба геодезии и картографии России. – М.: ЦНИИГАиК, 2003. – 80 с.
- 19 Итоги науки и техники. [Текст] // Геодезия и аэросъемка. – 1982. – Т.20. – 136 с.
- 20 Зайцев, В. А. Обзор продукции компании LH Systems. Ч. 2 ArcReview [Электронный ресурс] / В. А. Зайцев // 2002. – № 4 (23). – Режим доступа: http://www.dataplus.ru/news/arcreview/detail.php?ID=2352&SECTION_ID=59&print=Y.

21 Кадничанский, С. А. Обзор цифровых фотограмметрических систем [Текст] / С. А. Кадничанский, С. И. Хмелевский // Ежегодный обзор ГИС-Ассоциации. – 1999. – № 5. – С. 21–25.

22 Калантаров, Е. И. Фотограмметрическое инструментоведение [Текст]: учебник для вузов / Е. И. Калантаров. – М.: Недра, 1968. – 126 с.

23 Кацарский, И. С. О цифровой фотограмметрии и перспективах ее применения [Текст] / И. С. Кацарский // Геопрофи. – 2006. – № 6. – С. 4–8.

24 Комиссаров, Д. В. Разработка и исследование методов сбора, организации и обработки данных для цифровой фототриангуляции [Текст] : Д. В. Комиссаров : дис. на соис. учен. степ. канд. техн. наук по спец. 25.00.34 – Комиссаров Дмитрий Владимирович. – Новосибирск, 2003. – 181 с.

25 Комиссаров, Д. В. Исследование программы цифровой фототриангуляции по макетным материалам [Текст] / Д. В. Комиссаров // Сб. науч. тр. молодых учен. и аспирантов, посвящ. 70-летию СГГА. – Новосибирск, 2002. – С. 9–15.

26 Коркин, В. С. Алгоритм обратного трассирования лучей для формирования цифровых макетных снимков [Текст] / В. С. Коркин // Гео-Сибирь – 2007: III Междунар. науч. конгр., 25–27 апр. 2007г. : сб. материалов в 6 т. Новосибирск: СГГА, 2010. – Т.3. – С. 45–48.

27 Коркин, В. С. Аппроксимация профиля рельефа, заданного на нерегулярной сетке [Текст] / В. С. Коркин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012: VIII Междунар. науч. конгр., 10–20 апр. 2012г.; Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. Новосибирск: СГГА, 2012. – Т.1. – С. 18–20.

28 Коркин, В. С. Моделирование рельефа с использованием ортонормированных полиномов Чебышева [Текст] / В. С. Коркин // Сб. материалов X Междунар. научно-практ. Конф. «Методы дистанционного зондирования и Гис-технологии для оценки состояния окружающей среды,

инвентаризации земель и объектов недвижимости». GEOINFOCAD-ASIA, (МГУГиК), Китай; 20 – 29 мая 2006. – С. 56–62.

29 Коркин, В. С. Разработка макетных снимков для тестирования цифровых фотограмметрических систем [Текст] / В. С. Коркин // Современные проблемы геодезии и оптики: материалы междунар. научно-техн. конф., посвящ. 65-летию СГГА – НИИГАиК; 23 – 24 нояб., 1998г. – Новосибирск: СГГА, 1998. – С. 62–69.

30 Коркин, В. С. Цифровые фотограмметрические тест-объекты для тестирования цифровых фотограмметрических станций [Текст] / В. С. Коркин // Геодезия и картография. – 2008. – № 2. – С. 39–41.

31 Коркин, В. С. Проект создания комплекса цифровых макетных аэроснимков для исследования фотограмметрических систем [Текст] / В. С. Коркин, А. Е. Сидякина // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр., 19 – 29 апр. 2011г. : сб. материалов в 6 т. – Новосибирск: СГГА, 2011. – Т.4, ч.1. – С. 77–79.

32 Коркин, В. С. Разработка алгоритма и программы формирования цифровых макетных снимков, образующих маршрут [Текст] / В. С. Коркин, А. Е. Червова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013: IX Междунар. науч. конгр., 15–26 апр. 2013г.; Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. – Новосибирск: СГГА, 2013. – Т.1. – С. 88–91.

33 Коркин, В. С. Разработка алгоритма и методики создания маршрута макетных цифровых аэроснимков с подпиксельной точностью [Текст] / В. С. Коркин, А. Е. Червова // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 1. – С. 51–56.

34 Коркин, В. С. Разработка методики моделирования псевдореалистичных тест-объектов [Текст] / В. С. Коркин, А. Е. Червова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014: X Междунар. науч. конгр., 8–18 апр. 2014г.; Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. Новосибирск: СГГА, 2014. – Т.1. – С. 81–85.

- 35 Коркин, В. С. Разработка алгоритма и методики создания блока макетных цифровых аэроснимков высокого класса точности [Текст] / В. С. Коркин, А. Е. Червова // Инженерные изыскания. – 2015. – № 9. – С. 58–61.
- 36 Кравцов, А. В. Обзор математических моделей освещения при построении трехмерных сцен [Текст] / А. В. Кравцов // Изв. ТулГУ. Тех. науки. – 2010. – № 3. – С. 278–284.
- 37 Краснопевцев, Б. В. Фотограмметрия [Текст] / Б. В. Краснопевцев. – М.: МИИГАИК; Репрография, 2008. – 160 с.
- 38 Кучко, А. С. Аэрофотография (основы и метрология) [Текст] / А. С. Кучко. – М.: Недра, 1974. – 271 с.
- 39 Лазарев, Д. Н. Международный светотехнический словарь [Текст] / под ред. Д. Н. Лазарева. – М.: Русский язык, 1979. – 132 с.
- 40 Лобанов, А. Н. Автоматизация фотограмметрических процессов [Текст] / А. Н. Лобанов, И. Г. Журкин. – М.: Недра, 1980. – 240 с.
- 41 Лобанов, А. Н. Фотограмметрия [Текст] : учебник для вузов / А. Н. Лобанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 552 с.
- 42 Лобанов, А. Н. Фотограмметрия [Текст] / А. Н. Лобанов, М. И. Буров, Б. В. Краснопевцев. – М.: Недра, 1987. – 309 с.
- 43 Лютивинская, М. В. Программный комплекс INPHO – передовые решения в области фотограмметрии [Текст] / М. В. Лютивинская // Геоматика. – 2009. – № 2. – С. 30–34.
- 44 Лютивинская, М. В. Решения компании INPHO для создания и работы с ЦМР и ЦММ [Текст] / М. В. Лютивинская // Геопрофи. – 2009. – № 1. – С. 32–44.
- 45 Малявский, Б. К. Дисплейный стереофотограмметрический комплекс Фотомод [Текст] / Б. К. Малявский // Геодезия и Картография. – 1997. – № 11. – С. 20–25.
- 46 Михайлов, А. П. Макетные стереопары цифровых снимков для тестирования систем автоматической идентификации соответственных точек [Электронный ресурс] / А. П. Михайлов // Геоинформационный портал ГИС-ассоциации. – Режим доступа: <http://www.gisa.ru/3810.html>.

47 Михайлов, А. П. Фотограмметрические рабочие станции для построения цифровых моделей местности по аэрокосмическим и наземным снимкам [Текст] / А. П. Михайлов, А. Г. Чибуничев // Тезисы докладов научной конференции, посвященной 215-летию МИИГАиК. – 1994. – С. 6–8.

48 Назаров, А. С. Современные технологии в цифровых фотограмметрических системах [Текст] / А. С. Назаров // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2006. – № 4 (23). – С. 21–27.

49 Назаров, А. С. Фотограмметрия: учеб. пособие для студентов вузов [Текст] / А. С. Назаров – Мн.: ТетраСистемс, 2006. – 368 с.: ил.

50 Нехин, С. С. От аналитических способов к цифровым [Текст] / С. С. Нехин // Геодезия и картография. – 1987. – № 3. – С. 53–58.

51 Нехин, С. С. От аналитических фотограмметрических приборов к цифровым [Текст] / С. С. Нехин // Геодезия и картография. – 1993. – № 4. – С. 29–36.

52 Нехин, С. С. Цифровые фотограмметрические системы: функции, возможности, перспективы развития [Текст] / С. С. Нехин // Пространственные данные. – 2006. – № 3. – С. 23–30.

53 Нехин, С. С. Десять лет цифровой фотограмметрии ЦНИИГАиК [Текст] / С. С. Нехин, Г. А. Зотов // Геодезия и картография. – 2005. – № 6. – С. 32–37.

54 Нехин, С. С. Создание и обновление топокарт и планов на ЦФС [Текст] / С. С. Нехин, Г. А. Зотов // Материалы юбилейной научно-технической конференции ЦНИИГАиК, посвященной 850-летию г. Москвы. – 1997. – Ч. 2. – С. 21–30.

55 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., 10–20 апреля 2012г.; Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. – Новосибирск: СГГА, 2012. – Т. 1. – С. 33–38.

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

57 Новаковский, Б. А. Использование цифровых фотограмметрических станций в целях картографирования [Текст] / Б. А. Новаковский, С. В. Прасолов, И. С. Волкова // Геодезия и картография. – 2010. – № 1. – С. 40–45.

58 Официальный сайт компании ERDAS в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://erdas-russia.ru>.

59 Официальный сайт компании BAE Systems GXP [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geospatalexploitationproducts.com>.

60 Официальный сайт компании «GeoSystem» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vingeo.com/delta.html>.

61 Официальный сайт компании Intergraph [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.intergraph.com>.

62 Официальный сайт ГИС – ассоциации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gisa.ru>.

63 Официальный сайт компании Ракурс [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.racurs.ru.

64 Официальный сайт компании Совзонд [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sovzond.ru>.

65 Ошурков, Г. А. Фотограмметрическое инструментоведение [Текст] / Г. А. Ошурков. – М.: ВИА, 1960. – 387 с.

66 Павлидис, Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений [Текст] / Т. Павлидис; пер с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 400 с.

67 Программная документация к цифровой фотограмметрической станции ЦФС «PHOTOMOD» [Текст] : руководство пользователя. – М.: Ракурс, 2009. – 92 с.

68 Программный компонент фототриангуляции для цифровой фотограмметрической станции ЦНИИГАиК. PHOTOSOM [Текст] : руководство пользователя. Версия 1.1. – Новосибирск, 2005. – 77 с.

69 РД БГЕИ 03-89 Приборы фотограмметрические. Термины и определения [Текст]. – М., 1989.

70 Роджерс, Д. Математические основы машинной графики [Текст] / Д. Роджерс, Дж. Адамс. – М.: Мир, 2001. – 604 с.

71 Роджерс, Д. Алгоритмические основы машинной графики [Текст] / Д. Роджерс. – М.: Мир. – 512 с.

72 Сечин, А. Ю. Современные тенденции развития цифровых фотограмметрических систем [Электронный ресурс] / А. Ю. Сечин. – Режим доступа: <http://www.gisa.ru/47297.html>.

73 Сидякина, А. Е. Алгоритм формирования стереопары битовых макетных снимков для исследования точности работы ЦФС Photomod 5 [Текст] / А. Е. Сидякина // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012: VIII Междунар. науч. конгр., 10 – 20 апр. 2012г. : сб. молодых учёных СГГА. – Новосибирск: СГГА, 2012. – С. 71–76.

74 Тюкавкин, А. В. О цифровой фотограмметрической системе «Талка» [Текст] / А. В. Тюкавкин // РОФДЗ Современные проблемы фотограмметрии и дистанционного зондирования: тезисы докладов на 1-ой науч.-практич. конф. – 2000. – С. 14–15.

75 Тюкавкин, А. В. Очередная версия ПК «Талка» [Текст] / А. В. Тюкавкин // Информационный бюллетень «ГИС-Ассоциация». – 2002. – № 1(33). – С. 41–45.

76 Фоли, Дж. Основы интерактивной машинной графики [Текст] в 2-х кн. / Дж. Фоли. – М.: Мир, 1985. – 368 с.

77 Фотограмметрический сканер DELTA. Инструкция оператору [Текст] // Украина ГНПП "Геосистема". – 2001. – 86 с.

78 Фототриангуляция в режиме реального времени на ЦФС [Текст] / И. Т. Антипов, Г. А. Зотов, С. С. Нехин, Ю. И. Кучинский // Геодезия и картография. – 2003. – № 11. – С. 32–37.

79 Хрущ, Р. М. Этапы становления и развития фотограмметрии в России [Текст] / Р. М. Хрущ // Геодезия и картография. – 2003. – № 7. – С. 50–61.

80 Цифровое моделирование местности в топографо-геодезических целях: обзорная информация [Текст] / Обзорная информация ЦНИИГАиК. Сер. Механизация и автоматизация крупномасштабных съемок. – М.: ЦНИИГАиК. – 1980. – Вып. 44. – 58 с.

81 Цифровая фотограмметрия: обзор программных средств // ГИС – Обзорение, 1998. – № 1. – С. 10–15.

82 Цифровой фотограмметрический комплекс для создания и обновления карт [Текст] / А. П. Гук, В. С. Коркин, В. А. Самушкин и др. // Геодезия и картография. – 1996. – № 12. – С. 29–31.

83 Цифровая фотограмметрическая система ЦНИИГАиК. Программное обеспечение для создания и обновления цифровых топографических карт и планов [Текст]. – М.: ЦНИИГАиК, 2004. – 128 с.

84 Davis E. R. Machine Vision: theory, algorithms, practicalities [Text] / E. R. Davis/ – Amsterdam: Elsevier, 2005. – 934 p.

85 DSW700 Digital Scanning Workstation [Electronic resource] / официальный сайт компании Leica-geosystems. – Режим доступа: http://digital-imaging.leica-geosystems.com/en/DSW700_90563.htm.

86 Digital Scanning Workstation. User's Manual DSW 200 Scan and Maintenance. Version 2.5.1 [Text], 1996. – 130 p.

87 Egels Y. Digital Photogrammetry [Text] / Y. Egels, M. Kasser // Taylor and Francis Inc. – 2002. – PP. 376.

88 Guk A. The Digital Stereoplotter for Windows 95 [Text] / A. Guk, V. Korokin, V. Samushkin // Presented paper for XYIII Isprs Gongress, Vienn, 9 –19 July, 1996. – PP. 66.

89 Gruen A. Digital photogrammetric stations revisited [Text] / A. Gruen // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.XXXI, Vienna. – 1996. – P.B2. – PP. 127–134.

90 Heipke C. State-of-the-art of digital photogrammetric workstations for topographic applications [Text] / C. Heipke // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1995. – Vol. 61, No. 1. – PP. 45–56.

91 Lemmens, M. Digital Photogrammetric Workstations Digital photogrammetric workstations [Text] / M. Lemmens // GIM International. – 2007. – Vol. 21. – PP. 22–25.

92 Photogrammetric scanning innovation in the LH systems DSW500 [Text] / A. L. Dam, S. B. Miller, G. A. Nagle // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B2. Amsterdam. – 2000. – PP. 119–124.

93 Review of some digital photogrammetric systems [Text] / V. Petrova, T. Hristova, A. Alexandrov // International symposium Spaceinformation — technologies, acquisition, processing and effective application, Sofia. – 2002. – PP. 105–113.

94 Talka-gis: digital photogrammetric stations [Electronic resource]. – Режим доступа: <http://gis.talka2000.ru>.

95 Walker S. Digital photogrammetric workstations 1992-96 [Text] / S. Walker // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna. – 1996. – Vol. XXXI, P.1 B.2. – PP. 384–395.

96 Walker S. New features in SOCET SET [Text] / S. Walker // 51st Photogrammetric Week (September, 3 – 7), Stuttgart. – 2007. – PP. 35–40.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

ЭЛЕМЕНТЫ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ МАКЕТНЫХ АЭРОСНИМКОВ

Таблица А.1 – Элементы внешнего ориентирования стереопары идеальных макетных снимков

Снимки	X_s	Y_s	Z_s	α	ω	χ
P_1	990	907	903	0,3	0,3	0,2
P_2	1430	895	901	0,2	0,3	0,2

Таблица А.2 – Элементы внешнего ориентирования маршрута идеальных макетных снимков

Снимки	X_s	Y_s	Z_s	α	ω	χ
P_1	550	905	900	0,3	0,1	0,2
P_2	990	907	903	0,2	0,2	0,1
P_3	1430	895	901	0,1	0,2	0,1
P_4	1870	901	895	0,2	0,1	0,3
P_5	2310	904	902	0,1	0,2	0,2

Таблица А.3 – Элементы внешнего ориентирования маршрута неидеальных макетных снимков

Снимки	X_s	Y_s	Z_s	α	ω	χ
P_1	550	900	850	3,3	3,1	3,2
P_2	990	909	845	3,5	3,4	3,3
P_3	1430	910	840	3,5	3,6	3,8
P_4	1870	901	835	3,0	3,5	3,9
P_5	2310	904	833	3,1	3,2	3,2

Таблица А.4 – Элементы внешнего ориентирования блока макетных снимков

Снимки	X_s	Y_s	Z_s	α	ω	χ
P_1	830	1770	860	1,0	1,2	-0,5
P_2	1300	1775	865	1,1	1,3	-0,6
P_3	1760	1778	867	1,3	1,4	-0,7
P_4	838	920	870	-0,7	0,4	0,5
P_5	1245	915	868	-1,2	0,5	0,8
P_6	1755	925	862	-0,9	1,2	0,7

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ МАКЕТНЫХ СТЕРЕОПАР

Таблица Б.1 – Результаты обработки цифровой макетной стереопары № 1

Внутреннее ориентирование снимков				
Средние ошибки по модулю, пиксель	Снимок 1		0,250	
	Снимок 2		0,083	
Взаимное ориентирование снимков				
Количество точек	Остаточный поперечный параллакс, пиксель			
	СКО	Ср. модуль	max	
12	0,214	0,190	0,369	
Ошибка пространственного положения опорных точек				
	$X_{cp}-X_g, м$	$Y_{cp}-Y_g, м$	$Z_{cp}-Z_g, м$	$E_{xy}, м$
Допуск	0,200	0,200	0,200	0,200
Среднее значение	0,014	0,039	0,047	0,043
СКО	0,015	0,048	0,047	0,050
Максимум	0,018	0,068	0,050	0,070
Ошибка пространственного положения контрольных точек				
	$X_{cp}-X_g, м$	$Y_{cp}-Y_g, м$	$Z_{cp}-Z_g, м$	$E_{xy}, м$
Допуск	0,200	0,200	0,200	0,200
Среднее значение	0,021	0,017	0,043	0,029
СКО	0,022	0,019	0,060	0,029
Максимум	0,027	0,025	0,086	0,029

Таблица Б.2 – Результаты обработки цифровой макетной стереопары № 2

Внутреннее ориентирование				
Средние ошибки по модулю, пиксель	Снимок 1		0,015	
	Снимок 2		0,000	
Взаимное ориентирование				
Количество точек	Остаточный поперечный параллакс, пиксель			
	СКО	Ср. модуль	max	
12	0,229	0,190	0,376	

Продолжение таблицы Б.2

Ошибка пространственного положения опорных точек				
	Х _{ср} -Х _г , м	У _{ср} -У _г , м	Z _{ср} -Z _г , м	Е _{ху} , м
Допуск	0,200	0,200	0,200	0,200
Среднее значение	0,017	0,004	0,009	0,017
СКО	0,017	0,004	0,009	0,018
Максимум	0,018	0,006	0,010	0,019
Ошибка пространственного положения контрольных точек				
	Х _{ср} -Х _г , м	У _{ср} -У _г , м	Z _{ср} -Z _г , м	Е _{ху} , м
Допуск	0,200	0,200	0,200	0,200
Среднее значение	0,008	0,015	0,035	0,020
СКО	0,011	0,016	0,039	0,020
Максимум	0,016	0,020	0,052	0,020

Таблица Б.3 – Результаты обработки цифровой макетной стереопары № 3

Внутреннее ориентирование снимков				
Средние ошибки по модулю, пиксель	Снимок 1		0,001	
	Снимок 2		0,001	
Взаимное ориентирование снимков				
Количество точек	Остаточный поперечный параллакс, пиксель			
	СКО	Ср. модуль	max	
12	0,032	0,028	0,063	
Ошибка пространственного положения контрольных точек				
	Х _{ср} -Х _г , м	У _{ср} -У _г , м	Z _{ср} -Z _г , м	Е _{ху} , м
Допуск	0,200	0,200	0,200	0,200
Среднее значение	0,001	0,002	0,002	0,002
СКО	0,001	0,002	0,002	0,002
Максимум	0,001	0,002	0,002	0,003
Ошибка пространственного положения контрольных точек				
	Х _{ср} -Х _г , м	У _{ср} -У _г , м	Z _{ср} -Z _г , м	Е _{ху} , м
Допуск	0,200	0,200	0,200	0,200
Среднее значение	0,003	0,001	0,017	0,003
СКО	0,003	0,001	0,017	0,003
Максимум	0,004	0,002	0,021	0,004

Таблица Б.4 – Сводная таблица ошибок взаимного ориентирования, возникающих на точках в стереопарах № 1, № 2 и № 3

Порядковый номер точки	Название точки	Вид точки при обработке снимков	10 мкм	5 мкм	5 мкм с подпиксельной точностью
1	0103	связующая	0,105	0,140	0,027
2	0204	опорная	0,233	0,047	0,063
3	1503	связующая	0,095	0,322	0,034
4	1604	контрольная	0,196	0,249	0,011
5	2803	связующая	0,282	0,043	0,019
6	2904	опорная	0,369	0,004	0,044
7	2814	связующая	0,031	0,062	0,033
8	2915	опорная	0,077	0,121	0,004
9	1514	связующая	0,266	0,320	0,006
10	1615	контрольная	0,150	0,376	0,035
11	0113	связующая	0,282	0,332	0,043
12	0114	опорная	0,178	0,332	0,014

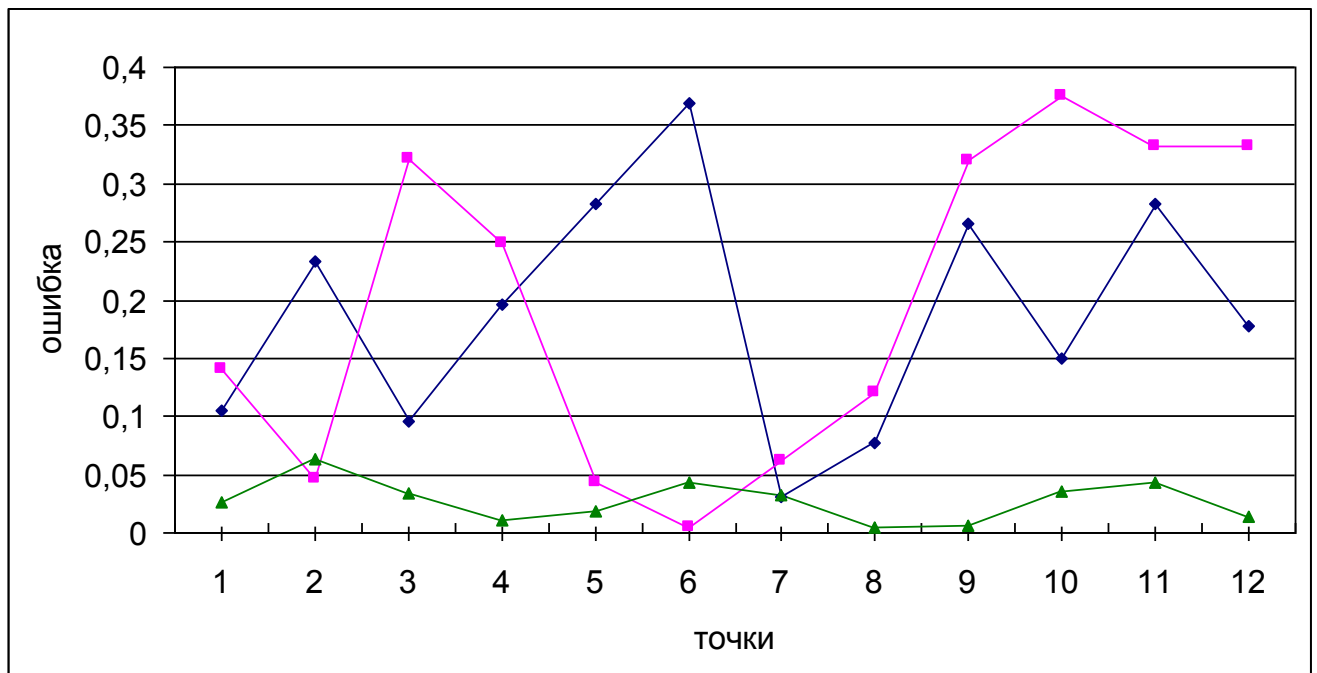


Рисунок Б.1 – График ошибок на точках в стереопарах №1 (—◆—), №2 (—■—) и №3 (—▲—) (в соответствии с номером точки)

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КООРДИНАТЫ ТОЧЕК, ЗАМАРКИРОВАННЫХ НА
СТЕРЕОПАРАХ № 1, № 2 И № 3

Таблица В.1 – Каталог точек триангуляции стереопар № 1, № 2 и № 3

Поряд- ковый номер точки	Название точки	Вид точки при обработке снимков	X, м	Y, м	Z, м
1	0103	связующая	589,8355	1434,7158	146,4488
2	0204	опорная	627,7277	1397,2865	146,3177
3	1503	связующая	590,5712	906,4102	165,6841
4	1604	контрольная	626,8838	870,0586	170,9448
5	2803	связующая	590,5171	448,4144	194,8794
6	2904	опорная	625,8555	413,3791	195,0998
7	2814	связующая	995,5176	431,1332	168,1309
8	2915	опорная	1033,3074	393,5414	166,7517
9	1514	связующая	995,7508	907,8280	165,8223
10	1615	контрольная	1033,1342	871,1014	165,2979
11	0113	связующая	973,4123	1443,9862	137,1706
12	0114	опорная	1011,7173	1444,1281	137,3598

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ МАРШРУТА МАКЕТНЫХ СНИМКОВ

Таблица Г.1 – Результаты обработки маршрута макетных снимков № 1

Внутреннее ориентирование снимков						
Средние ошибки по модулю, пиксель	Снимок 1		0,240			
	Снимок 2		0,012			
	Снимок 3		0,010			
	Снимок 4		0,239			
	Снимок 5		0,004			
Взаимное ориентирование снимков						
Количество точек	Остаточный поперечный параллакс, пиксель					
	СКО		Ср. модуль		max	
Стереопара 1	0,275		0,223		0,523	
Стереопара 2	0,460		0,409		0,761	
Стереопара 3	0,345		0,324		0,579	
Стереопара 4	0,276		0,211		0,529	
Максимальное расхождение в положении координат связующих точек снимков, пиксель						
	СКО		Ср. модуль		max	
	E_{xy}	E_z	E_{xy}	E_z	E_{xy}	E_z
Триплет 1	0,931	1,453	0,716	1,302	1,579	2,291
Триплет 2	0,764	1,213	0,638	1,117	1,169	1,675
Триплет 3	0,368	0,861	0,292	0,736	0,729	1,399
Ошибка пространственного положения опорных точек						
	X _{ср} -X _г , м		Y _{ср} -Y _г , м		Z _{ср} -Z _г , м	
Допуск	0,200		0,200		0,200	
Среднее значение	0,036		0,034		0,053	
СКО	0,039		0,040		0,053	
Максимум	0,052		0,060		0,055	
Ошибка пространственного положения опорных точек						
	X _{ср} -X _г , м		Y _{ср} -Y _г , м		Z _{ср} -Z _г , м	
Допуск	0,200		0,200		0,200	
Среднее значение	0,091		0,029		0,053	
СКО	0,091		0,030		0,074	
Максимум	0,093		0,037		0,105	
Ошибка пространственного положения связующих точек (между стереопарами)						
	X1-X2, м		Y1-Y2, м		Z1-Z2, м	
Допуск	0,200		0,200		0,200	
Среднее значение	0,002		0,022		0,050	
СКО	0,002		0,031		0,060	
Максимум	0,004		0,074		0,118	

Таблица Г.2 – Результаты обработки маршрута макетных снимков № 2

Внутреннее ориентирование снимков						
Средние ошибки по модулю, пиксель	Снимок 1		0,000			
	Снимок 2		0,035			
	Снимок 3		0,042			
	Снимок 4		0,000			
	Снимок 5		0,000			
Взаимное ориентирование снимков						
Количество точек	Остаточный поперечный параллакс, пиксель					
	СКО		Ср. модуль		max	
Стереопара 1	0,343		0,326		0,480	
Стереопара 2	0,257		0,205		0,574	
Стереопара 3	0,348		0,277		0,740	
Стереопара 4	1,415		0,311		0,897	
Максимальное расхождение в положении координат связующих точек снимков, пиксель						
	СКО		Ср. модуль		max	
	E_{xy}	E_z	E_{xy}	E_z	E_{xy}	E_z
Триплет 1	0,239	0,505	0,187	0,458	0,414	0,756
Триплет 2	0,867	1,337	0,618	0,996	1,575	2,384
Триплет 3	0,420	1,146	0,387	0,997	0,623	2,161
Ошибка пространственного положения опорных точек						
	X _{ср} -X _г , м		Y _{ср} -Y _г , м		Z _{ср} -Z _г , м	
Допуск	0,200		0,200		0,200	
Среднее значение	0,014		0,031		0,022	
СКО	0,017		0,033		0,022	
Максимум	0,028		0,049		0,023	
Ошибка пространственного положения контрольных точек						
	X _{ср} -X _г , м		Y _{ср} -Y _г , м		Z _{ср} -Z _г , м	
Допуск	0,200		0,200		0,200	
Среднее значение	0,029		0,055		0,047	
СКО	0,031		0,056		0,060	
Максимум	0,041		0,062		0,084	
Ошибка пространственного положения связующих точек (между стереопарами)						
	X1-X2, м		Y1-Y2, м		Z1-Z2, м	
Допуск	0,200		0,200		0,200	
Среднее значение	0,001		0,013		0,028	
СКО	0,001		0,017		0,035	
Максимум	0,002		0,039		0,079	

Таблица Г.3 – Результаты обработки маршрута макетных снимков № 3

Внутреннее ориентирование снимков						
Средние ошибки модулю, пиксель	по	Снимок 1			0,000	
		Снимок 2			0,000	
		Снимок 3			0,000	
		Снимок 4			0,000	
		Снимок 5			0,000	
Взаимное ориентирование снимков						
Количество точек	Остаточный поперечный параллакс, пиксель					
	СКО		Ср. модуль		max	
Стереопара 1	0,037		0,029		0,073	
Стереопара 2	0,031		0,025		0,064	
Стереопара 3	0,068		0,050		0,149	
Стереопара 4	0,048		0,037		0,113	
Максимальное расхождение в положении координат связующих точек снимков, пиксель						
	СКО		Ср. модуль		max	
	E_{XY}	E_Z	E_{XY}	E_Z	E_{XY}	E_Z
Триплет 1	0,025	0,052	0,020	0,047	0,045	0,070
Триплет 2	0,025	0,067	0,022	0,059	0,045	0,149
Триплет 3	0,049	0,085	0,037	0,062	0,100	0,113
Ошибка пространственного положения опорных точек						
	$X_{ср}-X_{г}$, м	$Y_{ср}-Y_{г}$, м	$Z_{ср}-Z_{г}$, м	E_{xy} , м		
Допуск	0,200	0,200	0,200	0,200		
Среднее значение	0,002	0,002	0,002	0,002		
СКО	0,002	0,002	0,002	0,003		
Максимум	0,003	0,003	0,002	0,003		
Ошибка пространственного положения контрольных точек						
	$X_{ср}-X_{г}$, м	$Y_{ср}-Y_{г}$, м	$Z_{ср}-Z_{г}$, м	E_{xy} , м		
Допуск	0,200	0,200	0,200	0,200		
Среднее значение	0,001	0,004	0,065	0,004		
СКО	0,002	0,004	0,065	0,005		
Максимум	0,002	0,006	0,067	0,006		
Ошибка пространственного положения связующих точек (между стереопарами)						
	$X1-X2$, м	$Y1-Y2$, м	$Z1-Z2$, м	E_{xy} , м		
Допуск	0,200	0,200	0,200	0,200		
Среднее значение	0,000	0,001	0,002	0,001		
СКО	0,000	0,001	0,002	0,001		
Максимум	0,000	0,002	0,004	0,002		

Таблица Г.4 – Каталог ошибок на точках в маршрутах № 1, № 2 и № 3

Порядковый номер точки	Название точки	10 мкм,				5 мкм.				5 мкм с подпиксельной точностью			
		1 стереопара	2 стереопара	3 стереопара	4 стереопара	1 стереопара	2 стереопара	3 стереопара	4 стереопара	1 стереопара	2 стереопара	3 стереопара	4 стереопара
1	0103/0101	0,002				0,354				0,053			
2	0204/0101	0,274				0,390				0,045			
3	1503/0101	0,084				0,211				0,006			
4	1604/0101	0,358				0,253				0,040			
5	2803/0101	0,232				0,414				0,073			
6	2904/0101	0,452				0,452				0,059			
7	2814/0101	0,112	0,401			0,369	0,085			0,008	0,034		
8	2915/0101	0,126	0,610			0,286	0,206			0,014	0,025		
9	1514/0101	0,067	0,232			0,480	0,574			0,011	0,003		
10	1615/0101	0,523	0,493			0,386	0,065			0,016	0,011		
11	0114/0101	0,088	0,256			0,182	0,124			0,008	0,006		
12	0113/0101	0,355	0,015			0,140	0,131			0,018	0,011		
13	0210/0102		0,761	0,401			0,159	0,311			0,026	0,019	
14	0111/0102		0,408	0,340			0,100	0,026			0,020	0,009	
15	1510/0102		0,703	0,283			0,402	0,272			0,018	0,033	
16	1611/0102		0,284	0,186			0,120	0,415			0,025	0,020	
17	2910/0102		0,517	0,531			0,397	0,528			0,057	0,058	
18	2911/0102		0,233	0,579			0,100	0,225			0,064	0,046	
19	2912/0103			0,344	0,042			0,261	0,174			0,146	0,048
20	2811/0103			0,264	0,056			0,027	0,004			0,149	0,003
21	1410/0103			0,222	0,000			0,063	0,483			0,026	0,035
22	1511/0103			0,217	0,078			0,740	0,076			0,059	0,028
23	0110/0103			0,257	0,207			0,067	0,205			0,009	0,018
24	0111/0103			0,264	0,307			0,392	0,372			0,031	0,012
25	0111/0104				0,529				0,609				0,005
26	0212/0104				0,499				0,897				0,027
27	1410/0104				0,097				0,635				0,049
28	1511/0104				0,044				0,048				0,113
29	2811/0104				0,359				0,034				0,079
30	2912/0104				0,315				0,191				0,026

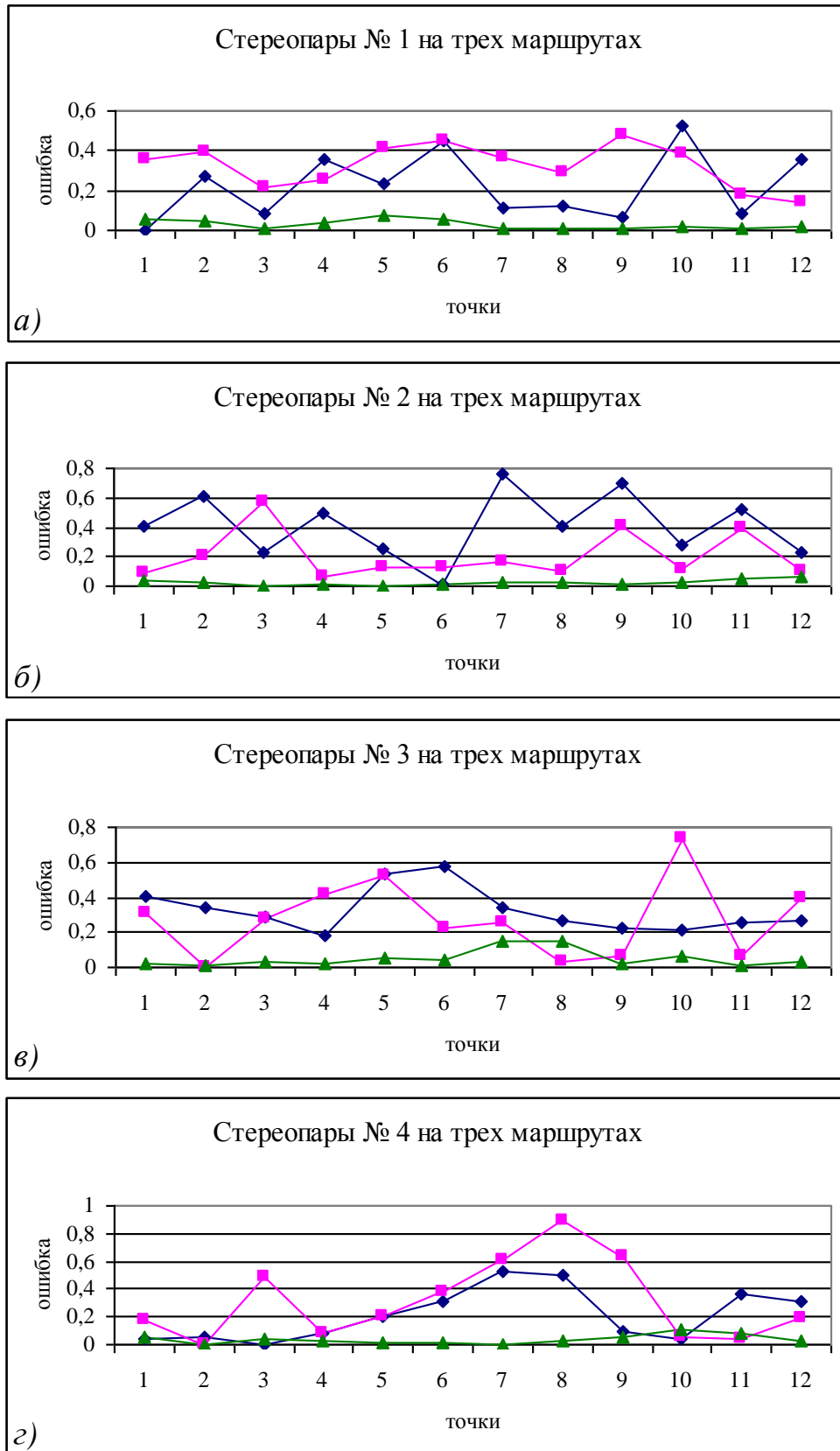


Рисунок Г.1 – Графики ошибок на этапе взаимного ориентирования на одних и тех же точках маршрутов №1 (◆), №2 (■) и №3 (▲), сформированных с разными параметрами: а – г) ошибки на разных стереопарах

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
(обязательное)

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КООРДИНАТЫ ТОЧЕК, ЗАМАРКИРОВАННЫХ
НА МАРШРУТАХ № 1, № 2 И № 3

Таблица Д.1 – Каталог точек триангуляции маршрутов № 1, № 2 и № 3

Поряд- ковый номер точки	Название точки	Вид точки при обработке снимков	X, м	Y, м	Z, м
1	0103/0101	связующая	589,8355	1434,7158	146,4488
2	0204/0101	опорная	627,7277	1397,2865	146,3177
3	1503/0101	связующая	590,5712	906,4102	165,6841
4	1604/0101	связующая	626,8838	870,0586	170,9448
5	2803/0101	связующая	590,5171	448,4144	194,8794
6	2904/0101	опорная	625,8555	413,3791	195,0998
7	2814/0101	связующая	995,5176	431,1332	168,1309
8	2915/0101	связующая	1033,3074	393,5414	166,7517
9	1514/0101	связующая	995,7508	907,8280	165,8223
10	1615/0101	связующая	1033,1342	871,1014	165,2979
11	0114/0101	связующая	973, 4123	1443,9862	137,1706
12	0113/0101	связующая	1011,7173	1444,1281	137,3598
13	0210/0102	связующая	1414,1367	1409,5389	138,3405
14	0111/0102	контрольная	1453,0139	1448,6442	137,6981
15	1510/0102	связующая	1405,1744	910,3384	154,3441
16	1611/0102	связующая	1441,8978	872,9626	155,7461
17	2910/0102	связующая	1405,0242	386,6125	154,4499
18	2911/0102	контрольная	1443,6934	385,2277	152,4949
19	2912/0103	связующая	1912,7603	380,8919	160,7116
20	2811/0103	связующая	1877,7057	415,6775	157,4934
21	1410/0103	связующая	1848,7844	936,3353	142,7291
22	1511/0103	связующая	1887,3722	898,4491	141,7264
23	0110/0103	связующая	1850,9983	1433,7116	138,8777
24	0111/0103	связующая	1889,5374	1434,1334	138,4425
25	0111/0104	связующая	2328,2683	1439,5419	133,5104
26	0212/0104	опорная	2365,9053	2400,7717	134,7489
27	1410/0104	связующая	2295,4107	943,0048	127,5772
28	1511/0104	связующая	2337,1688	904,7831	122,5051
29	2811/0104	опорная	2315,9927	426,9220	160,8367
30	2912/0104	связующая	2352,2391	391,1000	161,9505

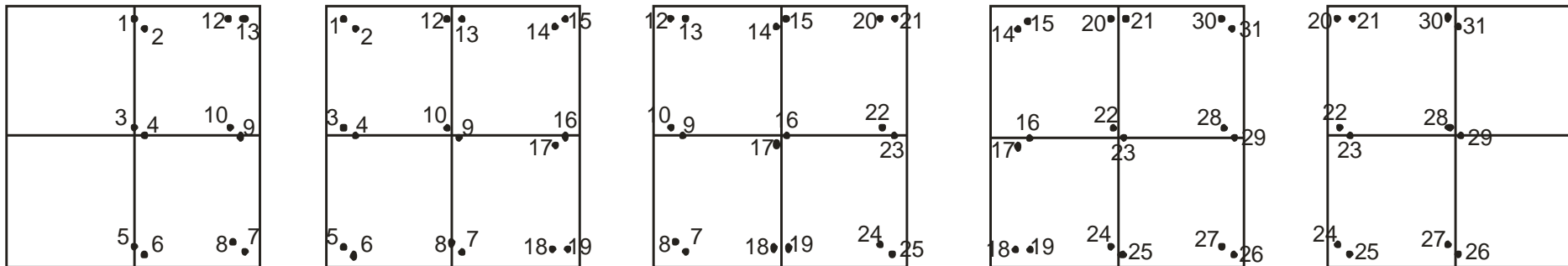


Рисунок Д.1 – Схема расположения замаркированных точек макетных снимков маршрута

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

(обязательное)

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ МАРШРУТА МАКЕТНЫХ СНИМКОВ С
БОЛЬШИМИ УГЛАМИ НАКЛОНА СНИМКОВ

Таблица Е.1 – Результаты обработки маршрута макетных снимков № 1

Внутреннее ориентирование снимков						
Средние ошибки по модулю, пиксель	Снимок 1		0,002			
	Снимок 2		0,002			
	Снимок 3		0,004			
	Снимок 4		0,001			
	Снимок 5		0,000			
Взаимное ориентирование снимков						
Количество точек	Остаточный поперечный параллакс, пиксель					
	СКО		Ср. модуль		max	
Стереопара 1	0,212		0,171		0,444	
Стереопара 2	0,285		0,232		0,580	
Стереопара 3	0,220		0,171		0,397	
Стереопара 4	0,392		0,332		0,759	
Максимальное расхождение в положении координат связующих точек снимков, пиксель						
	СКО		Ср. модуль		max	
	E_{xy}	E_z	E_{xy}	E_z	E_{xy}	E_z
Триплет 1	0,793	1,502	0,639	1,298	1,231	2,267
Триплет 2	1,161	1,838	0,815	1,555	2,202	3,017
Триплет 3	1,252	2,022	1,047	1,846	1,826	3,020
Ошибка пространственного положения опорных точек						
	X _{ср} -X _г , м		Y _{ср} -Y _г , м		Z _{ср} -Z _г , м	
Допуск	0,200		0,200		0,200	
Среднее значение	0,019		0,006		0,012	
СКО	0,019		0,006		0,012	
Максимум	0,024		0,009		0,012	
Ошибка пространственного положения контрольных точек						
	X _{ср} -X _г , м		Y _{ср} -Y _г , м		Z _{ср} -Z _г , м	
Допуск	0,200		0,200		0,200	
Среднее значение	0,002		0,019		0,055	
СКО	0,002		0,022		0,055	
Максимум	0,003		0,031		0,058	
Ошибка пространственного положения связующих точек (между стереопарами)						
	X1-X2, м		Y1-Y2, м		Z1-Z2, м	
Допуск	0,200		0,200		0,200	
Среднее значение	0,002		0,020		0,042	
СКО	0,003		0,028		0,047	
Максимум	0,005		0,066		0,079	

Таблица Е.2 – Результаты обработки маршрута макетных снимков № 2

Внутреннее ориентирование снимков						
Средние ошибки по модулю, пиксель	Снимок 1		0,001			
	Снимок 2		0,000			
	Снимок 3		0,002			
	Снимок 4		0,001			
	Снимок 5		0,000			
Взаимное ориентирование снимков						
Количество точек	Остаточный поперечный параллакс, пиксель					
	СКО		Ср. модуль		max	
Стереопара 1	0,054		0,051		0,079	
Стереопара 2	0,054		0,048		0,084	
Стереопара 3	0,061		0,058		0,087	
Стереопара 4	0,046		0,037		0,101	
Максимальное расхождение в положении координат связующих точек снимков, пиксель						
	СКО		Ср. модуль		max	
	E_{XY}	E_Z	E_{XY}	E_Z	E_{XY}	E_Z
Триплет 1	0,108	0,159	0,094	0,148	0,156	0,198
Триплет 2	0,031	0,045	0,026	0,037	0,059	0,059
Триплет 3	0,049	0,057	0,042	0,050	0,096	0,096
Ошибка пространственного положения опорных точек						
	X _{ср} -X _г , м		Y _{ср} -Y _г , м		Z _{ср} -Z _г , м	
Допуск	0,200		0,200		0,200	
Среднее значение	0,002		0,002		0,003	
СКО	0,003		0,003		0,003	
Максимум	0,004		0,005		0,003	
Ошибка пространственного положения контрольных точек						
	X _{ср} -X _г , м		Y _{ср} -Y _г , м		Z _{ср} -Z _г , м	
Допуск	0,200		0,200		0,200	
Среднее значение	0,002		0,002		0,056	
СКО	0,003		0,002		0,056	
Максимум	0,004		0,003		0,058	
Ошибка пространственного положения связующих точек (между стереопарами)						
	X1-X2, м		Y1-Y2, м		Z1-Z2, м	
Допуск	0,200		0,200		0,200	
Среднее значение	0,000		0,002		0,003	
СКО	0,000		0,003		0,004	
Максимум	0,001		0,006		0,007	

Таблица Е.3 – Каталог ошибок на точках в маршрутах макетных снимков с большими углами наклона снимков

Порядковый номер точки	Название точки	5 мкм				5 мкм с подпиксельной точностью			
		1	2	3	4	1	2	3	4
1	0103/0101	0,158				0,060			
2	0204/0101	0,228				0,079			
3	1503/0101	0,013				0,044			
4	1604/0101	0,117				0,048			
5	2803/0101	0,376				0,065			
6	2904/0101	0,444				0,059			
7	2814/0101	0,130	0,580			0,060	0,022		
8	2915/0101	0,026	0,530			0,054	0,023		
9	1514/0101	0,200	0,209			0,028	0,075		
10	1615/0101	0,059	0,351			0,015	0,084		
11	0114/0101	0,186	0,058			0,048	0,042		
12	0113/0101	0,115	0,025			0,057	0,027		
13	0210/0102		0,143	0,098			0,067	0,044	
14	0111/0102		0,114	0,050			0,056	0,079	
15	1510/0102		0,224	0,040			0,078	0,072	
16	1611/0102		0,168	0,054			0,073	0,042	
17	2910/0102		0,208	0,026			0,007	0,044	
18	2911/0102		0,178	0,025			0,016	0,030	
19	2912/0103			0,396	0,157			0,072	0,016
20	2811/0103			0,397	0,306			0,055	0,004
21	1410/0103			0,339	0,446			0,042	0,029
22	1511/0103			0,232	0,759			0,080	0,020
23	0110/0103			0,230	0,155			0,087	0,101
24	0111/0103			0,172	0,035			0,047	0,076
25	0111/0104				0,350				0,035
26	0212/0104				0,254				0,057
27	1410/0104				0,077				0,015
28	1511/0104				0,356				0,030
29	2811/0104				0,616				0,018
30	2912/0104				0,477				0,037

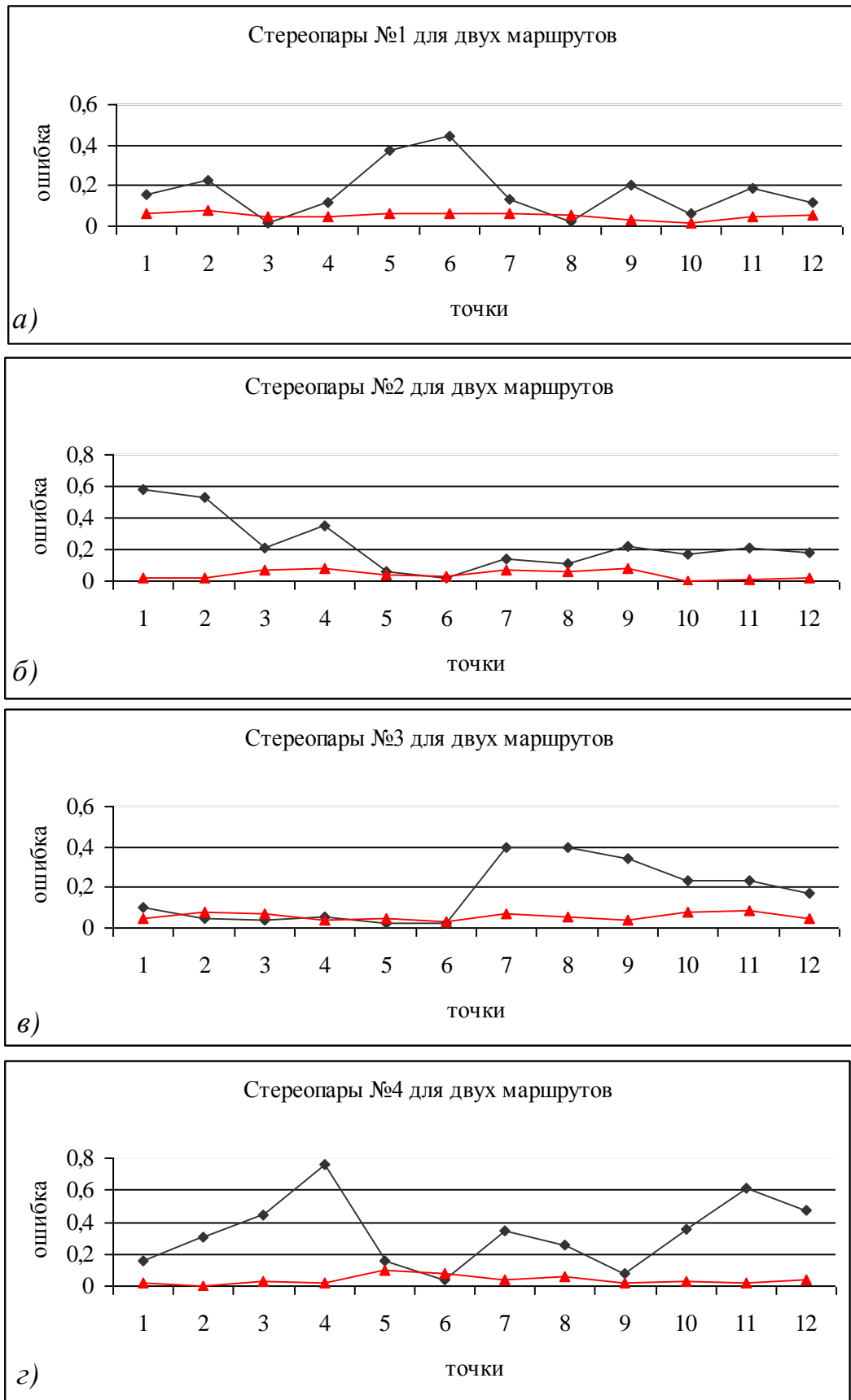


Рисунок Е.1 – Графики ошибок на этапе взаимного ориентирования на одних и тех же точках в маршрутах № 1 (—♦—) и № 2 (—▲—): а – г) ошибки на разных стереопарах

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

(обязательное)

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ МАКЕТНЫХ СНИМКОВ БЛОКОВ

Таблица Ж.1 – Результаты обработки макетных снимков блока № 1

Внутреннее ориентирование снимков						
Средние ошибки по модулю, пиксель	Маршрут 1	Снимок В-11		0,001		
		Снимок В-12		0,001		
		Снимок В-13		0,001		
	Маршрут 2	Снимок В-21		0,001		
		Снимок В-22		0,001		
		Снимок В-23		0,001		
Остаточный поперечный параллакс, пиксель						
СКО		Ср. модуль		max		
Взаимное ориентирование снимков						
Стереопара В-11 – В-12	0,278	0,256		0,474		
Стереопара В-12 – В-13	0,273	0,235		0,498		
Стереопара В-21 – В-22	0,265	0,213		0,600		
Стереопара В-22 – В-23	0,330	0,288		0,635		
Межмаршрутные измерения						
Стереопара В-11 – В-21	0,160	0,132		0,291		
Стереопара В-12 – В-22	0,446	0,354		0,824		
Стереопара В-13 – В-23	0,226	0,169		0,422		
Максимальное расхождение в положении координат связующих точек снимков						
	СКО		Ср. модуль		max	
	E_{XY}	E_Z	E_{XY}	E_Z	E_{XY}	E_Z
Триплет В-11 – В-12 – В-13	0,884	1,280	0,604	0,876	1,710	2,637
Триплет В-21 – В-22 – В-23	1,206	1,996	0,963	1,828	1,936	2,896
Ошибки по опорным и контрольным точкам						
	$X_{ср}-X_{г}$, м	$Y_{ср}-Y_{г}$, м	$Z_{ср}-Z_{г}$, м	E_{xy} , м		
Допуск	0,200	0,200	0,200	0,200		
Опорные точки						
Среднее значение	0,006	0,011	0,030	0,013		
СКО	0,007	0,015	0,034	0,017		
Максимум	0,014	0,025	0,052	0,026		
Контрольные точки						
Среднее значение	0,012	0,016	0,024	0,022		
СКО	0,012	0,021	0,034	0,024		
Максимум	0,012	0,030	0,048	0,032		
Ошибки по связующим точкам (между стереопарами)						
	$X1-X2$, м	$Y1-Y2$, м	$Z1-Z2$, м	E_{xy} , м		
Допуск	0,200	0,200	0,200	0,200		
Среднее значение	0,007	0,018	0,029	0,021		
СКО	0,009	0,022	0,036	0,024		
Максимум	0,019	0,046	0,078	0,046		

Таблица Ж.2 – Результаты обработки макетных снимков блока № 2

Внутреннее ориентирование снимков						
Средние ошибки по модулю, пиксель	Маршрут 1	Снимок В-11		0,000		
		Снимок В-12		0,000		
		Снимок В-13		0,000		
	Маршрут 2	Снимок В-21		0,000		
		Снимок В-22		0,000		
		Снимок В-23		0,000		
Взаимное ориентирование снимков						
Остаточный поперечный параллакс, пиксель						
	СКО	Ср. модуль	max			
Стереопара В-11 – В-12	0,064	0,050	0,150			
Стереопара В-12 – В-13	0,054	0,043	0,123			
Стереопара В-21 – В-22	0,033	0,028	0,054			
Стереопара В-22 – В-23	0,048	0,038	0,121			
Межмаршрутные измерения						
Остаточный поперечный параллакс, пиксель						
	СКО	Ср. модуль	max			
Стереопара В-11 – В-21	0,042	0,034	0,079			
Стереопара В-12 – В-22	0,049	0,043	0,094			
Стереопара В-13 – В-23	0,051	0,039	0,103			
Максимальное расхождение в положении координат связующих точек снимков, пиксель						
	СКО		Ср. модуль		max	
	E_{XY}	E_Z	E_{XY}	E_Z	E_{XY}	E_Z
Триплет В-11 – В-12 – В-13	0,096	0,120	0,073	0,100	0,175	0,195
Триплет В-21 – В-22 – В-23	0,075	0,113	0,060	0,100	0,159	0,181
Ошибки по опорным и контрольным точкам						
	$X_{ср}-X_{г}$, м	$Y_{ср}-Y_{г}$, м	$Z_{ср}-Z_{г}$, м	E_{xy} , м		
Допуск	0,200	0,200	0,200	0,200		
Опорные точки						
Среднее значение	0,001	0,001	0,026	0,002		
СКО	0,002	0,002	0,028	0,003		
Максимум	0,004	0,003	0,040	0,004		
Контрольные точки						
Среднее значение	0,000	0,003	0,008	0,003		
СКО	0,000	0,004	0,010	0,004		
Максимум	0,001	0,005	0,013	0,005		
Ошибки по связующим точкам (между стереопарами)						
	$X1-X2$, м	$Y1-Y2$, м	$Z1-Z2$, м	E_{xy} , м		
Допуск	0,200	0,200	0,200	0,200		
Среднее значение	0,001	0,003	0,003	0,003		
СКО	0,002	0,004	0,004	0,004		
Максимум	0,004	0,013	0,007	0,013		

Таблица Ж.3 – Каталог ошибок на точках в блоках № 1 и № 2

Порядковый номер точки	Название точки	5 мкм				5 мкм с подпиксельной точностью			
		1 (В-11 – В-12)	2 (В-12 – В-13)	3 (В-21 – В-22)	4 (В-22 – В-23)	1 (В-11 – В-12)	2 (В-12 – В-13)	3 (В-21 – В-22)	4 (В-22 – В-23)
1	101	0,225				0,004			
2	102	0,183				0,017			
3	103	0,220				0,024			
4	104	0,043				0,061			
5	105	0,385		0,105		0,081		0,044	
6	106	0,226		0,253		0,099		0,004	
7	107	0,185	0,278			0,072	0,005		
8	108	0,160	0,143			0,075	0,042		
9	109	0,221	0,459			0,026	0,073		
10	110	0,339	0,067			0,028	0,029		
11	111	0,187	0,339	0,247	0,225	0,016	0,035	0,037	0,052
12	113		0,063				0,032		
13	114		0,380				0,005		
14	115		0,368				0,008		
15	116		0,498				0,081		
16	117		0,145		0,099		0,027		0,044
17	118		0,183		0,426		0,013		0,033
18	201	0,474		0,540		0,150		0,001	
19	202	0,443		0,600		0,068		0,007	
20	203			0,205				0,050	
21	204			0,050				0,005	
22	205			0,215				0,036	
23	206			0,153				0,041	
24	207	0,350	0,105	0,107	0,130	0,007	0,052	0,054	0,002
25	208	0,265	0,112	0,211	0,635	0,021	0,123	0,013	0,036
26	209			0,255	0,210			0,033	0,042
27	210			0,168	0,220			0,039	0,121
28	211			0,069	0,444			0,027	0,019
29	212			0,023	0,278			0,031	0,045
30	213		0,254		0,222		0,070		0,028
31	214		0,114		0,395		0,056		0,035
32	215				0,511				0,058
33	217				0,088				0,021
34	218				0,151				0,000

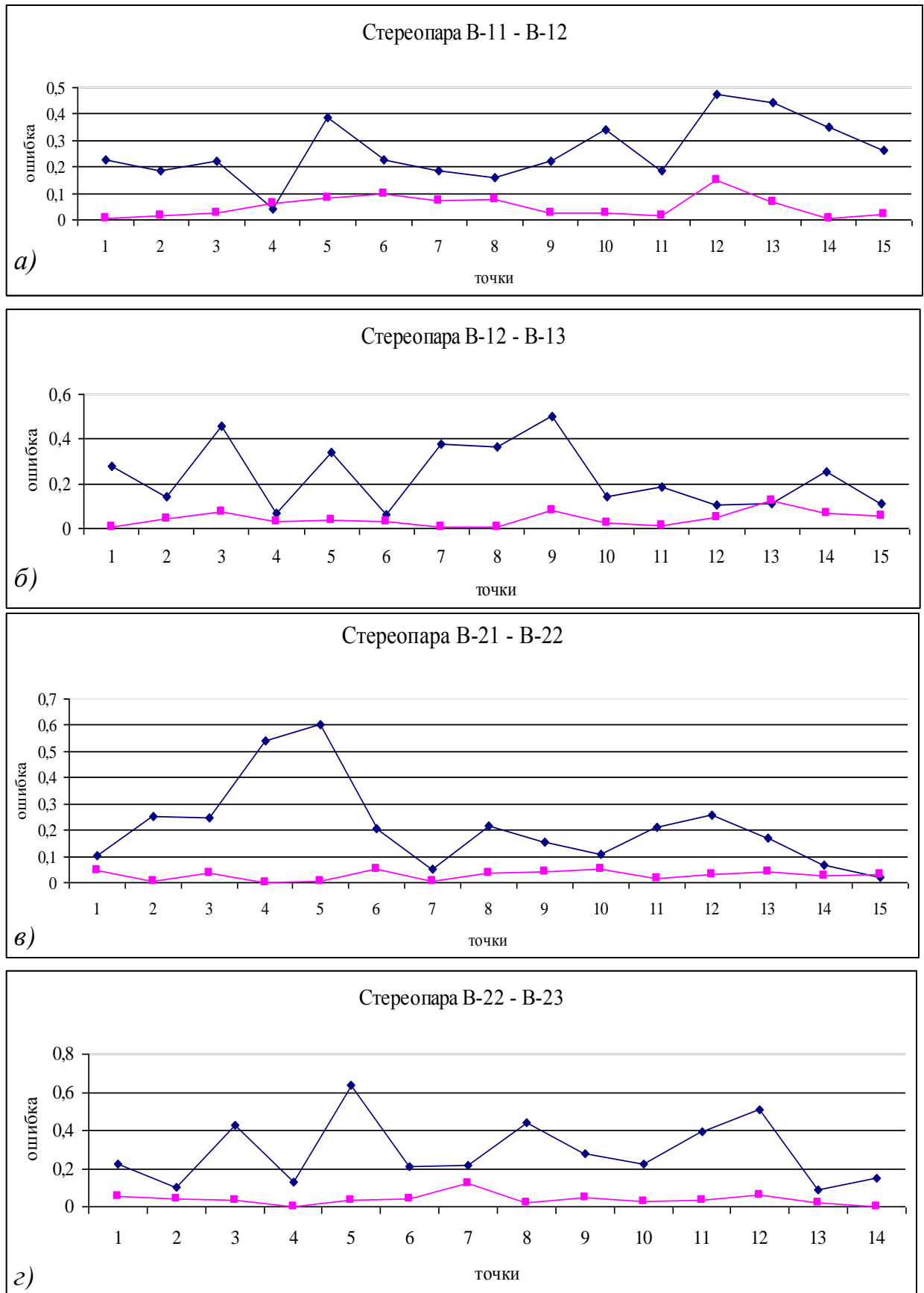


Рисунок Ж.1 – Графики ошибок взаимного ориентирования на одних и тех же точках на снимках блоков №1 (—◆—) и №2 (—■—): а – г) ошибки на разных стереопарах

ПРИЛОЖЕНИЕ И

(обязательное)

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КООРДИНАТЫ ТОЧЕК, ЗАМАРКИРОВАННЫХ
В БЛОКАХ № 1 И № 2

Таблица И.1 – Каталог точек триангуляции блоков № 1 и № 2

Поряд- ковый номер точки	Название точки	Вид точки при обработке снимков	X, м	Y, м	Z, м
1	101	опорная	830,00	2250,00	160,00
2	102	связующая	900,00	2200,00	162,00
3	103	связующая	900,00	1850,00	140,00
4	104	связующая	800,00	1700,00	145,00
5	105	связующая	800,00	1300,00	170,00
6	106	связующая	900,00	1250,00	172,00
7	107	контрольная	1300,00	2250,00	159,00
8	108	связующая	1350,00	2200,00	155,00
9	109	связующая	1250,00	1900,00	180,00
10	110	связующая	1350,00	1700,00	179,00
11	111	связующая	1250,00	1300,00	181,00
12	113	опорная	1700,00	2250,00	141,00
13	114	связующая	1750,00	2200,00	143,00
14	115	связующая	1750,00	1850,00	120,00
15	116	связующая	1700,00	1700,00	126,00
16	117	связующая	1700,00	1300,00	119,00
17	118	связующая	1750,00	1250,00	122,00
18	201	связующая	850,00	1450,00	165,00
19	202	опорная	800,00	1400,00	167,00
20	203	связующая	850,00	1000,00	190,00
21	204	связующая	800,00	850,00	192,00
22	205	опорная	850,00	450,00	196,00
23	206	связующая	800,00	400,00	195,00
24	207	связующая	1250,00	1450,00	175,00
25	208	связующая	1350,00	1400,00	177,00
26	209	связующая	1250,00	950,00	150,00
27	210	связующая	1350,00	900,00	156,00
28	211	контрольная	1250,00	500,00	180,00
29	212	связующая	1300,00	450,00	183,00
30	213	опорная	1750,00	1450,00	120,00
31	214	связующая	1700,00	1400,00	123,00
32	215	связующая	1700,00	950,00	158,00
33	217	опорная	1700,00	500,00	177,00
34	218	связующая	1750,00	400,00	179,00

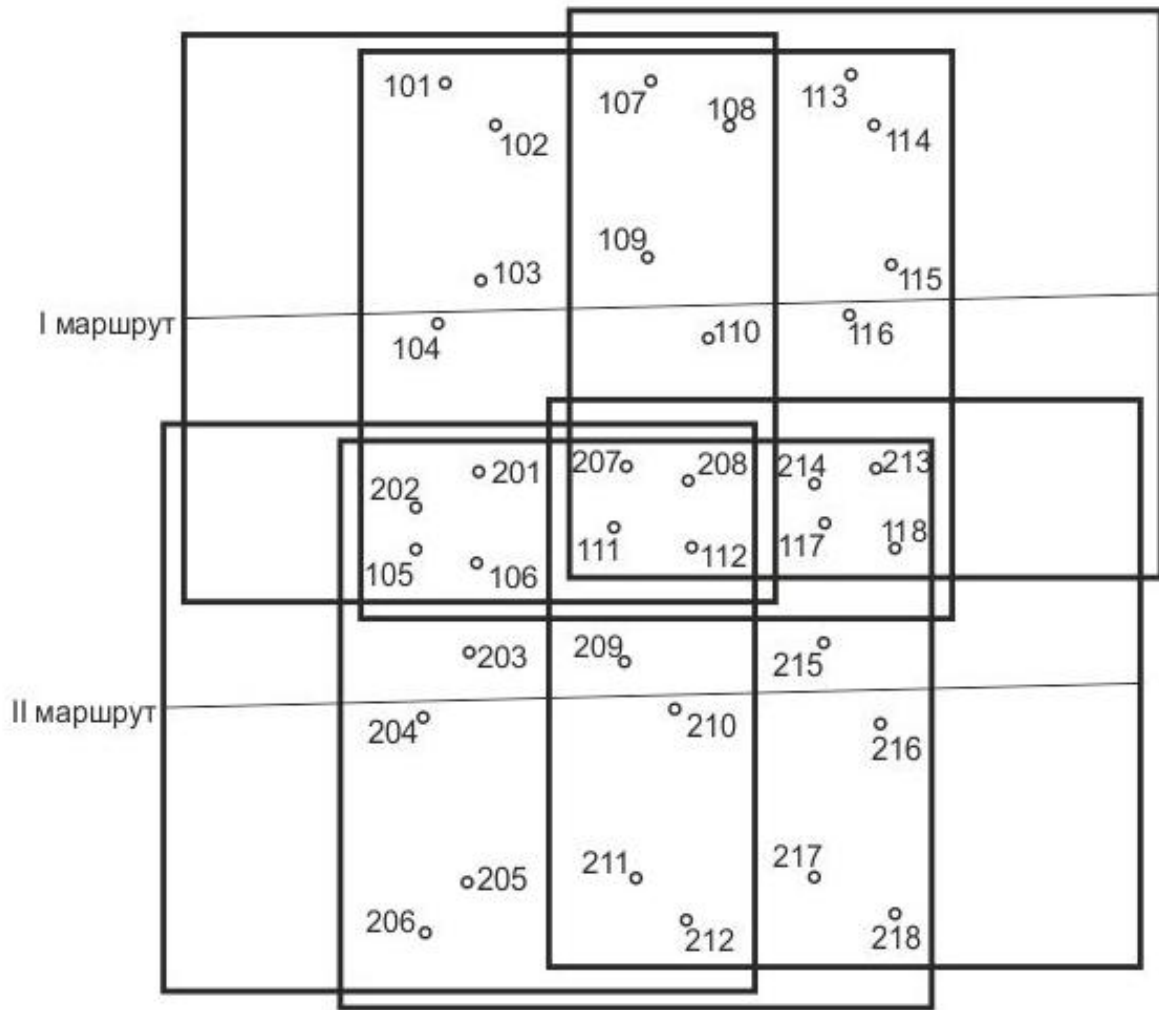


Рисунок И.1 – Схема расположения замаркированных точек макетных снимков блока