

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»

А. А. Михеева, В. В. Ялтыхов

ФОТОГРАММЕТРИЯ

ЦИФРОВАЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ

Учебно-методический комплекс
для студентов специальности 1-31 02 01 «География»

Новополоцк
ПГУ
2016

УДК 528.71(075.8)
ББК 26.12я73
М69

Рекомендован к изданию методической комиссией
геодезического факультета в качестве
учебно-методического комплекса (протокол № 2 от 24.10.2014)

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

инженер 2-й категории отд. инженерной подготовки
ОАО «Нафтан» Р. Н. КИРЕЕВ;
канд. техн. наук, декан геодезического факультета
Полоцкого государственного университета И. П. ШЕВЕЛЕВ

Михеева, А. А.

М69 Фотограмметрия. Цифровая фотограмметрия : учеб.-метод. комплекс
для студентов специальности 1-31 02 01 «География» / А. А. Михеева,
В. В. Ялтыхов. – Новополоцк : ПГУ, 2016. – 140 с.
ISBN 978-985-531-519-4.

Разработан на основе универсальной модели согласно действующему образовательному стандарту ОСРБ 1-31 02 01-2008. Приведены темы изучаемого курса с указанием объема в часах лекционных и лабораторных занятий, самостоятельной работы студентов. Кратко изложены теоретические основы цифровой фотограмметрии, приведен список литературы. Представлены задания, методические указания к выполнению лабораторных работ, вопросы для самоконтроля.

Предназначен для студентов геодезического факультета.

УДК 528.71(075.8)
ББК 26.12я73

ISBN 978-985-531-519-4

© Михеева А. А., Ялтыхов В. В., 2016
© Полоцкий государственный университет, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Рабочая программа	4
Введение.....	7
1. Сканеры.....	7
2. Система координат цифрового изображения	12
3. Наблюдение и измерение координат на цифровых изображениях	13
3.1. Монокулярный способ измерений.....	13
3.2. Внутреннее ориентирование	14
3.3. Стереоскопический способ наблюдений.....	21
3.4. Автоматическое измерение точек по стереопаре цифровых снимков	25
4. Аналитическая фототриангуляция	27
4.1. Выбор и измерение точек	28
4.2. Учет систематических ошибок фотоизображения	29
4.3. Учет деформации фотоизображения	30
4.4. Учет ошибок выравнивания фотопленки.....	30
4.5. Учет рефракции атмосферы	30
4.6. Учет дисторсии объектива аэрофотоаппарата.....	31
4.7. Учет влияния кривизны земли	33
4.8. Взаимное ориентирование	34
4.9. Определение координат точек в моделях	36
4.10. Создание модели маршрута.....	38
4.11. Объединение построенных маршрутов в блок	41
4.12. Внешнее ориентирование построенной сети фототриангуляции.....	42
4.13. Устранение деформаций в построенной сети фототриангуляции.....	43
4.14. Составление стереопар	44
5. Строгий способ построения сетей фототриангуляции	45
6. Учет систематических ошибок при построении сетей фототриангуляции по способу связок с самокалибровкой	53
7. Цифровая модель рельефа.....	56
8. Построение горизонталей.....	63
9. Ортотрансформирование.....	66
10. Векторизация	73
10.1. Оформление рамок листов карт	77
10.2. Опорные пункты.....	77
10.3. Гидрография и гидротехнические сооружения	77
10.4. Населенные пункты.....	79
10.5. Растительный покров и грунты	84
Методические указания к выполнению лабораторных работ	88
Задания для самостоятельной работы студентов	133
Вопросы для самоконтроля	136
Литература	139

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время составление и обновление топографических карт и планов в подавляющем большинстве случаев выполняется фотограмметрическими методами. С развитием компьютерной техники создавать и обновлять карты стали на цифровых фотограмметрических станциях. Переход на цифровые методы обработки аэрокосмических снимков способствует сокращению полевых работ и увеличению производительности труда. В связи с этим возрастают требования подготовки студентов в области цифровой фотограмметрии. Цифровые методы обработки снимков целесообразно знать студентам следующих специальностей и специализаций: инженерная геодезия, фотограмметрия, геодезическое обеспечение кадастра и география дневной и заочной форм обучения.

Цель преподавания дисциплины – дать необходимые знания в области цифровой фотограмметрии, развить у студентов способность применять полученные знания на производстве.

Фрагмент рабочей программы, посвященный цифровым методам обработки снимков, для студентов специальности 1-31 02 01 «География» приведен ниже.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Лекционный курс

№ п/п	Наименование темы	Содержание	Объем, часы
Восьмой семестр			
1	Цифровые изображения аэроснимков. Аппаратные и программные средства.	Общие понятия о цифровом изображении. Характеристики цифрового изображения. Растровое изображение. Устройства ввода цифровой информации (сканеры). Ошибки растровых изображений. Выбор параметров сканирования фотоматериалов. Представление топографических карт и аэроснимков в растровой форме. Фотограмметрические методы создания и обновления карт. Аппаратные и программные средства. Программный комплекс «Photomod». Состав, назначение и основные функции.	6

2	Принципы измерения цифровых изображений аэроснимков. Построение аналитической фототриангуляции на цифровых фотограмметрических станциях.	Принципы измерения координат точек на цифровых изображениях снимков. Стереоскопическое наблюдение цифровых снимков. Автоматическая идентификация точек цифровых снимков. Преобразование измеренных координат растрового изображения в систему координат снимка. Внутреннее ориентирование снимков на цифровых фотограмметрических станциях (ЦФС). Определение систематических искажений и параметров внутреннего ориентирования. Взаимное ориентирование снимков на ЦФС. Построение сети аналитической фототриангуляции методом независимых моделей (создание модели маршрута). Составление базы данных по стереопарам.	12
3	Цифровая модель рельефа. Ортофототрансформирование.	Способы представления цифровой модели рельефа. Пространственная триангуляция (TIN), типы моделей рельефа. Создание модели рельефа на ЦФС. Построение горизонталей. Редактирование, импорт и экспорт цифровой модели рельефа. Принцип цифрового трансформирования снимков (ортофотопланы). Построение ортоизображения на ЦФС. Привязка растрового изображения (ортофотоплана) к геодезической системе координат.	14
4	Векторизация на цифровых фотограмметрических станциях.	Векторные объекты, их свойства и атрибуты. Работа со слоями. Типы векторных объектов. Представление топографических карт в векторной форме. Структура цифровой карты. Создание электронной карты (плана). Условные знаки. Векторизация растровых изображений (ортофотопланов). Векторизация растровых изображений в стереорежиме. Работа с окнами и управление маркером (режимы трассировки) в модуле «Photomod StereoDraw» Редактирование векторных объектов. Импорт и экспорт векторных объектов.	12

Лабораторные занятия

№ п/п	Наименование	Объем, часы
Восьмой семестр		
1	Знакомство с программным комплексом «Photomod»	4
2	Создание проекта сети фототриангуляции. Внутреннее ориентирование снимков в «Photomod»	2
3	Выполнение измерений для построения сети фототриангуляции в «Photomod»	4
4	Уравнивание сети фототриангуляции в модуле «Photomod Solver».	2
5	Построение модели рельефа в модуле «Photomod DTM».	8
6	Создание ортофотоплана	2
7	Векторизация площадных, линейных и точечных объектов в модуле «Photomod StereoDraw». Импорт и экспорт данных.	10

Управляемая самостоятельная работа студентов

№ п/п	Наименование самостоятельной работы студента	Объем в часах
Восьмой семестр		
1	Составить структуры матриц коэффициентов уравнений поправок A и нормальных уравнений B .	6

ВВЕДЕНИЕ

Обработка снимков в цифровой фотограмметрии выполняется на цифровых фотограмметрических станциях (системах) (ЦФС), которые имеют название цифровых стереофотограмметрических систем (ЦСФС) или цифровых фотограмметрических рабочих станций (ЦФРС).

Под цифровой фотограмметрической станцией понимается совокупность программных и технических средств, обеспечивающих выполнение комплекса процессов и операций, необходимых для получения цифровой карты по цифровым изображениям.

Цифровая фотограмметрическая станция должна обеспечивать выполнение следующих основных процедур:

1. Сканирование снимков.
2. Возможность вывода на экран измерительной марки.
3. Вывод, фиксацию и сохранение координат точек.
4. Возможность импорта существующих файлов с координатами.
5. Построение сетей фототриангуляции.
6. Возможность создания и отображения элементов ситуации и рельефа.

1. СКАНЕРЫ

Цифровое изображение получают двумя способами. Один из них предполагает сканирование аэрофотонегативов, полученных в процессе аэрофотосъемки; второй – использование цифровых съемочных систем непосредственно в процессе съемки.

Сканирование аэрофотоснимков выполняют с помощью оптико-электронных приборов – сканеров. Сканеры появились в 80-х годах XX века. Название произошло от английского слова Scan, что означает «пристально разглядывать». Изобретение сканера дало толчок развитию аналитических методов обработки.

Суть работы сканера состоит в последовательном просвечивании сканируемого материала (в нашем случае аэрофотонегатива), который укладывается на рабочую поверхность сканера. Световые потоки попадают на светочувствительные элементы и преобразуются в цифровую форму. Чувствительные элементы называют CCD (Couple Charge Device), на русском ПЗС (Прибор с зарядовой связью).

Созданию ПЗС послужил тот факт, что кремний, как и серебро, способен реагировать на видимый свет. Серебро под воздействием света чернеет, а в кремнии под воздействием света возникают электроны. Яркий свет обеспечивает большой заряд. Заряды считывают и переводят в цифровую форму.

Для сканирования аэрофотонегативов должны применяться фотограмметрические сканеры. Число производителей фотограмметрических сканеров невелико. Стоимость их высока. Поэтому раньше предпринимались попытки применять менее дорогостоящие полиграфические сканеры формата А3. Однако реальная точность сканеров стоимостью до 10 тысяч долларов составляет 20-50 мкм, несмотря на калибровку таких сканеров и все программные ухищрения. Каждый микрон потерянной точности влечет за собой значительные финансовые затраты, связанные с неизбежной необходимостью увеличения масштаба залета. Более крупный масштаб фотографирования не только увеличивает стоимость залета, но также повышает объем, трудоемкость и стоимость последующей фотограмметрической обработки за счет увеличения количества снимков и числа опознаков на единицу площади.

Конструктивно фотограмметрический сканер имеет массивное основание, направляющие из специальной стали, обработанные и выставленные с высокой точностью, прецизионные подшипники и т.д.

Примерная схема сканера приведена на рисунке 1.

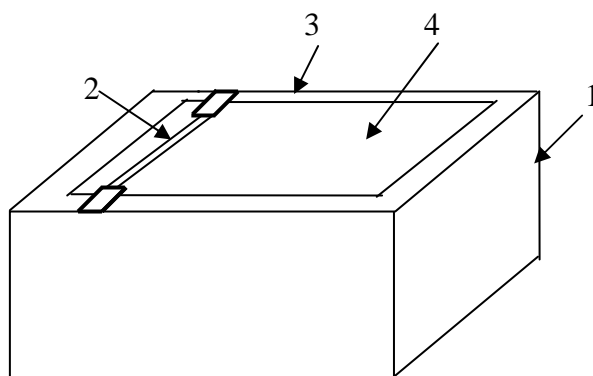


Рис. 1: 1 – корпус; 2 – линейка светочувствительных элементов;
3 – направляющие; 4 – рабочая область

Аэрофотонегатив укладывается на рабочую поверхность и освещается лампой, расположенной внутри корпуса под негативом.

На каждом шаге каретки 2 сканер фиксирует одну горизонтальную полосу оригинала, разбитую на определенное число пикселей, т. е. элементарных ячеек на линейке ПЗС. Такое изображение называют растровым.

Сканер для фотограмметрических целей обязательно должен работать на просвет. Сканер должен отвечать следующим основным условиям, вытекающим из его геометрической схемы (рис. 2):

1. Должна быть обеспечена прямолинейность направляющих.

2. Направляющие должны быть параллельны между собой.

3. Центры считывающих элементов на линейке ПЗС должны лежать на одной прямой.

4. Чувствительные элементы должны равномерно располагаться на линейке.

5. Должна быть обеспечена перпендикулярность линейки направляющим.

6. Должно быть обеспечено равенство линейки расстоянию между направляющими.

7. Должна быть обеспечена параллельность рабочей поверхности сканера и плоскости, проходящей через направляющие.

Нарушение перечисленных условий приводит к геометрическим ошибкам сканирования. Поэтому сканер, используемый для целей фотограмметрии, должен периодически проверяться и исследоваться. Существуют специальные программы для исправления геометрических искажений, вносимых при сканировании. Для компенсации искажений строится поле искажений сканера, которое получают по результатам сканирования контрольной сетки. Используя поле искажений, вводятся поправки в координаты точек изображения.

Внешний вид фотограмметрического сканера «Дельта» приведен на рисунке 3.

Некоторые характеристики сканеров приведены в таблице 1.

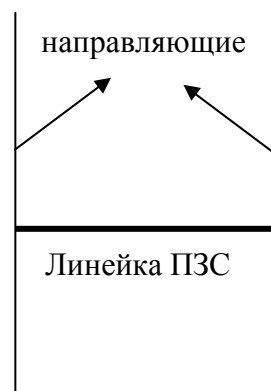


Рис. 2

Таблица 1

Наименование характеристики	Характеристика фотограмметрического сканера			
	ОАО «Пеленг», РБ	Дельта, Украина	СКФ-11, Россия	DSW500 LH System
Размер снимка, мм	300×400	300×450	300×300	260×260
Размер пиксела, мкм	5	8 – 128	8	9
Ошибка сканирования, мкм	±2	±3	±3	±2



Рис. 3. Фотограмметрический сканер «Дельта» (Украина)

Как видим, точность размещения элементов на линейке ПЗС должна быть очень высокой. Геометрическая точность является основным параметром сканера, который определяется при помощи контрольной сетки, нанесенной с микронной точностью на стеклянную пластину. В результате измерения крестов сетки на ее отсканированном изображении определяется средняя квадратическая погрешность сканирования. Из таблицы 1 видно, что ошибка сканирования у приведенных сканеров не превышает ± 3 мкм.

Полученное в результате сканирования растровое изображение характеризуется геометрическим и радиометрическим разрешением.

Геометрическое разрешение цифрового изображения определяет линейный размер пиксела и представляется либо его линейной величиной в микронах (мкм) или числом точек на дюйм (dpi – dots per inch).

Величина геометрического разрешения определяет качество изображения, точность вычислительной обработки, возможность увеличения и т. д.

Минимальный размер пиксела приведен в таблице 1. На практике крайне редко применяется сканирование с минимальным размером пиксела. Обычное значение пиксела при сканировании черно-белых снимков составляет 12 – 24 мкм. По рекомендации Международного общества фотограмметрии и дистанционного зондирования минимальная величина разрешения должна составлять не менее 4-5 мкм.

При использовании в сканере зеркального объектива, имеющего увеличение 1:1, минимальный размер пиксела совпадает с размером пиксела

ПЗС-сенсора. Например, 7 мкм у PhotoScan или 8 мкм у сканера «Дельта» (табл. 1). Другие размеры, кратные минимальному размеру, получают с помощью цифрового сложения и усреднения оптических плотностей исходных пикселей. Так, четыре 8-микронных пиксела (2×2) дадут в результате один 16-микронный. При этом происходит минимальная потеря качества изображения.

Другие размеры, не кратные минимальному размеру, могут быть получены только в результате программного пересчета. При этом всегда происходит определенная потеря качества исходного изображения. Для устранения данной проблемы некоторые сканеры имеют оптическую систему с изменяемым увеличением, которая позволяет настроить сканер на любой выбранный размер пиксела. В этом случае используют линзовые объективы, преимуществом которых является переменное увеличение, позволяющее плавно изменять минимальный размер пиксела. Объективы, состоящие из одной линзы, дают очень большие искажения, поэтому в фотограмметрических сканерах используют дорогостоящие объективы с малой дисторсией.

Радиометрическое разрешение определяется числом градаций цветов или тонов. Сканер для фотограмметрических целей должен передавать минимум 256 градаций (8 бит) для черно-белых снимков, что достаточно близко к диапазону зрения человека. Чем больше бит используется при переводе фотографического изображения в цифровой вид, тем больше градаций яркости способен различить сканер, тем с большей детальностью будут передаваться все малоконтрастные детали снимка.

Появление фотограмметрических сканеров с автоматической перемоткой фотопленки позволило еще больше повысить эффективность и оперативность обработки (сканер DSW600), что особенно полезно при значительных объемах сканирования. Фотограмметрический сканер-автомат способен за 20-30 часов без вмешательства оператора отсканировать фильм, содержащий около 300 снимков размером 23×23 см.

Последняя модель сканера фирмы Leica Geosystems DSW600 использует площадной светочувствительный элемент (ПЗС-матрицу), что позволило существенно ускорить процесс сканирования, но требует более мощного осветителя и повышенных требований к его калибровке.

В настоящее время используемые для аэрофотосъемки аэрофотокамеры с форматом кадра 23×23 см с последующим сканированием фильма на высокоточном фотограмметрическом сканере является наиболее эффективной и хорошо изученной технологией.

2. СИСТЕМА КООРДИНАТ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Цифровое изображение, полученное на сканере, называют растровым. Оно вводится в компьютер и хранится в памяти в виде матрицы, элементы $a_{i,j}$ (рис. 4) которой несут информацию об оптических плотностях (степени почернения), если изображение в градациях серого, и цвете элементарных участков, если изображение цветное.

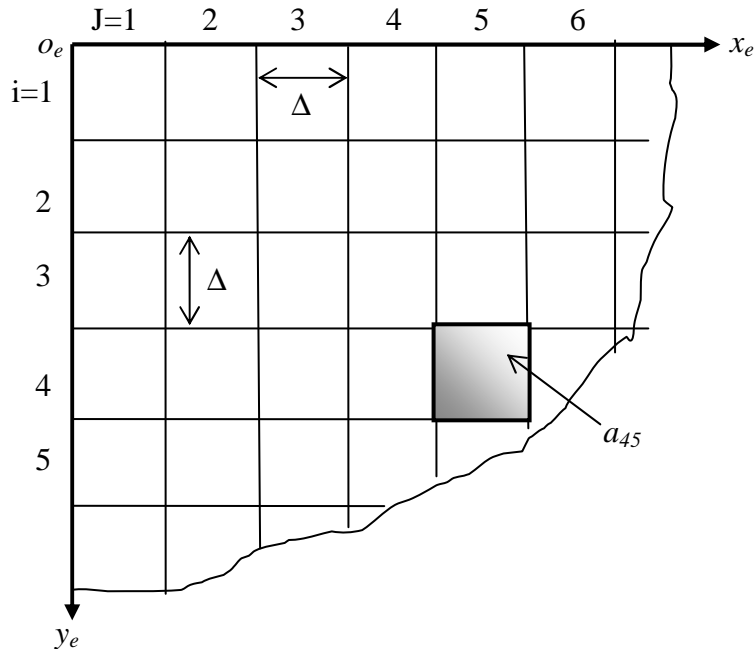


Рис. 4

Начало координат цифрового изображения находится в левом верхнем углу o_e , направление осей x_e , y_e , показано на рис. 4.

Номер строки i и столбца j элемента $a_{i,j}$ позволяют определить координаты элемента матрицы в пикселах:

$$x_p=j; \quad y_p=i. \quad (1)$$

Например, для элемента матрицы a_{45} : $x_p=5$, $y_p=4$.

Для определения фактических координат центров пикселей необходимо знать размеры сторон пикселя изображения Δ , которое соответствует разрешению, с которым был отсканирован снимок. В фотограмметрии предполагается, что пиксел имеет квадратную форму. Фактические координаты центров пикселей в системе координат цифрового изображения можно определить по формулам

$$x_e=(x_p-0,5)\Delta; \quad y_e=(y_p-0,5)\Delta. \quad (2)$$

Систему координат $o_e x_e y_e$ называют системой координат растрового изображения.

3. НАБЛЮДЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ КООРДИНАТ НА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Для измерения координат точек цифрового изображения снимок визуализируют на экране дисплея. Для измерения координат служит марка или, как ее часто называют в компьютерных технологиях, маркер. Вид марки (точка, крест и другие фигуры) и цвет может выбрать оператор. С помощью мыши и клавиатуры компьютера наводят измерительную марку на точку изображения.

Используют монокулярный способ измерений и стереоскопический.

3.1. Монокулярный способ измерений

Монокулярный способ используют при нанесении на цифровые снимки опорных точек, которые должны быть отмечены на всех снимках, на которые они попадают, для измерения координатных меток при внутреннем ориентировании и других целей. При измерении опорных точек опознают нужную точку и наводят на нее марку. Считывание координат в системе координат $o_e x_e y_e$ (см. рис. 4) и преобразование их в ту или иную систему выполняется в автоматическом режиме.

Координатные метки имеют различный вид, число их также может быть разным (рис. 5).

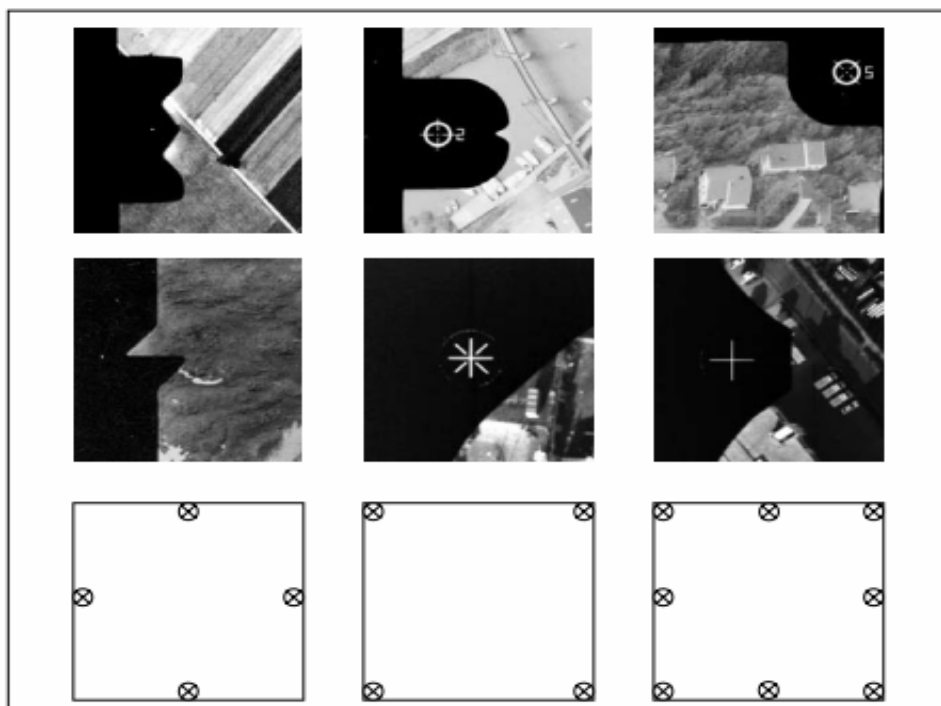


Рис. 5

3.2. Внутреннее ориентирование

Внутреннее ориентирование выполняется с целью вычисления значений параметров, определяющих положение и ориентацию системы координат снимка относительно системы координат цифрового изображения. Эти параметры определяют по координатным меткам. Для измерения координатных меток наводят маркер на выбранную координатную метку. Фиксация измерений выполняется автоматически при нажатии соответствующей клавиши на клавиатуре.

В программном комплексе Photomod после измерения двух координатных меток при выборе третьей и последующих происходит автоматическое позиционирование маркера в окрестности текущей метки. Точное наведение осуществляется оператором.

Начиная с версии 3.6 комплекса Photomod, имеется возможность автоматически измерять координатные метки, однако необходимо выполнить их измерения хотя бы на одном изображении вручную. В результате ручного измерения программа создает шаблоны для каждой координатной метки. Автоматическая работа заключается в поиске аналогичных по шаблону координатных меток на всех снимках блока. Измеренные координатные метки будут получены в системе координат цифрового изображения.

В программном комплексе Photomod имеется пять вариантов внутреннего ориентирования, которые применяют в зависимости от того, какие параметры калибровки записаны в паспорте камеры, вида съемки: цифровая или аэрофотосъемка и т.п. Рассмотрим варианты внутреннего ориентирования.

Первый вариант применяют в том случае, когда в паспорте аэрокамеры заданы координаты главной точки, и оси системы координат снимка и цифрового изображения параллельны между собой.

Этот вид внутреннего ориентирования применяется тогда, когда съемка выполняется цифровой камерой.

В цифровых камерах координатные метки, как правило, отсутствуют и оси координат цифрового изображения параллельны осям координат снимка (рис. 6). В этом случае процесс сканирования снимков не производится.

Показанную на рисунке 6 систему координат $o_k x_k y_k$ целесообразно применять для калибровки, так как в этом случае наиболее просто перейти в систему координат снимка. oxy – система координат цифрового снимка с началом в главной точке снимка.

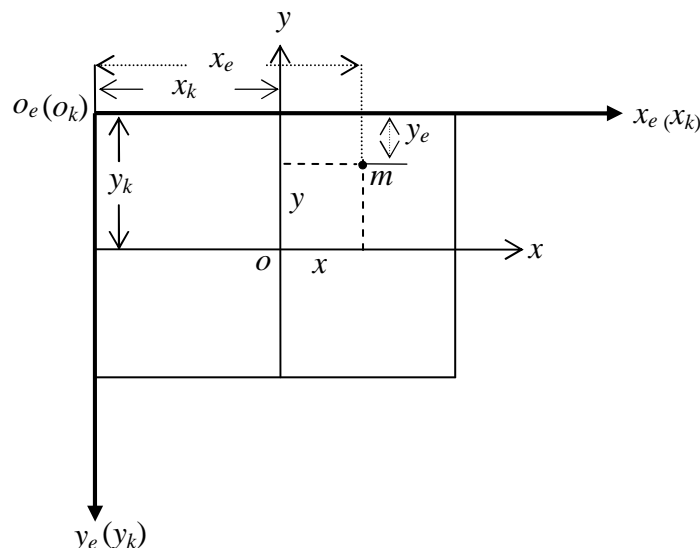


Рис. 6: O_e – начало координат цифрового изображения;
 x_e, y_e – направление осей координат цифрового изображения;
 $O_k x_k y_k$ – система координат, в которой выполнена калибровка цифровой камеры

Для рассматриваемого случая переход в систему координат снимка выполняется по формулам

$$x = x_e - x_{O_k}; \quad y = y_{O_k} - y_e. \quad (3)$$

В формулах (3) x_e и y_e поменялись местами, так как положительные направления осей координат y_e и y не совпадают.

Второй вариант внутреннего ориентирования выполняют в том случае, если в ходе калибровки определялись элементы внутреннего ориентирования, но не определялись расстояния между противоположными координатными метками. Вид преобразования определим на основании рисунка 7.

Для перехода в систему координат снимка используют координатные метки, которым присваивают стандартные номера. После измерения координатных меток и точек на снимках их координаты будут определены в системе координат цифрового изображения $O_e x_e y_e$. Для точки m будут измерены координаты x_{em}, y_{em} . Для дальнейшей обработки необходимо знать координаты точек в системе координат снимка, т.е. в системе координат $O x y$. Для точки m такими координатами будут x и y . Для перехода из системы координат $O_e x_e y_e$ в систему координат снимка $O x y$ измеряют координаты координатных меток (см. рис. 7).

Самый простой способ определения координат точки o в системе координат $O_e x_e y_e$ – это взять среднее из координат всех координатных меток,

однако этот метод не обеспечивает высокой точности, поэтому в компьютерных технологиях не применяется.

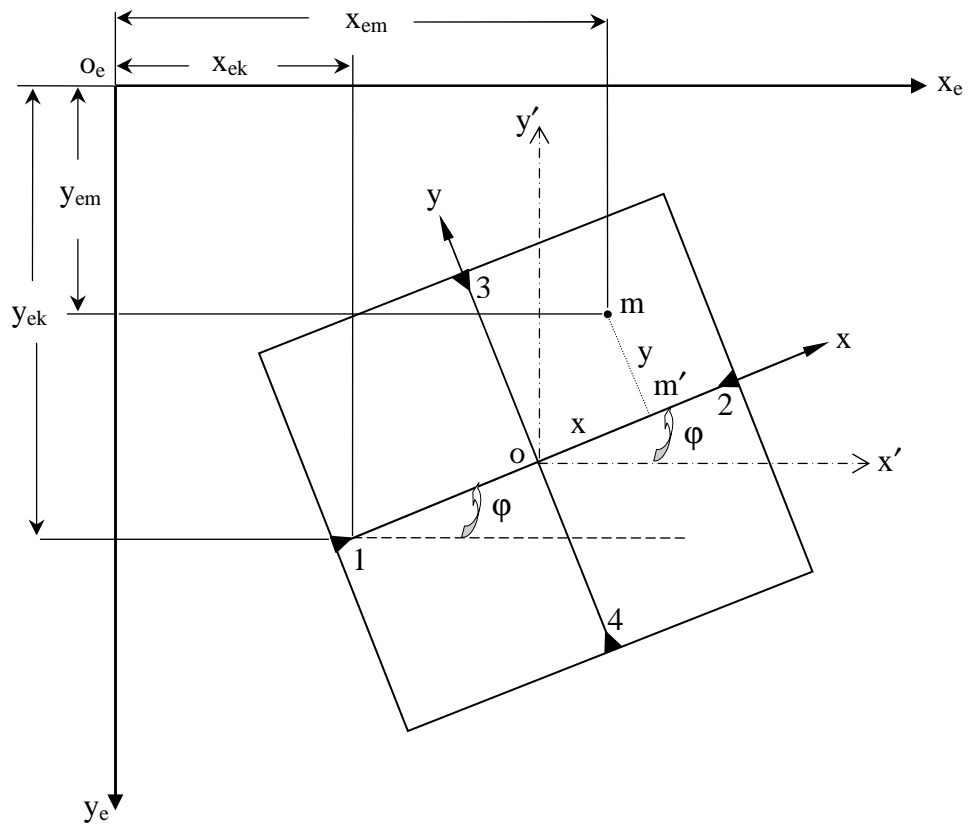


Рис. 7

В компьютерных технологиях положение точки o – начало координат снимка в системе координат $o_e x_e y_e$ находят как пересечение линий, соединяющих противоположные координатные метки. Уравнение прямой, проходящей через три точки, имеет вид

$$\frac{x_{ek1} - x_{eo}}{y_{ek1} - y_{eo}} = \frac{x_{ek1} - x_{ek2}}{y_{ek1} - y_{ek2}}; \quad \frac{x_{ek3} - x_{eo}}{y_{ek3} - y_{eo}} = \frac{x_{ek3} - x_{ek4}}{y_{ek3} - y_{ek4}}. \quad (4)$$

После преобразования уравнений (4) с двумя неизвестными x_{eo}, y_{eo} решение примет вид

$$x_{eo} = \frac{D_X}{D}; \quad y_{eo} = \frac{D_Y}{D}, \quad (5)$$

где x_{eo}, y_{eo} – координаты главной точки в системе координат цифрового изображения, которые будем называть местами нулей (МО) цифрового изображения.

Величины D_X , D_Y и D подсчитывают по формулам

$$D_X = \begin{vmatrix} -(x_{ek1} - x_{ek2}) & [(x_{ek1} - x_{ek2})y_{ek1} - (y_{ek1} - y_{ek2})x_{ek1}] \\ -(x_{ek3} - x_{ek4}) & [(x_{ek3} - x_{ek4})y_{ek3} - (y_{ek3} - y_{ek4})x_{ek3}] \end{vmatrix}; \quad (6)$$

$$D_Y = \begin{vmatrix} [(x_{ek1} - x_{ek2})y_{ek1} - (y_{ek1} - y_{ek2})x_{ek1}] & (y_{ek1} - y_{ek2}) \\ [(x_{ek3} - x_{ek4})y_{ek3} - (y_{ek3} - y_{ek4})x_{ek3}] & (y_{ek3} - y_{ek4}) \end{vmatrix}; \quad (7)$$

$$D = \begin{vmatrix} (y_{ek1} - y_{ek2}) & -(x_{ek1} - x_{ek2}) \\ (y_{ek3} - y_{ek4}) & -(x_{ek3} - x_{ek4}) \end{vmatrix}. \quad (8)$$

Координаты точек снимка во вспомогательной системе координат $o'x'y'$ (см. рис. 7), оси которой параллельны осям координат цифрового изображения, получим как

$$x' = x_e - MOx_e; \quad y' = MOy_e - y_e. \quad (9)$$

MOx_e имеет знак плюс, MOy_e – знак тоже плюс. Как и в предыдущем случае, места нулей в формулах (9) поменялись местами, так как оси координат y и y_e имеют противоположные направления.

Координаты точки m в системе координат $o'x'y'$ будут

$$x'_m = x_{em} - MOx_e; \quad y'_m = MOy_e - y_{em}. \quad (10)$$

Применительно к рисунку 7 MOx_e имеет знак плюс; MOy_e – знак плюс. Координаты точки m в системе координат цифрового изображения x_e и y_e также положительны. Подставив определенные значения мест нулей и измеренные координаты точки m на цифровом изображении в формулу (10), получим координаты точки m в системе координат $o'x'y'$, которые также будут положительны.

Для перехода из системы координат $o'x'y'$ в систему координат снимка, кроме координат точки o , в системе координат $o_e x_e y_e$ необходимо знать угол разворота системы координат снимка относительно системы координат исходного цифрового изображения φ . Угол φ необходим для определения направляющих косинусов и перехода из системы координат $o'x'y'$ в систему координат снимка $o x y$. Угол φ можно определить на основании рисунка 7 по формуле

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{y_{ek2} - y_{ek1}}{x_{ek2} - x_{ek1}} = \frac{x_{ek4} - x_{ek3}}{y_{ek3} - y_{ek4}} = \frac{\Delta y_{k2-1}}{\Delta x_{k2-1}} = \frac{\Delta x_{k4-3}}{\Delta y_{k3-4}}. \quad (11)$$

По формуле (11) угол φ определяют дважды по разностям координат противоположных координатных меток. В обработку берется среднее значение, если расхождение углов $\Delta\varphi$ не превышает установленной величины.

Связь систем координат $ox'y'$ и oxy следующая:

$$\begin{vmatrix} x \\ y \end{vmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix} \begin{vmatrix} x' \\ y' \end{vmatrix}, \quad (12)$$

где $a_1 = \cos \angle x'ox = \cos\varphi$; $a_2 = \cos \angle x'oy = -\sin\varphi$; $b_1 = \cos \angle xoy' = \sin\varphi$;
 $b_2 = \cos \angle yoy' = \cos\varphi$.

Координаты точек в системе координат снимка будут:

$$x = a_1x' + a_2y' = x' \cos\varphi - y' \sin\varphi, \quad (13)$$

$$y = b_1x' + b_2y' = x' \sin\varphi + y' \cos\varphi, \quad (14)$$

или можно воспользоваться следующими формулами:

$$x = (x_e - MOx_e) \cos\varphi - (MOy_e - y_e) \sin\varphi, \quad (15)$$

$$y = (x_e - MOx_e) \sin\varphi + (MOy_e - y_e) \cos\varphi. \quad (16)$$

Третий вариант внутреннего ориентирования применяют в том случае, когда в ходе калибровки были определены, кроме элементов внутреннего ориентирования, расстояния между противоположными координатными метками. В этом случае можно учесть систематическую деформацию аэрофотонегатива. В данном варианте формулы преобразования (13) и (14) примут вид

$$x = k_x(x' \cos\varphi - y' \sin\varphi), \quad (17)$$

$$y = k_y(x' \sin\varphi + y' \cos\varphi), \quad (18)$$

где k_x, k_y – коэффициенты систематической деформации снимка по осям координат x и y соответственно.

Коэффициенты систематической деформации вычисляют по формулам

$$k_x = \frac{l_{x_0}}{l_x}, \quad k_y = \frac{l_{y_0}}{l_y}, \quad (19)$$

где l_{x_0}, l_{y_0} – определенные при калибровке расстояния между противоположными координатными метками вдоль осей координат x и y соответственно;

l_x, l_y – аналогичные расстояния между координатными метками, полученные по измерениям координат координатных меток по формулам

$$l_x = \sqrt{(x_{e_{k2}} - x_{e_{k1}})^2 + (y_{e_{k2}} - y_{e_{k1}})^2}; \quad l_y = \sqrt{(x_{e_{k4}} - x_{e_{k3}})^2 + (y_{e_{k4}} - y_{e_{k3}})^2}. \quad (20)$$

Четвертый вариант внутреннего ориентирования реализован для случая, когда в паспорте аэрофотоаппарата заданы координаты координатных меток. В этом случае преобразование координат в систему координат снимка осуществляется по формулам:

$$x = a_0 + a_1 x_e + a_2 y_e; \quad (21)$$

$$y = b_0 + b_1 x_e + b_2 y_e. \quad (22)$$

В формулах (21) и (22) шесть неизвестных коэффициентов a_i, b_i . Их определяют по измерениям координат координатных меток x_{e_k}, y_{e_k} в системе координат цифрового изображения $o_e x_e y_e$. При наличии четырех координатных меток будем иметь восемь уравнений, в которых неизвестны коэффициенты $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$. Так как имеются избыточные измерения, то задача будет решаться по способу наименьших квадратов.

Когда в паспорте аэрофотоаппарата записаны координаты координатных меток x, y , то эти значения для всех координатных меток в системе координат снимка известны. Координаты этих же меток в системе координат цифрового изображения x_{e_k}, y_{e_k} измеряют на компьютере. Так что для координатных меток неизвестными в уравнениях (21) и (22) являются только коэффициенты. Представим уравнения (21) и (22) в следующем виде:

$$a_0 + a_1 x_{e_k} + a_2 y_{e_k} - x_k = 0, \quad (23)$$

$$b_0 + b_1 x_{e_k} + b_2 y_{e_k} - y_k = 0. \quad (24)$$

В матричной форме для n координатных меток система уравнений (23) и (24) будет иметь вид

$$AX + L = V, \quad (25)$$

где

$$A = \begin{vmatrix} 1 & x_{e_{k1}} & y_{e_{k1}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_{e_{k1}} & y_{e_{k1}} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{e_{kn}} & y_{e_{kn}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_{e_{kn}} & y_{e_{kn}} \end{vmatrix}; \quad X = \begin{vmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{vmatrix}; \quad L = \begin{vmatrix} x_{k1} \\ y_{k1} \\ \cdot \\ x_{kn} \\ y_{kn} \end{vmatrix}; \quad (26)$$

A – матрица коэффициентов при неизвестных; X – вектор неизвестных; L – вектор координат координатных меток (паспортные данные).

На основе уравнений (25) составляют уравнения вида

$$BX + C = 0, \quad (27)$$

где $B=A^T A$; $C=A^T L$.

В ходе решения системы уравнений (27) получим вектор неизвестных X

$$X = -B^{-1}C = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}. \quad (28)$$

После того, как определены неизвестные коэффициенты a_i , b_i , можно определить координаты любых точек в системе координат снимка по формулам (23) и (24). При этом варианте преобразований исключаются также систематические искажения.

Внутреннее ориентирование считают выполненным верно, если значения вектора поправок V уравнений (25) не превышают заданных величин.

Пятый вариант предполагает использовать не аффинные преобразования, как в четвертом варианте, а проективные преобразования. В традиционной (перспективной) фотограмметрии аэрофотоснимок представляет собой центральную проекцию сфотографированных объектов на плоскость. По ряду причин, например, имеет место неравномерная деформация фильма, или линии, соединяющие противоположные координатные метки, не перпендикулярны между собой, снимки не являются перспективными. Кроме перекоса осей координат, снимки могут иметь разные масштабы по осям координат x и y , т.е. стать проективными по отношению к снимаемому объекту. Обработку таких снимков следует проводить с учетом проективных преобразований, которые предполагают использование формул

$$x = \frac{A_1 x_c + A_2 y_c + A_3}{C_1 x_c + C_2 y_c + 1}; \quad (29)$$

$$y = \frac{B_1 x_c + B_2 y_c + B_3}{C_1 x_c + C_2 y_c + 1}, \quad (30)$$

где A_i , B_i , C_i – параметры проективного преобразования.

Для определения параметров аффинного преобразования по формулам (23) и (24) необходимо измерить не менее трех изображений координатных меток, а для определения параметров проективного преобразования – не менее четырех изображений координатных меток, так как в уравнениях (29) и (30) содержится восемь неизвестных коэффициентов.

3.3. Стереоскопический способ наблюдений

С появлением компьютерных технологий стали изобретать разнообразные способы получения стереоэффекта на экране монитора.

Стереоскопические наблюдения двух изображений возможны при выполнении тех же условий, что и при наблюдении реальных аэрофотоснимков. Одним из основных условий получения стереоэффекта является требование наблюдения каждого снимка только одним глазом.

Как и в случае наблюдения реальных аэрофотоснимков, способы получения стереоэффекта те же: оптический, анаглифический, затворный, поляризационный.

Оптический способ предполагает вывод зоны перекрытий снимков соответственно в левую и правую части экрана (рис. 8).



Рис. 8

Получение стереоэффекта достигается применением специальной стереоприставки, установленной перед монитором (рис. 9).

В этом случае нет потерь света, что имеет место в других способах. Недостаток – неподвижное положение оператора.



Рис. 9

Анаглифический способ требует наличия анаглифических очков. В этом случае перекрывающиеся части левого и правого изображений окрашиваются в дополнительные цвета, как правило, в синий и красный. Полученное изображение рассматривается через анаглифические очки, стекла которых окрашены в те же цвета. В результате наблюдатель видит стереоэффект. Метод прост в реализации. Недостаток – большая потеря света.

Затворный способ получения стереоэффекта основан на специфике представления изображения на экране монитора. Изображение формируется в видеопамяти и поочередно выводится на экран. Наблюдения выполняются через специальные (жидкокристаллические) очки (рис. 10), представляющие собой пару плоскопараллельных пластин с заключенным между ними слоем жидкого кристалла, который при воздействии на него электрического импульса может менять интенсивность проходящего через него света так, что в каждый момент наблюдатель воспринимает изображение на экране монитора только одним глазом: левым или правым.



Рис. 10

Смена страниц кадров на экране монитора синхронизирована с изменением прозрачности пластин затворных очков при помощи специального канала связи. При частоте смены кадров более 100 Гц изображение воспринимается без мерцания. Недостатки – снижение яркости изображения, что приводит к утомляемости оператора, и высокая цена.

Встречаются и следующие методы разделения изображения:

1) одна половина стереопары выводится на четных строках, другая половина – на нечетных строках; 2) используют четные и нечетные столбцы соответственно левого и правого снимков стереопары. Оба метода имеют потерю точности либо по оси y либо по оси x .

Поляризационный способ разделения изображения появился с развитием LCD – мониторов (Liquid Crystal Display, что означает жидкокристаллические мониторы) в 2007 году.

Световая волна представляет собой электромагнитную волну. Переменные (электрическое и магнитное) поля находятся в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Изменение их величины во времени показано на рисунке 11.

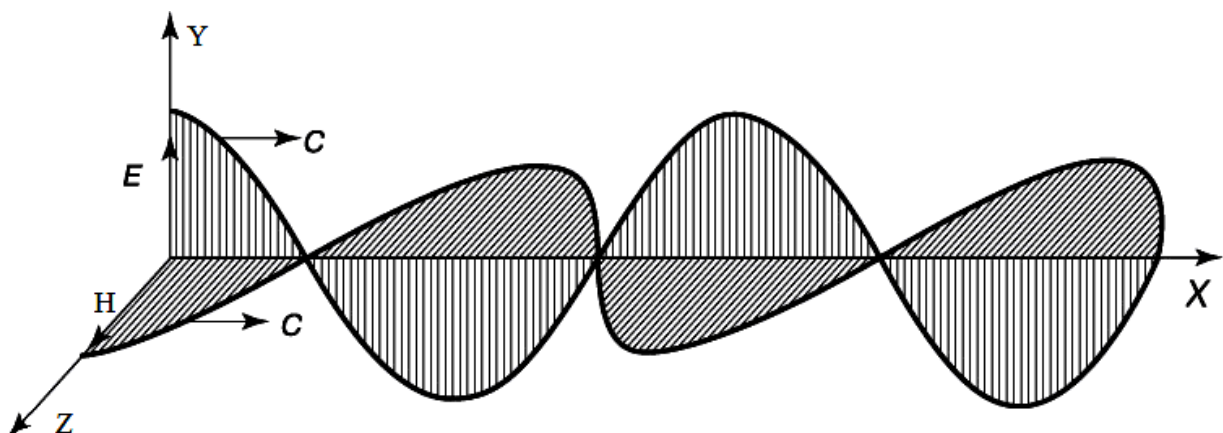


Рис. 11

Направление движения световой волны совпадает с осью X . На рисунке 11 E – вектор электрического поля; H – вектор магнитного поля; C – вектор распространения света.

Большинство источников испускают свет, плоскости колебания волн которого (электрического и магнитного полей) беспорядочно меняются. Такой свет называют неполяризованным или естественным. При помощи поляризации плоскости колебаний электрического и магнитного полей можно получить неизменными. Такой свет называется поляризованным. Получение поляризованного света из естественного называется поляризацией.

Природный поляризатор – турмалин. Он не очень подходит для практического использования. В настоящее время существуют синтетические пленки, служащие прекрасными поляризаторами, которые называют поляроидами. Например, синтетический поливиниловый спирт с внедренным йодом. Такие пленки могут пропускать 80% света, поляризованного в одном направлении и 1% – в другом. Поляроидные пленки поляризуют свет без изменения направления его распространения.

Поляризационный способ разделения изображения используется в конструкции, состоящей из двух LCD – мониторов. К экранам приклеена поляризационная пленка. Экраны закреплены под определенным углом друг к другу, на которых отражены левый и правый снимки стереопары (рис. 12).



Рис. 12

Между панелями находится полупрозрачное зеркало, благодаря которому метод называют зеркальным. Положение экранов в разных конст-

рукциях может быть различным. Сквозь полупрозрачное зеркало виден экран одного монитора и отражение экрана второго монитора. В зеркальном отображении поляризация меняется, поэтому левое и правое изображения будут иметь разную поляризацию. Ход лучей показан на рисунке 13.

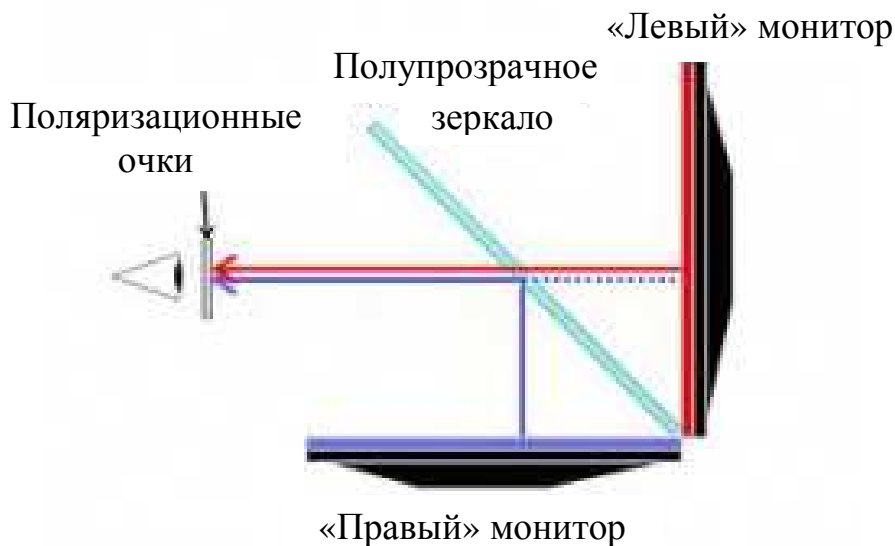


Рис. 13

Рассматривание изображения выполняется с помощью поляризационных очков. Между стеклами очков находится прозрачная поляризационная пленка, которая отсекает изображение, предназначенное для другого глаза. Эти очки передают изображение одновременно на каждый глаз. Затворные очки показывают изображение только половину времени, поэтому имеет место падение яркости. У поляризационных очков падение яркости меньше.

Достоинства поляризационного способа: 1) применение легких поляризационных очков; 2) отсутствие мерцания, свойственное затворному способу.

Главный недостаток – искажение изображения из-за погрешности угла поляризации ЖК-матрицей.

В любом из методов наблюдения необходимо добиться касания маркой выбранной точки. Координаты снимаются автоматически.

3.4. Автоматическое измерение точек по стереопаре цифровых снимков

В настоящее время идентификация точек по стереоскопической паре снимков решается с помощью программных блоков, называемых корреляторами. Коррелятор служит для автоматического вычисления корреляци-

онных и взаимно корреляционных функций случайных процессов. Корреляция – это взаимная связь. Работа корреляторов заключается в сравнении оптических плотностей пикселей элементарных участков цифровых изображений левого и правого снимков стереопары. Один из таких участков формируется в виде матрицы вокруг пикселя, совмещенного с измеряемой на левом снимке стереопары точкой. На другом снимке (правом) такая же матрица формируется последовательно из элементов цифрового изображения, расположенных в области вероятного местоположения соответствующей точки с координатами центра правой корреляционной матрицы $x_n \approx x_l - b$; $y_n \approx y_l$ (рис. 14).

Матрица формируется многократно, со смещением на один пиксел по осям координат x_e и y_e цифрового изображения на правом снимке.

Формируемые матрицы всегда имеют нечетное число строк и столбцов. Программы обработки обычно запрашивают полуразмер матрицы. Оптимальный полуразмер корреляционной матрицы составляет примерно 20×20 пикселей. При малом числе контуров он увеличивается до размера 40×40 пикселей.

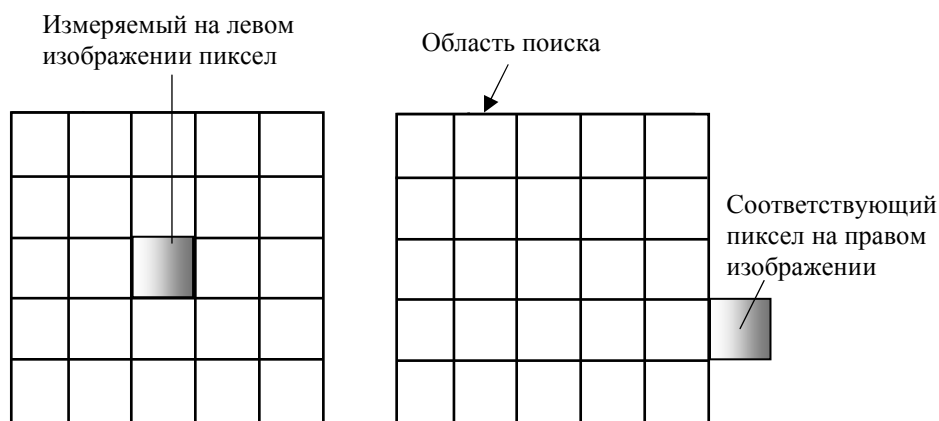


Рис. 14

Для каждой пары сформированных матриц вычисляется коэффициент корреляции R как отношение оптических плотностей D всех пикселей сформированных корреляционных матриц левого и правого снимков стереопары (рис. 14)

$$R = \frac{\sum (D_i - D_0)(D_i' - D_0')}{\sqrt{\sum (D_i - D_0)^2 \sum (D_i' - D_0')^2}}, \quad (31)$$

где D_0 и D_0' – средние оптические плотности из всех пикселей корреляционных матриц соответственно на левом и правом снимках;

D_i, D_i' – оптические плотности отдельных элементов левой и правой корреляционных матриц.

При $R=1$ подобие идеально. Значение R свидетельствует об идентичности сравниваемых участков. При $R \geq 0,8$ работа коррелятора считается удовлетворительной. Корреляторов, обеспечивающих 100% гарантию качества автоматической идентификации, не существует, так как на снимках имеются искажения, вызванные рельефом местности, а если снимки не трансформированы, то и наклоном снимка (рис. 15).

На рисунке 15 видно, что искажения линейных объектов направлены соответственно к точкам надир левого n_l и правого n_p снимков, и эти объекты совместить не получится. Поэтому работу коррелятора необходимо проверять при стереоскопическом просмотре и при необходимости корректировать положение марки.

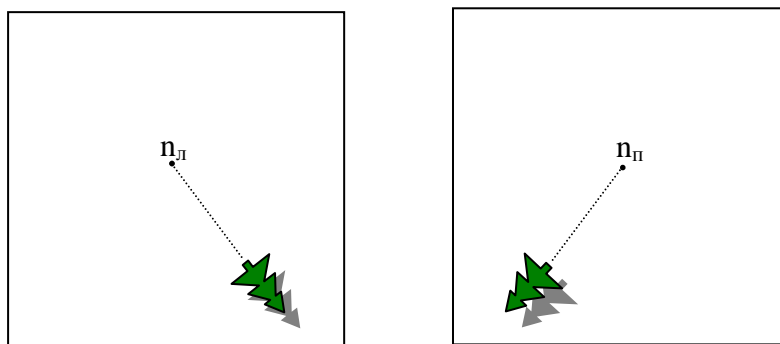


Рис. 15

Существуют и другие методы отождествления точек, основанные на выделении характерных элементов изображения или учитывающие все пиксели двух изображений стереопары.

4. АНАЛИТИЧЕСКАЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ

В настоящее время на производстве чаще всего применяют способ построения сетей фототриангуляции независимыми моделями, который реализован в программах Photomod, PAT-B, Талка и других, а также строгий способ, реализованный в программе ORIMA. Эти способы и рассмотрим.

Отсканированные снимки блока фототриангуляции загружают в компьютер и выполняют их внутреннее ориентирование одним из способов, рассмотренных ранее, затем приступают к выбору и измерению точек.

4.1. Выбор и измерение точек

Для построения сетей фототриангуляции на снимках должны быть намечены и измерены, помимо опорных точек, связующие и другие. Выбор и измерение точек начинают с точек, находящихся в межмаршрутных, т.е. поперечных перекрытиях, т.к. из-за больших искажений на краях снимков их сложнее определить. Эти точки служат для объединения маршрутов в блок. Они должны быть расположены по обе стороны относительно поперечного перекрытия в соответствии с рисунком 16.

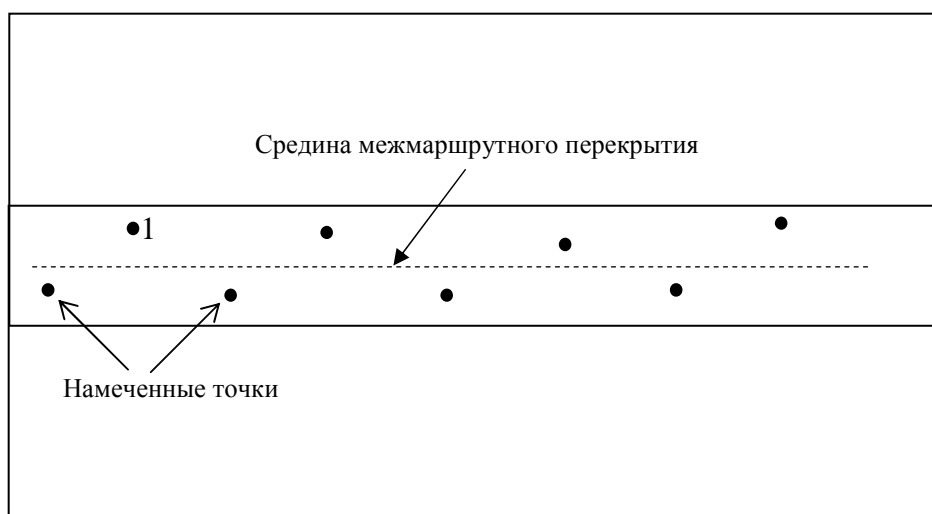


Рис. 16

Все выбранные точки, находящиеся в поперечном перекрытии должны быть измерены на всех смежных снимках обоих маршрутов. Например, если точка 1 попала на второй и третий снимки первого маршрута и на первый, второй и третий снимки второго маршрута, то она везде должна быть измерена.

Кроме точек, расположенных в поперечном перекрытии, необходимо выбрать связующие точки в зонах тройного продольного перекрытия. Зоны должны быть выбраны по стандартной схеме, как показано на рисунке 17. Точки выбирают группами: по две-три точки в зоне.

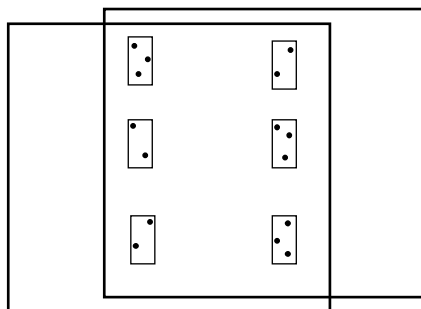


Рис. 17

Кроме связующих точек, в сеть можно включать любые точки, которые должны быть определены с высокой точностью, например, межевые знаки или урезы воды. Если измерения всех точек ведется с использованием коррелятора, то необходимо проверить его работу и, если маркер не касается выбранной точки, добиться касания точки вручную в стереоскопическом режиме.

При выборе точек необходимо стремиться к увеличению числа функций, выполняемых каждой точкой. Координаты считываются автоматически.

Расположение точек при минимальном их числе показано на рисунке 18 (опорные точки отмечены двойной окружностью).

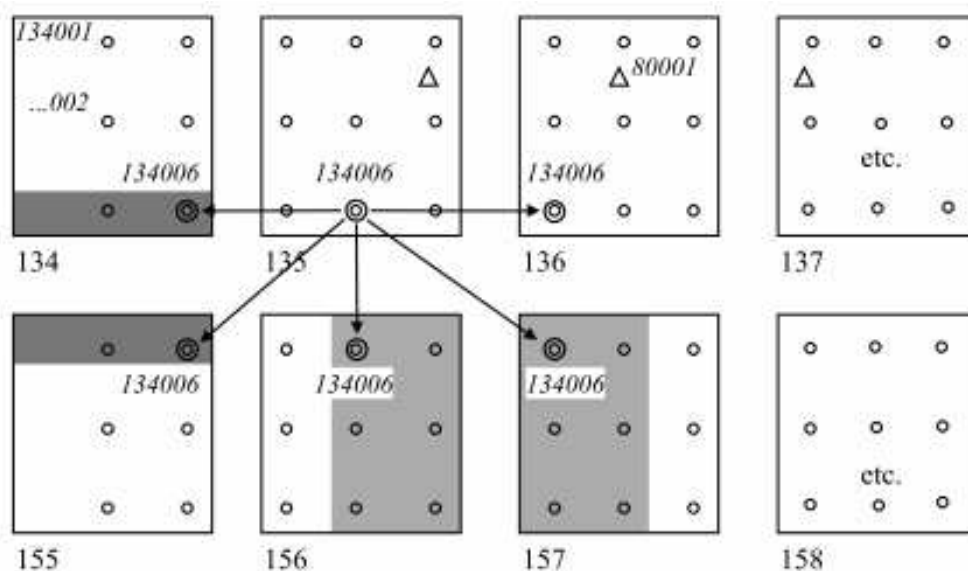


Рис. 18

Все измеренные координаты из системы координат цифрового изображения $o_e x_e y_e$ перевычисляют в систему координат снимка по формулам, например, (21) и (22). Полученные координаты должны быть исправлены за влияние систематических ошибок.

4.2. Учет систематических ошибок фотоизображения

На точность построения сетей фототриангуляции и, следовательно, последующих работ влияют ошибки исходных аэрофильмов, дисторсия объектива съёмочной фотокамеры, рефракция атмосферы, ошибки выравнивания фотопленки в плоскость и другие факторы.

При построении сетей аналитической фототриангуляции можно учесть все факторы, которые описываются математическими зависимостями. При программной реализации той или иной продукции разработчики учитывают те или иные погрешности, которые имели место при аэрофото съемке, хранении фотоматериала и последующей обработке. Рассмотрим возможность учета ряда факторов.

4.3. Учет деформации фотоизображения

Деформация фотоизображения может возникнуть в ходе фотографической обработки: проявления, закрепления, сушки аэронегатива, а также в результате его хранения.

Учет систематической деформации фотоизображения выполняется в ходе внутреннего ориентирования по третьему варианту по формулам (17) и (18), где вычисляется коэффициент систематической деформации путем сравнения расстояний между противоположными координатными метками с соответствующими расстояниями на прикладной рамке аэрофотоаппарата, приведенными в его паспорте.

Если в ходе калибровки определялись координаты координатных меток, то внутреннее ориентирование должно выполняться по четвертому варианту, где систематическая деформация учитывается коэффициентами a_1 , a_2 и b_1 , b_2 формул (21) и (22), или по формулам пятого варианта (23) и (24).

4.4. Учет ошибок выравнивания фотопленки

Ошибки выравнивания фотопленки могут быть частично учтены при внутреннем ориентировании по пятому варианту или в ходе уравнивания сетей фототриангуляции по способу связок с самокалибровкой. Способ самокалибровки реализован в программе ORIMA. Кроме того, судить о наличии ошибок выравнивания фотопленки можно по остаточным поперечным параллаксам, полученным в ходе взаимного ориентирования, или по расхождениям координат на связующих точках.

4.5. Учет рефракции атмосферы

Поправки в координаты точек снимка x и y за влияние рефракции атмосферы δx_p и δy_p можно рассчитать по формулам

$$\delta x_p = k_p x; \quad \delta y_p = k_p y. \quad (32)$$

Для определения коэффициента рефракции k_p в программе НИИПГ использовали формулу

$$k_p = \frac{3,1^{//} H [1 - (3H_{абс} - H) 0,035] r^2}{\rho^{//} f^2 \sin \gamma}, \quad (33)$$

где H – высота фотографирования;

$H_{абс}$ – абсолютная высота полета;

r – расстояние от главной точки снимка до определяемой;

γ – угол отклонения проектирующего луча от оптической оси.

Расстояние от главной точки до определяемой r и угол отклонения проектирующего луча от оптической оси γ вычисляются по координатам точек снимка x, y :

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad \operatorname{tg} \gamma = \frac{r}{f}. \quad (34)$$

В программе ORIMA поправки δr_p в расстояние r от главной точки до определяемой за влияние атмосферной рефракции вычисляют по формуле

$$\delta r_p = r \left(1 - \frac{r^2}{f^2} \right) k, \quad (35)$$

где f – фокусное расстояние аэрофотоаппарата.

Коэффициент k определяется следующим выражением:

$$k = 0,00241 \left(\frac{H}{H^2 - 6H + 250} - \frac{h^2}{H(h^2 - 6h + 250)} \right), \quad (36)$$

где H – высота фотографирования относительно средней отметки блока в км;

h – превышение каждой точки относительно средней плоскости блока в км.

В других программах могут быть реализованы и другие формулы.

4.6. Учет дисторсии объектива аэрофотоаппарата

Для учета дисторсии пользуются полиномами различного вида, например:

$$\delta x_0 = a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4 x^2 + a_5 y^2 + a_6 xy^2 + a_7 x^2 y + a_8 x^3 + a_9 y^3, \quad (37)$$

$$\delta y_0 = b_1 x + b_2 y + b_3 xy + b_4 x^2 + b_5 y^2 + b_6 xy^2 + b_7 x^2 y + b_8 x^3 + b_9 y^3. \quad (38)$$

Для определения коэффициентов a_i и b_i необходимо знать значение дисторсии, по крайней мере, на девяти точках аэрофотоснимка. На практике дисторсия определяется при калибровке аэрофотоаппарата на 56-64 точках, что позволит решить задачу по способу наименьших квадратов. При подсчете поправок за дисторсию берутся координаты точек снимков предварительно исправленные за влияние рефракции и деформацию.

Исправленные значения координат будут

$$x_{испр} = x - \delta x_p + \delta x_d; \quad y_{испр} = y - \delta y_p + \delta y_d. \quad (39)$$

В программном комплексе Photomod дисторсия учитывается в соответствии с имеющимися данными о дисторсии съемочной камеры. Программой предусмотрен учет дисторсии в следующих вариантах:

- 1) дисторсия не вводится, если нет данных о дисторсии;
- 2) вводятся табличные значения радиальной дисторсии по отстояниям радиус вектора r искомой точки от главной;
- 3) вводятся табличные значения дисторсии по направлениям осей координат снимка, если таким образом была определена дисторсия;
- 4) вводятся табличные значения дисторсии по диагональным направлениям;
- 5) вводятся табличные значения дисторсии по направлениям осей координат снимка и диагоналям;
- 6) вводятся коэффициенты дисторсии модели «Брауна – Конради».

В зависимости от заданного варианта учета дисторсии используется тот или другой математический аппарат. При задании значений дисторсии по направлениям осей координат учет ее может выполняться по формулам (37), (38).

При учете дисторсии с использованием модели «Брауна – Конради» применяют формулы

$$x_{испр} = x - k_1 x r^2 - k_2 x r^4 - k_3 x r^6 - P_1(2x^2 + r^2) - 2P_2 xy, \quad (40)$$

$$y_{испр} = y - k_1 y r^2 - k_2 y r^4 - k_3 y r^6 - P_2(2y^2 + r^2) - 2P_1 xy, \quad (41)$$

где $r^2 = x^2 + y^2$,

k_i – коэффициенты радиальной дисторсии;

P_i – коэффициенты тангенциальной дисторсии.

Коэффициенты k_i , P_i определяют либо в ходе калибровки аэрофотоаппарата, либо по значениям дисторсии, определенной для конкретных точек контрольной сетки в ходе калибровки или в ходе уравнивания. Если

коэффициенты определяют в ходе уравнивания, то число опорных точек должно быть увеличено.

В случае если используется второй или четвертый вариант учета дисторсии, то может быть использована формула (42)

$$\delta r = a_1(r^3 - r_0^2 r) + a_2(r^5 - r_0^4 r) + a_3(r^7 - r_0^6 r), \quad (42)$$

где δr – величина радиальной поправки за дисторсию;

a_i – коэффициенты радиальной дисторсии, которые вычисляются по точкам, используемым в ходе калибровки;

r_0 – расстояние от начала координат снимка до главной точки (вычисляется по координатам главной точки x_0, y_0 , приведенным в паспорте аэрокамеры по формуле $r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$).

4.7. Учет влияния кривизны земли

Пространственная фототриангуляция и последующие фотограмметрические работы выполняются, в основном, для создания топографических карт. Сети фототриангуляции и другие фотограмметрические определения принято выполнять в прямоугольной системе координат и затем приводить их по опорным точкам в геодезическую систему координат. В большинстве случаев геодезическая система координат не является прямоугольной трехмерной Декартовой системой координат. Например, система координат Гаусса – Крюгера, где координаты X и Y определяют в прямоугольной системе, а аппликаты Z – относительно уровня моря. В случае если система координат, в которой отображается объект, не является прямоугольной, необходимо вводить поправки за кривизну Земли. Поправки за кривизну Земли вводят в координаты точек изображения.

В программе Photomod может учитываться кривизна Земли, если сети фототриангуляции строят в местной системе координат. Поправки в превышения между точками δh определяют по формуле

$$\delta h = \frac{S^2}{2R}, \quad (43)$$

где S – расстояние между точками;

R – радиус Земли.

В программе ORIMA исправление за кривизну Земли вводят в радиальное направление r от главной точки до текущей по формуле

$$\delta r = -\frac{r}{2R} \left(\frac{r^2(H-h)}{f^2} - 2h \right), \quad (44)$$

где R – радиус Земли (6370 км);

H – высота фотографирования над средней отметкой блока;

h – превышение каждой точки над средней плоскостью блока;

f – фокусное расстояние фотокамеры.

Может встретиться и такая формула для учета влияния кривизны Земли:

$$\delta r = -\frac{Hr^3}{2Rf^2}. \quad (45)$$

Как видно из формул (44) и (45), искажения увеличиваются при уменьшении фокусного расстояния f и высоты фотографирования H .

4.8. Взаимное ориентирование

После перевычисления координат всех точек в систему координат снимка и исправления координат точек снимка за влияние систематических погрешностей, выполняют взаимное ориентирование в соответствии с уравнением

$$YZ' - ZY' = 0, \quad (46)$$

где Y, Z, Y', Z' – пространственные координаты точек левого и правого снимков соответственно, которые получают через координаты точек на левом x, y и правом x', y' снимках.

Пространственные координаты Y, Z, Y', Z' связаны с координатами точек на снимках x, y, x', y' следующими зависимостями:

$$Y = b_1x + b_2y - b_3f; \quad Z = c_1x + c_2y - c_3f; \quad (47)$$

$$Y' = b_1'x' + b_2'y' - b_3'f; \quad Z' = c_1'x' + c_2'y' - c_3'f; \quad (48)$$

где b_i, c_i, b_i', c_i' – направляющие косинусы, вычисляемые через элементы взаимного ориентирования $\alpha_n, \alpha_n, \omega_n, \kappa_n, \kappa_n$, которые неизвестны. Так как для топографических целей выполняется только плановая аэрофотосъемка, то приближенное значение неизвестных элементов взаимного ориентирования можно принять равными нулю.

Уравнения вида (46) составляют для всех измеренных точек каждой стереопары. На основе формулы (46) составляют систему уравнений поправок вида

$$a_1 \delta a_l + b_1 \delta a_n + c_1 \delta w_l + d_1 \delta k_l + e_1 \delta k_n + l_1 = v_1, \quad (49)$$

.....

$$a_n \delta a_l + b_n \delta a_n + c_n \delta w_n + d_n \delta k_l + e_n \delta k_n + l_n = v_n,$$

где n – число измеренных точек; a_i, b_i, c_i, d_i, e_i – коэффициенты, которые получают по формулам частных производных уравнений (46) по определяемым параметрам $\alpha_l, \alpha_n, \omega_n, \kappa_l, \kappa_n$.

Свободный член l будет

$$l = F(\alpha_l = \alpha_n = \omega_n = \kappa_l = \kappa_n = 0) = Y_0 Z_0' - Z_0 Y_0', \quad (50)$$

где Y_0, Z_0, Y_0', Z_0' – значения пространственных координат при угловых элементах взаимного ориентирования, равных нулю.

В матричной форме система уравнений (49) будет иметь вид

$$AX + L = V, \quad (51)$$

где

$$A = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 & e_1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_n & b_n & c_n & d_n & e_n \end{vmatrix}; \quad X = \begin{vmatrix} \delta\alpha_l \\ \delta\alpha_n \\ \delta\omega_n \\ \delta\kappa_l \\ \delta\kappa_n \end{vmatrix}; \quad L = \begin{vmatrix} l_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ l_n \end{vmatrix}. \quad (52)$$

На основе уравнений (51) составляют нормальные уравнения

$$BX + C = 0, \quad (53)$$

где $B = A^T A; C = A^T L$.

В ходе решения системы уравнений (53) получают поправки к элементам взаимного ориентирования:

$$X = -B^{-1}C = \begin{vmatrix} \delta\alpha_l \\ \delta\alpha_n \\ \delta\omega_n \\ \delta\kappa_l \\ \delta\kappa_n \end{vmatrix}. \quad (54)$$

Прибавив полученные поправки к приближенным значениям, получают элементы взаимного ориентирования. Используя полученные эле-

менты взаимного ориентирования, трансформируют координаты всех точек, включенных в сеть, по формулам

$$x^0 = -f \frac{a_1x + a_2y - a_3f}{c_1x + c_2y - c_3f}, \quad (55)$$

$$y^0 = -f \frac{b_1x + b_2y - b_3f}{c_1x + c_2y - c_3f}, \quad (56)$$

где a_i, b_i, c_i – направляющие косинусы, вычисляемые через полученные элементы взаимного ориентирования; x, y – измеренные координаты точек на сканированном снимке.

Контролем правильности выполненного взаимного ориентирования служат величины остаточных поперечных параллаксов q .

$$y_l^0 - y_n^0 \leq \delta q_{don}, \quad (57)$$

где δq_{don} – допустимое значение остаточного поперечного параллакса, которое задается оператором.

4.9. Определение координат точек в моделях

После определения элементов взаимного ориентирования и трансформирования координат в каждой построенной модели вычисляют пространственные координаты всех измеренных точек путем решения прямых засечек с концов базиса фотографирования S_l, S_n (рис. 19).

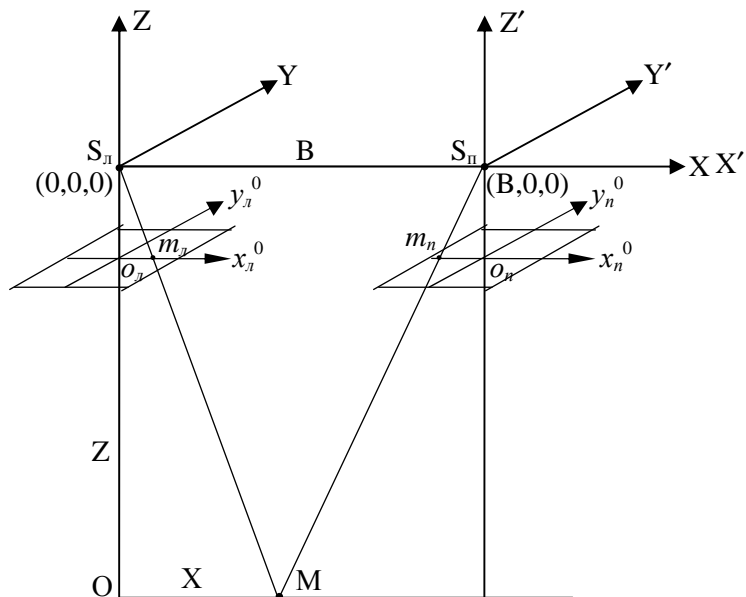


Рис. 19

На рисунке 19 S_nXYZ – базисная система координат; базис фотографирования B условно горизонтален и ось X совпадает с базисом фотографирования. $S_nX'Y'Z'$ – вспомогательная система координат, оси которой параллельны осям координат X, Y, Z ; M – точка местности, которую выбрали для простоты таким образом, чтобы она на снимках изобразилась на осях координат x_l и x_n ; m_l и m_n – изображения точки M соответственно на левом и правом трансформированных снимках; $o_l x_l^0 y_l^0$ и $o_n x_n^0 y_n^0$ – соответственно системы координат левого и правого снимков; $o_l m_l$ – координата x_l^0 на левом снимке; $o_n m_n$ – координата x_n^0 на правом снимке. Как видим, координаты x_l^0 и x_n^0 имеют противоположные знаки. Продольный параллакс p будет

$$p^0 = x_l^0 - x_n^0 = o_l m_l + o_n m_n. \quad (58)$$

Отрезки $o_l m_l$ и $o_n m_n$ просуммируются, так как имеют противоположные знаки.

Известно, что продольный параллакс вычисляется по формуле

$$p^0 = \frac{Bf}{H}, \quad (59)$$

где f – фокусное расстояние аэрокамеры; H – высота центра проектирования S над снимаемой точкой.

Применительно к рисунку 19 H является аппликатой Z и, как видим, для всех точек построенной модели координаты Z будут иметь знак минус, так как фокусное расстояние в принятой системе координат имеет знак минус. С учетом сказанного формула (59) примет вид

$$p^0 = \frac{Bf}{Z}. \quad (60)$$

На основании формулы (60) получим отношение

$$\frac{B}{p^0} = \frac{Z}{f}, \quad (61)$$

Из формулы (61) получим аппликату Z :

$$Z = -\frac{B}{p^0} f = -\frac{Bf}{x_l^0 - x_n^0}. \quad (62)$$

Так как в соответствии с рисунком 19 и аппликата, и фокусное расстояние имеют знаки минус, то и в правой части формулы (62) будет знак минус.

Координату X получим на основании рисунка 19 из подобия треугольников $S_l o_l m_l$ и $S_l OM$:

$$\frac{X}{x_l^0} = \frac{Z}{f} = \frac{B}{p^0}. \quad (63)$$

Из отношения (63) найдем абсциссу X :

$$X = \frac{Bx_l^0}{p^0} = \frac{Bx_l^0}{x_l^0 - x_n^0}. \quad (64)$$

По формуле аналогичной (64) находим ординату Y :

$$Y = \frac{By_l^0}{x_l^0 - x_n^0}. \quad (65)$$

Во всех моделях базисы B условно горизонтальны и все модели имеют свой масштаб.

Далее построенные модели объединяют по связующим точкам. Существует два варианта создания блока фототриангуляции.

Первый – создание независимых маршрутов и объединение их в блок, **второй** – создание независимых стереопар и объединение их в блок фототриангуляции.

В этой работе мы рассмотрим способ создания блока фототриангуляции путем построения независимых маршрутов и объединения их в блок.

4.10. Создание модели маршрута

При соединении моделей в сеть только первый базис фотографирования B_1 будет горизонтален, остальные базисы уже не будут горизонтальны, а займут произвольное положение по отношению к первому базису фотографирования (рис. 20).

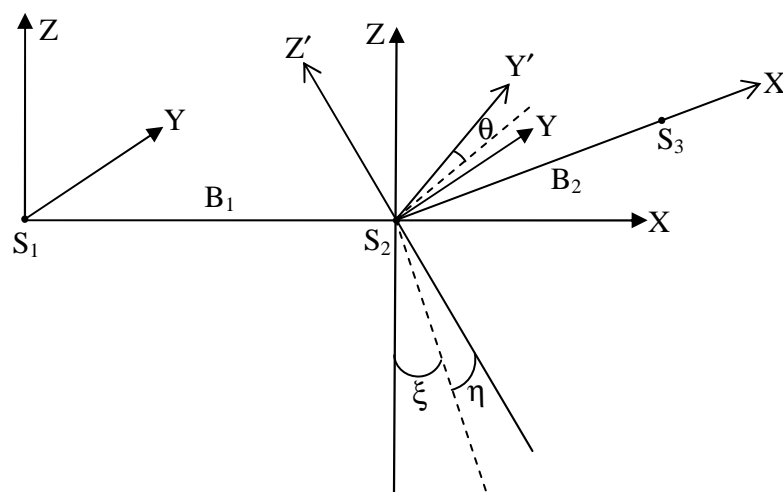


Рис. 20

На рисунке 20 показано взаимное положение систем координат первой модели (X, Y, Z) и второй модели (X', Y', Z') . Связь координат этих моделей, полученных в результате взаимного ориентирования, осуществляется по координатам связующих точек. Координаты связующих точек в первой модели получены в системе координат S_1XYZ , обозначим их X, Y, Z . Координаты этих же связующих точек во второй модели получены в системе координат $S_2X'Y'Z'$, обозначим их X', Y', Z' . По координатам связующих точек находят элементы ориентирования второй модели относительно первой.

Элементами ориентирования второй модели относительно первой будут (рис. 20): координаты точки S_2 в системе координат S_1XYZ , которые обозначим $X_{S_2}, Y_{S_2}, Z_{S_2}$, масштабный коэффициент t и углы, которые определяют положение осей координат системы $S_2X'Y'Z'$ относительно системы координат S_1XYZ :

ξ – продольный угол наклона второй модели относительно первой (угол между осью Z и проекцией оси Z' на плоскость XZ);

η – поперечный угол наклона модели (угол между проекцией оси Z' на плоскость XZ и осью Z);

θ – угол разворота второй модели, т. е. угол между осью Y' и следом плоскости ZY на плоскость $X'Y'$.

В качестве исходных для составления уравнений поправок будут зависимости

$$\begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X_{S_2} \\ Y_{S_2} \\ Z_{S_2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{vmatrix} t. \quad (66)$$

Направляющие косинусы a_i, b_i, c_i вычисляются через углы ξ, η, θ .

Уравнения поправок для связующих точек составляют на основе формулы (66) и они имеют вид

$$a_x \delta X_{S_2} + d_x \delta \xi + e_x \delta \eta + f_x \delta \theta + g_x \delta t + l_x = v_x, \quad (67)$$

$$b_y \delta Y_{S_2} + d_y \delta \xi + e_y \delta \eta + f_y \delta \theta + g_y \delta t + l_y = v_y, \quad (68)$$

$$c_z \delta Z_{S_2} + d_z \delta \xi + e_z \delta \eta + f_z \delta \theta + g_z \delta t + l_z = v_z. \quad (69)$$

Коэффициенты $a, b, c \dots$ получают, решая формулы частных производных уравнений (66) по соответствующим параметрам.

Систему уравнений (67), (68), (69) для n связующих точек в общем виде можно записать как

$$AX+L=V. \quad (70)$$

В уравнениях (70) свободный член L получают как расхождения координат связующих точек (X) , (Y) , (Z) вычисленных по формулам (66) и полученных в предыдущей модели X, Y, Z . Значения величин, входящих в формулу (70), следующие:

$$A = \begin{vmatrix} a_{x_1} & 0 & 0 & d_{x_1} & e_{x_1} & f_{x_1} & g_{x_1} \\ 0 & b_{y_1} & 0 & d_{y_1} & e_{y_1} & f_{y_1} & g_{y_1} \\ 0 & 0 & c_{z_1} & d_{z_1} & e_{z_1} & f_{z_1} & g_{z_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{x_n} & 0 & 0 & d_{x_n} & e_{x_n} & f_{x_n} & g_{x_n} \\ 0 & b_{y_n} & 0 & d_{y_n} & e_{y_n} & f_{y_n} & g_{y_n} \\ 0 & 0 & c_{z_n} & d_{z_n} & e_{z_n} & f_{z_n} & g_{z_n} \end{vmatrix}; \quad X = \begin{vmatrix} \delta X_{S_2} \\ \delta Y_{S_2} \\ \delta Z_{S_2} \\ \delta \xi \\ \delta \eta \\ \delta \theta \\ \delta t \end{vmatrix}; \quad L = \begin{vmatrix} [(X) - X]_1 \\ [(Y) - Y]_1 \\ [(Z) - Z]_1 \\ \dots \\ [(X) - X]_n \\ [(Y) - Y]_n \\ [(Z) - Z]_n \end{vmatrix}, \quad (71)$$

где (X) , (Y) , (Z) – координаты точек модели, вычисленные по формулам (66) с использованием приближенных значений неизвестных;

X , Y , Z – координаты точек, полученные в первой модели по формулам (62), (64) и (65).

Вид нормальных уравнений следующий:

$$BX + C = 0. \quad (72)$$

Решением системы уравнений (72) будет

$$X = -B^{-1}C = \begin{vmatrix} \delta X_{S_2} \\ \delta Y_{S_2} \\ \delta Z_{S_2} \\ \delta \xi \\ \delta \eta \\ \delta \theta \\ \delta t \end{vmatrix}. \quad (73)$$

Прибавив полученные поправки к приближенным значениям элементов ориентирования второй модели относительно первой, получим величины X_{S_2} , Y_{S_2} , Z_{S_2} , ξ , η , θ , t , используя которые по формулам (66) вычисляют координаты всех точек в системе координат, принятой при постро-

нии первой модели. Аналогично присоединяют последующие модели маршрута.

Общая модель будет иметь единую систему координат с началом в точке S_1 и один масштаб. Аналогично строят другие маршруты.

Построенные маршруты объединяют в блок по связующим точкам, расположенным в межмаршрутных перекрытиях.

4.11. Объединение построенных маршрутов в блок

Пусть имеется несколько маршрутных сетей фототриангуляции, различающихся между собой масштабами, началами координат, ориентированием в пространстве. Объединение маршрутов в блок осложняется тем, что из-за накопления ошибок они деформированы (рис. 21).

Используя общие точки смежных маршрутов, перевычисляют координаты всех точек в систему координат, например, среднего маршрута, по методике, используемой при создании модели маршрута.

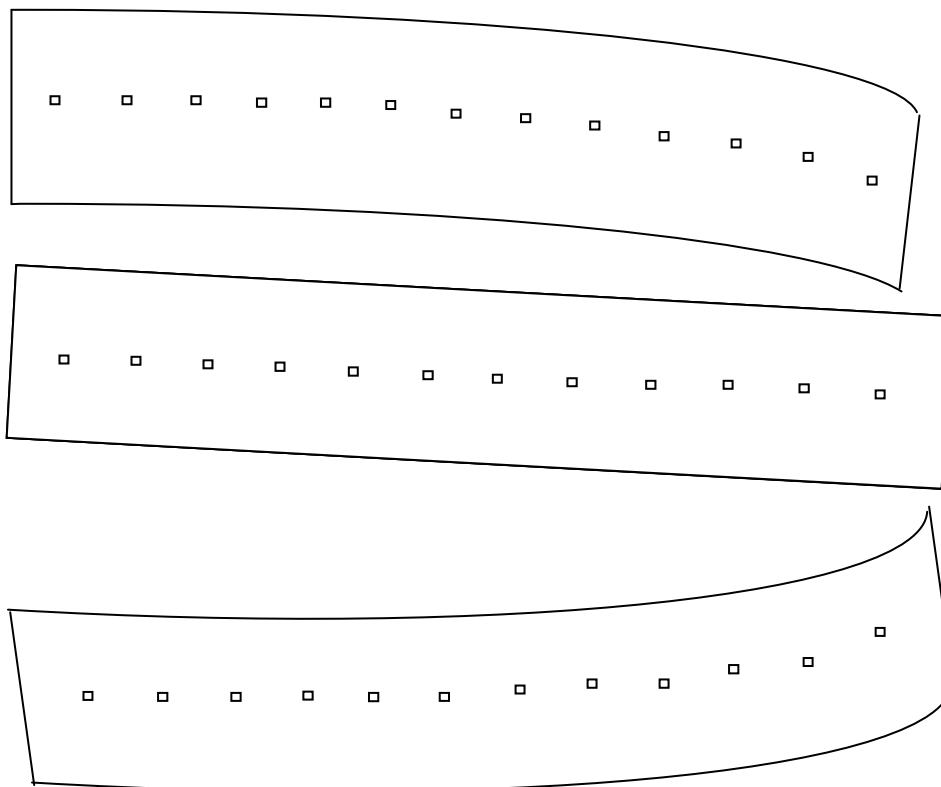


Рис. 21

Оставшиеся после этого расхождения координат связующих точек межмаршрутных перекрытий, которые являются следствием возможных

деформаций объединяемых маршрутов, устраняют при помощи разного рода полиномов, например:

$$\delta X = A_0 + A_1 X + A_2 Y + A_3 XY + A_4 X^2 + A_5 X^3 + \dots \quad (74)$$

$$\delta Y = B_0 + B_1 X + B_2 Y + B_3 XY + B_4 X^2 + B_5 X^3 + \dots \quad (75)$$

$$\delta Z = C_0 + C_1 X + C_2 Y + C_3 XY + C_4 X^2 + C_5 X^3 + \dots \quad (76)$$

Для этого, взяв какой либо маршрут по всем его точкам связи с соседними маршрутами, составляют уравнения вида (74), (75), (76), определяют коэффициенты A_i, B_i, C_i , которые используют для исправления координат всех точек смежных маршрутов.

4.12. Внешнее ориентирование построенной сети фототриангуляции

Для получения окончательных результатов обработки в заданной системе координат необходимо знать положение построенной модели относительно этой системы координат и ее масштаб t_3 . Положение модели относительно заданной системы координат $OX_3Y_3Z_3$ определим на основании рисунка 22.

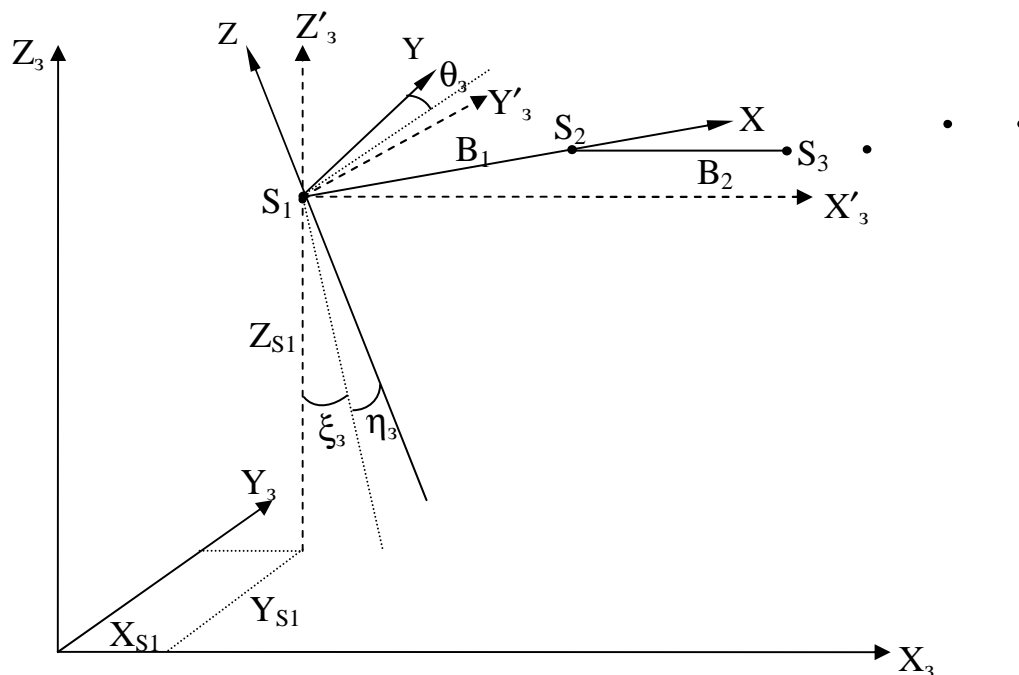


Рис. 22

На рисунке 22 X_{S1}, Y_{S1}, Z_{S1} – координаты начала фотограмметрической системы координат, т. е. точки S_1 . Оси X'_3, Y'_3, Z'_3 вспомогательной системы координат параллельны осям координат заданной системы координат X_3, Y_3, Z_3 .

ξ_3 – продольный угол наклона построенной модели сети; составлен проекцией оси Z на плоскость $X'_3Z'_3$ с осью Z'_3 ;

η_3 – поперечный угол наклона сети, составленный осью Z и ее проекцией на плоскость $X'_3Z'_3$;

θ_3 – угол поворота модели (угол между осью Y и следом плоскости $Z'_3Y'_3$ на плоскость XY).

Внешнее ориентирование определяется семью элементами: $X_{S1}, Y_{S1}, Z_{S1}, \xi_3, \eta_3, \theta_3, t_3$.

Для их определения составляют уравнения связи координат, аналогичные уравнениям (66). Ход решения такой же, как и при создании модели маршрута.

Для определения неизвестных элементов ориентирования $X_{S1}, Y_{S1}, Z_{S1}, \xi_3, \eta_3, \theta_3, t_3$ необходимы опорные точки. Так как число неизвестных семь, а каждая опорная точка позволяет составить три уравнения вида (66), для решения задачи требуется не менее трех опорных точек. При большем числе опорных точек задача решается по способу наименьших квадратов. Т.е. на основе системы уравнений вида (66) составляют нормальные уравнения; в ходе их решения получают поправки к приближенным значениям элементов внешнего ориентирования, прибавив которые к приближенным значениям, получают элементы внешнего ориентирования относительно заданной системы координат. Полученные элементы внешнего ориентирования используют для вычисления координат всех точек блока в заданной системе координат.

4.13. Устранение деформаций в построенной сети фототриангуляции

Из-за воздействия неучтенных ошибок аэрофотоаппарата, обрабатываемого материала и т.д. сеть будет деформирована. Для исправления координат точек сети используют полиномы, например, вида

$$\begin{aligned} X_{ucnp} &= X_3 + A_0 + A_1X_3 + A_2Y_3 + A_3X_3Y_3 + A_4X_3^2 + A_5X_3^3 + \dots \\ Y_{ucnp} &= Y_3 + B_0 + B_1X_3 + B_2Y_3 + B_3X_3Y_3 + B_4X_3^2 + B_5X_3^3 + \dots \\ Z_{ucnp} &= Z_3 + C_0 + C_1X_3 + C_2Y_3 + C_3X_3Y_3 + C_4X_3^2 + C_5X_3^3 + \dots \end{aligned} \quad (77)$$

В уравнениях (77) для опорных точек неизвестными являются коэффициенты A_i, B_i, C_i . Число их зависит от числа членов полинома. При дли-

не полинома, как в уравнениях (77), неизвестных коэффициентов 18. Определяют эти коэффициенты по опорным точкам, которых применительно к нашему случаю должно быть не менее шести. При большем числе опорных точек задача решается по способу наименьших квадратов (СНК) по общепринятой методике.

После нахождения коэффициентов A_i, B_i, C_i решают уравнения (77) для всех определяемых точек сети. В результате получают уравненные значения координат.

В программном комплексе Photomod после построения сетей выполняется процедура составления стереопар.

4.14. Составление стереопар

Перед составлением стереопар уточняют элементы внешнего и, при необходимости, внутреннего ориентирования каждого снимка,

В ходе уравнивания сетей фототриангуляции получены уравненные значения координат всех точек сети. Пользуясь этими координатами, уточняют элементы ориентирования, которые несколько изменились после уравнивания координат. Для этого по полученным координатам решается обратная засечка по формулам

$$x = -f \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}, \quad (78)$$

$$y = -f \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}. \quad (79)$$

В формулах (78) и (79) a_i, b_i, c_i – направляющие косинусы, вычисляемые через угловые элементы внешнего ориентирования: продольный угол наклона α , поперечный угол наклона ω и угол разворота снимка κ ; X_S, Y_S, Z_S – координаты центров фотографирования; X, Y, Z – координаты точек местности, полученные в ходе уравнивания сетей фототриангуляции; x, y – координаты точек на снимках.

На основе уравнений коллинеарности (78) и (79) составляют уравнения поправок, нормальные уравнения, в ходе решения которых получают поправки к приближенным значениям элементов внешнего ориентирования всех снимков.

В качестве приближенных значений принимают полученные в ходе внешнего ориентирования координаты центров фотографирования и углы наклонов и поворотов всех снимков.

Используя угловые элементы внешнего ориентирования α , ω , κ , трансформируют попиксельно изображения всех снимков по формулам

$$x^0 = -f \frac{a_1x + a_2y - a_3f}{c_1x + c_2y - c_3f}, \quad (80)$$

$$y^0 = -f \frac{b_1x + b_2y - b_3f}{c_1x + c_2y - c_3f}, \quad (81)$$

где x^0, y^0 – координаты точек на трансформированном изображении.

Оптическую плотность точки реального снимка с координатами x, y присваивают точке с координатами x^0, y^0 .

Трансформированные по формулам (80) и (81) изображения снимков в дальнейшем используют в других модулях для построения цифровых моделей рельефа (ЦМР), при ортотрансформировании, при создании цифровых моделей местности (ЦММ).

Рассмотренный способ уравнивания сетей фототриангуляции по способу независимых моделей дает хорошие результаты, хотя его считают приближенным, так как уравниваются не непосредственно измеренные величины, а уравнивание ведется по полиномам.

5. СТРОГИЙ СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ СЕТЕЙ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ

Строгий способ построения сетей фототриангуляции получил такое название, так как в этом случае уравниваются не функции измеренных величин, а непосредственно измеренные параметры. Строгий способ реализован в программах ORIMA, последних версиях Photomod и других. В отличие от способа построения сетей фототриангуляции по принципу моделей, в строгом способе сети строят сразу на блок, состоящий из многих маршрутов. Этот способ основан на применении уравнений связи между координатами точек местности и снимка, которые выражают требование одновременного прохождения прямой через три точки: центр фотографирования, точку местности и ее изображение на снимке. Это уравнение также называют уравнением коллинеарности или уравнением одиночной связки, и оно имеет вид

$$x = -f \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}, \quad (82)$$

$$y = -f \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}. \quad (83)$$

Уравнения (82) и (83) написаны для случая, когда координаты главной точки равны нулю, в противном случае эти уравнения будут иметь вид

$$x - x_0 = -f \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}, \quad (84)$$

$$y - y_0 = -f \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}, \quad (85)$$

где a_i, b_i, c_i – направляющие косинусы, связанные с угловыми элементами внешнего ориентирования α, ω, κ ,

X_S, Y_S, Z_S – координаты центра фотографирования,

X, Y, Z – координаты точки местности,

f – фокусное расстояние аэрофотоаппарата,

x_0, y_0 – координаты главной точки,

x, y – координаты точки в системе координат снимка.

Для каждой точки можно записать два уравнения вида (84) и (85), в которых неизвестными являются координаты точек местности X, Y, Z , координаты центров фотографирования X_S, Y_S, Z_S и угловые элементы внешнего ориентирования α, ω, κ , входящие в направляющие косинусы a_i, b_i, c_i . Элементы внутреннего ориентирования f, x_0, y_0 определяют при калибровке, но при необходимости уточнения их можно найти в ходе уравнивания сети фототриангуляции.

Если известны приближенные значения элементов внешнего и внутреннего ориентирования, а также координаты определяемых точек сети, то так как система уравнений вида (84) и (85) является нелинейной относительно искомых параметров, наиболее эффективными методами решения таких систем в фотограмметрических задачах являются методы, основанные на их линеаризации, т.е. на составлении линейной системы уравнений поправок. Из решения линейной системы уравнений определяют поправки к приближенным параметрам. Уравнения поправок будут следующими:

$$a\delta X_S + b\delta Y_S + c\delta Z_S + d\delta\alpha + e\delta\omega + f\delta\kappa + g\delta f + h\delta x_0 + i\delta y_0 - a\delta X - b\delta Y - c\delta Z + l = v, \quad (86)$$

$$a'\delta X_S + b'\delta Y_S + c'\delta Z_S + d'\delta\alpha + e'\delta\omega + f'\delta\kappa + g'\delta f + h'\delta x_0 + i'\delta y_0 - a'\delta X - b'\delta Y - c'\delta Z + l' = v', \quad (87)$$

где коэффициенты a, b, \dots, i' получают, решая формулы частных производных по соответствующим параметрам, используя приближенные значения неизвестных, а именно:

$$a = \frac{\partial x}{\partial X_s}, b = \frac{\partial x}{\partial Y_s}, \dots, i' = \frac{\partial y}{\partial y_0}.$$

Для вывода формул, по которым определяют коэффициенты уравнений поправок, запишем формулы (84) и (85) в следующем виде:

$$x - x_0 = -f \frac{X^*}{Z^*}; \quad (88)$$

$$y - y_0 = -f \frac{Y^*}{Z^*}. \quad (89)$$

Для примера выведем формулу для вычисления коэффициента a . Так как неизвестные входят и в числитель, и в знаменатель, то частная производная от дроби имеет вид

$$\frac{\partial X}{\partial X_s} = -f \frac{(X^*)' Z^* - X^* (Z^*)'}{Z^{*2}} = a. \quad (90)$$

На основании формул (84) и (85) производные от числителя $(X^*)'$ и знаменателя $(Z^*)'$ будут

$$(X^*)' = -a_1, \quad (Z^*)' = -a_3. \quad (91)$$

С учетом (91) формула (90) примет вид

$$a = \frac{1}{Z^*} (a_1 f + a_3 (x - x_0)). \quad (92)$$

Аналогично получают и другие коэффициенты.

Для вычисления коэффициентов уравнений поправок используют приближенные значения неизвестных и плоские координаты x, y , полученные в ходе внутреннего ориентирования снимков и измерения координат точек, исправленные за влияние систематических ошибок.

Свободные члены l и l' определяют по вычисленным по формулам (84) и (85) координатам $(x), (y)$ с использованием приближенных значений неизвестных и координатам x, y , полученным после внутреннего ориентирования и измерения координат точек на ЦФС:

$$L = (x) - x, \quad l' = (y) - y. \quad (93)$$

В дальнейшем для простоты в решении задачи будем использовать в качестве исходных уравнения (82) и (83) и считать, что фокусное расстояние определено с высокой точностью. Тогда уравнения поправок (86) и (87) для произвольной точки будут иметь более простой вид:

$$a\delta X_S + b\delta Y_S + c\delta Z_S + d\delta\alpha + e\delta\omega + f\delta\kappa - a\delta X - b\delta Y - c\delta Z + l = v, \quad (94)$$

$$a'\delta X_S + b'\delta Y_S + c'\delta Z_S + d'\delta\alpha + e'\delta\omega + f'\delta\kappa - a'\delta X - b'\delta Y - c'\delta Z + l' = v', \quad (95)$$

где $\delta X_S, \delta Y_S, \delta Z_S, \delta\alpha, \delta\omega, \delta\kappa, \delta X, \delta Y, \delta Z$ – поправки к искомым параметрам.

В матричной форме система уравнений поправок для одного снимка будет иметь вид

$$A_1 X_1 + L_1 = V_1, \quad (96)$$

где

$$A_1 = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 & e_1 & f_1 & -a_1 & -b_1 & -c_1 \\ a'_1 & b'_1 & c'_1 & d'_1 & e'_1 & f'_1 & -a'_1 & -b'_1 & -c'_1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_n & b_n & c_n & d_n & e_n & f_n & -a_n & -b_n & -c_n \\ a'_n & b'_n & c'_n & d'_n & e'_n & f'_n & -a'_n & -b'_n & -c'_n \end{vmatrix} \quad X_1 = \begin{vmatrix} \delta X_{S_1} \\ \delta Y_{S_1} \\ \delta Z_{S_1} \\ \delta\alpha_1 \\ \delta\omega_1 \\ \delta\kappa_1 \\ \delta X_1 \\ \delta Y_1 \\ \delta Z_1 \\ \cdot \\ \delta X_n \\ \delta Y_n \\ \delta Z_n \end{vmatrix}$$

$$L_1 = \begin{vmatrix} l_1 \\ l'_1 \\ \cdot \\ l_n \\ l'_n \end{vmatrix} \quad V_1 = \begin{vmatrix} v_1 \\ v'_1 \\ \cdot \\ v_n \\ v'_n \end{vmatrix}$$

Блок фототриангуляции может иметь произвольное число снимков. Запишем матрицу уравнений поправок для блока, состоящего из любого числа снимков:

$$\begin{vmatrix} A_1 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & A_2 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & A_k \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ X_k \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ L_k \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ V_k \end{vmatrix} \quad (97)$$

где A_i – матрицы коэффициентов уравнений поправок i -того снимка;

X_i, L_i, V_i – соответственно вектора неизвестных поправок к приближенным значениям, свободных членов и поправок в измеренные координаты точек снимков.

Система уравнений (97) в общем виде будет

$$AX+L=V. \quad (98)$$

Структура матрицы уравнений поправок зависит от выбора порядка расположения неизвестных в уравнениях (98), от числа маршрутов в блоке, снимков в маршруте, а также от выбранного порядка нумерации снимков и точек блока. Выберем размещение неизвестных в уравнениях (86) и (87) в следующем порядке: $\delta\alpha_1 \delta\omega_1 \delta\kappa_1 \delta X_{S1} \delta Y_{S1} \delta Z_{S1} \dots \delta\alpha_m \delta\omega_m \delta\kappa_m \delta X_{Sm} \delta Y_{Sm} \delta Z_{Sm} \delta X_1 \delta Y_1 \delta Z_1 \dots \delta X_n \delta Y_n \delta Z_n$, m – число снимков, n – число точек.

В перечисленных неизвестных индекс m – число снимков, индекс n – число точек.

Выберем блок, состоящий из двух маршрутов. Расположение снимков и точек показано на рисунке 23.

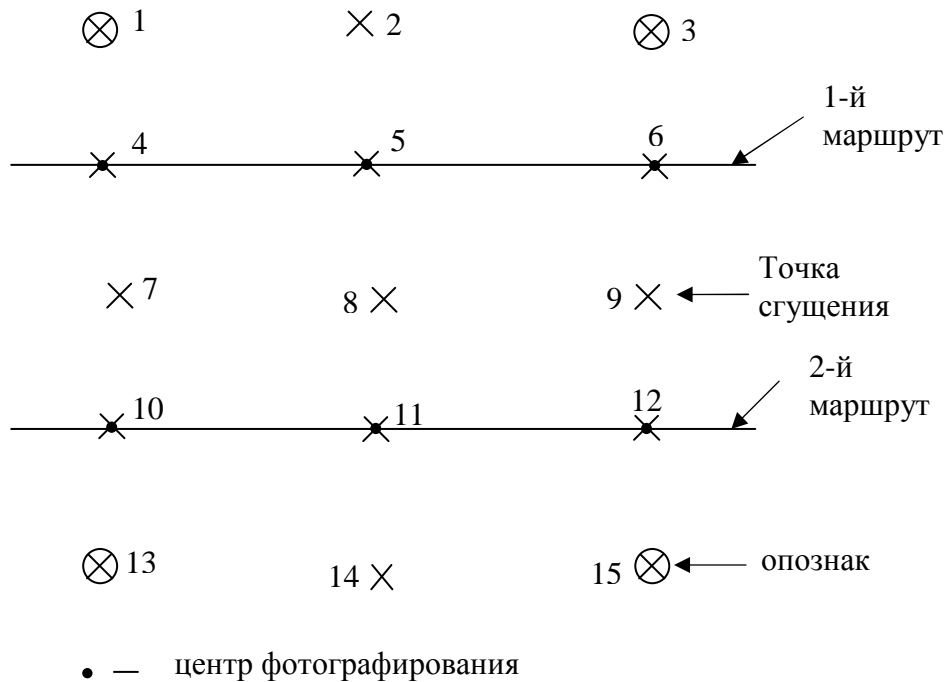


Рис. 23

Для первого снимка имеем шесть неизвестных элементов внешнего ориентирования: $\alpha_1, \omega_1, \kappa_1, X_{S1}, Y_{S1}, Z_{S1}$, коэффициенты в уравнениях поправок при поправках к приближенным значениям этих неизвестных будут отличны от нуля. Приближенные значения координат центров фотографирования X_S, Y_S, Z_S можно получить, например, по данным *GPS*. Так как аэрофотосъемка выполняется с применением гиростабилизирующей установки, то приближенные значения углов α, ω, κ можно принять равными

нулю. Кроме того, каждая точка дает два уравнения поправок для координат x и y на снимке, в которых по три отличных от нуля коэффициентов при поправках к координатам точек местности. На первом снимке шесть точек, следовательно, для первого снимка необходимо составить 12 уравнений поправок, которые займут в матрице A формул (97) 12 строк. На втором снимке девять точек, значит, в матрице коэффициентов уравнений поправок необходимо зарезервировать 18 строк.

При расположении неизвестных в уравнениях поправок, как отмечено выше, структура матрицы коэффициентов уравнений поправок будет иметь вид, показанный на рисунке 24 (отличные от нуля коэффициенты выделены).

Левая часть формируемой матрицы (см. рис. 24) состоит из подматриц размером $6 \times 2k$, которые содержат коэффициенты уравнений поправок, относящиеся к элементам внешнего ориентирования снимков, где k – число точек на i -ом снимке. Правая часть матрицы состоит из подматриц размером 2×3 и содержит коэффициенты уравнений поправок, относящиеся к координатам точек местности.

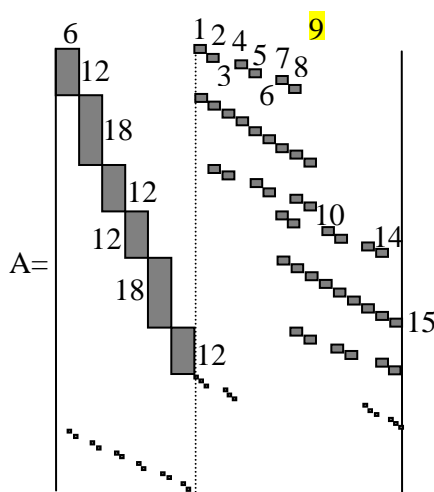


Рис. 24

При включении в уравнивание вспомогательных данных (геодезических измерений, показаний вспомогательных приборов и т.п.) необходимо составить дополнительные уравнения поправок для вспомогательной информации.

Например, точки 1, 3, 13 и 15 являются опорными. Для них можно составить уравнения вида

$$\delta X + X - X_0 = v_X, \quad (99)$$

$$\delta Y + Y - Y_0 = v_Y, \quad (100)$$

$$\delta Z + Z - Z_0 = v_Z, \quad (101)$$

где

$$X - X_0 = l_X, \quad Y - Y_0 = l_Y, \quad Z - Z_0 = l_Z, \quad (102)$$

тогда

$$\delta X + l_X = v_X, \quad \delta Y + l_Y = v_Y, \quad \delta Z + l_Z = v_Z. \quad (103)$$

В формулах (99) – (103) X_0, Y_0, Z_0 – координаты опознаков, полученные из геодезических измерений; X, Y, Z – координаты этих же точек, полученные из фотограмметрических построений; $\delta X, \delta Y, \delta Z$ – поправки в фотограмметрические координаты опорных точек; v_X, v_Y, v_Z – поправки в геодезические координаты этих же точек.

В этом случае структура матрицы коэффициентов уравнений поправок будет дополнена коэффициентами единица при поправках $\delta X, \delta Y, \delta Z$. На рисунке 24 эти коэффициенты показаны в нижней части матрицы A справа.

При включении в уравнивание плановых координат центров фотографирования, полученных, например, по данным GPS, уравнения поправок (97) дополняются уравнениями следующего вида:

$$\delta X_{Si} + X'_{Si} - X^0_{Si} = \delta X_{Si} + l_{X_{Si}} = v_{X_{Si}}, \quad (104)$$

$$\delta Y_{Si} + Y'_{Si} - Y^0_{Si} = \delta Y_{Si} + l_{Y_{Si}} = v_{Y_{Si}}, \quad (105)$$

где X'_{Si}, Y'_{Si} – значения плановых координат центров фотографирования, полученные из фотограмметрических построений;

X^0_{Si}, Y^0_{Si} – значения плановых координат центров фотографирования, полученные по данным GPS-измерений;

$$l_{X_{Si}} = X'_{Si} - X^0_{Si}; \quad l_{Y_{Si}} = Y'_{Si} - Y^0_{Si} \text{ – свободные члены.}$$

В этом случае структура матрицы уравнений поправок будет дополнена коэффициентами единица при поправках к плановым координатам центров фотографирования (на рис. 24 слева внизу).

Если дополнительные данные не включают значений искомых параметров матрицы уравнений поправок, например, значений базисов фотографирования, полученных по показаниям доплеровской системы, то в этом случае устанавливают вид функциональной зависимости, связывающей измеренные величины с неизвестными параметрами:

$$B_i = \sqrt{(X_{Si+1} - X_{Si})^2 + (Y_{Si+1} - Y_{Si})^2 + (Z_{Si+1} - Z_{Si})^2}. \quad (106)$$

Уравнение поправок будет иметь вид

$$a' \delta X_{Si+1} + b' \delta Y_{Si+1} + c' \delta Z_{Si+1} - a' \delta X_{Si} - b' \delta Y_{Si} - c' \delta Z_{Si} + l''_i = v''_i, \quad (107)$$

где

$$l''_i = \sqrt{(X_{Si+1} - X_{Si})^2 + (Y_{Si+1} - Y_{Si})^2 + (Z_{Si+1} - Z_{Si})^2} - B'_i, \quad (108)$$

B'_i – длина базиса фотографирования, полученная на основе показаний доплеровской системы.

Коэффициенты уравнений поправок (107) вычисляются по формулам частных производных:

$$a'' = \frac{\partial B}{\partial X_S}, \quad b'' = \frac{\partial B}{\partial Y_S}, \quad c'' = \frac{\partial B}{\partial Z_S}. \quad (109)$$

Частная производная от корня будет $(\sqrt{X})' = \frac{1}{2\sqrt{X}}$, следовательно,

$$a'' = \frac{2(X_{Si+1} - X_{Si})}{2\sqrt{(X_{Si+1} - X_{Si})^2 + (Y_{Si+1} - Y_{Si})^2 + (Z_{Si+1} - Z_{Si})^2}} = \frac{X_{Si+1} - X_{Si}}{B}, \quad (110)$$

$$b'' = \frac{Y_{Si+1} - Y_{Si}}{B}, \quad c'' = \frac{Z_{Si+1} - Z_{Si}}{B}. \quad (111)$$

При программной реализации не возникает никаких трудностей, если используются те или другие вспомогательные данные. В этом случае на месте соответствующих коэффициентов уравнений поправок для величин, которые не используются в уравнивании, пишутся нули и видоизменений в программе не возникает.

В ходе уравнивания можно получить некоторые систематические ошибки. В этом случае матрица уравнений поправок будет иметь вид, представленный на рисунке 25, а систематические ошибки определяют за влияние всех источников без разделения на составляющие (дисторсия, деформация фильма и т.д.).

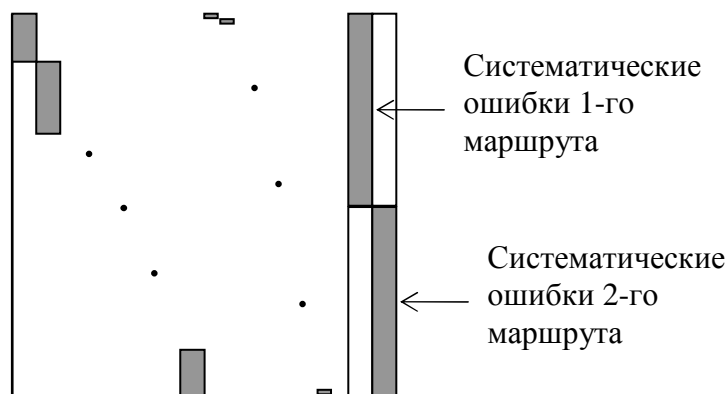


Рис. 25

Программы, основанные на принципе получения систематических ошибок в ходе уравнивания сетей фототриангуляции, называются программами с самокалибровкой.

6. УЧЕТ СИСТЕМАТИЧЕСКОХ ОШИБОК ПРИ ПОСТРОЕНИИ СЕТЕЙ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ ПО СПОСОБУ СВЯЗОК С САМОКАЛИБРОВКОЙ

При учете систематических ошибок при построении сетей фототриангуляции по способу связей предпочтение отдается методу самокалибровки, так как этот метод не требует дополнительных геодезических, аэрофотосъемочных и фотограмметрических работ и позволяет учитывать искажения снимков, непосредственно участвующих в фототриангулировании.

Существуют различные методы самокалибровки. В программе ORIMA искажения аэроснимка описываются аппроксимирующим полиномом, который добавляется к исходным уравнениям коллинеарности в качестве дополнительных параметров. Коэффициенты полинома определяются из совместного уравнивания с другими неизвестными параметрами (координатами точек местности, элементами внешнего и внутреннего ориентирования).

С использованием дополнительных параметров уравнения (84) и (85) преобразуются к виду

$$x - x_0 = x' + \Delta x; \quad y - y_0 = y' + \Delta y, \quad (112)$$

где x', y' – координаты точки снимка, вычисленные по формулам (84) и (85); $\Delta x, \Delta y$ – полиномы, учитывающие искажения для каждой координаты точек снимка.

В общем виде полином можно записать:

$$\Delta x = \sum_{i=1}^k a_i f(x, y); \quad \Delta y = \sum_{i=1}^k b_i g(x, y), \quad (113)$$

где a_i, b_i – неизвестные коэффициенты полинома;

$f(x, y), g(x, y)$ – функции, описывающие все возможные виды искажений.

Уравнения (112) составляют для всех точек, изобразившихся на снимках блока. Затем они приводятся к линейному виду относительно всех неизвестных параметров, и составляется общая система уравнений поправок вида (98).

Для решения уравнений поправок по методу наименьших квадратов необходимо, чтобы число уравнений поправок было больше числа определяемых неизвестных.

Модель систематических искажений, представленная аппроксимирующим полиномом, должна быть адекватной реальным искажениям аэро-снимка. Разные аэросъемочные системы характеризуются различными искажениями, поэтому сложно определить полином, удовлетворяющий любым системам. Выбор оптимального полинома определяется на основании следующих положений: 1) полином должен описывать все возможные искажения; 2) дополнительные параметры не должны ухудшать обусловленность системы уравнений. Включение дополнительных параметров, особенно линейно зависимых между собой и другими неизвестными, в систему уравнений поправок ухудшает ее обусловленность и, следовательно, снижает надежность решения или даже приводит к вырожденным системам, когда определитель матрицы равен нулю. Для вырожденной матрицы не существует обратной матрицы или их много. Во избежание этого необходимо выбирать полином ортогональным или близким к нему (ортогональность членов полинома зависит от его вида и расположения точек на снимке). Подбор полинома осуществляется непосредственно в процессе уравнивания для любых исходных данных. Для этого используется корреляционный анализ, устанавливающий линейную зависимость определяемых неизвестных. Корреляционную матрицу R находят на основе обратной матрицы нормальных уравнений B^{-1} , которую обычно обозначают Q , т. е. $B^{-1}=Q$. В процессе уравнивания на этапе вычисления дополнительных параметров находят матрицу коэффициентов корреляции R всех пар анализируемых переменных, воспроизводящих структуру зависимости между переменными:

$$R = \begin{vmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & 1 \end{vmatrix}, \quad (114)$$

где r_{ij} – коэффициенты корреляции, которые вычисляются через элементы обратной матрицы нормальных уравнений Q по формуле

$$r_{ij} = \frac{Q_{ij}}{\sqrt{Q_{ii}Q_{jj}}}, \quad (115)$$

где i, j – индексы неизвестных.

Коэффициент корреляции r – безразмерная характеристика независимости и зависимости случайных величин. По величине коэффициентов корреляции выявляются дополнительные параметры линейно зависимые

между собой и другими неизвестными. Высокие коэффициенты корреляции указывают на зависимость между параметрами. Коэффициенты корреляции не должны превышать 0,5. Исключение составляют коэффициенты, учитывающие дисторсию объектива (коэффициенты a_1, a_2, a_3 формулы (115)). В соответствии с этим из исходного полинома, содержащего число членов больше необходимого, формируется полином из независимых членов.

Следующий этап уравнивания выполняется с независимыми дополнительными параметрами.

В программе ORIMA в качестве исходного уравнения используется полином, который имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_0 + a_1(r^2 - r_0^2)x + a_2(r^4 - r_0^4)x + a_3(r^6 - r_0^6)x + b_1x + b_2y + (c_1(x^2 - y^2) + c_2x^2y^2 + c_3(x^4 - y^4))x/c + d_1xy + d_2y^2 + d_3x^2e + d_4xy^2 + d_5x^2y^2; \\ \Delta y &= y_0 + a_1(r^2 - r_0^2)y + a_2(r^4 - r_0^4)y + a_3(r^6 - r_0^6)y + b_1x + b_2y + (c_1(x^2 - y^2) + c_2x^2y^2 + c_3(x^4 - y^4))x/c + d_6xy + d_7y^2 + d_8x^2e + d_9xy^2 + d_{10}x^2y^2; \end{aligned} \quad (116)$$

где x_0, y_0 – координаты главной точки;

x, y – координаты точек изображения;

r – радиальное расстояние от начала координат снимка до текущей точки, вычисляется по формуле $r = \sqrt{x^2 + y^2}$;

r_0 – расстояние от начала координат снимка до главной точки;

a_1, a_2, a_3 – полиномиальные коэффициенты для дисторсии;

b_1, b_2 – коэффициенты за неортогональность координатных осей снимка;

c_1, c_2, c_3 – коэффициенты, учитывающие невыравнивание пленки;

$d_1 - d_{10}$ – коэффициенты за деформацию фотопленки и дисторсию.

Полную калибровку с определением поправки в фокусное расстояние возможно выполнить только для снимков горной местности, так как при плоской местности будут высокие коэффициенты корреляции между фокусным расстоянием и координатами центров проекции.

При выполнении самокалибровки следует учитывать, что в блочную сеть могут включаться снимки, полученные разными аэрофотоаппаратами в разных условиях фотографирования, поэтому в каждом маршруте систематические ошибки снимков могут иметь разные значения. Это вызывает необходимость увеличения числа опорных точек.

Преимущество способа самокалибровки – определение элементов внутреннего ориентирования снимков и систематических ошибок в тех же условиях, в которых выполнялась аэрофотосъемка.

На основе систем уравнений поправок (97), (103), (104), (105), (107) и других составляют нормальные уравнения

$$BX + C = 0, \quad (117)$$

где $B=A^T P A$; $C=A^T P L$; P – матрица весов.

Решением системы нормальных уравнений будет вектор неизвестных поправок к приближенным параметрам X :

$$X = -B^{-1} P C. \quad (118)$$

Прибавив полученные поправки к приближенным значениям неизвестных, получим искомые параметры.

Этот метод позволяет получить высокую точность определяемых неизвестных только в том случае, если их приближенные значения близки к истинным данным. Поэтому порой сети строят по способу моделей, полученные значения элементов внешнего ориентирования и координат всех точек сети принимают в качестве приближенных, а дальнейшее уравнивание ведут строгим способом.

7. ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ РЕЛЬЕФА

Цифровая модель рельефа (ЦМР) используется для отображения рельефа местности в горизонталях и для получения ортофотопланов.

ЦМР представляет собой математическое описание земной поверхности с помощью совокупности расположенных на ней точек, связей между ними и метода определения высот точек, принадлежащих области моделирования.

В зависимости от формы представления исходных данных в ЦМР их можно разделить на три основные группы: с регулярным, не регулярным расположением точек и комбинированным.

Регулярная ЦМР представляется в виде матрицы равномерно расположенных точек. Матрица рельефа представляет собой таблицу, координатно привязанную к местности. В ячейках хранятся значения высот, соответствующих либо центру ячейки, либо среднему значению высоты по площади данной ячейки.

Такая модель известна как DEM (Digital Elevation Model). Для ее получения используют, как правило, нерегулярные модели.

Достоинство матрицы высот – возможность быстрого доступа к ее элементам; недостаток – большие объемы хранимой и зачастую избыточной информации.

Нерегулярная ЦМР представляет собой сеть треугольников, четырехугольников, многоугольников и других фигур, опирающихся своими вершинами на нерегулярно расположенные на земной поверхности точки. Плоскости фигур должны аппроксимировать рельеф местности.

Создание нерегулярной ЦМР предусматривает определение трехмерных координат вершин треугольников. Эта задача решается с помощью прямой фотограмметрической засечки в комплексе Photomod по формулам

$$\Delta X = Nx_l^0; \quad \Delta Y = Ny_l^0; \quad \Delta Z = -Nf, \quad (119)$$

где
$$N = \frac{B_x + \frac{x_n^0}{f} B_z}{p^0} = \frac{B_x + \frac{x_l^0}{f} B_z}{x_l^0 - x_n^0},$$

x^0, y^0 – координаты точек на трансформированных снимках;
 p^0 – продольный параллакс на трансформированных снимках;
 B_x, B_y, B_z – проекции базиса фотографирования на оси координат X, Y и Z соответственно.

Координаты узлов сетки будут

$$X_\Gamma = X_{S_{\Gamma}} + \Delta X; \quad Y_\Gamma = Y_{S_{\Gamma}} + \Delta Y; \quad Z_\Gamma = Z_{S_{\Gamma}} + \Delta Z; \quad (120)$$

где $X_\Gamma, Y_\Gamma, Z_\Gamma$ – координаты узлов сетки в заданной системе координат;
 $X_{S_{\Gamma}}, Y_{S_{\Gamma}}, Z_{S_{\Gamma}}$ – координаты левого центра фотографирования стереопары.

Существуют довольно эффективные методы пересчета одной модели в другую. При пересчете нерегулярной ЦМР в регулярную используют интерполяционные функции: полиномы, сплайны и др.

Параметры математической модели вычисляют по исходным точкам нерегулярной ЦМР, а затем их используют для интерполяции высот точек области моделирования регулярной ЦМР по их плановым координатам.

Рассмотрим полиномиальные способы. Они предполагают представление моделируемой поверхности в виде полинома, как правило, второй – пятой степени

$$Z_i = a_0 + a_1 X_i + a_2 Y_i + a_3 X_i Y_i + a_4 X_i^2 + a_5 Y_i^2 + \dots \quad (121)$$

Для отыскания неизвестных коэффициентов полинома для каждой опорной точки нерегулярной ЦМР составляют уравнения вида (121), в которых в качестве неизвестных приняты коэффициенты полинома a_0, a_1, a_2, \dots ; X_i, Y_i – координаты опорных точек, полученные по формулам (119) и (120). Свободные члены находят как разности между вычисленными по полино-

мам (121) значениями и полученными отметками опорных точек по формулам (119) и (120). В зависимости от программы применяют разные способы определения приближенных значений неизвестных, например, все коэффициенты принимают равными нулю или коэффициент a_0 принимают равным средней отметке снимаемой местности, а остальные – нулю.

Полученную систему решают по СНК по общепринятой методике.

Найденные коэффициенты используют для интерполяции высот произвольных точек области моделирования в соответствии с уравнением (121).

Порой используют кусочно-полиномиальные способы, которые предполагают деление области моделирования на участки, подбор для каждого участка своего локального полинома вида (121) и последующую связь локальных полиномов с помощью переходных уравнений.

Во всех случаях возникают переопределенные системы, которые решаются под условием минимума суммы квадратов расхождений высот точек реальной и аппроксимирующей поверхностей. Переопределенные системы – это системы, в которых число опорных точек значительно больше определяемых коэффициентов уравнений (121).

Наибольшее применение в программных комплексах получила ЦМР на треугольниках произвольной формы, называемая TIN-моделью (Triangulated Irregular Network), или моделью на нерегулярной сетке. Модель TIN начала разрабатываться в начале 70-х годов XX века. Эта модель занимает меньше места в памяти компьютера, чем другие модели.

Модель образована совокупностью точек с координатами и набором ребер, соединяющих эти точки. Исходные точки указываются на характерных точках рельефа: пиках, впадинах и т.п. Ребра должны лежать на склонах.

Из всех возможных видов триангуляции чаще всего пользуются триангуляцией Делоне, названной по имени советского математика Б.Н. Делоне, который в 1934 году сформулировал основные условия. Главное условие следующее: окружность, проведенная через три вершины любого треугольника, не должна содержать в себе никаких других точек (рис. 26).

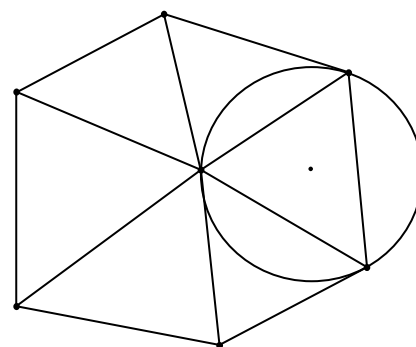


Рис. 26

Алгоритм построения триангуляции Делоне выглядит так:

– все множество точек делится на треугольники, т.е. создаются комбинации из трех точек;

– для каждой комбинации находится описанная окружность и координаты ее центра;

– если внутри окружности текущей комбинации не находится ни одной точки из оставшихся точек, то эта комбинация есть треугольник – часть триангуляции Делоне.

Треугольники в этом случае становятся настолько «равноугольными», насколько возможно (рис. 27).

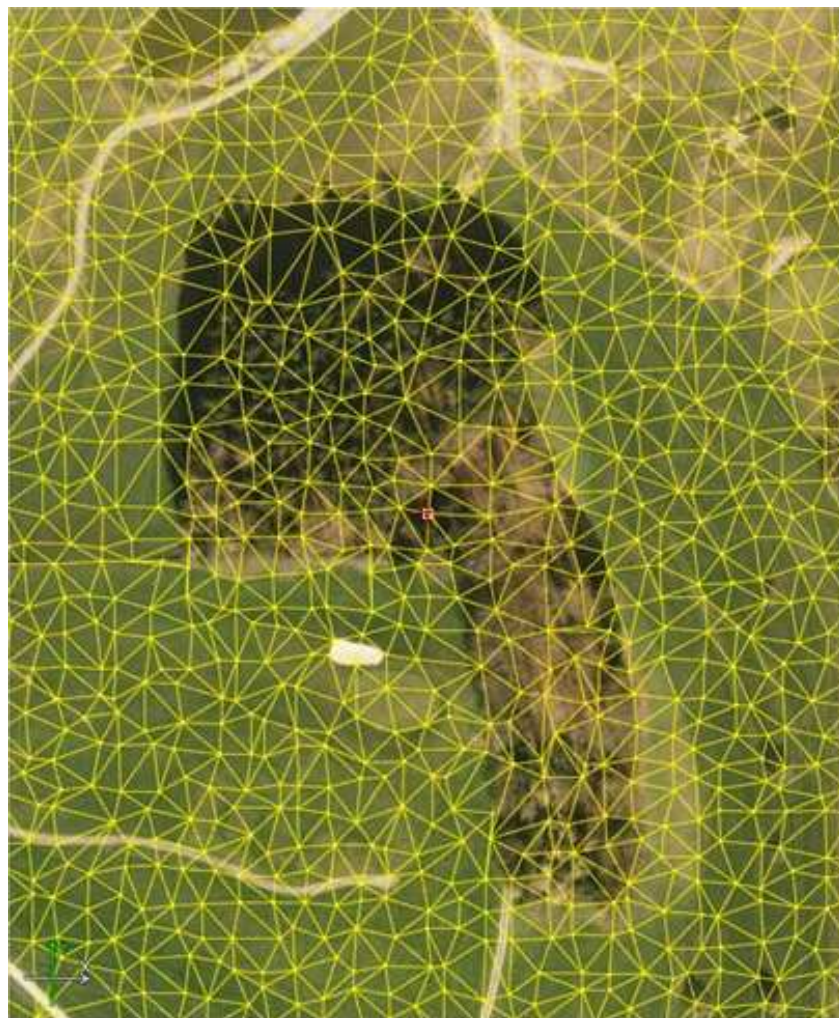


Рис. 27

Для приближения создаваемой модели рельефа к реальной поверхности в нее внедряются дополнительные элементы, обеспечивающие учет и отображение ее линейных и площадных структурных элементов. Такими дополнительными элементами являются широко используемые в топографии структурные линии, определяющие «скелет рельефа»: водоразделы, тальвеги, хребты, обрывы, уступы, озера, овраги, береговые линии, границы искусственных сооружений и др., совокупность которых создает как бы

каркас триангуляции Делоне (TIN). Эти структурные линии внедряются в триангуляцию в качестве ребер треугольников, чем и достигается моделирование реальных элементов рельефа на фоне общих неровностей земной поверхности. Такие ребра называются структурными (фиксированными, неперестраиваемыми), не пересекают ребра других треугольников и в последующем не изменяются.

Задача построения модели поверхности с учетом структурных линий называется триангуляцией Делоне с ограничениями, если условия Делоне выполняются для любой пары смежных треугольников, которые не разделяются структурными линиями. Вид такой триангуляции показан на рисунке 28.



Рис. 28

Триангуляцию Делоне можно получить из любой другой триангуляции по тем же точкам, последовательно перестраивая пары соседних треугольников $\triangle ABC$ и $\triangle BCD$, не удовлетворяющих условию Делоне, в пары треугольников $\triangle ABD$ и $\triangle ACD$ (рис. 29).

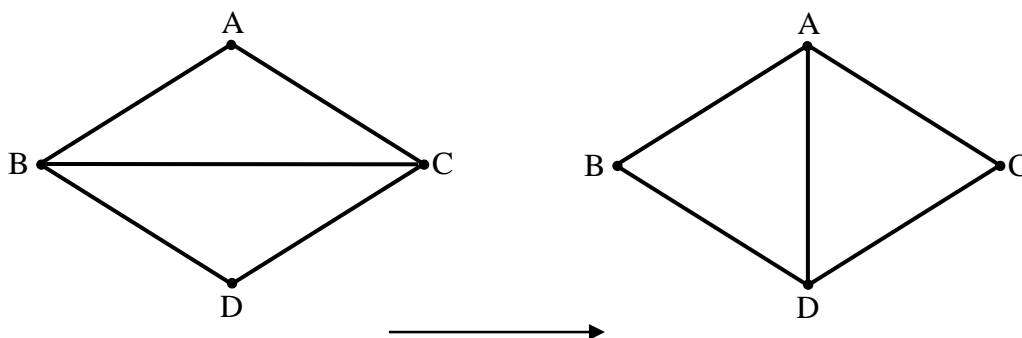


Рис. 29

Данное условие позволяет строить триангуляцию Делоне последовательно, построив вначале некоторую триангуляцию, а потом улучшать ее до выполнения условия Делоне.

При построении ЦМР вершины сети треугольников определяются автоматически при помощи коррелятора без учета характера местности и вершины могут оказаться на крышах домов, на крутых склонах, на водной поверхности и т.п. Поэтому необходимо откорректировать построенную сеть, путем изменения положения ее вершин при стереоскопическом просмотре. В процессе редактирования можно не только переместить точки, но и удалить их или добавить и т.п.

Контроль точности построения TIN осуществляют путем сравнения невязок по координате Z по точкам, полученным в ходе построения и уравнивания сетей фототриангуляции, опорным, контрольным, связующим.

Основные варианты построения ЦМР в программном комплексе Photomod:

Регулярная модель, которую рекомендуют использовать с сильно неоднородными поверхностями.

Адаптивная модель – используется при обработке изображений со значительными однородными областями или достаточно гладкими поверхностями.

Гладкая модель – используется при построении горизонталей в населенных пунктах и сильно залесенной местности.

В каждом методе аппроксимации рельефа используется свой способ.

Работа по созданию ЦМР начинается с выделения зоны продольного перекрытия, на которую будет создаваться модель рельефа.

В вариантах **регулярная модель** и **адаптивная модель** оператор задает размер сетки, например, $A \times B = 30 \times 50$ узлов. Вид сетки показан на рисунке 30.

Коррелятор в узлах сетки определит отметки и вычислит коэффициент корреляции. Если коэффициент корреляции низкий и в большинстве случаев марка не касается точки, меняют размер сетки, например, $A \times B = 31 \times 51$. В этом случае получим одинаковые треугольники.

В варианте **регулярная модель** при автоматическом измерении отметок используют только те точки, которые наметили (см. рис. 30), даже если точка плохо определяется. А в варианте **адаптивная модель** коррелятор выбирает точку в окрестности точек, показанных на рисунке 30. Для всех намеченных точек будут рассчитываться пространственные координаты, и создаваться пикеты.

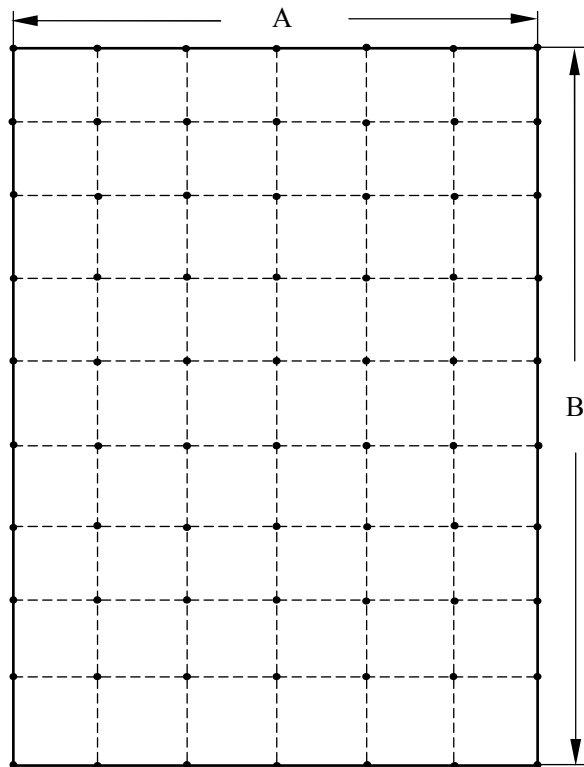


Рис. 30

Сетку можно построить на весь блок изображений, любую часть блока или на выбранную стереопару. Форма границ сетки может быть любой – прямоугольник или произвольный полигон.

Вариант **гладкая модель** предусматривает построение интерполяционной поверхности по набору пикетов, заданных на растровом изображении. Этот вариант удобен при работе с гладкими поверхностями, которые могут быть описаны небольшим числом характерных точек.

Данный тип моделей удобно использовать для расчета горизонталей при необходимости устранения антропогенного влияния (дома, застройки и т.п.) на конечный результат.

В каждом методе аппроксимации рельефа используют свой способ. Число вариантов построения ЦМР или отображения рельефа зависит от версии программы.

Невозможно построить трехмерную модель реальной поверхности в автоматическом режиме. На практике, как правило, не более 70-80% точек может быть измерено автоматически. Для корректировки модели предусмотрен режим редактирования, в ходе которого можно удалять точки, добавлять новые, перемещать в нужное положение. Поиск ошибочных точек

выполняют в режиме стереоскопической визуализации. Программа перепределивает трехмерные координаты всех отредактированных точек.

В процессе редактирования помимо точек сеточной модели редактируются и ребра, которые можно перемещать, удалять граничные ребра и т.д.

Если в процессе создания TIN модель грубо аппроксимирует обрабатываемую поверхность, то можно расщепить (раздробить) созданную TIN на более мелкие элементы, т.е. уменьшить в два раза размер ребер и тем самым увеличить число вершин TIN, или можно добавить узловые точки. Расщепление TIN проводится при возможности расчета дополнительных точек в автоматическом режиме.

Достоинства TIN в том, что плоские участки можно моделировать небольшим числом больших треугольников, а на участках, где необходимо детально показать все перегибы рельефа, поверхность отображается многочисленными маленькими треугольниками.

Результатом построения ЦМР будут геодезические координаты X, Y, Z всех точек модели, полученные по формулам (119) и (120).

Сеть треугольников TIN, построенных для отдельных стереопар, должна быть сшита в единую ЦМР на весь блок изображений.

Для ортотрансформирования нерегулярная сеть треугольников TIN преобразуется в регулярную модель DEM. В программах есть возможность проверки матрицы высот по высотам, полученным при создании TIN, суть которой заключается в том, что для каждой вершины TIN вычисляется отклонение по высоте от соответствующей ячейки матрицы высот.

8. ПОСТРОЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЕЙ

Исходными данными для построения горизонталей является модель рельефа, представленная в виде нерегулярной сети треугольников (TIN) или регулярной матрицы высот (DEM).

По созданной цифровой модели рельефа TIN можно найти положение горизонталей. В случае если рельеф гладкий, то ведется линейная интерполяция по ребрам, соединяющим вершины треугольников (узлы).

Считается, что размеры сторон сети нерегулярных треугольников для правильного отображения рельефа на плане масштаба 1:2000 путем линейной интерполяции между точками с известными высотами возможно, если средние расстояния на местности между ними не превышают:

20 м – для плоскоравнинной местности со слабой расчлененностью;

10 м – для волнообразной поверхности с гладкими формами;

5 м – для сильно расчлененной местности с большим числом оврагов и промоин.

Полученные горизонтали имеют вид ломаной линии (рис. 31), которые необходимо сгладить.

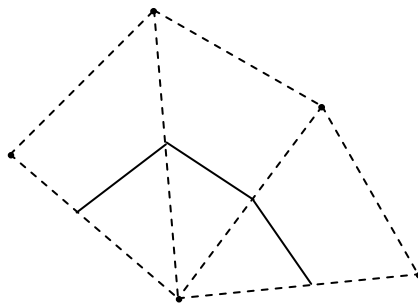


Рис. 31

Перед сглаживанием каждый участок линии, проходящий через четыре точки, анализируют на пилообразность (рис. 32).

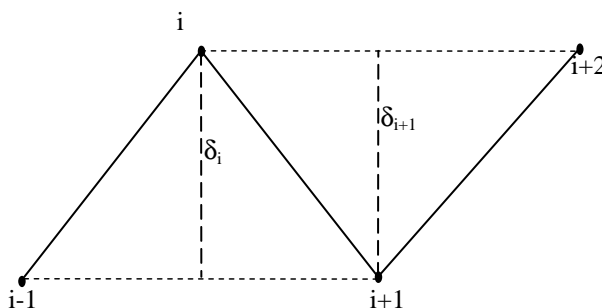


Рис. 32

На рисунке 32 i – номер точки; δ – уклонение точки i относительно линии, соединяющей точки $i - 1$, i и $i + 1$.

Для этого вычисляют значения δ_i по формуле

$$\delta_i = \frac{AX_i + BY_i + C}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \quad (122)$$

где A , B , C – коэффициенты уравнения прямой, проходящей через три точки $i - 1$, i и $i + 1$.

Так как знаменатель формулы (122) положительный, для определения знака достаточно найти числитель.

Если знаки δ_i и δ_{i+1} разные, находят новое значение координат точек горизонтали X'_i , Y'_i , например, по формулам

$$X'_i = \frac{X_{i-1} + 2X_i + X_{i+1}}{4}, \quad (123)$$

$$Y_i' = \frac{Y_{i-1} + 2Y_i + Y_{i+1}}{4}, \quad (124)$$

где X_i, Y_i – координаты смежных точек ломаной линии (рис. 32).

В рассмотренном способе и других горизонтали (сплайны) могут и не проходить через полученные точки. Существуют способы, например, метод сопряженных парабол, в которых обязательным является требование прохождения горизонтали через проинтерполированную точку. Варианты сглаживания показаны на рисунке 33. Вариант сплайн-сглаживания может использоваться только в специфических случаях, правда, при нем полностью исключаются пересечения и самопересечения горизонталей, которые имеют место в других способах сглаживания горизонталей.

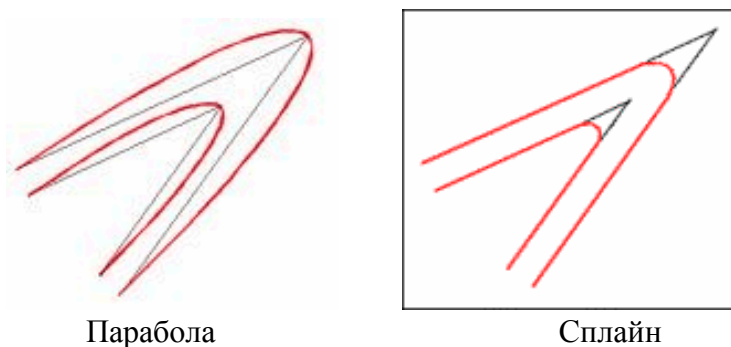


Рис. 33

Последовательность создания горизонталей показана на рисунке 34.



Рис. 34. Изображение горизонталей:
а – автоматически построенных; *б* – сглаженных

Фрагменты горизонталей, построенные на различные стереопары блока изображений, могут быть сшиты в единое целое автоматически.

9. ОРТОТРАНСФОРМИРОВАНИЕ

С появлением на производстве цифровых фотограмметрических станций (ЦФС) большое распространение получили ортофотопланы, монтируемые из ортотрансформированных снимков.

Трансформированием называется процесс преобразования снимка в заданную проекцию составляемой карты (плана) или преобразование наклонного снимка в горизонтальный снимок заданного масштаба и уменьшение искажений, вызванных рельефом местности. Наиболее полно влияние рельефа учитывается при ортотрансформировании, так как трансформируется каждый пиксел будущего ортофотоплана, который имеет малую величину, в соответствии с высотой, определяемой по цифровой модели рельефа.

После ортотрансформирования изображения можно использовать для решения задач, которые требуют высокой точности определения координат точек. После ортотрансформирования становится возможным:

- провести измерения по изображению;
- определить точное местоположение деталей изображения;
- получить информацию для геоинформационной системы и т.д.

В настоящее время практически все пакеты программ, выполняющие фотограмметрическую обработку снимков, имеют модуль ортототрансформирования.

В ранних версиях программы Photomod ортофотопланы создавали в модуле DTM, в более поздних версиях – в модуле Photomod Mosaic.

Ортофотоплан строится с заданным пользователем разрешением на местности и привязывается к выбранной системе координат.

Программе задаются: границы блока, масштаб карты, размер трапеций, формат файла геопривязки, размер разрешения на местности, в соответствии с которым рассчитывается размер пиксела на ортофотоплане, и др. информация.

Работа начинается с создания областей трансформирования. Для удобства можно вывести на экран ряд изображений снимков блока. Как правило, область трансформирования имеет прямоугольную форму. Желательно, чтобы границы области трансформирования проходили как можно ближе к главным точкам снимков (где искажения меньше) и посередине поперечного перекрытия. Максимальная область трансформирования определяется матрицей высот, построенной на основе TIN в модуле DTM или импортированной из другого программного продукта.

При ортофототрансформировании используют исходные изображения снимков, их элементы внутреннего и внешнего ориентирования, координаты точек местности, полученные в результате фотограмметрической обработки, или трансформированные снимки (как в комплексе Photomod) и информацию о рельефе местности, хранимую в ЦМР.

В программном комплексе Photomod имеется три метода построения ортоизображения:

1. Ортотрансформирование на заданной высоте.

В этом случае высота рельефа местности считается постоянной и, как правило, принимается равной среднему значению высоты, рассчитанному по всему блоку изображений в ходе построения и уравнивания сетей фототриангуляции из всех точек, принимавших участие в уравнивании. Этот метод применяется, если перепад точек местности невелик и не приведет к искажениям на будущем ортофотоплане более чем 0,3 мм, как требует «Инструкция по фотограмметрическим работам по созданию топографических карт и планов».

2. Интерполяция по точкам фототриангуляции.

В этом случае при создании ортофотоплана используется полиномиальная модель рельефа, построенная по опорным, контрольным и связующим точкам, полученным в процессе уравнивания сетей фототриангуляции. Этот метод применяют в том случае, если рельеф слегка всхолмленный и полином с достаточной точностью опишет реальную поверхность. Кроме того, этот метод можно использовать, когда проведение порезов и выравнивание яркости выполняется до построения модели рельефа. В этом случае рекомендуется временно установить модель рельефа, используя метод «Интерполяции по точкам триангуляции».

3. По матрице высот.

При создании ортофотоплана этим методом используется прореженная матрица высот. Начиная с версии 3.6 программы Photomod, прореженная матрица высот строится в модуле Photomod Mosaic на основе TIN-модели, полученной в модуле DTM. В процессе создания ортофотоплана нерегулярная модель TIN автоматически перестраивается в регулярную матрицу высот DEM.

Размер ячейки матрицы высот задается в зависимости от размера фрагмента местности, отобразившегося на пикселе ортофотоплана, который в свою очередь зависит от желаемого качества ортофотоплана и времени его изготовления. Например, размер фрагмента местности Δ зададим 0,3 м. Размер ячейки матрицы высот задается в 20 – 40 раз больше. Примем

коэффициент 20, тогда размер ячейки матрицы высот будет соответствовать на местности 6 метров. В этом случае размер пиксела ортофотоплана δ можно рассчитать по формуле $\delta = \Delta/m$, где m – знаменатель масштаба будущего ортофотоплана. Для масштаба ортофотоплана 1:10000 δ составит 30 мкм, а размер матрицы высот – 600 мкм. Границы матрицы высот должны быть не менее границ территории, занимаемой объектом.

Ортотрансформирование и построение ортофотоплана по прореженной матрице идет с высокой скоростью. Однако довольно часто на снимках присутствуют искусственные или естественные объекты небольших размеров, выделяющиеся по высоте по сравнению с окружающим ландшафтом, например, мосты. Для достижения высокой точности трансформирования на таких участках требуется матрица высот высокого разрешения, шаг которой сопоставим с размером пиксела результирующего ортофотоплана, или в разреженную матрицу высот встраиваются трехмерные вектора, описывающие искомые возвышающиеся объекты. Такие участки выделяют. Обработка этих участков требует значительных вычислительных ресурсов, однако в связи с тем, что доля их по отношению к площади всего ортофотоплана невелика, общее время обработки увеличивается незначительно.

Программа может рассчитать ошибки матрицы высот в процессе ортотрансформирования по отклонению вершин TIN от соответствующих им элементов матрицы высот по координате Z и вывести на экран: максимальное отклонение, среднюю и среднюю квадратическую ошибки. Если ошибки велики, то можно уменьшить размер ячейки матрицы высот, что приведет к снижению ошибок. Однако если нет уверенности в том, что формируемая матрица высот правильно отобразит рельеф, используют размер пиксела матрицы высот, полученный в модуле DTM.

После построения сетей фототриангуляции в системе Photomod выполняется трансформирование изображений снимков, в ходе которого устраняются искажения, обусловленные наклоном снимка. Так как трансформирование снимка осуществлялось с использованием углов α , ω , κ , определенных относительно заданной системы координат, то строки и столбцы цифрового трансформированного изображения параллельны осям координат системы координат объекта (см. рис. 35). Однако на трансформированном снимке положение точек искажено под влиянием рельефа местности. Чтобы учесть влияние рельефа, используют ЦМР. Для этого нерегулярная сеть треугольников TIN преобразуется в регулярную модель DEM. Стороны матрицы высот регулярной модели рельефа также параллельны осям X ,

Y системы координат объекта. Высоты точек ЦМР также определены в заданной системе координат.

При цифровом ортотрансформировании сначала формируется матрица будущего ортофотоплана, строки и столбцы которой параллельны осям X и Y системы координат объекта (рис. 35). По координатам X, Y будущего ортоизображения на цифровой модели рельефа определяют аппликату Z (рис. 35).

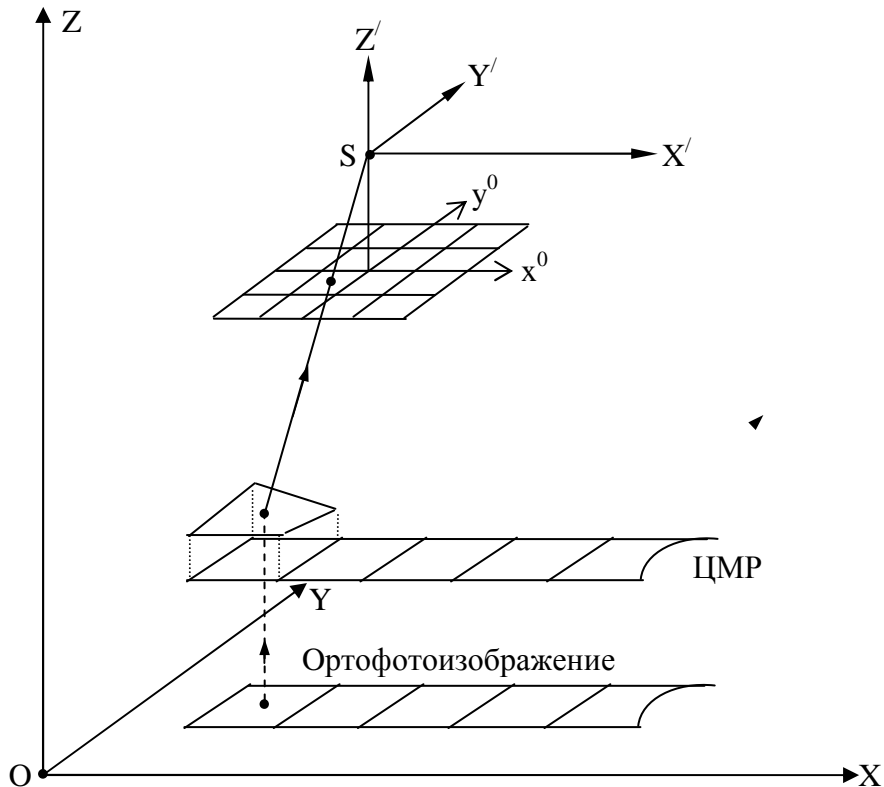


Рис. 35

На рисунке 35 показаны: $OXYZ$ – заданная система координат; $SX'Y'Z'$ – вспомогательная система координат, оси которой параллельны осям координат заданной системы координат; трансформированный снимок, оси координат которого x^0, y^0 параллельны осям координат заданной системы координат, а также ЦМР и будущее ортоизображение.

По определенным координатам X, Y, Z вычисляют координаты x^0, y^0 на трансформированном цифровом снимке по формулам

$$x^0 = -f \frac{(X - X_S)}{(Z - Z_S)}; \quad y^0 = -f \frac{(Y - Y_S)}{(Z - Z_S)}. \quad (125)$$

Затем оптическая плотность элемента матрицы с координатами x^0, y^0 трансформированного цифрового снимка присваивается соответствующему элементу матрицы цифрового ортофотоснимка.

Согласно требованиям инструкции по фотограмметрическим работам учитывать влияние рельефа местности необходимо в том случае, когда превышения относительно средней уровенной поверхности на трансформируемом снимке h_{don} превышают значение, рассчитанное по формуле

$$h_{don} = \frac{0,3fM}{r}, \quad (126)$$

где f – фокусное расстояние аэрокамеры;

M – знаменатель масштаба будущего ортофотоплана;

r – расстояние от центральной точки до крайней точки, которая попадет на фотоплан;

0,3 – средняя ошибка на ортофотоплане.

Таким образом, требования к ортофотоплану такие же, как и при других способах создания фотопланов.

Точность ортофотоплана зависит от точности определения аппликат в узлах сетки, методики определения высоты центральной точки сетки и размеров сетки.

Ортофотоплан создают в системе координат цифрового изображения, которое хранится в файле цифрового изображения, а для перехода в заданную систему координат служит файл привязки. Переход в заданную систему координат осуществляется по формулам

$$X = Ax_e + By_e + C, \quad (127)$$

$$Y = Dx_e + Ey_e + F. \quad (128)$$

В формулах (127) и (128) A, B, C, D, E, F – коэффициенты, которые находят по координатам точек на ортофотоплане.

Наличие файла привязки позволяет использовать ортофотоплан в любой программе.

По перекрывающимся цифровым ортофотоснимкам монтируют цифровые ортофотопланы.

Перед монтированием мозаичных ортофотопланов на каждом из исходных снимков отрезается 10% изображения с каждой из четырех сторон, чтобы исключить при монтаже области координатных меток и вспомогательную информацию, которая порой впечатывается в снимок. На ортотрансформированных снимках, которые будут использоваться при монтаже, выбирают области перекрытия таким образом, чтобы области

трансформирования были с перекрытием и не появились незаполненные участки. Величина перекрытия задается в зависимости от перепада высот. Чем значительнее перепады высот, тем больше должно быть взаимное перекрытие монтируемых снимков (рис. 36).

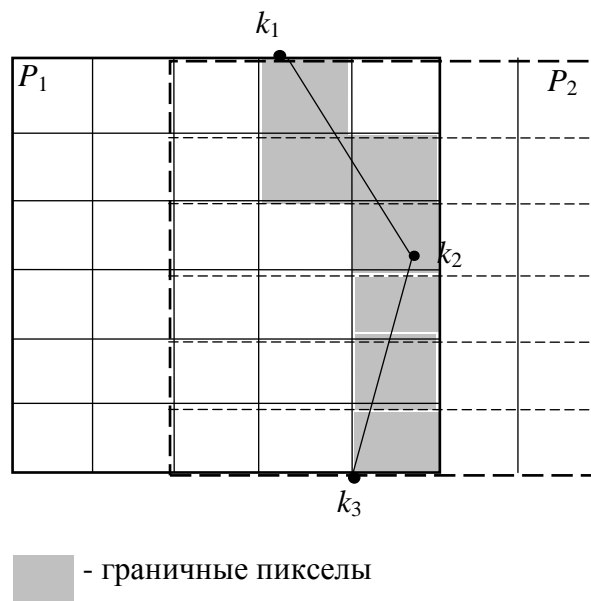


Рис. 36

Для монтажа ортофотопланов в зоне перекрытия смежных цифровых ортотрансформированных фотоснимков проводят линию пореза в виде полилинии с узлами k_i . Границы порезов, как правило, выбирают посередине зон перекрытий снимков. С помощью линии пореза определяют в каждой строке граничные элементы, совмещенные с линией пореза, и приступают к формированию матрицы цифрового ортофотоплана. Каждая строка матрицы фотоплана формируется из строки снимка P_1 , включая граничный пиксел, и строки снимка P_2 , начиная с пиксела, следующего за граничным.

Основные правила проведения порезов:

Порезы не должны пересекать объекты, возвышающиеся над рельефом (мосты, здания, объекты, служащие ориентирами, опоры ЛЭП и т.п.), так как возможны двоения и потери объектов.

1. Порезы не должны проходить по границе протяженных объектов, отличающихся по тону от основного фона (кромка леса, дорога и т.п.).

2. Рекомендуется пересекать линейные объекты под углом близким к прямому по отношению к этим объектам. Или необходимо вести порез на достаточном отдалении от линейного объекта.

Аналогичным образом монтируются другие перекрывающиеся ортофотоснимки.

Затем проводят фотометрическую коррекцию сформированного ортоизображения по границам снимков (выравнивание яркостей по границам зон трансформирования).

Фотометрическая коррекция предусматривает выравнивание яркости смежных снимков.

Исходные снимки могут иметь значительные яркостные и цветовые различия. Для выравнивания яркости в программе есть опции глобального и локального выравнивание яркости.

Глобальное преобразование предполагает преобразование, одинаково применяемое ко всем пикселям каждого изображения.

В этом случае выравнивание яркости выполняется по среднему значению яркости – когда яркость и контраст изображений приводится к значениям яркости и контраста всех снимков, входящих в мозаику, или по яркости выбранного снимка, когда яркость и контраст изображений приводятся к соответствующим характеристикам выбранного изображения (эталона).

Выравнивание по среднему значению яркости и контраста всех снимков, входящих в мозаику, рекомендуется в случае резкого различия яркости снимков, содержащих однородные сцены. Но если есть сцены с различной отражательной способностью (суша – море), выравнивание может выполняться неправильно.

Выравнивание по яркости выбранного снимка применяют, когда яркость приводят к характеристикам выбранного изображения. В качестве эталона используют снимок в центре мозаики. При наличии локальных изменений яркости на снимках может произойти постепенное изменение средней яркости по мере удаления от эталона.

Локальное выравнивание означает преобразование, применяемое вдоль линий сшивки с постепенным его ослаблением к центру снимка и границам мозаики. В большинстве случаев локальное выравнивание яркости приводит к удовлетворительным результатам.

При использовании локального выравнивания вначале выравнивают снимки внутри маршрутов, затем маршруты выравнивают между собой.

Цифровые ортофотопланы могут создаваться в пределах границ планшетов или в произвольно заданных границах (населенный пункт, промышленный объект и др.).

Для получения на основе изготовленного цифрового ортофотоплана цифровой фотокарты на растровое фотоизображение (ортофото-изображение) накладывается векторная цифровая информация. Эта информация

может включать условные знаки, линии различных типов, толщин и цветов, заливки, штриховки, подписи и т.п.

На фотоплан должны быть нанесены все опорные геодезические пункты. Их следует отобразить на фотоплане условными знаками. Кроме этого, должны быть нанесены рамка листа карты, координатная сетка и выполнено зарамочное оформление фотоплана.

Точность созданных цифровых ортофотопланов оценивается по расхождениям плановых координат на опорных, контрольных и связующих фотограмметрических точках, по линиям соединения фрагментов («порезам»), полученным со смежных снимков, и сводкам со смежными фотопланами. Контроль планового положения опорных и контрольных фотограмметрических точек выполняется по разности плановых координат изображений этих точек на ортофотоплане и их значений, выбранных из соответствующих каталогов. В случае значительных расхождений следует проверить TIN в окрестностях данной точки в модуле DTM. Для оценки точности совмещения по линии пореза можно измерить расстояния по ортофотоплану между точками с известными координатами. Можно использовать пункты триангуляции или загрузить контрольные точки.

Точность цифровых фотопланов описана в инструкции по фотограмметрическим работам:

- средние величины погрешностей в плановом положении опорных и контрольных точек не должны превышать в масштабе создаваемого фотоплана 0,5 мм в равнинных и всхолмленных районах и 0,7 мм – в горных;

- несовмещение контуров по линии соединения фрагментов не должно быть более 0,7 мм, а в горных районах – 1,0 мм;

- предельно допустимые величины несовмещений контуров при контроле по сводкам со смежными фотопланами составляют 1,0 мм в равнинных и всхолмленных районах и 1,5 мм – в горных. Как исключение, в равнинных районах допускают расхождения по сводкам до 1,5 мм (не более 5%);

- контроль изобразительного качества фотоплана осуществляется визуальным сравнением с эталоном. Размеры сторон и диагоналей фотоплана не должны отличаться от теоретических более чем на 0,2 мм.

10. ВЕКТОРИЗАЦИЯ

Векторизация – это обрисовка объектов поверх растровых изображений и указание, что нужно понимать под выделенным объектом – здание, земельный участок, кабель и т.д. При векторизации растровое изображение

заменяется на так называемую векторную или, как иногда говорят, цифровую модель местности. Векторизация объектов по их растровому изображению является заключительным этапом в создании топографических карт и планов. Важную роль здесь играет дешифрирование, эффективность которого зависит от особенностей изучаемых объектов и характера их передачи при аэрофотосъемке. Экономически получение векторной карты – дорогостоящий и трудоемкий процесс.

Перед началом работ проводятся редакционно-подготовительные мероприятия. Изучается район работ, анализируются исходные материалы, проводится сбор данных. **В районных комитетах** собирают: списки названий населенных пунктов; списки землевладений и землепользований. **В сельских советах** собирают сведения о границах земель сельских населенных пунктов. **В лесхозах** – схемы лесных кварталов, сведения о породах деревьев и т.д.

Создаются рабочие редакционные схемы на картах более мелкого масштаба или схемах, на которые наносятся основные объекты гидрографии, дорожной сети, населенные пункты, магистральные линии электропередач, трубопроводы и др. По редакционным схемам, в процессе производства работ, отслеживаются и согласовываются выходы автомобильных и железных дорог, колеиность и электрифицированность железных дорог, напряжение линий электропередач, назначение и количество трубопроводов и другие данные.

На цифровой фотограмметрической станции Photomod векторизацию можно выполнить в модуле StereoDraw по технологии аналогичной рисовке контуров и горизонталей на универсальном приборе или в модуле VectOr, где векторизацию выполняют по ортофотоплану путем его дешифрирования с определением границ и указанием контуров.

Рассмотрим векторизацию в модуле VectOr.

Данные о цифровых векторных картах, независимо от программы и модуля, в которых выполняется векторизация, имеют следующую структуру:

- паспортные данные о листе карты (масштаб, проекция, система координат, прямоугольные и геодезические координаты углов листа и т.д.);
- метрические данные объектов карты (координаты объектов на местности);
- семантические данные объектов карты (различные свойства объектов, например, дорога с бетонным покрытием и дорога с асфальтовым покрытием могут изображаться линиями разного цвета).

Объектом электронной карты является совокупность цифровых данных (метрики, семантики, справочных данных), которым может соответствовать реальный объект на местности (мост, река, здание и т.д.). **Отдельные объекты могут объединяться в группу объектов (квартал – группа домов и т.п.). При сложном описании метрики объекта она может быть разделена на два объекта.**

Объект имеет определенный набор параметров. Обязательные параметры приписываются каждому создаваемому векторному объекту. Дополнительный набор параметров (атрибуты), специфичны для конкретного объекта.

Для отображения объектов служит единый классификатор – файл описания условных знаков, который порой называют таблицей кодов. В описании объекта указывается код объекта (набор цифр), условный знак и др. параметры.

Семантические характеристики также имеют цифровой код и наименование, которые хранятся в списке характеристик в цифровом классификаторе.

Использование цифрового классификатора предусматривает:

- формирование изображения, параметров и атрибутного описания условных знаков, используемых при отображении и печати электронных карт;
- логическое разделение всех объектов карты на отдельные слои;
- управление приоритетами вывода слоев электронной карты на экран.

Однако для нанесения на карту вспомогательной графической информации (пояснительные надписи, вспомогательные линии, полигоны и т.д.) удобнее применять произвольные графические примитивы без их предварительного описания в классификаторе. Графический объект карты – это объект, не имеющий описания в классификаторе, но имеющий метрику, семантику, слой, уникальный номер и условный знак.

Создание векторных объектов возможно как с использованием таблицы кодов, так и без нее, что удобно при нанесении на карту вспомогательной графической информации. В этом случае применяют произвольные графические примитивы без их предварительного описания в классификаторе. К графическим примитивам относят: точечный объект, линейный и полигональный.

Точечный объект – это объект с определенными координатами, чьи размеры слишком малы, чтобы отразить его форму в масштабе карты, например, пункты опорной геодезической сети.

Линейный объект – объект, отображающийся в виде линии.

Полигональный объект – определяется замкнутой границей, например, границей леса, озер и т.п.

Отвекторизовав контур на ортофотоплане, можно получить его площадь, периметр.

Окончательная точность должна соответствовать требованиям, предъявляемым к точности обыкновенных карт.

К ошибкам ортофотоплана добавятся ошибки векторизации. В ходе векторизации контуров, например, если последнюю точку не совместить с первой, может появиться петля, разрыв и т.д. Программа должна обладать возможностью поиска таких ошибок, а оператору необходимо выявленные ошибки исправить.

Векторным объектам присваивается соответствующий условный знак из классификатора.

Порой возникает проблема стыковки одноименных контуров изготавливаемого ортофотоплана с соседним. Расхождение не должно превышать допуска и, если допуск не превышен, то необходимо выполнить стыковку соответствующих контуров.

Очередность распознавания и выделения контуров, как правило, такая же, как и при других способах дешифрирования, и выполняется в следующем порядке:

- оформление рамок листов карт;
- опорные пункты;
- гидрографическая сеть и гидросооружения;
- населенные пункты;
- ориентиры и отдельные постройки вне населенных пунктов;
- дорожная сеть и дорожные сооружения;
- линии электропередач и связи;
- элементы рельефа;
- растительный покров и грунты;
- сводки по смежным листам;
- зарамочное оформление.

Как правило, перечисленные пункты образуют слои: геодезические пункты, гидрография, растительность, административное деление, названия и подписи и т.д. Концепция слоев позволяет группировать близкие по какому-либо признаку объекты на отдельных слоях. Можно выбирать все объекты текущего слоя для выполнения с ними каких-либо операций. Число слоев зависит от масштаба создаваемой (обновляемой) карты, назначения и классификатора.

10.1. Оформление рамок листов карт

На рамках листов карт показываются выходы прямоугольной картографической сетки в виде проведенных параллелей и меридианов. За внутренней рамкой листов карт указываются географические координаты вершин углов рамки. Формирование рамок листов карт может выполняться автоматически.

В заголовке помещается название наиболее крупного населенного пункта. Элементы изображения и подписи не должны пересекать внутренней рамки листа. Как исключение, за рамкой показываются продолжения рек, дорог, если это помогает читаемости. Если центр условного знака находится на рамке карты, то этот объект показывается полностью на данном и смежном листах.

На каждый лист карты составляется формуляр, содержащий следующие данные:

- сведения о математической и геодезической основе;
- административное деление территории;
- список материалов, использованных при составлении карт;
- указания по составлению и оформлению листа карты;
- составление оригинала карты, заключение о качестве оригинала;
- подготовка к изданию;
- оформление оригинала к изданию.

10.2. Опорные пункты

Пункты планового обоснования наносятся по координатам. Эти данные берутся из формуляра карты, поэтому точность положения обозначений условных знаков должна быть в пределах 0,2 мм. Условные знаки пунктов геодезической сети и закрепленных на местности точек съемочной сети сопровождаются подписью отметки центра. Все отметки даются с точностью 0,1 м.

10.3. Гидрография и гидротехнические сооружения

Требования к дешифрированию объектов местности взяты из «Редакционных указаний по созданию топографических карт».

Цифрование необходимо начинать с объектов гидрографии. В плановом отношении объекты гидрографии, как правило, наносят в точном соответствии с их положением на ортофотоплане. Этому принципа следует придерживаться при цифровании площадных объектов и объектов естест-

венного происхождения (реки, озера). Некоторые незначительные или имеющие второстепенное значение канавы (даже показываемые в две линии) вдоль профилированных автомобильных дорог допускается сдвигать на минимальное расстояние (0,2 мм), исключая их касание (наползание) на стадии подготовки карт к изданию. В каждом случае необходимо проводить анализ ситуации и верно определять значимость каждого объекта.

В случае векторизации других объектов, а также при обобщении и отборе наиболее важных объектов пользуются допусками, принятыми при создании карт. При допустимой средней погрешности в положении контура, например, $\pm 0,5$ мм, имеется возможность более важный объект изобразить с более высокой точностью, а второстепенный – сдвинуть в пределах допуска. Например, дорога пролегает рядом со рвом, но отобразить дорогу и ров там, где они изобразились невозможно. Тогда, полагая дорогу более важным объектом, ее ось оставляют на месте изображения, а ров смещают.

Пруды и озера менее 1 кв. мм не цифруются. Дешифрирование открытых водоемов и водотоков не вызывает затруднений, но на их фотоизображения влияют различные факторы (условия освещения, небольшая облачность, блики, цвет дна, мутность воды, наличие водорослей), и поэтому тон может изменяться от черного до очень светлого (см. рис. 37).

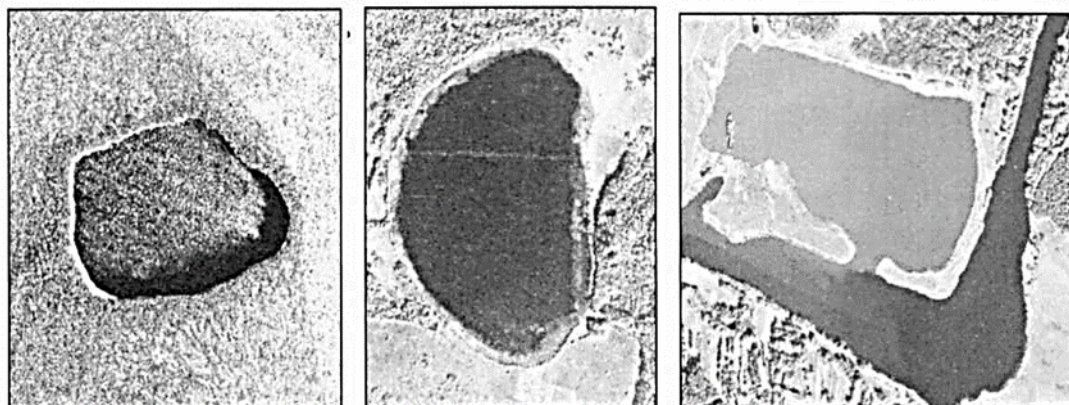


Рис. 37. Изменение тона воды

Все объекты, характеризующие площадную и линейную гидрографию на карте, показывают в соответствии с определенными правилами:

– Урезы воды на замкнутых водоемах надо давать с площади 1 кв. см. Если отметок высот не достаточно, то допускается подписывать значения урезов воды на водоемах меньшей площади, но без нанесения значка уреза. На «воде» отметки урезов воды размещают только в том случае, если нет места на берегу. Урезы на реках должны быть определены примерно через 10-15 см на карте.

– Собственное название замкнутых водоемов размещают по их изображению по прямым или плавным линиям в направлении вытянутости

объектов гидрографии. Если название не помещается на изображении водоема, тогда его подписывают параллельно северной рамке карты, по возможности справа. Названия рек и каналов подписывают параллельно береговым линиям по суше или воде, если это позволяет их ширина. Названия размещают так, чтобы реку можно было отследить от истока до устья. Длинные (через всю карту), но не очень извилистые реки без многочисленных притоков подписывают не более трех раз.

– Направление течения рек, как правило, указывают немного впереди собственного названия. Величину скорости течения воды подписывают только для рек, которые изображаются двойными линиями.

– Характеристики у рек и каналов, изображаемых двойными линиями, должны быть расставлены не реже чем через 10-15 см. Если позволяет ширина реки, то характеристику располагают на русле реки, а при небольшой ширине – выносят за береговую линию.

– Водную и камышовую растительность размещают по их приуроченности, а не по всему контуру водоемов.

10.4. Населенные пункты

Цифрование населенных пунктов необходимо начинать с отработки улиц и проездов. Стороны улиц сельских населенных пунктов цифруются по границе заборов (палисадников) или фасадной линии домов, расположенных вдоль проездов. Минимальный интервал между линиями на карте (плане) 0,63 мм. Улицы, ширина которых в масштабе создаваемой карты более 0,8 мм, цифруют по фотоизображению в масштабе карты, сохраняя их характерные конфигурацию и расширения.



Рис. 38. Сельский населенный пункт

На рисунке 38 показан фрагмент сельского населенного пункта с хорошо различимыми домами и приусадебными участками.

Если на карте расположен город или поселок городского типа, то предварительно должны быть уточнены и нанесены границы городских земель, т.к. есть особенности отображения их территории. На рисунке 39 изображен фрагмент городской застройки.

В городах и поселках городского типа выделяют кварталы. По характеру строений кварталы подразделяются на огнестойкие и неогнестойкие. Кварталы считаются огнестойкими, если в них 50% и более огне-

стойких строений. В квартальную застройку включаются и территории промышленных предприятий, находящиеся внутри городской застройки, если они ограничены улицами.



Рис. 39. Городская застройка

Садовые участки четко определяются по фотоизображению. Показывают внешние заборы, постройки, проезды. Если заборов нет, границы садовых участков «отбиваются» контуром или существующими проездами. Садовые участки представлены на рисунке 40.



Рис. 40. Садовые участки

Хорошо различимы границы участков, древесная растительность, проезды.

Промышленные, сельскохозяйственные и социально-культурные комплексы хорошо дешифрируются по фотоизображению; при наличии нескольких признаков их можно различать и по назначению.

Автозаправочные станции (АЗС) приурочены к автомобильным дорогам высших классов и выделяются характерными подъездами, хорошо заметными на ортофотопланах. Здания заправочных станций и примы-

кающие к ним асфальтовые площадки и подъезды сопровождаются пояснительной подписью АЗС.

Линии электропередач и воздушные линии связи распознаются по темным теням от опор (рис. 41).



Рис. 41. Линия электропередач

Наземные и подземные трубопроводы на ортофотопланах выглядят по-разному. Наземные трубопроводы (рис. 42) имеют вид тонких, четких ниточек. Недавно проложенные подземные трубопроводы видны в виде светлых, как бы размытых линий трассы – следам, оставшимся после их прокладки из-за нарушения почвенно-растительного покрова. Помогают их дешифрированию имеющиеся наземные сооружения: станции обслуживания трубопроводов, контрольно-распределительные пункты, люки смотровых колодцев, а также столбики-пикеты.



Рис. 42. Наземный газопровод

Дороги и дорожные сооружения уверенно распознаются по ортофотопланам. Имеющие твердое покрытие автомобильные дороги подразделяются (на топографических картах) по степени технического совершенства, а естественные грунтовые дороги классифицируются по их значению. Опознаются автомобильные дороги по прямым дешифровочным признакам. По фототону хорошо читается их асфальтовое покрытие (проезжая часть), обочины, оборудованные съезды, а также разделительные полосы на автомагистралях.

Автомагистрали (автострады) – дороги высшего класса, предназначенные для скоростного движения транспорта. Такие дороги содержат две проезжие части (по 7,5 м и более шириной, на прочном основании). Автомагистраль представлена на рисунке 43. Автомобильные дороги (шоссе), имеющие ширину проезжей части менее 7 м, с асфальтовым, щебеночным, гравийным или покрытием из других материалов, без прочного основания показаны на рисунке 44.



Рис. 43. Автомагистраль



Рис. 44. Шоссейные и грунтовые дороги

Они хорошо дешифрируются по резко очерченным проезжим частям и кюветам. У автомобильных дорог без покрытия, не имеющих твердого

основания и покрытия, с шириной проезжей части не менее 4,5 м, грунт проезжей части может быть укреплен (улучшен) гравием, щебнем, песком. Улучшенные грунтовые дороги на ортофотоплане отображаются светлым тоном, у них трудно отделить проезжую часть от обочин.

К полевым и лесным дорогам относят второстепенные грунтовые дороги, используемые автогужевым транспортом не регулярно или сезонно. Показывают только постоянные полевые дороги.

На рисунке 45 представлена транспортная развязка, она отлично дешифрируется по наличию скопления разъездов.



Рис. 45. Транспортные развязки

Расположение мостов (путепроводов) всегда приурочено к препятствиям, расположенным поперек трассы дороги – к рекам, канавам, оврагам или при пересечении двух дорог на разных уровнях. Они хорошо опознаются на ортофотопланах. Мост через реку представлен на рисунке 46. Небольшие мосты дешифрируются по заметным сужениям фотоизображений дорог, а также разрывам насыпей на них. Мосты длиной 13 м и более цифруют по фотоизображению с сохранением их действительных размеров.



Рис. 46. Металлический мост

Уверенно дешифрируются железные дороги, в том числе и узкоколейные. К железным дорогам **приурочены** железнодорожные станции (рис. 47).

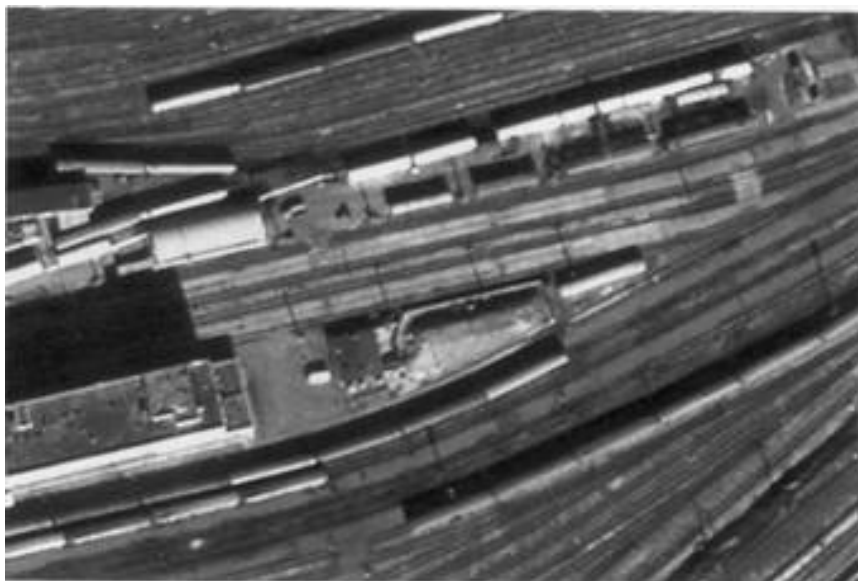


Рис. 47. Здание вокзала и станционные пути

10.5. Растительный покров и грунты

На топографических картах растительность показывается с подразделением по основным жизненным формам растений: деревья, кустарники, травы и мхи. Древесная и кустарниковая растительность может иметь как сплошные ареалы распространения, так и локальные (отдельные или редкие). При дешифрировании следует учитывать то, что некоторые породы растений имеют как древесные, так и кустарниковые виды (ольха, ива). Молодая поросль некоторых древесных пород (березы, дуба) внешне может напоминать заросли кустарников. Поэтому, во избежание ошибок, необходимо правильно учитывать их высоту, условия произрастания, рельеф, наличие влаги и другие факторы.

Близко расположенные одноименные контура растительности (до 0,5 мм) можно объединять. Леса цифруются с подразделением на хвойные, лиственные и смешанные. Взрослыми лесами принято считать массивы древесной растительности, в которых высота деревьев достигла 4 м и более.

Сплошные узкие полосы леса, поросли кустов (менее 1,5 мм) вдоль дорог, рек и канав следует показывать обсадками (односторонними или двусторонними). Они легко дешифрируются (рис. 48).

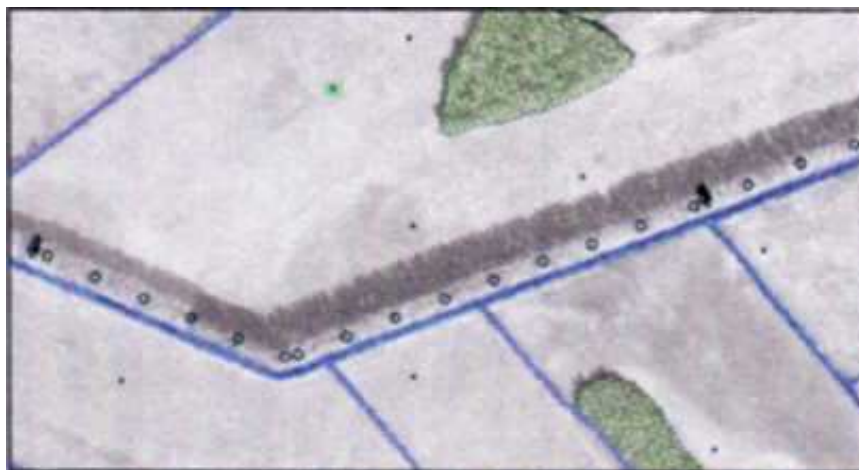


Рис. 48. Обсадки

Кустарники – многолетняя древесная растительность высотой до 8 м, ветвящаяся от самого основания (нет главных стволов). На ортофотоплане они характеризуются мелкозернистой серой структурой фототона, небольшими падающими тенями и волнистой (кудрявой) формой их крон.

Поляны (луговая растительность) и пашни в лесах выделяют с 10 кв. мм. С достаточной определенностью по фотоизображению можно отделить участки травяной растительности от изображения другой растительности. Луговая растительность дешифрируется по неоднородной структуре фототона, сопутствующим деревьям и кустарникам и своей приуроченностью к долинам рек, полянам в лесу, местам неудобным для посевных работ, как на рисунке 49. На ортофотоплане избыточно увлажненные места характеризуются более темным тоном, чем окружающие их сухие участки.

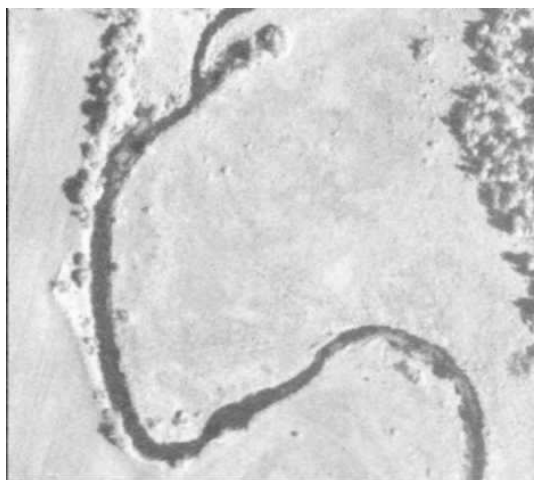


Рис. 49. Пойменная луговая растительность

Отдельно стоящие деревья надо цифровать не чаще чем через 5 мм. Не стоит показывать отдельно расположенные деревья и кусты рядом с контурами лесов или сплошных кустов.

Большинству болот присущи неправильная форма и плавные, округлые очертания. Травянистые низинные болота имеют темный тон, а верховые моховые болота – светлый или светло-серый тон фотоизображения. Чем сильнее обводнены болота, тем темнее они выглядят.

Объекты показываются с учетом произошедших изменений местности, характеристик старой карты, правил генерализации, а также с учетом требований расположения объектов относительно друг друга. Для более уверенного распознавания некоторых объектов и уточнения характеристик необходим стереоскопический просмотр. Для этой цели изготавливается плоттерная распечатка ортофотоплана (с цифровой картой), на которой указываются места или объекты, требующие дополнительного уточнения. Стереоскопический просмотр осуществляет специально подготовленный человек из фотограмметрической группы с использованием цифровой фотограмметрической системы Photomod.

Модуль StereoDraw – модуль стереовекторизации, предназначенный для создания и редактирования трехмерных векторных объектов в стереорежиме. Трехмерные векторные объекты используют для создания цифровых карт.

Векторные объекты представляют собой сочетание координатной информации о пространственной форме объекта (координаты вершин) и атрибутивной информации, описывающей тематическое содержание объекта. В связи с тем, что в модуле StereoDraw определяют трехмерные координаты, т.е. координаты X , Y и Z , то вместо точечного, линейного и полигонального объектов используют несколько другие названия: пикет, полилиния, полигон.

Полилиния представляет собой последовательность точек трехмерного пространства (вершин), соединенных отрезками прямых (ребер). Набор трехмерных точек (вершин), соединенных прямыми отрезками, называют сегментами. Полилиния может быть замкнутой, когда конечная точка совпадает с начальной пространственно. Частный случай полилинии, которая всегда замкнута, представляет собой контур (полигон). Замыкание полигона производится автоматически по завершении создания.

Разные полилинии могут пересекаться, сходиться и расходиться. Вершины пересечения, схождения или расхождения называют узлами. При редактировании полилиний применяют сглаживание для более детального получения гладких кривых при построении векторных объектов (дорог,

горизонталей и т.п.). В программе Photomod предусмотрен режим автоматического сглаживания и интерполирования полилиний. Если сглаженная кривая наилучшим образом описывает интересующий объект, необходимо проинтерполировать ее для получения дополнительных вершин. Шаг интерполяции выбирается оператором.

Существуют следующие способы создания контуров и рельефа:

- 1) в стереорежиме вручную;
- 2) автоматически вычисляются координаты точек;
- 3) в режиме трассировки по высоте координата Z вычисляется автоматически.

Работа в стереорежиме вручную аналогична работе на универсальном приборе при создании топографической карты (плана).

Для определения трехмерных координат узлов, горизонталей и контуров служит маркер, который в стереорежиме может перемещаться как в плоскости XY , так и по высоте.

При создании пикета совмещают маркер с точкой объекта (рельефа). Считывание и запись координат производится автоматически.

В отличие от универсальных приборов, где создание карты начинают с рисовки горизонталей, в модуле StereoDraw можно создать сначала ситуацию, т.к. при создании ситуации будет получено много точек с отметками. Полученные точки можно экспортировать в модуль DTM для построения модели рельефа и создания горизонталей.

Можно использовать режим автоматического проведения горизонталей с использованием алгоритма корреляции, если коррелятору удалось определить трехмерные координаты. В этом случае стереомаркер перемещается по поверхности рельефа в плоскости XY на выбранной оператором высоте автоматически.

В режиме трассировки по высоте оператор перемещает маркер в плане, а на рельеф он позиционируется автоматически с помощью коррелятора. В случае сообщения «Плохая точка» нужно добиться касания маркером точки вручную.

В модуле StereoDraw требования к очередности и точности отображения контуров такие же, как и в модуле VectOr.

При построении горизонталей возникает необходимость фиксации маркера по высоте. При дальнейшей работе маркер перемещается в плоскости XY на выбранной оператором высоте. Режим постоянной высоты удобен также при редактировании горизонталей.

Модуль программы StereoDraw требует значительного объема ручного труда, поэтому чаще векторизацию выполняют в модуле VectOr.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие компьютерных технологий, а также теоретические исследования в области обработки изображений сделали возможным применение цифровых методов. В цифровой фотограмметрии фотограмметрические процессы полностью или частично автоматизированы за счет использования цифровых изображений, получаемых путем сканирования фотоснимков или непосредственно с помощью цифровых метрических камер.

На смену аналитическим фотограмметрическим приборам в цифровой фотограмметрии приходит комплекс технических и программных средств, обеспечивающих автоматизацию ряда фотограмметрических процессов. К техническим средствам цифровой фотограмметрии можно отнести цифровые метрические камеры, фотограмметрические сканеры, стереомониторы, фотограмметрические рабочие станции. К числу программных средств относятся такие программные продукты, как ЦФС «Талка», «Дельта», «Photomod» и другие.

Структура программного комплекса «Photomod»

В состав системы входит управляющая оболочка PHOTOMOD Core и девять основных модулей:

- PHOTOMOD AT – подготовка данных для фототриангуляции;
- PHOTOMOD SolverA – уравнивание сетей фототриангуляции для снимков в центральной проекции;
- PHOTOMOD SolverS – уравнивание сетей фототриангуляции для сканерных снимков;
- PHOTOMOD DTM – построение ЦМР;
- PHOTOMOD StereoDraw – стереовекторизация и трехмерное моделирование;
- PHOTOMOD 3D Mod – построение гладких горизонталей;
- PHOTOMOD Mosaic – создание ортофотопланов;
- PHOTOMOD Geomosaic – выравнивание яркости ортофотопланов, нарезка на листы, создание зарамочного оформления;
- PHOTOMOD ScanCorrect – геометрическая калибровка изображений, полученных планшетными полиграфическими сканерами.

На рисунке 1 приведена упрощенная технологическая схема обработки проекта в системе PHOTOMOD.

Единая управляющая оболочка PHOTOMOD Core служит для подключения функциональных возможностей различных модулей, а также 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, импорта элементов внешнего ориентирования и построения накидного монтажа с учетом различных входных данных.

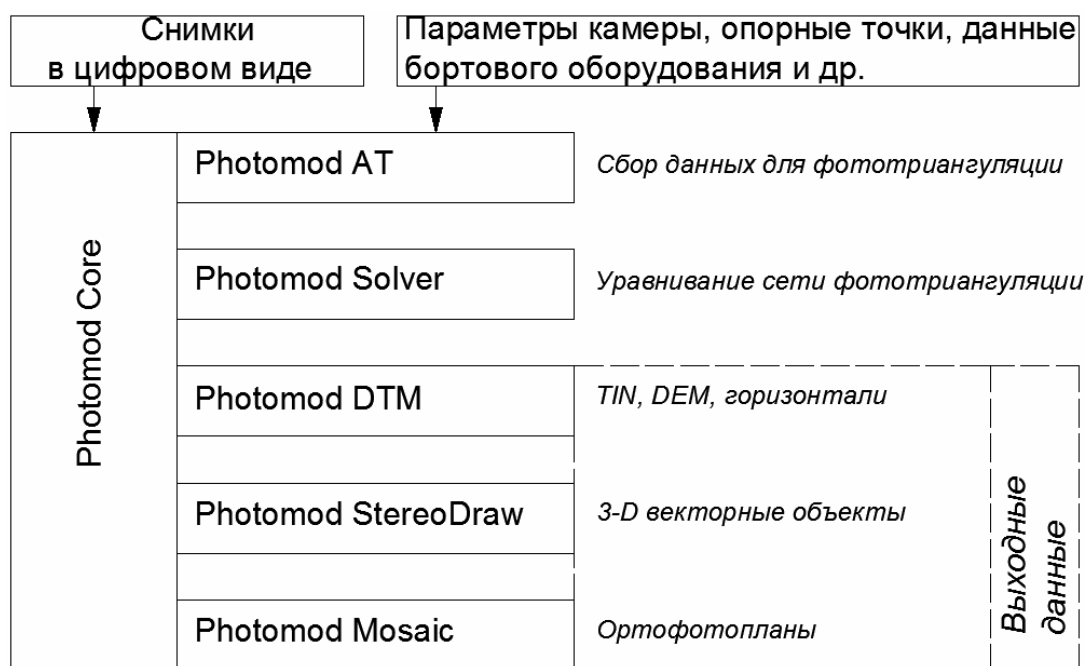


Рис. 1

На этапе обработки проектов используют два вида окон для визуализации и редактирования модели рельефа и прочих видов объектов: 2D и 3D. 2D окно предназначено для визуализации и редактирования модели рельефа, векторных объектов, в том числе горизонталей в моно/стерео режиме.

2D окно является основным окном при создании/редактировании векторных объектов, TIN- и DEM- моделей. При запуске PHOTOMOD Core автоматически открывается 2D окно, отображающее схему блока. Состав отображаемых в 2D окне объектов определяется содержимым окна **Диспетчер слоев**. Существует два вида 2D окон – окно со схемой блока и окно, открытое на выбранную стереопару (рис. 2).

Модуль сбора данных для уравнивания сетей фототриангуляции включает внутреннее и взаимное ориентирование, а также ввод/измерение опорных точек. Поддерживаются автоматические режимы выполнения внутреннего ориентирования и измерения связующих точек. Алгоритм автоматического измерения связующих точек с возможностями контроля точности измерений (в т.ч. контроля автокорреляции) позволяет получить практически готовый набор точек для уравнивания сети с небольшим процентом ручного редактирования.

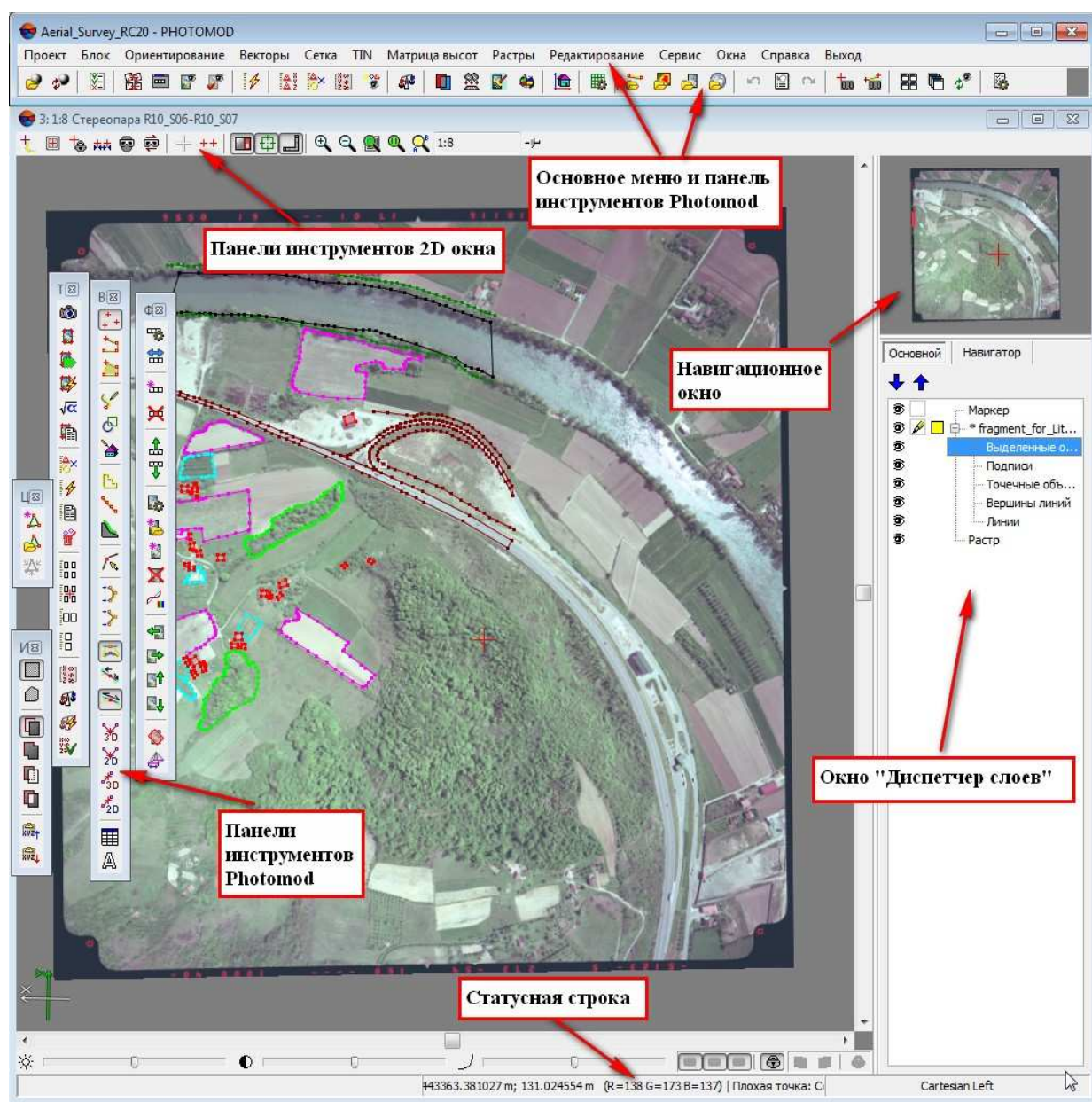


Рис. 2

Модули SolverA и SolverS предназначены для уравнивания сети фототриангуляции для снимков в центральной проекции и космических сканерных изображений соответственно. Они имеют инструменты контроля точности и графические средства представления и анализа ошибок. Средства обмена через формат RAT-B позволяют использовать систему PHOTOMOD в связке с другими фотограмметрическими системами.

Модуль обработки DTM предназначен для построения ЦМР (в виде пикетов, нерегулярной триангуляционной сети – TIN, регулярной модели рельефа – DEM и горизонталей). Он позволяет выполнять перестроение TIN и горизонталей при любом редактировании базовых векторных слоев. Просмотр/редактирование ЦМР и базовых векторов выполняется в основном в стереорежиме.

Модуль StereoDraw предназначен для создания и редактирования 3D векторных объектов в стереорежиме. Он содержит такие инструменты, как: автоматическое перемещение курсора по рельефу, 2D и 3D-снэппинг («привязка» к существующим векторным объектам), векторизация сегментов линий под прямым углом, копирование векторных объектов, автоматическое проведение линии вдоль границы существующего объекта, построение буферных зон и многие другие. К графическим объектам могут быть привязаны записи из классификатора и атрибуты. Поддерживается обширный набор векторных форматов импорта/экспорта.

Модули Mosaic и Geomosaic используются для создания ортофотопланов по аэрофотоснимкам или спутниковым сканерным изображениям на основе ЦМР, импортированной или построенной в модуле PHOTOMOD DTM. Модули содержат средства для определения областей трансформирования (редактор «порезов»). Инструменты автоматического яркостного выравнивания и обработки порезов обеспечивают отсутствие швов на выходном изображении.

Ортофотоплан создается с заданным размером элемента на местности и геопривязкой (предусмотрен прямой экспорт в MapInfo и ArcInfo, а также сохранение мозаики в формат GeoTIFF).

Поддерживается нарезка на листы или трапеции заданного пользователем размера, а также осуществление контроля точности построения ортофотоплана по опорным и контрольным точкам.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1
Создание проекта сети фототриангуляции.
Внутреннее ориентирование снимков в PHOTOMOD

Цель работы: научиться создавать проект сети фототриангуляции с установкой необходимых параметров и выполнять внутреннее ориентирование снимков ручным и полуавтоматическим методами.

Форма отчета: выполнение зачетного задания.

Задание:

1. Открыть проект сети аэрофототриангуляции.
2. Отредактировать при необходимости сформированный блок изображений.
3. Отредактировать при необходимости установленные параметры АФА.
4. Выполнить измерение координатных меток в ручном режиме (аффинные преобразования координат, остаточные расхождения координат меток E_x и E_y не более 0,006 мм).
5. Выполнить измерение координатных меток в полуавтоматическом режиме (аффинные преобразования координат, остаточные расхождения координат меток E_x и E_y не более 0,006 мм).

Исходные данные для выполнения работы

Обрабатываемый блок состоит из 2 маршрутов, по 3 снимка (2 стереопары) в каждом. Снимки цветные, полученные камерой Leica RC20: фокусное расстояние – 153,406 мм, масштаб снимков – приблизительно 1:5000. Высота полета – приблизительно 910 м. Среднее превышение местности над уровнем моря – 150 м. Снимки сканировались с разрешением 20 мкм на фотограмметрическом сканере. Перед обработкой разрешение снимков было уменьшено в 2 раза и составляет 40 мкм.

Порядок выполнения работы в системе PHOTOMOD

На рисунке 3 приведена общая технологическая схема выполнения работ по сбору данных для построения сети фототриангуляции. Структурой данных в системе PHOTOMOD является проект, который содержит все необходимые файлы для работы – изображения, модели рельефа, трехмерные векторные объекты, таблицы баз данных модуля PHOTOMOD AT и многое другое. При запуске программы появляется окно «Управление проектами» (рис. 4), которое позволяет создавать новые проекты или выполнять необходимые операции с уже существующими проектами.

Для выполнения работы необходимо открыть демо-проект «Aerial_Survey_RC20».

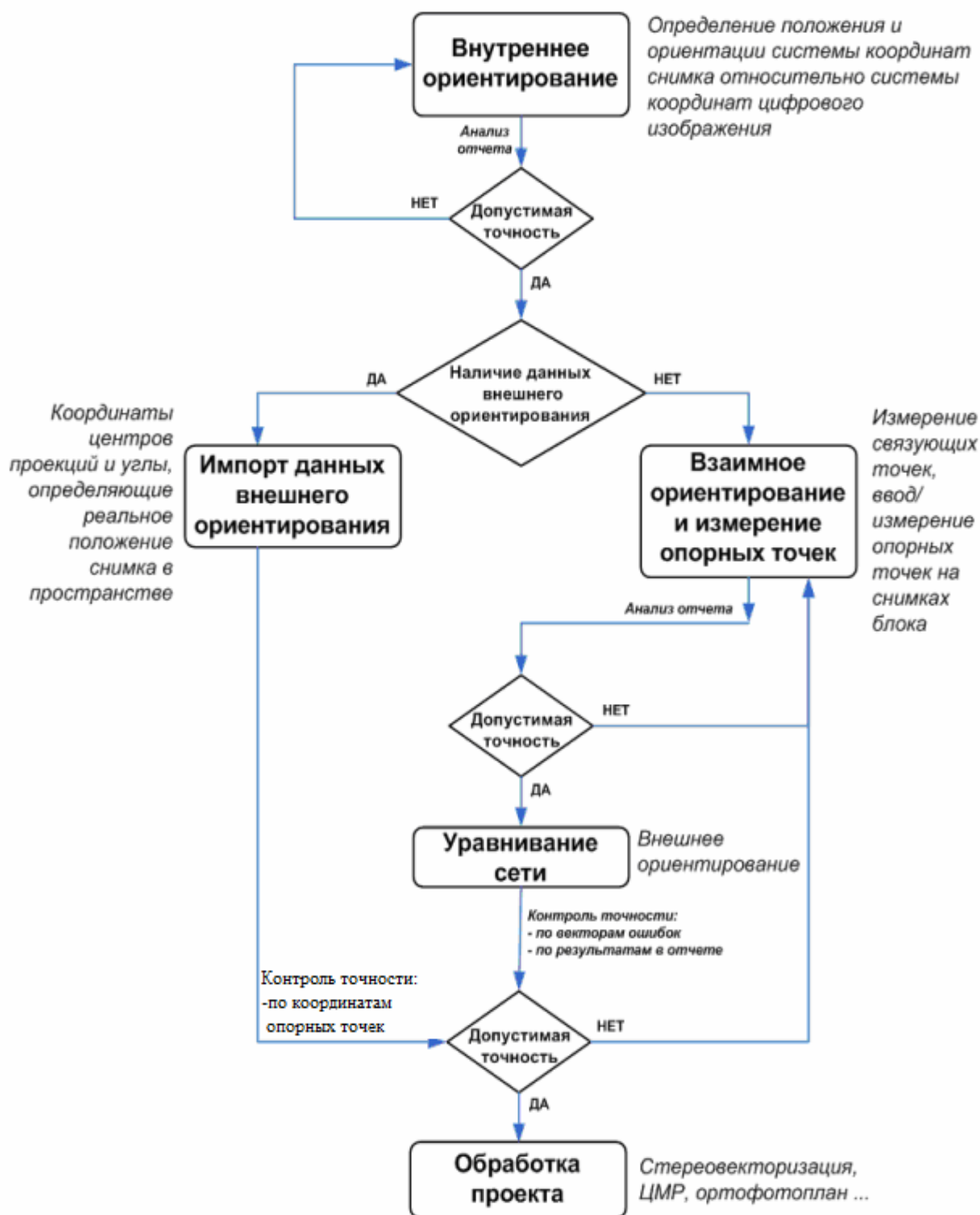


Рис. 3. Последовательность работ по сбору данных для построения сети фототриангуляции

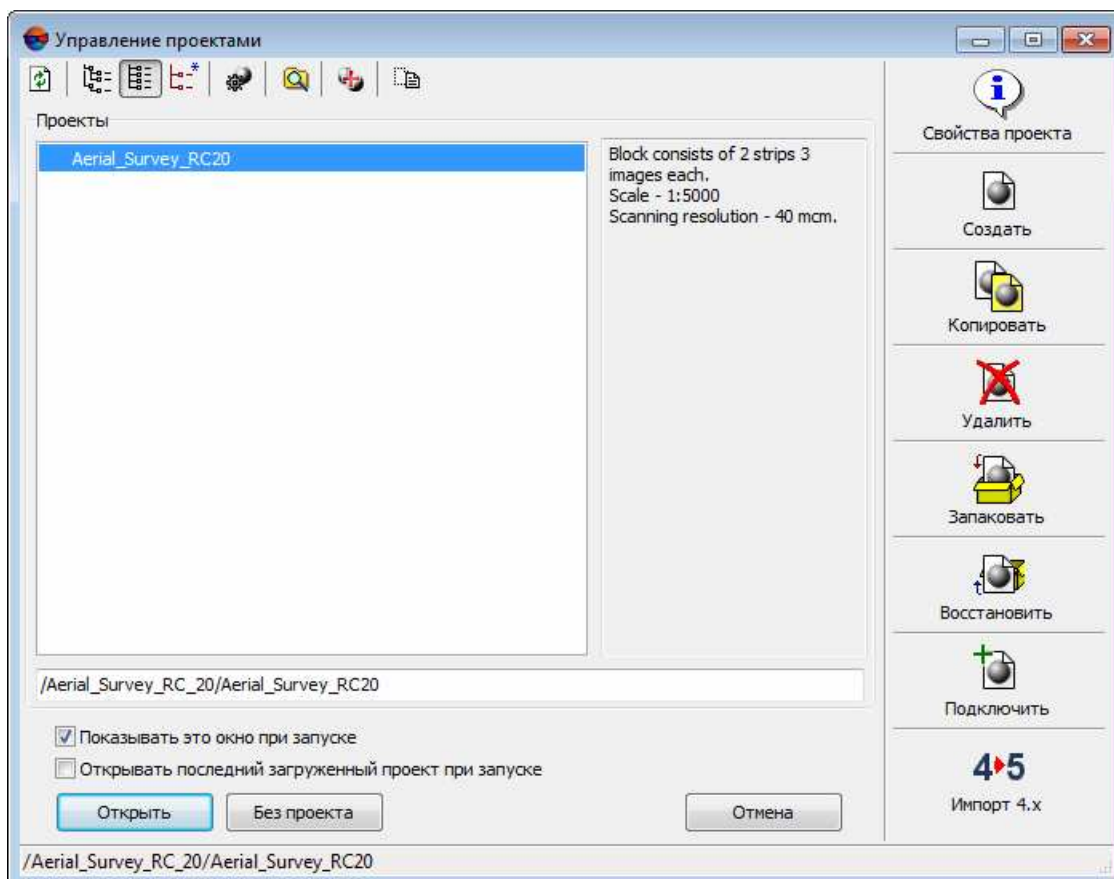


Рис. 4

Для выполнения дальнейших работ необходимо:

- определить камеру (АФА) для изображений, используемых в проекте, и ввести ее паспортные данные.
- присвоить параметры камеры изображениям проекта;
- определить направления осей координат камеры для изображений проекта (ориентация осей координат камеры может принимать значения 0° или 180° для прямого или обратного маршрутов).

Окно **Управление камерами** проекта открывается по команде меню **Ориентирование** → **Управление камерами** (рис. 5) и предназначено для ввода и редактирования характеристик камер, формирования списка камер для текущего проекта и присвоения параметров камер из списка изображений в случае, если блок изображений содержит снимки, полученные различными камерами.

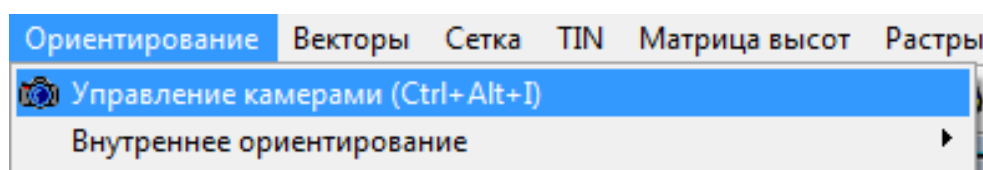


Рис. 5

Для каждого маршрута необходимо определить направления осей координат камеры для изображений проекта (рис. 6).

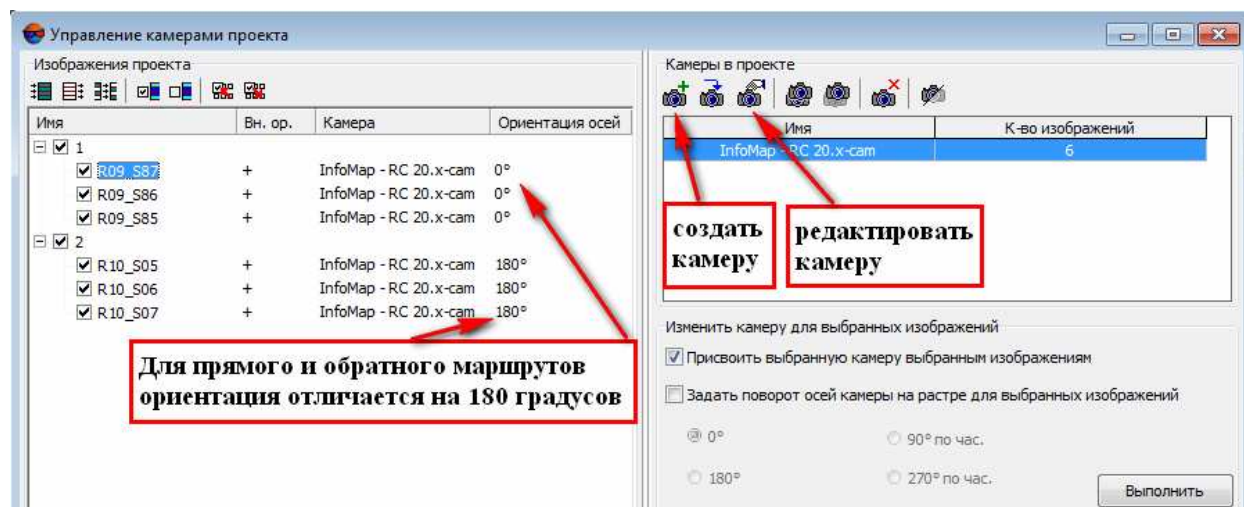


Рис. 6

Для ввода/редактирования аналоговой камеры текущего проекта, используя кнопки, указанные на рисунке 6, открыть окно **Управление камерами проекта** (рис. 7).

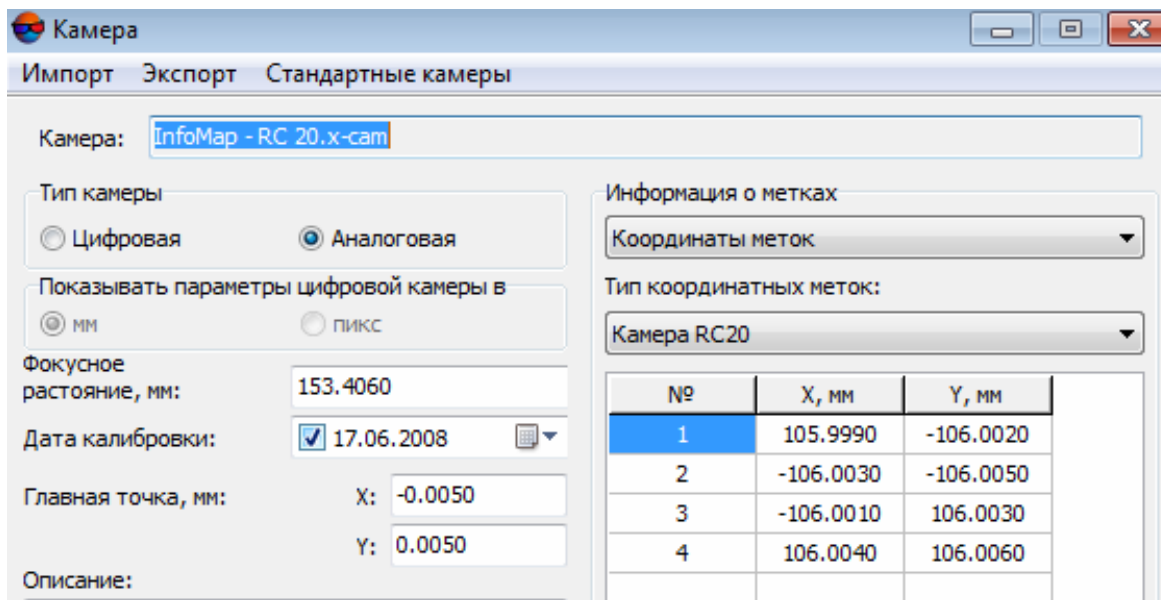


Рис. 7

Также в этом окне необходимо указать информацию о дисторсии объектива камеры в соответствии с имеющимися в паспорте АФА данными.

Для выполнения внутреннего ориентирования используется меню **Ориентирование** → **Внутреннее ориентирование**, которое содержит следующие команды (рис. 8):

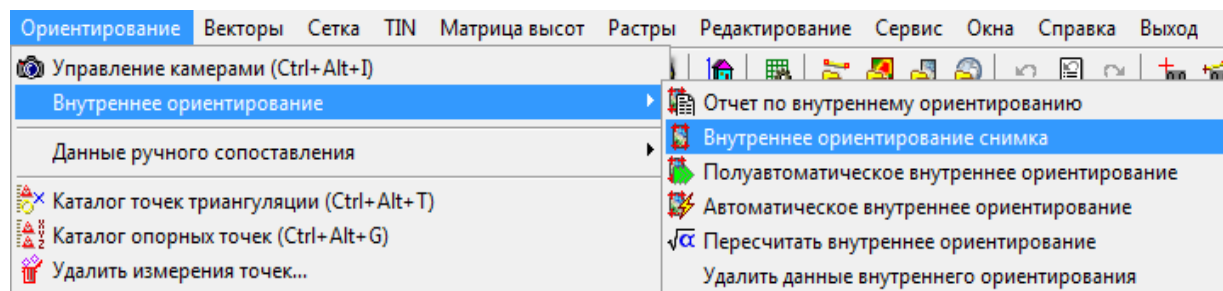


Рис. 8

При выборе команды **Внутреннее ориентирование снимка** откроется окно «Внутреннее ориентирование». Для измерения координатных меток следует выбрать измеряемую метку в таблице меток. Затем выполнить точное позиционирование маркера на выбранную метку снимка при помощи мыши или стрелок на клавиатуре (рис. 9).

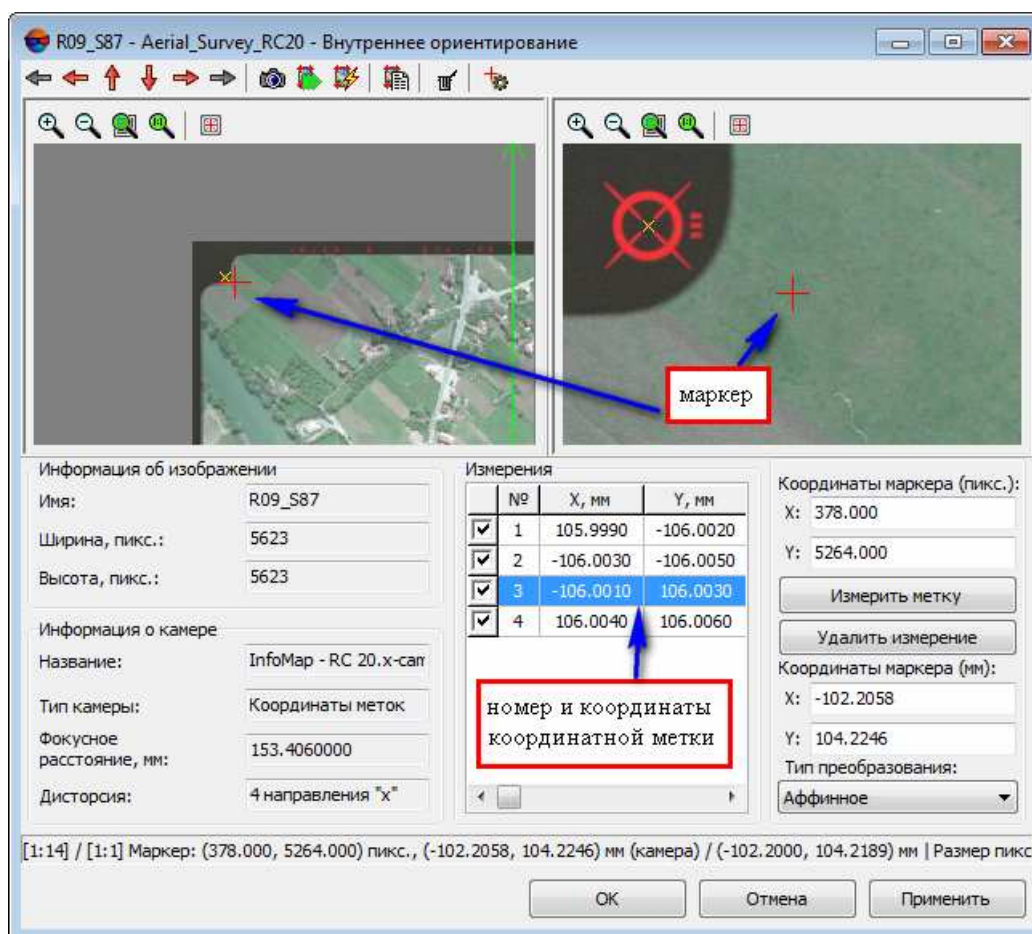


Рис. 9

Координаты положения маркера показываются в пикселях и в миллиметрах. Для поиска меток на растре и точного позиционирования маркера используйте кнопки верхнего меню в окнах просмотра снимков (увеличить/уменьшить масштаб изображения) (см. рис. 9). После точного позиционирования маркера нажмите кнопку «Измерить метку».

Контроль точности, после измерения 4-х координатных меток, выполняют по остаточным расхождениям E_x и E_y (рис. 10).

	№	X, мм	Y, мм	Xp, пикс.	Yp, пикс.	E_x , мм	E_y , мм
<input checked="" type="checkbox"/>	1	105.9990	-106.0020	5342.600	266.600	0.0043	0.0064
<input checked="" type="checkbox"/>	2	-106.0030	-106.0050	295.600	258.800	-0.0043	-0.0064
<input checked="" type="checkbox"/>	3	-106.0010	106.0030	287.938	5306.812	0.0043	0.0064
<input checked="" type="checkbox"/>	4	106.0040	106.0060	5334.600	5314.000	-0.0043	-0.0064

Рис. 10

Для перехода к другим снимкам используют кнопки в верхнем левом углу окна «Внутреннее ориентирование» (см. рис. 9).

После выполнения внутреннего ориентирования 6 снимков для контроля точности и получения более подробной информации по результатам внутреннего ориентирования снимка выберите команду «Отчет по внутреннему ориентированию». Пример отчета по внутреннему ориентированию приведен на рисунке 11.

Маршрут: 1

	Снимок	Камера	Данные калибровки камеры	Ориентация осей координат	Измерено меток	Тип преобразования	Ошибки, СКО, пикс.
* -	R09_S87	InfoMap - RC 20.x-sam	Координаты меток	0°	4/4	Аффинное	0.018
* -	R09_S86	InfoMap - RC 20.x-sam	Координаты меток	0°	4/4	Аффинное	0.129
* -	R09_S85	InfoMap - RC 20.x-sam	Координаты меток	0°	4/4	Аффинное	0.112

Рис. 11

Для запуска процедуры полуавтоматического внутреннего ориентирования необходимо выполнить внутреннее ориентирование вручную хотя бы одного изображения. Работа “полуавтомата” заключается в поиске/измерении системой PHOTOMOD координатных меток на изображениях проекта в соответствии с выбранным эталоном (изображением с уже выполненным внутренним ориентированием, метки которого будут использоваться как шаблоны) и вычислении внутреннего ориентирования в соответствии с указанным типом преобразования.

Первое изображение, для которого уже выполнено внутреннее ориентирование, отмечается в списке изображений как **Эталон** (рис. 12). Затем с помощью соответствующих ползунков необходимо настроить параметры поиска меток: **Размер области метки** и **Размер области поиска**.

Выбранная **Область поиска** (внешний прямоугольник) должна быть достаточно велика для случаев неравномерной нарезки снимков (когда соответствующие координатные метки на разных снимках находятся на разном расстоянии от края изображения).

Область метки, определяющая шаблон метки, должна захватывать изображение метки полностью. Области поиска и метки отображаются прямоугольниками (внешним и двумя внутренними для метки), как в основном окне просмотра, так и в окнах-«линзах» (рис. 12).

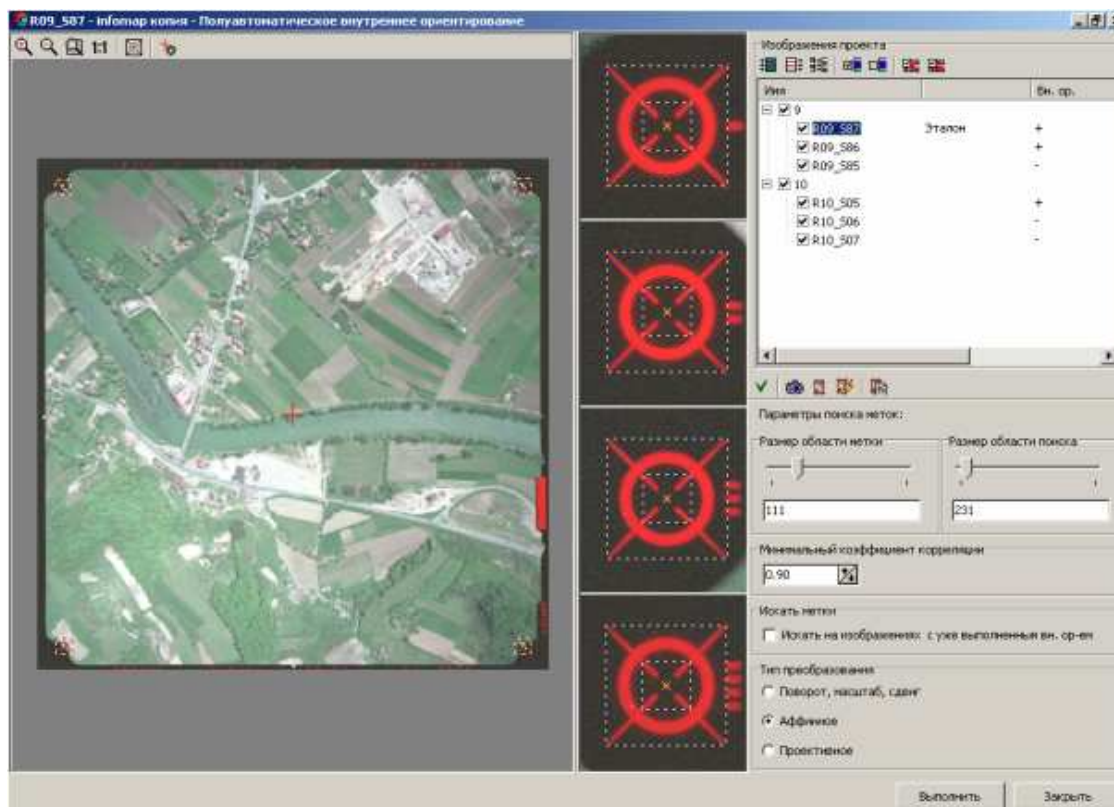


Рис. 12

Поиск координатных меток происходит с помощью коррелятора, сравнивающего изображение метки с шаблоном. Допустимое значение коэффициента корреляции устанавливается параметром **Коэффициент корреляции** (по умолчанию 0,9). Для выполнения полуавтоматического внутреннего ориентирования нажмите кнопку **Выполнить** (см. рис. 12). Для контроля точности и получения более подробной информации по результатам внутреннего ориентирования изображений откройте «Отчет по внутреннему ориентированию». В случае неудовлетворительных результатов данные измерений внутреннего ориентирования можно откорректировать в ручном режиме.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Выполнение измерений для построения сети фототриангуляции

Цель работы: научиться работать с каталогом координат опорных точек, выполнять измерения опорных и связующих точек в автоматическом режиме с последующей ручной корректировкой.

Форма отчета: выполнение зачетного задания.

Задание:

1. Выполнить контроль измерения опорных точек.
2. Выполнить измерения связующих точек в автоматическом режиме с последующей ручной корректировкой.

Для выполнения работ по сбору данных для построения сети фототриангуляции служит меню **Ориентирование**, пункты которого частично дублируются кнопками основной панели инструментов и панели инструментов **Триангуляция** (см. рис. 2).

Работа с опорными точками проходит в два этапа – ввод/импорт координат опорных точек и измерение опорных точек на изображениях. Ввод координат опорных точек осуществляется в окне **Точки триангуляции** на закладке **Каталог опорных точек**, открытие которой выполняется через верхнее меню (рис. 13).

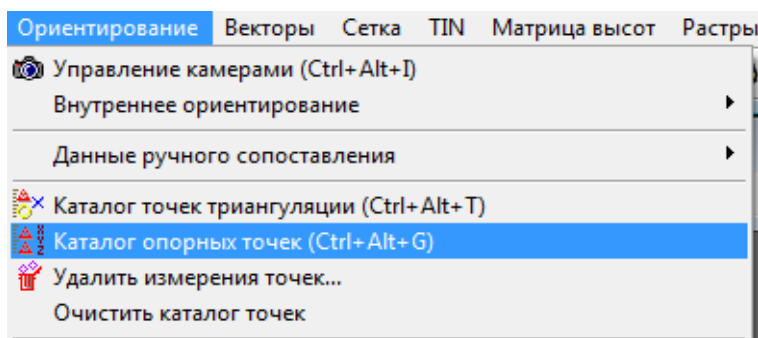


Рис. 13

Демо-проект «Aerial_Survey_RC20» по умолчанию содержит 11 точек с известными координатами (рис. 14).

Код	И	Добавить точку (Alt+Ins)	Y, m	Z, m	СКО X, m	СКО Y, m	СКО Z, m
5	0551	Опорная	4969403.12	6444320.64	134.84	0.1	0.1
1	0556	Опорная	4971037.27	6444373.22	129.63	0.1	0.1
10	0904	Контрольная	4970040.52	6443598.94	129	0.1	0.1
4	0906	Опорная	4969867.5	6444567.54	130.34	0.1	0.1
3	0908	Опорная	4970281.38	6444471.62	130.59	0.1	0.1
2	0911	Опорная	4970710.75	6444342.65	129.1	0.1	0.1
9	1004	Опорная	4969846.86	6442930.37	146.18	0.1	0.1
7	1009	Опорная	4969846.86	6442967.29	180.83	0.1	0.1
6	1010	Опорная	4970040.52	6443051.46	172.22	0.1	0.1
8	OT31	Опорная	4970211.49	6442953.4	160.92	0.1	0.1
11	OT34	Опорная	4969470.39	6442963.69	132.14	0.1	0.1

Рис. 14

Для добавления новой точки (редактирования существующей) в таблице используют кнопки панели инструментов (см. рис. 14).

В таблицу вводят следующие данные для новой точки:

Имя – имя опорной точки;

Тип – тип точки: опорная (по умолчанию), контрольная или исключенная;

X, Y, Z – координаты X, Y, Z опорной точки в метрах;

СКО X, СКО Y, СКО Z – задаваемые пользователем значения точности (СКО) по координатам X, Y, Z в метрах.


Кроме ручного добавления опорных точек, предусмотрена возможность импорта каталога опорных точек из текстового файла. Координаты опорных точек задаются в системе координат, выбранной на этапе создания проекта. После ввода координат опорных точек переходят к их изменению на изображениях.

Измерение опорных точек

Для измерения опорных точек необходимо выполнить следующие действия:


1. Открыть окно **Точки триангуляции**.

2. Выбрать в списке опорную точку для измерения на изображениях

блока и нажать на кнопку  (дублируется двойным щелчком мыши). Откроется модуль **Измерение точек**.

При отсутствии измерений опорных точек необходимо выбрать и открыть изображения, содержащие соответствующую точку местности с помощью кнопки верхней панели инструментов модуля **Измерение точек** и осуществить поиск точки местности вручную.

3. Измерить опорную точку на изображении (или нескольких изображениях в случае, если опорная точка попадает в зону перекрытия) в модуле **Измерение точек** можно одним из следующих способов:

– *Измерение опорной точки без коррелятора* с помощью кнопки  верхней панели инструментов модуля.










– *Измерение и перенос опорной точки с корреляцией* (рекомендуемый коэффициент 0.90 – 0.95). В этом случае надо измерить точку на одном изображении с помощью кнопки . Определить это изображение как левое с помощью кнопки  в окне изображения. Затем, используя коррелятор, перенести точку с левого изображения на другие изображения с помощью кнопки  для переноса точки на изображение активного окна или кнопки  для переноса точки на все открытые в модуле изображения (рис. 15).



Рис. 15

Измерение в стереорежиме. Для открытия окна стереоизображения необходимо выбрать два изображения (левое и активное), имеющие перекрытие, указать маркером две одинаковые точки на этих изображениях и нажать кнопку  основной панели главного окна модуля **Измерение точек**. По умолчанию открывается стереоизображение на всю рабочую область окна **Измерение точек** (т.е. вместо всех открытых окон изображений). Для переключения в режим с подвижным маркером используется кнопка . При измерении точек в этом режиме используется колесо мыши (перемещение маркера верх-низ) и кнопки с изображением стрелочек на клавиатуре (перемещение маркера в плане). Для измерения точки используйте кнопки ,  и контролируйте значение остаточного поперечного параллакса.

Можно также воспользоваться процедурой корреляции (кнопка  основной панели окна **Измерение точек**) для автоматического позиционирования точки на правом изображении относительно ее текущего положения на левом изображении.

Автоматическое измерение связующих точек

В системе предусмотрена возможность измерения связующих точек и выполнения взаимного ориентирования в автоматическом режиме. Автоматический режим предполагает использование корреляционного алгоритма при поиске и измерении связующих точек. Повторные запуски процедуры автоматического измерения с коррекцией значений параметров, а также использование ручного режима для уточнения измерений и устранения ошибок могут обеспечить требуемые результаты на этапе уравнивания сети.


Для выполнения процедуры автоматического измерения связующих точек требуется наличие следующих данных:

- *данные внутреннего ориентирования снимков;*
- *накидной монтаж.*

Накидной монтаж отображается в 2D окне и является обязательным условием для выполнения процедуры автоматического измерения связующих точек. Накидной монтаж может быть первичным, приближенным или окончательным. Таким образом, по мере накопления данных и участия их в создании накидного монтажа схема блока становится все более точной.

Для построения накидного монтажа могут быть использованы следующие данные:

- Средние значения размеров перекрытий снимков в маршруте и между маршрутами. Размеры перекрытий используются для “грубой” схемы блока, т.е. для построения первичного накидного монтажа.
- Данные ручного сопоставления. Данные ручного сопоставления также используются для построения первичного накидного монтажа снимков. Они могут существенно уточнить положение снимков в блоке, построенном “по перекрытиям”. Для получения данных ручного сопоставления выполняется связывание снимков вручную путем приблизительного указания одинаковых точек местности на соседних снимках блока в 2D окне.
- Опорные точки. Для использования опорных точек при построении накидного монтажа выполняется ввод их координат и измерение на снимках блока в модуле **Измерение точек**. Накидной монтаж, построенный по опорным точкам, отражает схему блока в реальной системе координат.
- Данные внешнего ориентирования (ЭВО) (при наличии данных) – координаты центров проекций и три угловых элемента, определяющие положение снимков в пространстве. Для использования ЭВО при построении накидного монтажа необходимо выполнить импорт этих данных.
- Связующие точки.

Для построения накидного монтажа надо нажать на кнопку  основной панели инструментов (рис. 16).

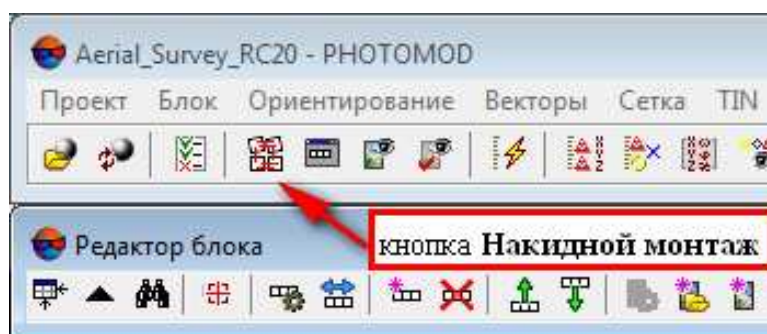


Рис. 16

Откроется окно **Накидной монтаж** (рис. 17).

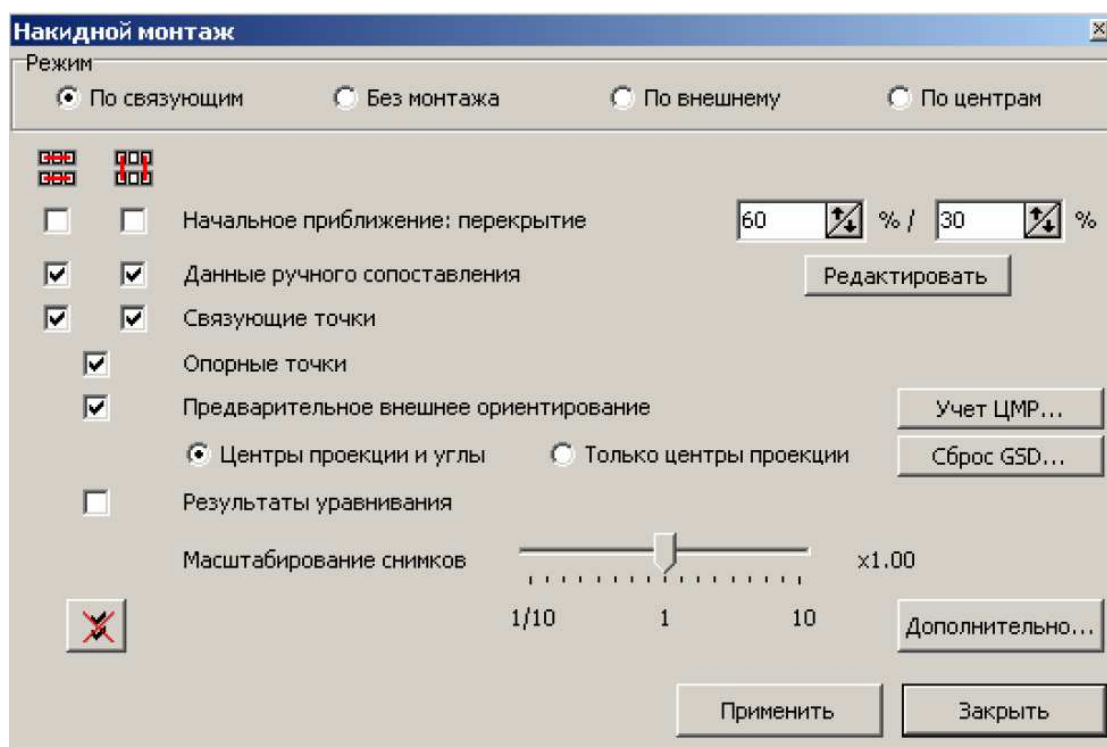



Рис. 17

Далее выбирают один из трех режимов построения накидного монтажа. Для построения накидного монтажа необходимо нажать на кнопку **Применить**.

Порядок работы по измерению связующих точек с использованием автоматического режима предполагает следующие действия:

1. Построить накидной монтаж с учетом имеющихся данных.
2. Настроить параметры измерения, переноса, отбраковки точек и запустить процедуру автоматического измерения связующих точек.
3. Оценить точность выполнения взаимного ориентирования для выявления ошибок при измерении связующих точек.
4. Выполнить взаимное ориентирование.
5. Устранить ошибки измерений связующих точек вручную в модуле **Измерение точек** или подобрать другие параметры отбраковки и повторно запустить процедуру автоматического измерения.
6. Обновить накидной монтаж с учетом уже измеренных связующих точек. Изменить при необходимости настройки параметров и повторно запустить процедуру автоматического измерения связующих точек для дальнейшего накопления данных измерений связующих точек.

Для выполнения измерения точек в автоматическом режиме надо нажать кнопку  в панели инструментов **Триангуляция**. Открывается окно **Автоматическое измерение связующих точек** (рис. 18).

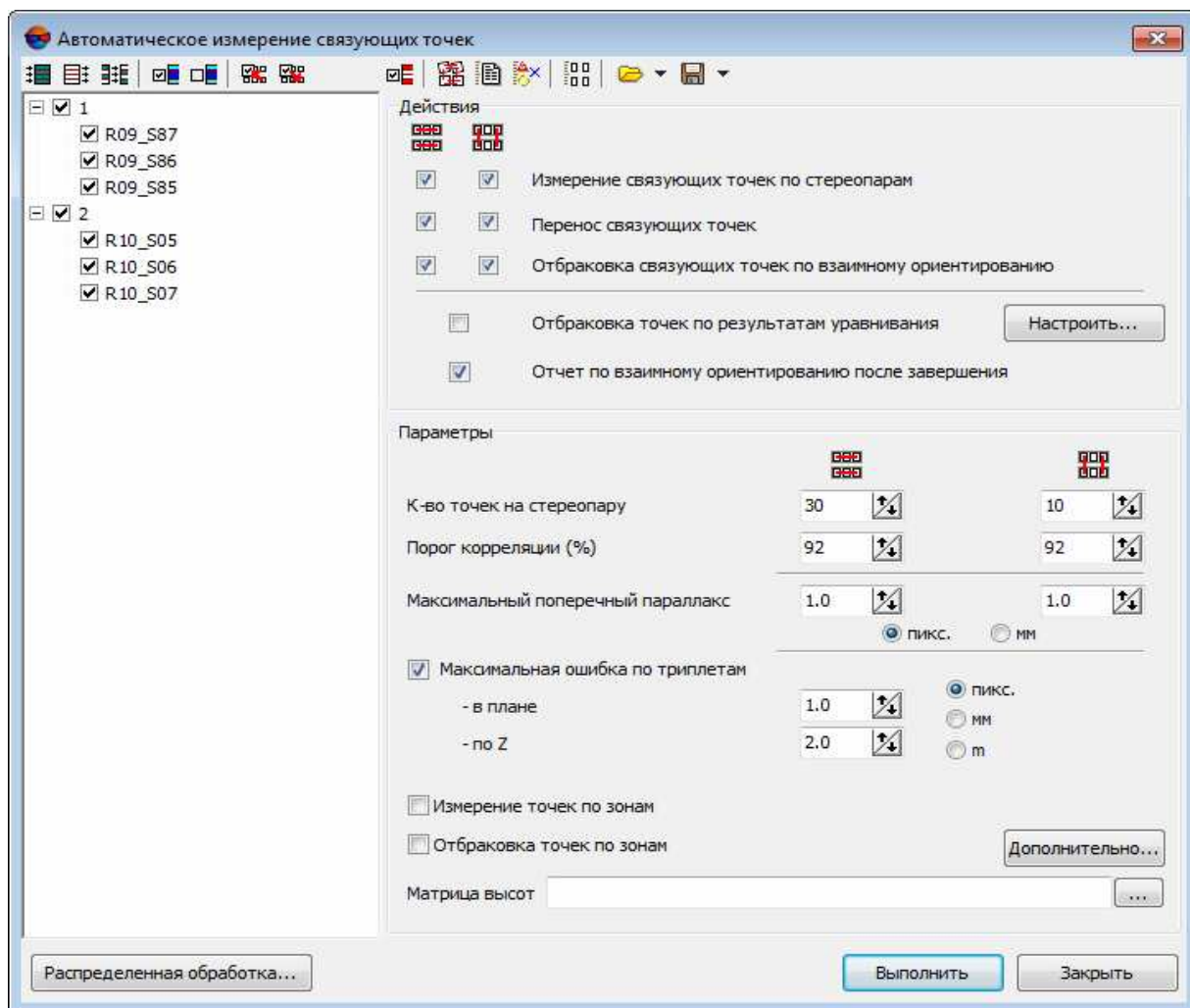


Рис. 18

После настройки необходимых параметров нажать кнопку **Выполнить**.

Для просмотра результатов автоматического измерения связующих точек открыть «Отчет по взаимному ориентированию», т.к. именно взаимное ориентирование позволяет судить о качестве измерения точек.

Система PHOTOMOD позволяет выполнить измерение точек триангуляции в ручном режиме, а также отредактировать измерения с ошибками, полученными после выполнения автоматического измерения точек. Для этого предусмотрен модуль **Измерение точек**.

Модуль **Измерение точек** представляет собой объединение двух окон – главного окна **Измерение точек** и окна **Точки триангуляции**. Основное окно отображает выбранные изображения в отдельных окнах и содержит инструменты для выполнения измерений точек триангуляции. Окно **Точки триангуляции** представляет собой каталог всех точек триангуляции с данными измерений и содержит инструменты для работы со списком точек (рис. 19).

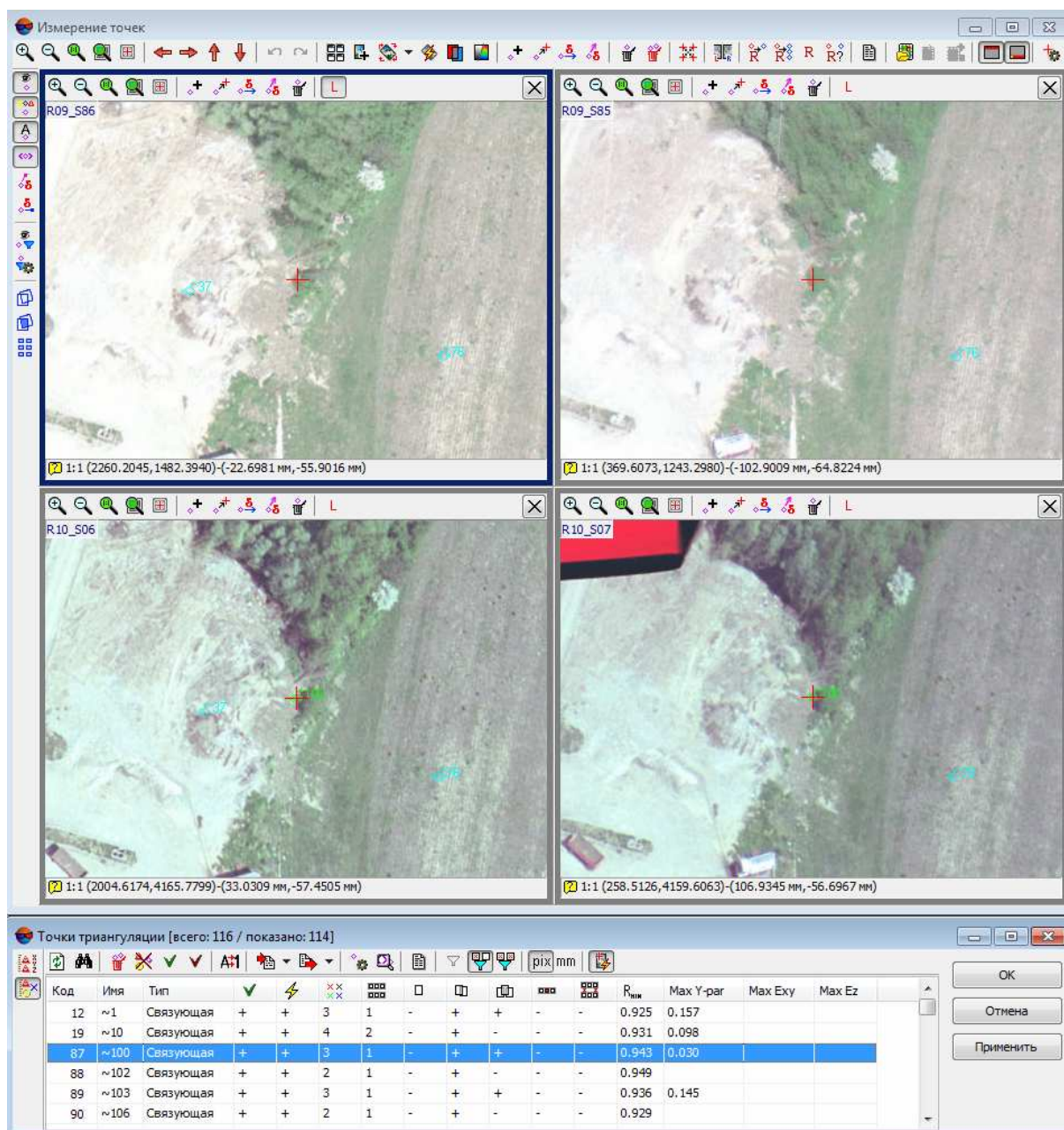


Рис. 19

После измерения (редактирования) каждой новой связующей точки автоматически выполняется вычисление элементов взаимного ориентирования снимков и пересчитывается остаточный поперечный параллакс для измеренных точек.

Для просмотра результатов, анализа и контроля точности определяемых элементов взаимного ориентирования, выполненного в автоматическом или ручном режиме, предусмотрен «Отчет по взаимному ориентированию». Отчет составляется с учетом параметров контроля и допусков на ошибки, заданных в окне **Параметры отчета по взаимному ориентированию** (рис. 20).

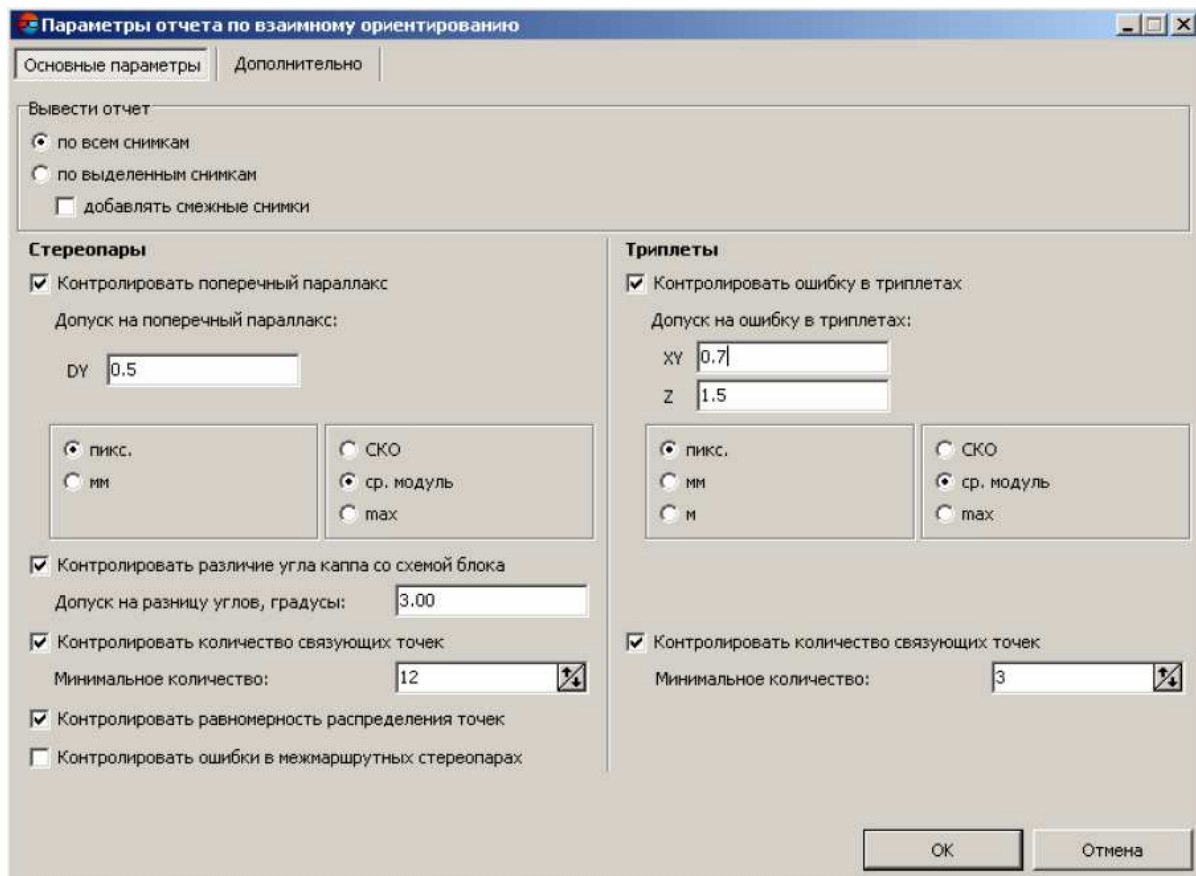


Рис. 20

Разработчиками **Photomod** рекомендуется устанавливать опцию контроля стереопар и триплетов на количество измеренных связующих точек. Рекомендуется не меньше 12 точек на маршрутную стереопару (по 2 точки на каждую из 6 стандартных зон) и не меньше 3-х точек на каждый триплет.

Для открытия отчета предусмотрена команда меню **Ориентирование / Отчет по взаимному ориентированию** (рис. 21).

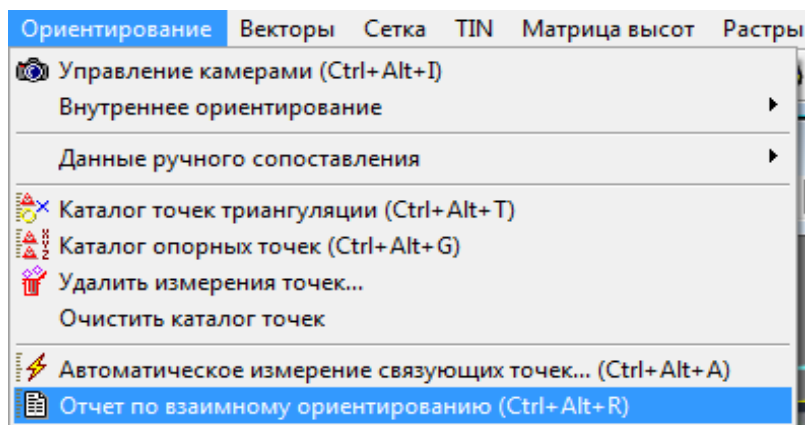


Рис. 21

Контроль точности выполнения взаимного ориентирования подразумевает:

- контроль точности измерений на стереопарах по величинам остаточных поперечных параллаксов;
- контроль точности измерений в зонах тройного перекрытия по величинам расхождений измерений точек на соседних стереопарах (моделях);
- контроль количества точек и равномерности их распределения на стереопарах и в триплетах;
- контроль разницы угла каппа со схемой блока.

На рисунке 22 приведен фрагмент отчета по маршруту №2.

Маршрут: 2

	Стереопара	Кол-во точек	Остаточный поперечный параллакс, пикс.			Разница углов каппа, рад
			СКО	ср. модуль	max	
* -	R10_S05 — R10_S06	44	0.241	0.166	0.784	0.00818075
* -	R10_S06 — R10_S07	43	0.175	0.143	0.485	0.03341990

	Триплет	Кол-во точек	Ошибки по связи, пикс.					
			СКО		ср. модуль		max	
			E_{xy}	E_z	E_{xy}	E_z	E_{xy}	E_z
* -	R10_S05 — R10_S06 — R10_S07	14	0.207	0.538	0.162	0.383	0.479	1.160

Рис. 22

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Уравнивание сети фототриангуляции в модуле «Photomod»

Цель работы: Научиться выполнять уравнивание сети фототриангуляции, анализ полученных результатов и поиск ошибок измерений в сети.


Форма отчета: Выполнение зачетного задания.

Задание:

1. Выполнить уравнивание сети фототриангуляции.
2. Выполнить анализ полученных результатов (соответствие точности полученных данных требованиям нормативных документов).
3. Выполнить (при необходимости) корректировку измерений и повторное уравнивание сети.

Модуль PHOTOMOD Solver предназначен для уравнивания блоков аэрофото- и сканерных снимков после ввода (импорта) координат опорных точек и выполнения сбора данных для фототриангуляции – данных внутреннего и взаимного ориентирования, данных измерения опорных точек.

Минимальным требованием для построения блока фототриангуляции является наличие внутреннего и взаимного ориентирования блока снимков. Т.е. построить блок можно и без опорных точек (свободная модель), после чего приступить сразу к обработке проекта.

Для запуска модуля необходимо выбрать пункт меню **Ориентирование / Уравнивание блока** (рис. 23) или нажать на кнопку  основной панели системы PHOTOMOD.

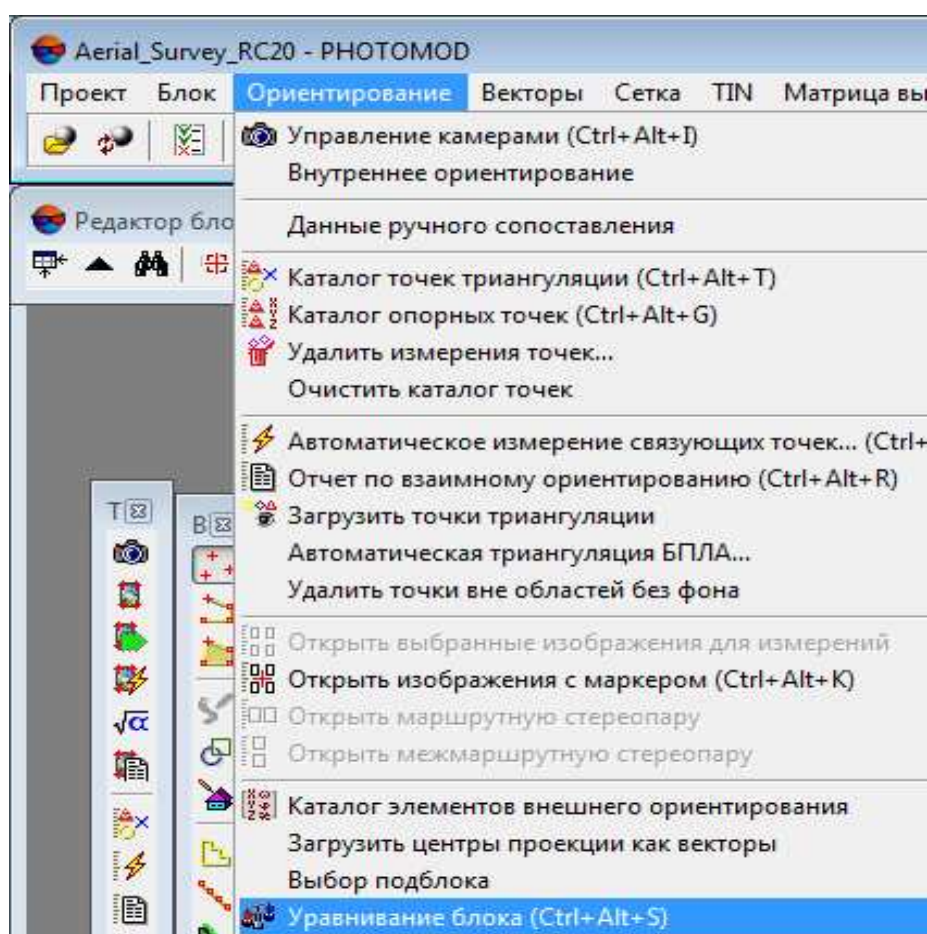


Рис. 23

При запуске модуля первый раз открывается главное окно **Уравнивание блока** на закладке **Исходная** и производится автоматическая загрузка собранных данных, полученных на этапе измерения сети. На закладке **Исходная** отображается блок изображений до уравнивания (рис. 24).

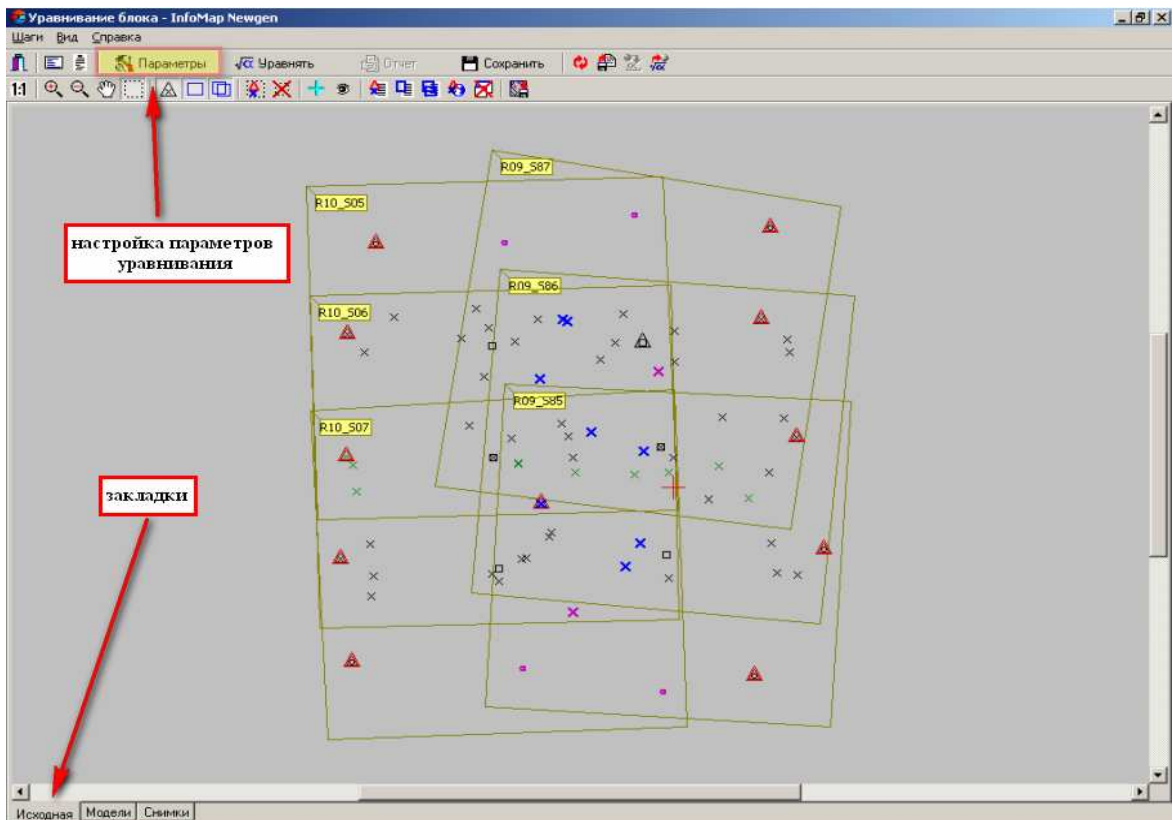


Рис. 24

В случае корректной загрузки становится активной кнопка **Параметры** (см. рис. 24). Если блок обрабатывается в модуле уравнивания впервые, необходимо задать параметры уравнивания и параметры отчета (рис. 25).

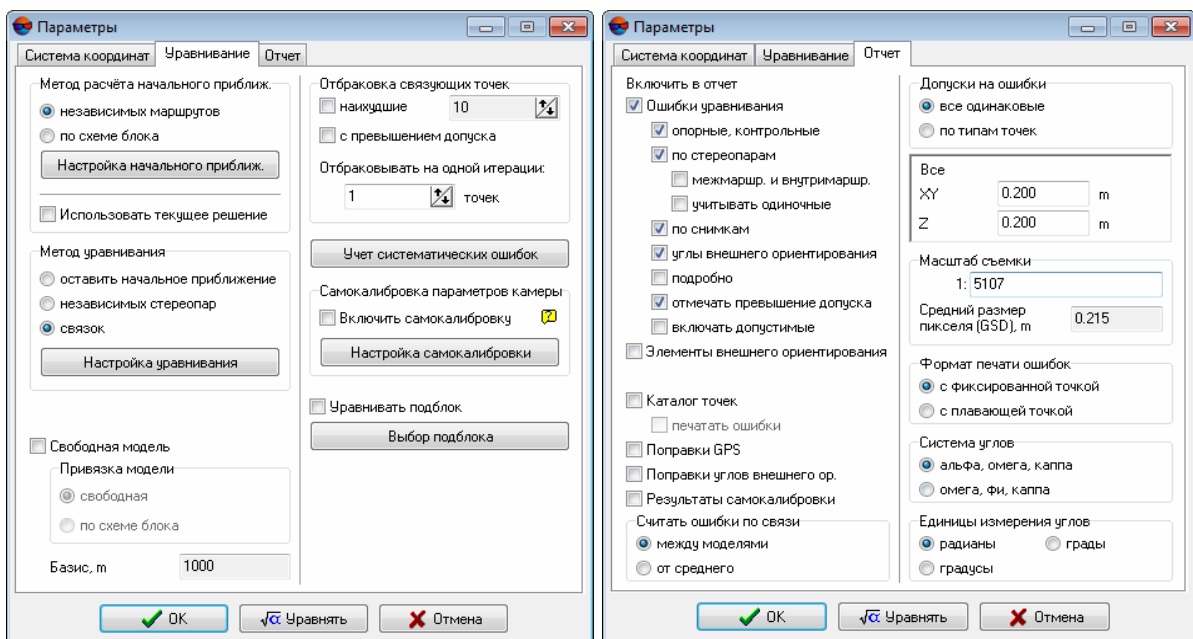


Рис. 25

При выходе из PHOTOMOD Solver заданные параметры автоматически сохраняются вместе с проектом и при последующих запусках модуля автоматически восстанавливаются.

При первом уравнивании блока фототриангуляции рекомендуется устанавливать следующие параметры:

- **Метод расчета начального приближения** – метод независимых маршрутов, который предполагает предварительное построение независимых моделей из снимков каждого маршрута с последующим соединением их в общую модель, которая затем ориентируется по опорным точкам относительно выбранной системы координат.

- В панели **Метод уравнивания** установить метод независимых стереопар.

Отбраковку связующих точек, учет систематических ошибок и самокалибровку параметров камеры при первом уравнивании включать нецелесообразно, т.к. основной задачей вначале является выявление точек сети фототриангуляции с максимальными ошибками с последующим повторным измерением (исключением) этих точек.

Выявление таких точек производится на основании отчета по уравниванию. Вид и содержание отчета настраивается на закладке **Отчет** (см. рис. 25). При первом уравнивании в отчет обычно включают только точки, ошибки которых превышают допуск. Закладка **Модели** используется для отображения результатов уравнивания в графическом виде. Здесь отображаются ошибки на опорных точках и ошибки по связи между стереопарами.

Изображение точки может также включать вектора ошибок, длина которых пропорциональна величинам ошибок. Вектора ошибок выглядят следующим образом:

- плановые: вектор с началом в центре точки в направлении заданного положения точки, на конце маленькая окружность;

- высотные: вертикальный вектор, на конце маленькая горизонтальная перекладина (рис. 26).

Цвет указанных векторов зеленый, если ошибки лежат в пределах заданного допуска, или красный в случае превышения допуска.

На рисунке 27 приведен пример окна с векторами ошибок и окна с информацией о выбранной точке.

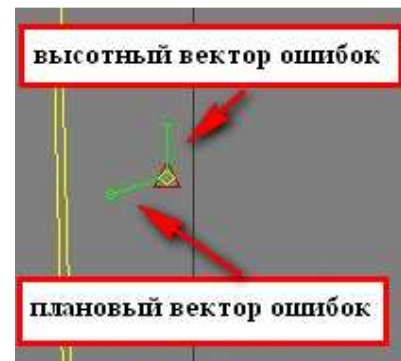


Рис. 26

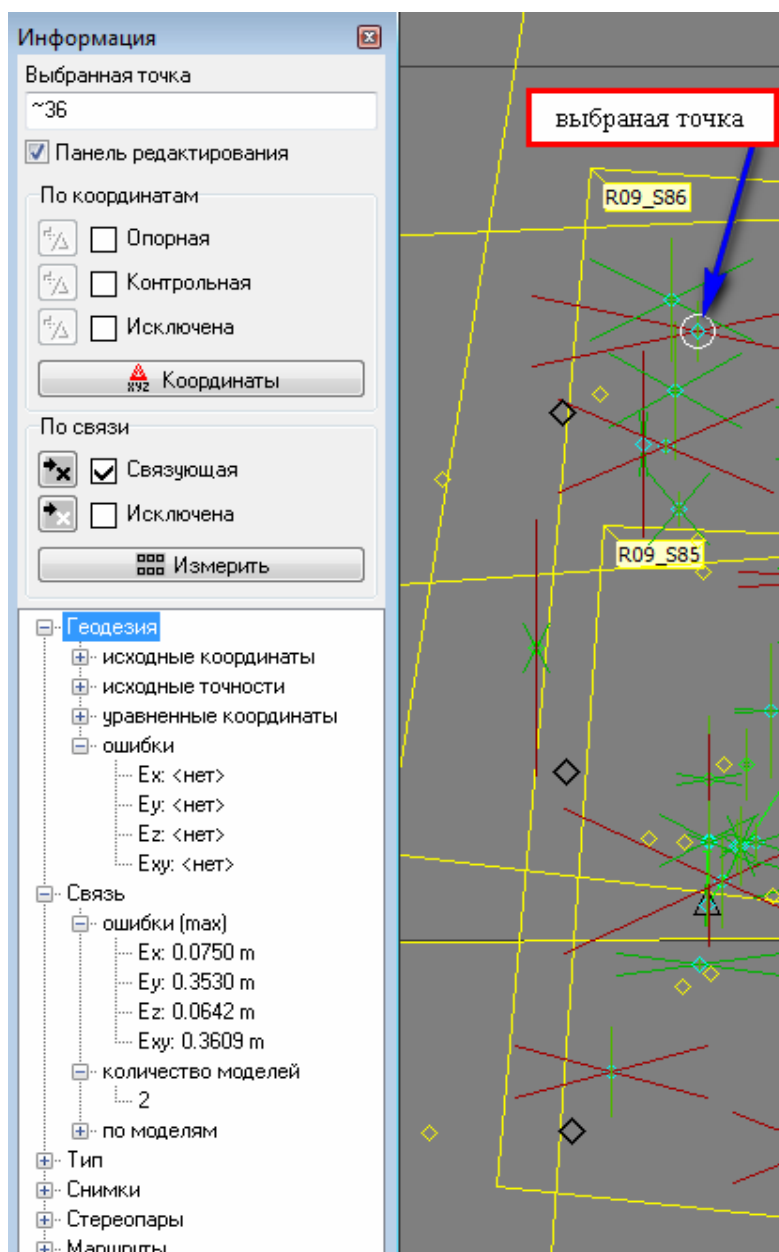




Рис. 27

Выбрав связующую точку, можно посмотреть значения соответствующих ошибок в окне **Информация** (нажав кнопку ) (см. рис. 27). Для графического отображения ошибки и открытия окна **Ошибки по связи** нужно воспользоваться кнопкой . Вид окна приведен на рисунке 28.

В верхней части окна отображаются вектора ошибки в плане, направленные из уравненного (среднего) положения точки в положения, вычисленные из каждой стереопары отдельно. В нижней части окна аналогичным образом отображаются ошибки по координате Z. В надписи показан номер (название) стереопары, разность между средним положением точки и ее положением на этой стереопаре.



Рис. 28

Если результаты уравнивания не удовлетворяют требованиям, можно попробовать добиться лучших результатов, переместив (перемежив) или исключив некоторые «сомнительные» точки, на которых вектора ошибок в графическом окне превышают установленный допуск, и выполнить повторное уравнивание.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 Создание векторных объектов

Цель работы: ознакомиться с методами построения векторных объектов средствами PHOTOMOD.

Форма отчета: выполнение зачетного задания.

Задание: выполнить самостоятельно комплекс работ по векторизации стереопары в программе PHOTOMOD.

Для выполнения векторизации необходимо выбрать снимки в окне **Схема блока** или окне **Редактор блока** (рис. 29). Открыть стереопары в 2D окне можно одним из следующих способов:

- выделить два соседних изображения;
- выделить одно изображение – в окне стереопары откроется стереопара, образованная выделенным изображением и следующим за ним в маршруте изображением (рис. 29).

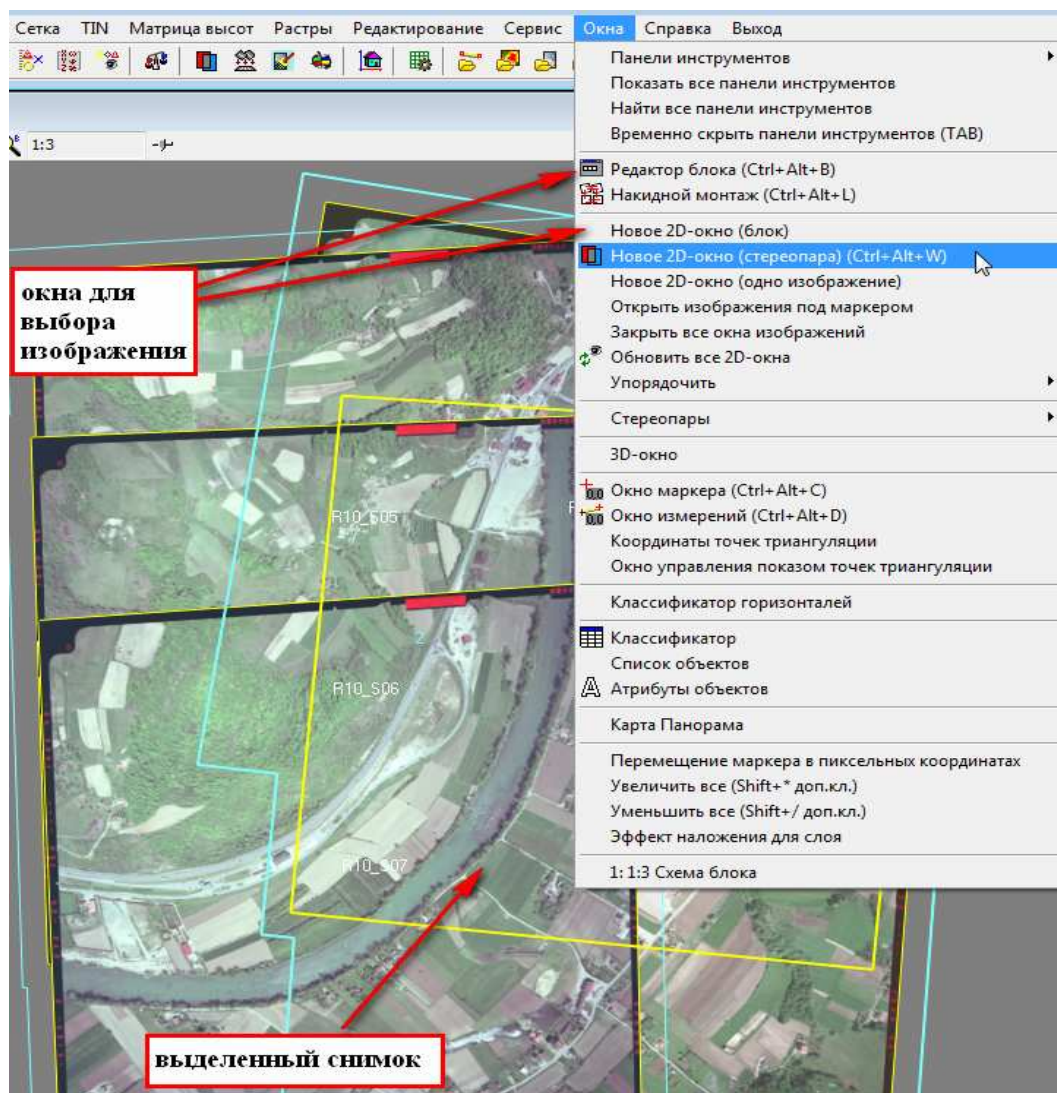


Рис. 29

При векторизации все векторные объекты должны располагаться на соответствующих слоях. Слой с векторными данными представляет собой векторные объекты (точки, полилинии, полигоны) с классификатором или без тематической классификации.

Обычный векторный слой с векторными данными представляет собой векторные объекты, не имеющие атрибутов (без тематической классификации). Для создания векторного слоя без классификатора служит команда меню **Вектора | Создать слой**. При этом в окне **Диспетчер слоев** появляется новый слой (Вектора) с порядковым номером слоя и расширением x-data.

Все векторные объекты, создаваемые в слое с классификатором, привязываются к записям в классификаторе. Классификатор представляет собой набор стандартных атрибутов, используемых для тематической классификации объектов.

Для создания векторного слоя с классификатором используется команда меню **Вектора | Создать слой с классификатором**, при этом в окне **Диспетчер** появляется новый слой (Вектора) с порядковым номером слоя и расширением x-data, и автоматически открывается окно классификатора (рис. 30).

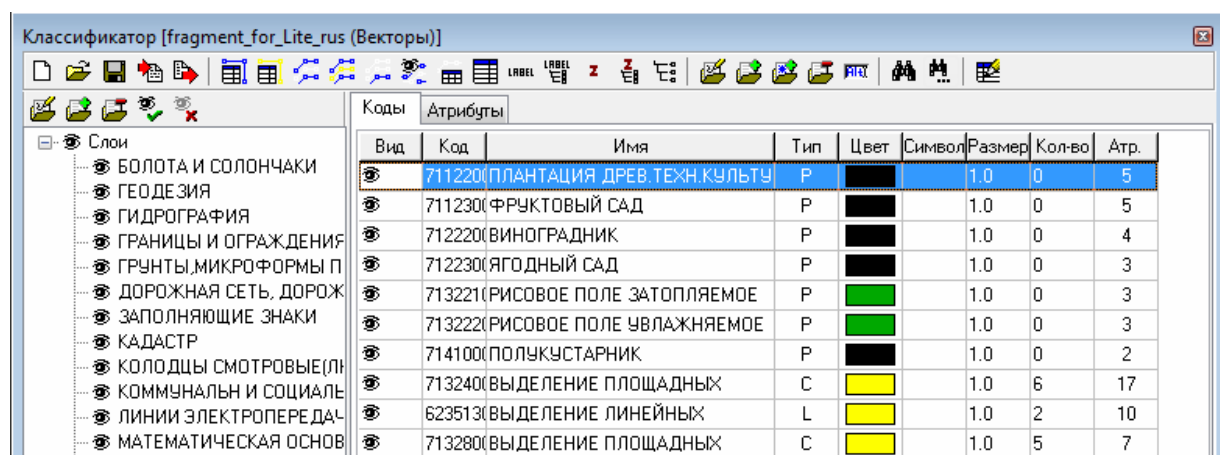


Рис. 30

Правая часть содержит список кодов векторных объектов и имеет две закладки: **Коды** и **Атрибуты**. На закладке **Коды** имеется таблица со следующими столбцами:


- **Вид** – показывает видимость объектов с выбранным кодом в 2D окне;
- **Код** – код объекта;
- **Имя** – произвольный текст длиной не более 64 символов, позволяет присваивать каждому коду (группе объектов с выбранным кодом) уникальное имя – например «Грунтовые дороги»;
- **Тип** – тип объекта. Может иметь следующие значения: P – точка, L – полилиния, C – полигон;
- **Цвет** – цвет, который используется для отображения объекта;
- **Символ** – ASCII символ, соответствующий коду объекта. Используется для точечных объектов и может быть выбран из списка символов в имеющейся библиотеке;
- **Размер** – вещественное число, описывающее размер векторного объекта в используемой реальной системе координат. Для точек этот па-

параметр определяет размер символов, с помощью которых они отображаются;

- **Кол-во** – количество объектов, имеющих данный код;
- **Атр.** – количество атрибутов объекта.

Для каждого кода векторных объектов можно добавить произвольные атрибуты, используя закладку **Атрибуты** в окне классификатора. Каждый векторный объект можно снабдить специальной подписью (label), которая будет визуализирована в 2D окне как подпись к точечному объекту или к вершине линейного объекта.



Записи классификатора могут быть привязаны к векторным объектам двумя способами:


- в процессе создания векторного объекта – выберите нужный код в классификаторе и начните векторизацию объекта. Код будет привязан к нему автоматически;
- назначение кода существующему объекту. Если выбран векторный объект (группа объектов) в 2D-окне и нужный код в классификаторе, необходимо нажать кнопку  (присвоить код выбранным объектам).

К типам 3D векторных объектов, с которыми работает PHOTOMOD, относятся:

- точка – точечный трехмерный объект, определяемый в пространстве координатами X, Y, Z;
- полилиния – сложный объект, состоящий из набора узлов (вершин), соединенных сегментами. В случае прямолинейных сегментов полилиния представляет собой ломаную, дуговых сегментов – кривую. Полилиния может быть замкнутой и незамкнутой. В случае создания замкнутой полилинии ее первая и последняя точка совпадают пространственно;
- полигон – в системе PHOTOMOD полигон представляет собой замкнутую полилинию, для удобства создания которой предусмотрен отдельный инструмент, позволяющий автоматически замыкать “полигон” по завершении рисования. Однако объекты типа «полигон», определенные в атрибутах на слое с классификатором, будут восприниматься при экспорте как площадные объекты;
- CAD объекты – стандартные геометрические фигуры.

Создание 3d векторных объектов необходимо выполнять в стереорежиме. Для выбора одного из стереорежимов, описанных ниже, используется окно настроек, открывающееся по команде меню **Сервис | Параметры | Стерео**. Выберите Анаглифический стереорежим. Откройте 2D-окно для


выбранной стереопары с помощью кнопки  основной панели инструментов PHOTOMOD или команды меню **Окна | Новое 2D-окно** (стереопара) (см. рис. 29). Для включения или отключения стереорежима в 2D-окне используется кнопка  панели инструментов 2D-окна (см. рис. 2) (дублируется горячей клавишей F9).

При создании векторных объектов используются инструменты управления стереомаркером. Режимы подвижного и неподвижного маркера переключаются нажатием кнопки  или горячей клавиши F6. Подвижный маркер произвольно перемещается оператором по «неподвижному» изображению в плане с помощью мыши с нажатой левой клавишей или клавиш со стрелками, а по высоте с помощью клавиш PgUp, PgDn или колеса мыши.

В режиме неподвижного маркера он (маркер) постоянно находится в центре экрана. Для перемещения изображения относительно маркера в плане используется мышь или клавиши со стрелками. По высоте неподвижный маркер перемещается с помощью клавиш PgUp, PgDn или колеса мыши.


Для автоматического позиционирования маркера на поверхность модели используется коррелятор, который вызывается нажатием клавиши «пробел». В случае несрабатывания коррелятора в **Статусной строке** (см. рис. 2) появляется сообщение «Плохая точка», сопровождающееся звуковым сигналом.

Следует отметить, что шаг перемещения маркера по оси Z дискретен и обратно пропорционален текущему увеличению. Для быстрого перемещения маркера по высоте удобно использовать движение колеса мыши при нажатой клавише Alt.


Для входа в режим создания и редактирования векторных объектов выберите слой **Вектора** в **Диспетчере слоев** (см. рис. 2). Для управления отображением окна **Диспетчер слоев** служит кнопка  (показать/скрыть) на панели инструментов 2D окна.

Рассмотрим процесс создания векторных объектов.

Для создания точки:

- войти в режим создания точек (нажав клавишу P или кнопку панели инструментов  (режим ввода точечных объектов));
- поместить маркер в нужное место;
- нажать Insert для ввода точки.

Для создания полилинии:

– войти в режим создания полилиний (нажав клавишу L или кнопку панели инструментов  (режим ввода незамкнутых полилиний));

– для каждой вершины линии:

• *поместить маркер в нужное место;*

• *нажать Insert для ввода вершины;*

– нажать Enter или Esc для завершения создания полилинии;


– для замыкания полилинии в процессе ее создания выбрать команду **Вектора | Топология | Замкнуть полилинию** (или сочетание клавиш Shift-C) после ввода последней вершины.

Создание полигона выполняется аналогично полилинии.

При векторизации некоторых типов объектов – например, зданий, необходимо, чтобы полилиния или полигон состояли из сегментов, расположенных под прямым углом.

Включение прямоугольного режима осуществляется:

– нажатием клавиши A (латинской) – если необходимо, чтобы часть линии была прямоугольной, при вводе очередного сегмента линии нажмите и удерживайте эту клавишу, для продолжения линии в обычном режиме отпустите клавишу;


– кнопки  панели инструментов – для включения постоянного ортогонального режима векторизации, который необходим при векторизации некоторых типов объектов – например, зданий. При векторизации таких объектов необходимо, чтобы полилиния или полигон состояли из сегментов, расположенных под прямым углом. Режим ортогональной линии используется при создании как полилиний, так и полигонов.


Редактирование векторных объектов

Операции редактирования производятся над выбранным объектом или группой объектов. Выбирать объекты можно вручную или автоматически – по запросу в классификаторе кодов или слоев.

Для выбора объектов используются следующие инструменты:

– двойной щелчок мыши или нажатие клавиши S для выбора одиночной полилинии или полигона или щелчок мыши для выбора точки (предварительно маркер должен быть расположен в его окрестности);

– прямоугольник (кнопка  панели инструментов или команда **Редактирование | Групповое выделение | Прямоугольник**). Выбор векторных объектов внутри прямоугольника, «растянутого» мышью с нажатой клавишей Shift;

– полигон (кнопка  панели инструментов или команда **Редактирование | Групповое выделение | Полигон**). Выбор векторных объектов внутри нарисованного произвольного полигона. Нажмите левую клавишу мыши и клавишу Shift, чтобы начать рисование полигона. В результате появляется его первая вершина и «резиновая нить», направленная в текущее положение курсора. Ввод последующих вершин осуществляется щелчками мыши. Для завершения выделения объектов полигоном сделайте двойной щелчок левой кнопкой мыши.

Режимы выбора векторных объектов устанавливаются с помощью кнопок панели инструментов или пункта меню **Редактирование | Групповое выделение**:

– **нормальное** – в этом режиме при выборе векторных объектов снимается выделение (выбор) с объектов, выбранных прежде;

– **добавлять к выделенному** – добавление к выбору. Каждый вновь выбранный объект (группа объектов) добавляется к текущей группе выбранных объектов;

– **вычитать из выделенного** – снятие выбора с объекта (группы объектов);

– **полностью внутри** – режим выбора векторных объектов, при котором выделяются объекты, полностью попавшие в область выбора;

– **частично внутри** – режим выбора векторных объектов, хотя бы один отрезок линии которых пересекает границу области выбора;

– **хотя бы одна вершина внутри** – режим выбора векторных объектов, хотя бы одна вершина которых находится в области выбора.

Для выделенного точечного объекта доступны следующие операции:

– **удаление** – клавиша Delete;

– **перемещение** – если нажата клавиша Ctrl, точка может быть перемещена с помощью мыши или клавиш со стрелками в плоскости XY и с помощью клавиш PgUp, PgDn или колеса мыши по оси Z ;

– **перемещение в положение маркера** – Для этого вершину необходимо выделить, поместить маркер в необходимое положение и нажать клавишу J, либо выбрать команду **Вектора | Операции | Переместить в положение маркера**. Позиционирование маркера в необходимое положение производится вручную.

Вершина полилинии (полигона) выбирается щелчком мыши. Для выбранной вершины полилинии (полигона) доступны следующие операции:

– **удаление** – клавиша Delete;

– **перемещение** – если нажата клавиша Ctrl, вершина может быть перемещена в плоскости XY с помощью мыши или клавиш со стрелками, а по оси Z с помощью клавиш PgUp, PgDn или вращением колеса мыши;

– **перемещение в положение маркера.**

Чтобы вставить вершину в выбранную полилинию (полигон), поместите маркер в необходимое положение и нажмите Insert. Можно также вставить вершину после выделенной точки при создании линий сложной конфигурации. Для этого перед нажатием Insert выберите вершину нажатием комбинации клавиш Alt-S.

Если включена опция **Режим редактирования общих вершин**, то при добавлении вершины в общую границу нескольких полилиний между двумя связанными вершинами она вставляется во все из них.

Для продолжения выбранной полилинии сделайте активной ее начальную или конечную вершину (комбинация клавиш Alt-S) и продолжите векторизацию в обычном режиме.

Для перемещения выделенной (двойным щелчком мыши) полилинии нажмите клавишу Ctrl и переместите ее с помощью мыши или клавиш со стрелками в плоскости XY и с помощью клавиш PgUp, PgDn или колеса мыши по оси Z. При этом в полилинии не должно быть выделенных вершин.

Операция **Проведение полилинии вдоль существующей** используется при векторизации объектов, общие границы которых должны в точности совпадать (например, земельных участков).

Для проведения одного объекта вдоль другого используются возможности начинать и завершать создание общей части новой и существующей линий двумя способами.

Способы создания начальной общей точки двух полилиний:

– *В существующей вершине имеющейся линии.* Начните векторизацию нового объекта при наличии существующего линейного объекта, вдоль которого будет проводиться общая граница. Поместите маркер в окрестности нужной вершины существующего линейного объекта, нажмите Shift-V, после чего эта вершина станет первой общей точкой для обеих линий.

– *В произвольной точке имеющейся линии.* Начните векторизацию нового объекта при наличии существующего линейного объекта, вдоль которого будет проводиться общая граница. Поместите маркер в окрестности нужной произвольной точки существующего линейного объекта и нажмите Shift-L (или выберите команду **Вектора | Топология | Подключиться к полилинии**), после чего программа вычислит координаты ближайшей к маркеру точки на линии и эта точка станет вершиной и первой общей точкой для обеих линий.

Способы создания последней общей точки двух полилиний:

– *До выделенной вершины имеющейся линии.* Поместите маркер в окрестности вершины существующего линейного объекта, которая будет

последней общей точкой обеих линий, и нажмите Shift-S, чтобы выделить эту вершину. Затем воспользуйтесь сочетанием клавиш Shift-F (или выберите команду **Вектора | Топология | Продолжить вдоль полилинии | До выделенной вершины**), что приведет к созданию общей части нового и существующего линейных объектов. При этом вершины обоих объектов можно редактировать как отдельно друг от друга, так и одновременно в зависимости от включенной/отключенной опции **Режим редактирования общих вершин**.

– *До произвольной точки имеющейся линии.* Поместите маркер в произвольную точку рядом с полилинией и нажмите Shift-A (или выберите команду **Вектора | Топология | Продолжить вдоль полилинии | До положения маркера**). Последняя общая вершина двух линий будет создана в точке пересечения существующей линии и проекции положения маркера на нее. Если маркер поместить так, что его проекция не попадает ни на один из отрезков полилинии, на ней создается дополнительный сегмент и создаваемая полилиния проведется до ближайшей вершины.

После создания последней общей вершины двух линий можно продолжить создание нового линейного объекта, завершив его создание нажатием клавиши **Enter**.

В результате новый и существующий объекты будут иметь общую границу с совпадающими вершинами между «последней» и «первой» выделенными вершинами.

После выполнения векторизации нескольких стереопар необходимо выполнить объединение полилиний, относящихся к одному объекту.

Для объединения двух полилиний выделите их в 2D окне с помощью клавиши Shift и правой клавиши мыши и выберите команду **Вектора | Топология | Объединить полилинии** (дублируется сочетанием клавиш **Shift-P**). В результате две ближайшие начальные или конечные точки будут соединены отрезком. В случае если объединяемые объекты в слое с классификатором имеют разный код, результирующему объекту будет присвоен код, выбранный в окне классификатора, в противном случае ему будет присвоен тот же код, что был у объединяемых объектов.

После окончания векторизации для использования полученных материалов в других программных продуктах необходимо выполнить экспорт данных в другой формат.

Для экспорта векторных объектов служит команда меню **Вектора | Экспорт**. При экспорте в любой формат вначале выводится стандартный системный диалог выбора имени файла для сохранения экспортируемых

данных. Затем выводится диалог параметров экспорта, позволяющий задать параметры, специфичные для экспортируемого формата.

В верхней части диалога параметров экспорта для каждого формата расположена опция "Экспортировать только выделенные". Эта опция доступна, если в экспортируемом слое есть выделенные объекты. При ее включении в выходной файл будут сохранены только эти выделенные объекты. Наиболее распространенным является обменный формат DXF.

Для экспорта векторных объектов в DXF формат выполните команду **Вектора | Экспорт | DXF**. Поддерживается экспорт в DXF версии R14 (AutoCAD R14). Диалог параметров экспорта для данного формата имеет следующий вид (рис. 30):

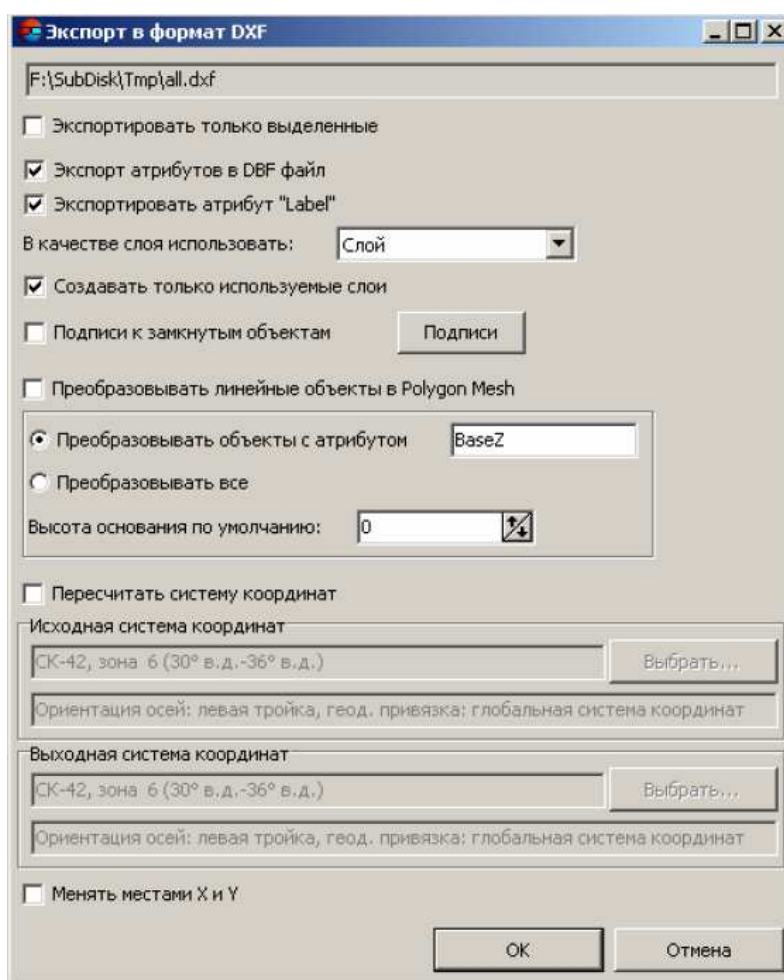


Рис. 30

Опция "Экспорт атрибутов в DBF файл" позволяет экспортировать атрибуты объектов (записи таблицы кодов, таблицы атрибутов и дополнительных атрибутов) в файл формата DBF с именем, совпадающим с именем .dxf файла, и расширением DBF.

Опция "Сохранять атрибут Label" позволяет также экспортировать подпись (label) объектов.

Выпадающий список "В качестве слоя использовать" позволяет выбрать вариант привязки векторных объектов к слоям в выходном DXF файле: по имени слоя, по коду объекта или по имени этого кода.

Опция "Создавать только используемые слои" определяет, экспортировать в DXF все определенные в классификаторе слои либо только те, в которых есть объекты.

Опция "Подписи к замкнутым объектам" позволяет экспортировать подписи к полигонам в отдельный слой. При этом по нажатию кнопки "Подписи" открывается окно, предназначенное для настройки параметров слоя подписей.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

Создание TIN. Построение и редактирование горизонталей.

Цель работы: ознакомиться с алгоритмом работ по построению моделей рельефа и горизонталей средствами PHOTOMOD.

Форма отчета: выполнение зачетного задания.

Задание: выполнить самостоятельно комплекс работ по построению моделей рельефа и горизонталей на стереопару в программе PHOTOMOD.

В PHOTOMOD возможно создание и редактирование в стереорежиме цифровых моделей рельефа (ЦМР) и горизонталей. Основным форматом представления ЦМР в системе PHOTOMOD является пространственная нерегулярная сеть треугольников – TIN (Triangulated Irregular Network). Предусмотрена возможность конвертирования TIN'а в регулярную модель рельефа – матрицу высот (DEM – Digital Elevation Model). Для уточнения модели рельефа могут использоваться структурные линии – 3D векторные линии вдоль характерных вытянутых форм рельефа, таких, например, как хребты, тальвеги и др. Помимо TIN, модель рельефа может быть представлена в виде набора 3D-точек (пикетов) и структурных линий. Система содержит необходимый набор инструментов для редактирования TIN, структурных линий и горизонталей.

Система PHOTOMOD хранит TIN-модели, горизонталы, структурные линии и другие типы объектов в специальных файлах – ресурсах.

Порядок работы при создании нерегулярной пространственной сети треугольников (TIN) заключается в следующем:

1. Формирование базовых векторных слоев.
2. Определение границ TIN.
3. Построение TIN.
4. Просмотр, контроль точности и “редактирование” TIN.

Главными элементами ЦММ являются пикеты – точки, находящиеся на поверхности земли. Пикеты можно расставлять в ручном или автоматическом режиме. Для автоматической расстановки пикетов в меню выбираем **Вектора – Расчет пикетов...** (рис. 31).

Расстановка пикетов в автоматическом режиме производится следующим образом:

- сначала строится сетка с выбранным шагом;
- затем программа пытается возле каждого узла сетки найти точку с наилучшим коэффициентом корреляции;
- если максимальное значение коэффициента корреляции меньше допуска, происходит переход к следующему узлу сетки.

После выбора пункта **Расчет пикетов** предлагается задать шаг сетки (рис. 32). Шаг сетки выбирается в зависимости от рельефа местности.

Следующее окно, открывающееся после нажатия кнопки ОК, позволяет уточнить параметры поиска пикетов (рис. 33).

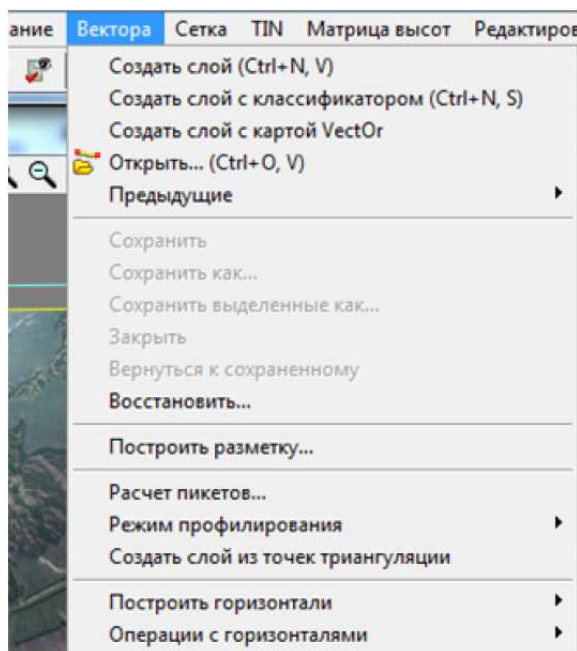


Рис. 31

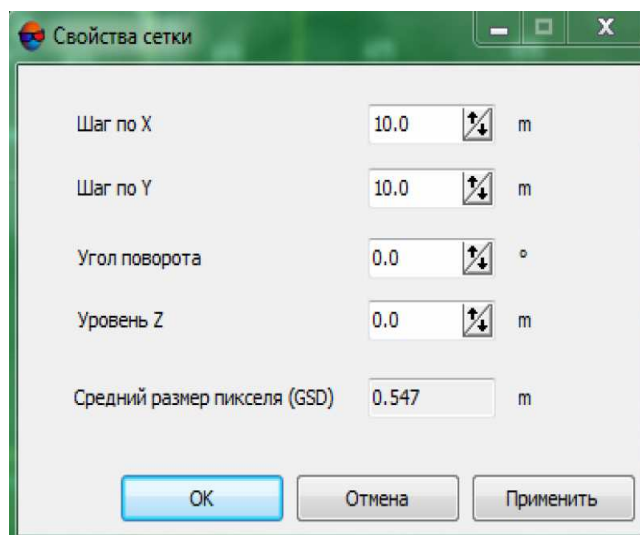


Рис. 32

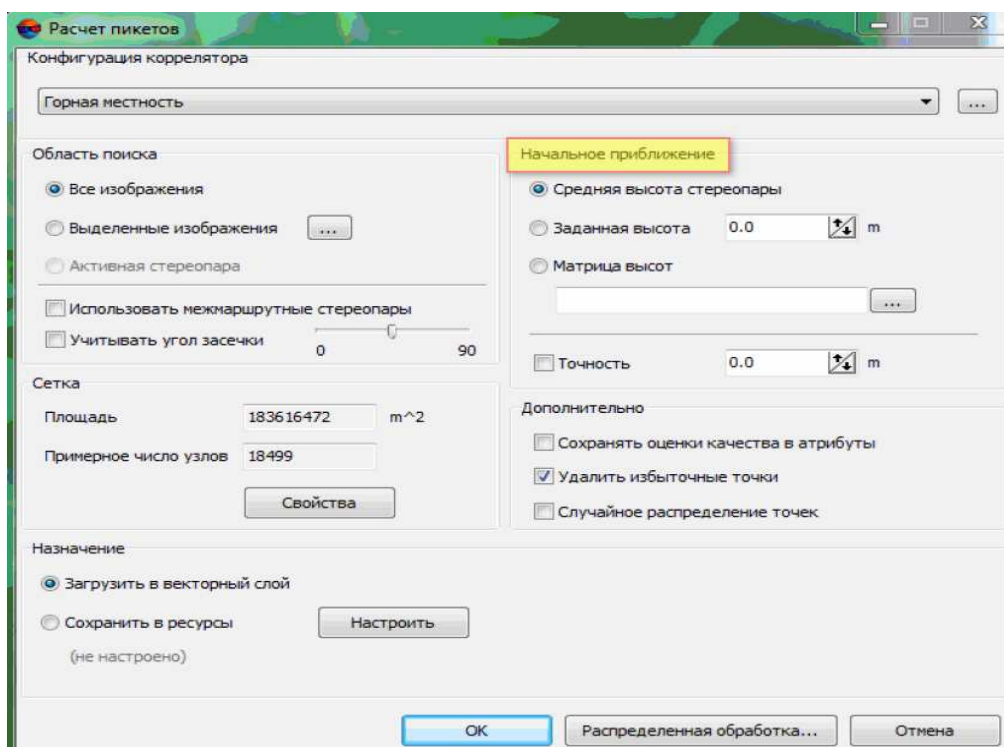


Рис. 33

Например, в разделе **Конфигурация** коррелятора можно выбрать тип местности: Горная местность, Городская застройка, Пустыня, Сельская местность (рис. 34).

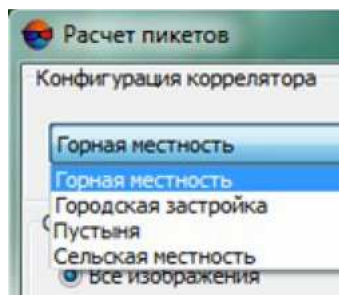


Рис. 34

Областью поиска пикетов могут служить либо все изображения, либо только выделенные изображения, либо активная стереопара. В качестве начального приближения (см. рис. 33) для поиска пикетов можно также задать один из трех предлагаемых вариантов:

- средняя высота стереопары;
- заданная высота;
- матрица высот.

После определения (выбора) всех необходимых параметров запускаем программу на расчет отметок пикетов (рис. 35).

По окончании работы программы расчета пикетов справа (в **Диспетчере слоев**) в списке активных элементов появятся две записи: ***Вектора** и ***Сетка**. Впереди стоящая звездочка символизирует о том, что эти данные еще не сохранены в проекте. Для сохранения пикетов в проекте нажимаем правой кнопкой мыши на ***Вектора**. Выбираем пункт **Сохранить как...**

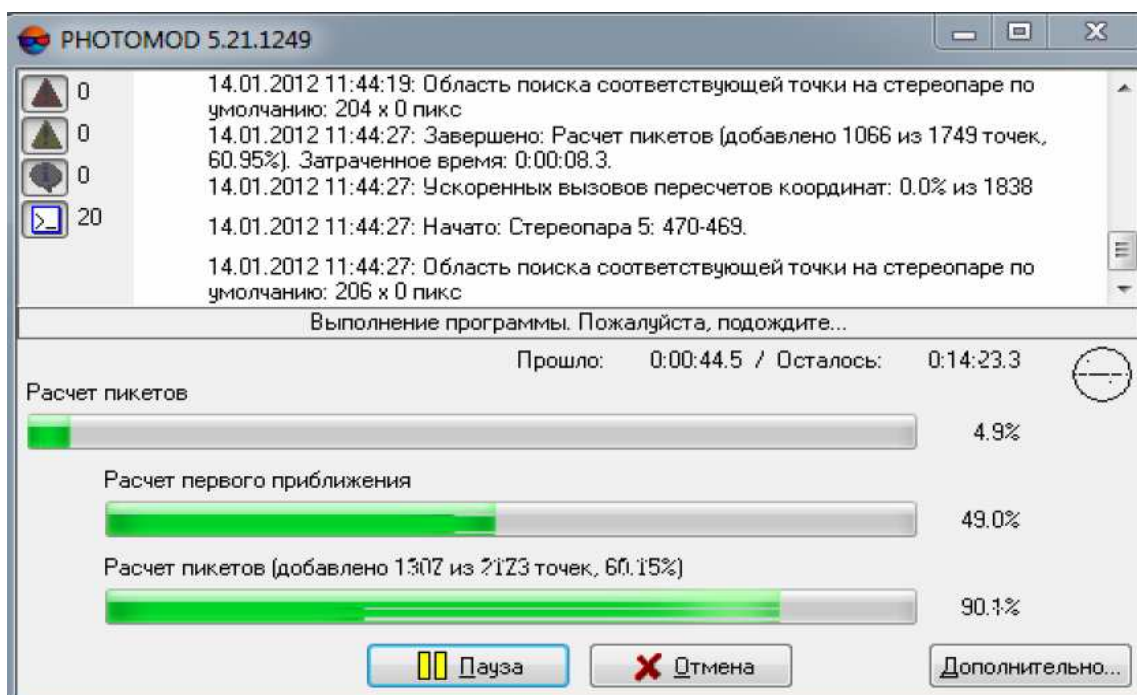


Рис. 35

Имея пикеты, можно построить триангуляционную сеть. Исходными данными могут быть не только пикеты, но и другие векторные объекты,

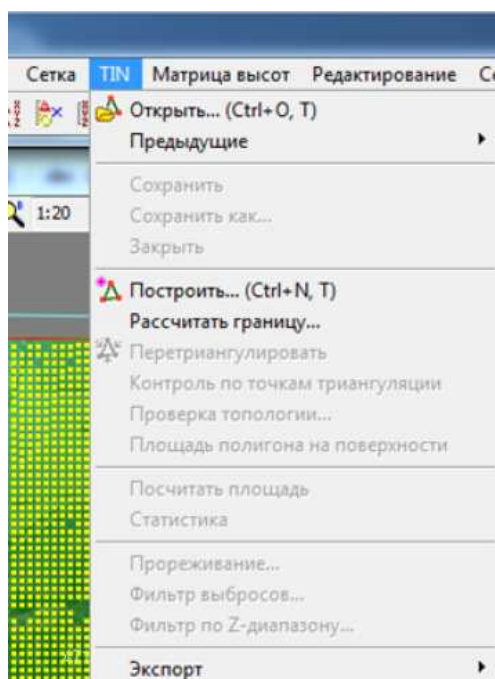


Рис. 36

такие как: структурные линии, результаты векторизации ситуации в 3D режиме, точки фототриангуляции (опорные, связующие).

Для построения триангуляционной сети в меню выбираем **TIN – Построить...** (рис. 36). После запуска этой команды появляется окно параметров построения и отображения TIN (рис. 37).

На панели **Квазигоризонтали** (рис. 37) можно задать шаг для отображения горизонталей, которые будут строиться по TIN. Процедура построения TIN довольно быстро выполняется, поэтому можно не сохранять ни TIN, ни горизонтали, а поэкспериментировать с различными значениями шага, удобного для визуализации.

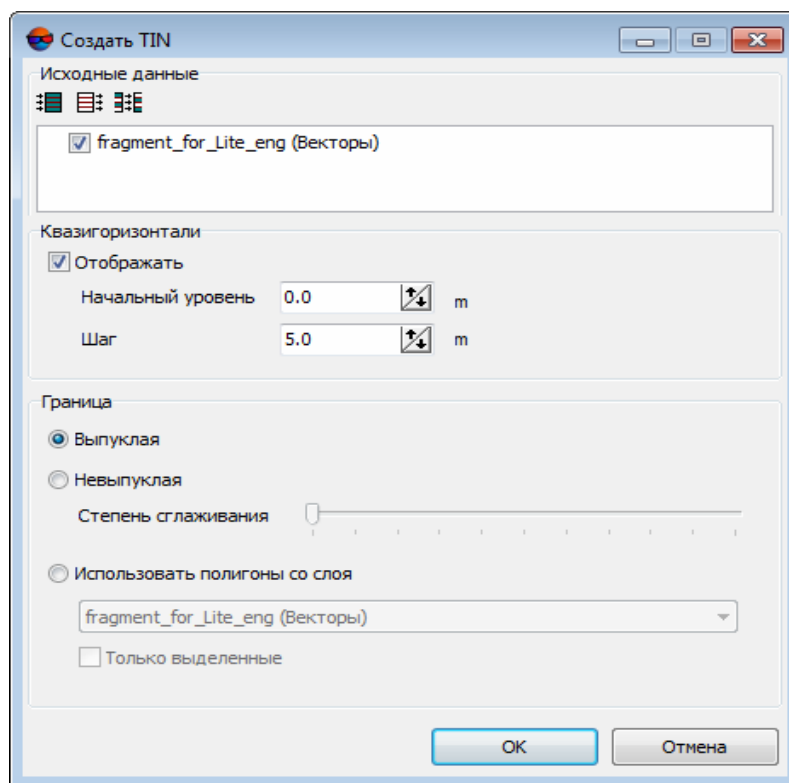


Рис. 37

В данном случае горизонтали сейчас не являются самостоятельным векторным объектом, а служат только для отображения форм рельефа. Поэтому они и названы разработчиками программного комплекса квазигоризонтальями.

Для построения векторного слоя горизонталей необходимо выбрать пункт меню **Вектора – Построить горизонтали – По TIN...** (рис. 38).

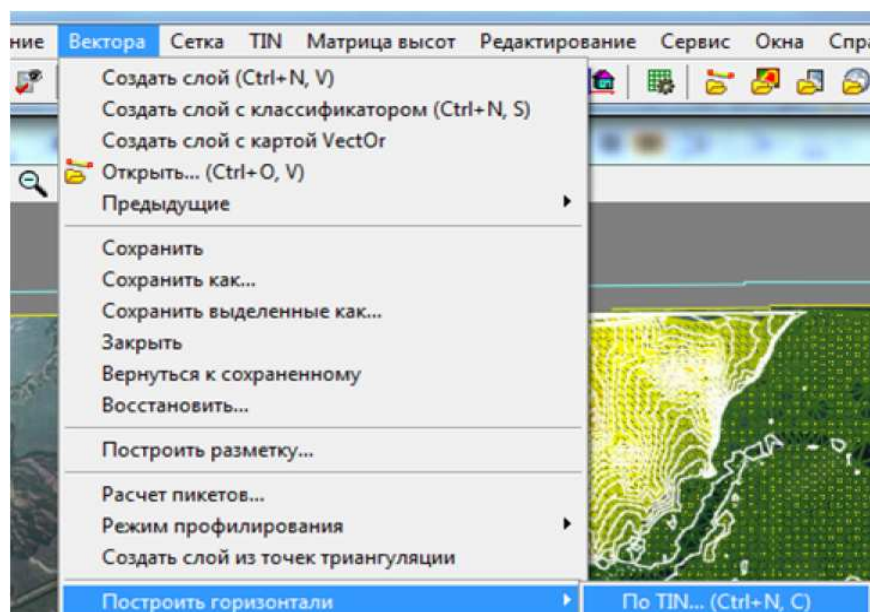


Рис. 38

В открывшейся форме нужно настроить параметры построения горизонталей (рис. 39).

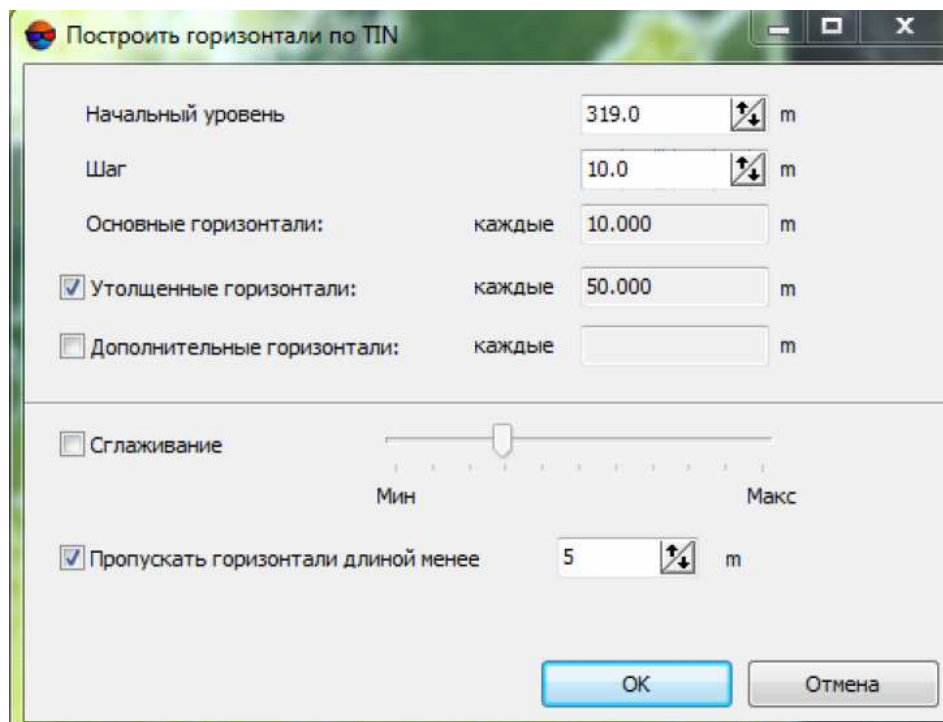



Рис. 39

После нажатия кнопки ОК появится новый векторный слой **Горизонтали**. Эти горизонтали появятся и в окне со снимками. Полученные горизонтали можно, как и любой векторный слой, экспортировать в желаемый формат.

Однако прежде чем выполнять операцию экспорта, необходимо выполнить контроль пикетов и редактирование пространственной триангуляции. Как было сказано ранее, программа не всегда может «найти» точку с достаточно высоким коэффициентом корреляции. Кроме того, некоторые пикеты могут попасть на верхушки деревьев, здания и т.д.

Для контроля положения пикетов необходимо перейти в стереорежим. Переход в стереорежим осуществляется при нажатии на соответствующую пиктограмму  (рис. 40).

В стереорежиме (см. рис. 40) хорошо видно, что отмеченный пикет расположен высоко над землей, а соседние пикеты справа от него также «висят в воздухе». Их надо «опустить на землю» вручную либо удалить и поставить новые, т.е. отредактировать.

Для редактирования пикетов необходимо слой пикетов в **Диспетчере слоев** сделать редактируемым, т.е. он должен быть отмечен символом «карандаш» (рис. 41).

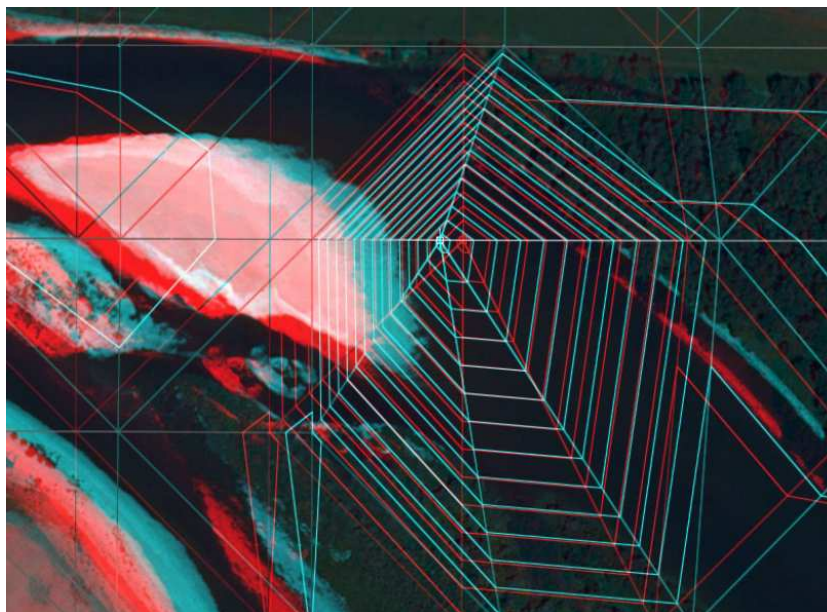


Рис. 40

При наведении маркера на пикет он выделяется квадратиком. Для выделенного точечного объекта доступны следующие операции:

- удаление – клавиша Delete ;
- перемещение – если нажата клавиша Ctrl, точка может быть перемещена с помощью клавиш со стрелками или с помощью клавиш PgUp, PgDn, или колеса мыши по оси Z;
- перемещение в положение маркера – для этого вершину необходимо выделить, поместить маркер в необходимое положение и нажать клавишу J либо выбрать команду **Вектора – Операции – Переместить в положение маркера**.

Позиционирование маркера в необходимое положение производится вручную с помощью клавиш PgUp, PgDn или автоматически с помощью клавиши «пробел».

Операция по редактированию пикетов TIN может быть очень трудоемка и утомительна. В таком случае для получения приемлемых результатов в автоматическом режиме необходимо изменить параметры поиска пикетов (параметры коррелятора и сетки).

Настройка конфигурации коррелятора заключается в определении сценария выполнения автоматического расчета пикетов. Основные параметры коррелятора задаются в окне **Расчет пикетов** (рис. 42).

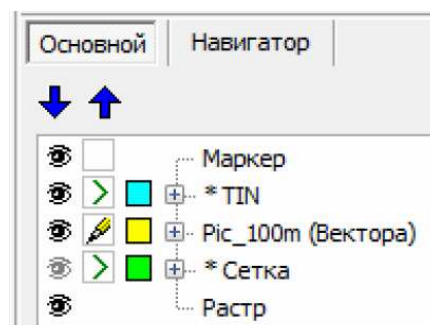


Рис. 41

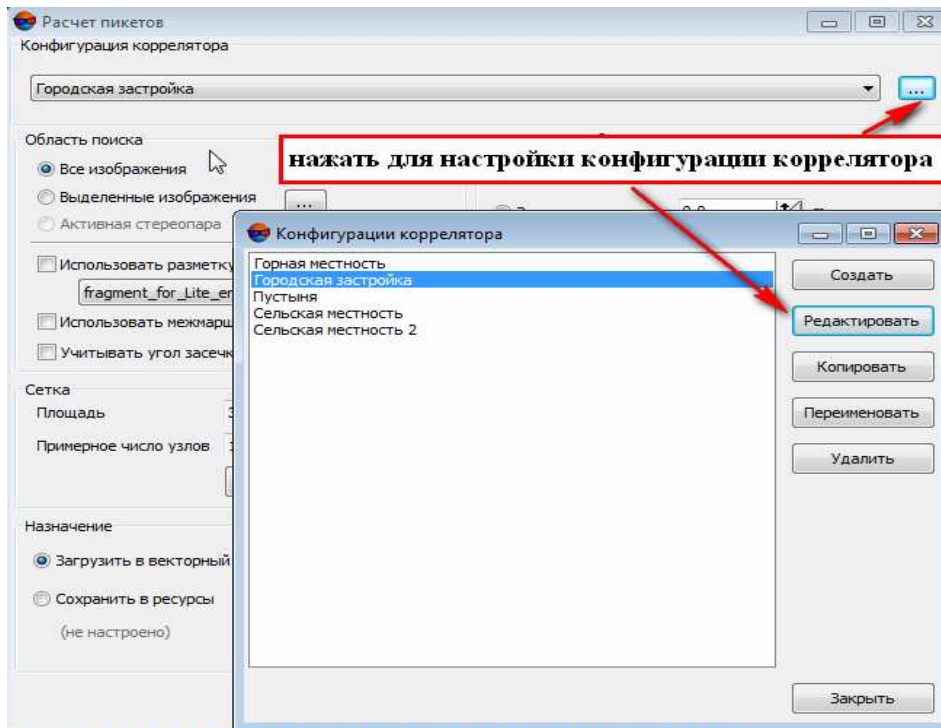


Рис. 42

Вид окна Редактирование параметров приведен на рис. 43.

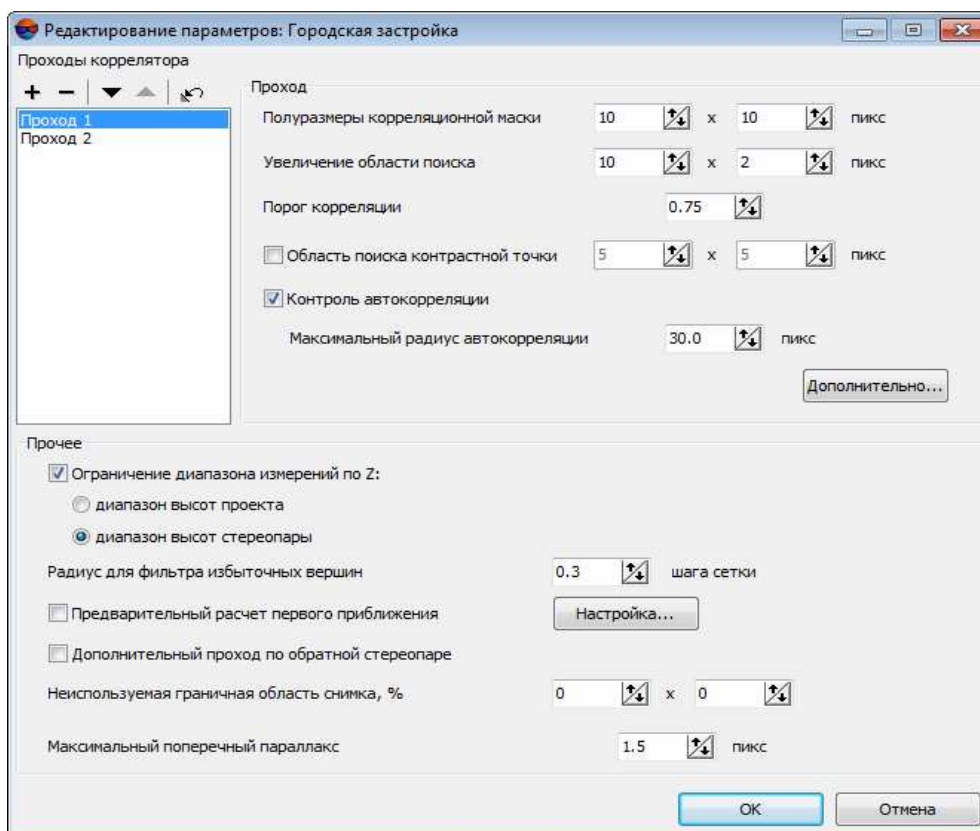


Рис. 43

Возможно изменить (отредактировать) для каждого прохода следующие параметры:

– **Полуразмеры корреляционной маски** – половина линейного размера маски корреляции в пикселах по осям X и Y (маска имеет прямоугольную форму). Значение по умолчанию – 12×12 пикселей. Увеличение размера маски повышает качество распознавания для плавно меняющегося рельефа и снижает влияние мелких деталей на поверхности, однако снижает “общий выход” (количество) точек. Также следует иметь в виду, что при обработке материала со слабоконтрастными областями, соответствующими наклонным формам рельефа (например, поля или лужайки на склонах холмов), возможно добавление точек, соответствующих не центру, а краю маски.

– **Увеличение области поиска.** Параметр предназначен для исправления ситуации, когда по данным ориентирования стереопары расчетная область поиска соответствующей точки на правом снимке недостаточна (наличие высотных объектов в углах стереопары и др.). **Порог корреляции** – минимально допустимое значение коэффициента корреляции. Значение существенно зависит от качества материала, а также от остальных параметров. Однако, как правило, рекомендуется устанавливать значение не меньше 0,7.

– **Область поиска контрастной точки.** Определяет размер области (в пикселах) вокруг начального приближения (узла сетки), в которой перед корреляцией производится поиск максимально контрастной точки. Значение размера области рекомендуется увеличивать для изображений с четкими контурами объектов, уменьшать для малоконтрастных областей, где вероятность ошибок коррелятора велика.

– **Контроль автокорреляции и максимальный радиус автокорреляции.** Параметр позволяет контролировать автокорреляцию точки, т.е. степень уникальности точки в некоторой ее окрестности на левом снимке. Чем выше значение радиуса автокорреляции, тем менее характерной является точка и тем больше вероятность неверного сопоставления ее с правым снимком даже при высоком коэффициенте корреляции.

В системе PHOTOMOD TIN не существует без “векторов” и его нельзя отредактировать (т.е. его вершины и ребра), так как TIN содержит только относительные пути к базовым векторным слоям, а также шаг квазигоризонталей. Внести изменения в сеть треугольников (TIN)

возможно только при редактировании основы – векторных объектов базовых слоев. TIN вместе с квазигоризонталями перестраивается автоматически при редактировании базовых векторных слоев. Для “редактирования” TIN в системе PHOTOMOD предусмотрены следующие средства:

- **Фильтрация** – прореживание, фильтр выбросов и фильтр по Z-диапазону, которые применяются к объектам базовых векторных слоев.
- **Проверка топологии** – поиск близлежащих вершин TIN (т.е. соответствующих им точек или узлов полилиний/полигонов базовых векторных слоев) и исправление топологии.

Для достижения хороших результатов при создании TIN рекомендуется использовать структурные линии – векторные полилинии вдоль характерных форм рельефа таких, например, как хребты и тальвеги, а также линейные объекты антропогенного происхождения, например, вдоль дорог. Процесс создания структурных линий выполняется так же, как и процесс создания обычных полилиний (без классификатора) рассмотренный в предыдущей лабораторной работе.

TIN строится с учетом всех объектов всех выбранных векторных слоев (базовых слоев) и динамически перестраивается при любом изменении базовых слоев – добавлении / удалении / редактировании “векторов” на указанных слоях.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Составить структуры матриц коэффициентов уравнений поправок A и нормальных уравнений B . Расположение снимков и точек для разных вариантов показано на рисунках 1-6.

На рисунках даны следующие обозначения:

— ось маршрута аэрофотосъемки; • – центры фотографирования;
 \times – точки сети; \otimes – опорные знаки (опознаки).

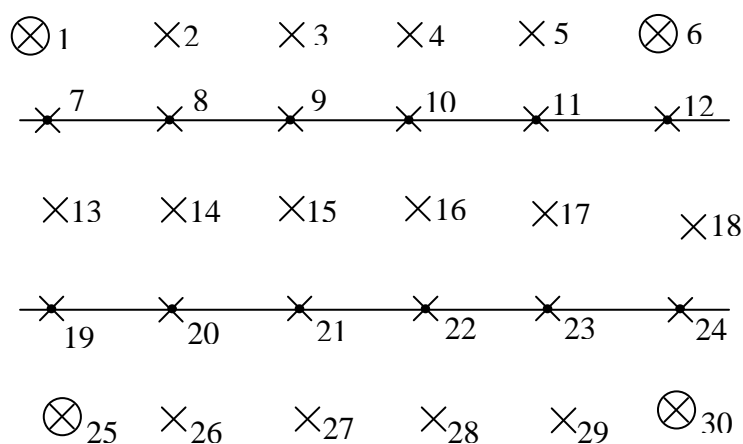


Рис. 1

Расположение неизвестных:

Вариант 1: $\delta\alpha, \delta\omega, \delta\kappa, \delta X_S, \delta Y_S, \delta Z_S, \delta X, \delta Y, \delta Z$

Вариант 2: $\delta X, \delta Y, \delta Z, \delta\alpha, \delta\omega, \delta\kappa, \delta X_S, \delta Y_S, \delta Z_S$

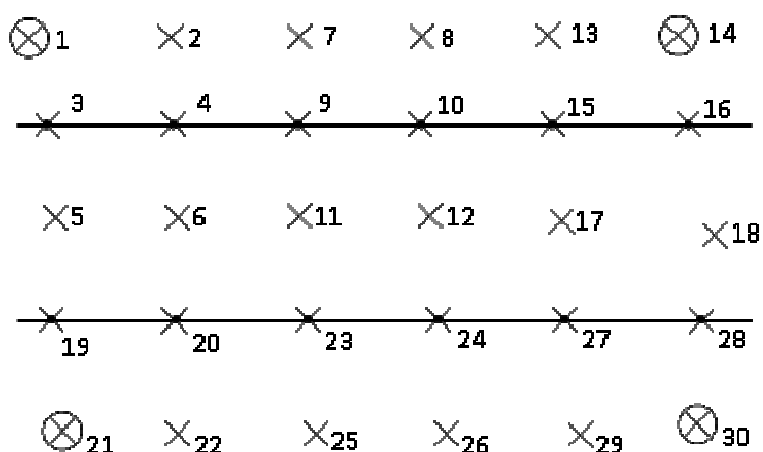


Рис. 2

Вариант 3: $\delta\alpha, \delta\omega, \delta\kappa, \delta X_S, \delta Y_S, \delta Z_S, \delta X, \delta Y, \delta Z$

Вариант 4: $\delta X, \delta Y, \delta Z, \delta\alpha, \delta\omega, \delta\kappa, \delta X_S, \delta Y_S, \delta Z_S$

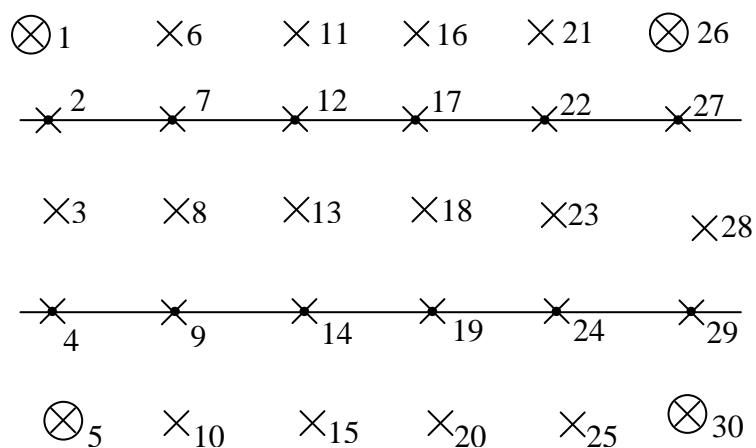


Рис. 3

Вариант 5: $\delta\alpha, \delta\omega, \delta\kappa, \delta X_S, \delta Y_S, \delta Z_S, \delta X, \delta Y, \delta Z$

Вариант 6: $\delta X, \delta Y, \delta Z, \delta\alpha, \delta\omega, \delta\kappa, \delta X_S, \delta Y_S, \delta Z_S$

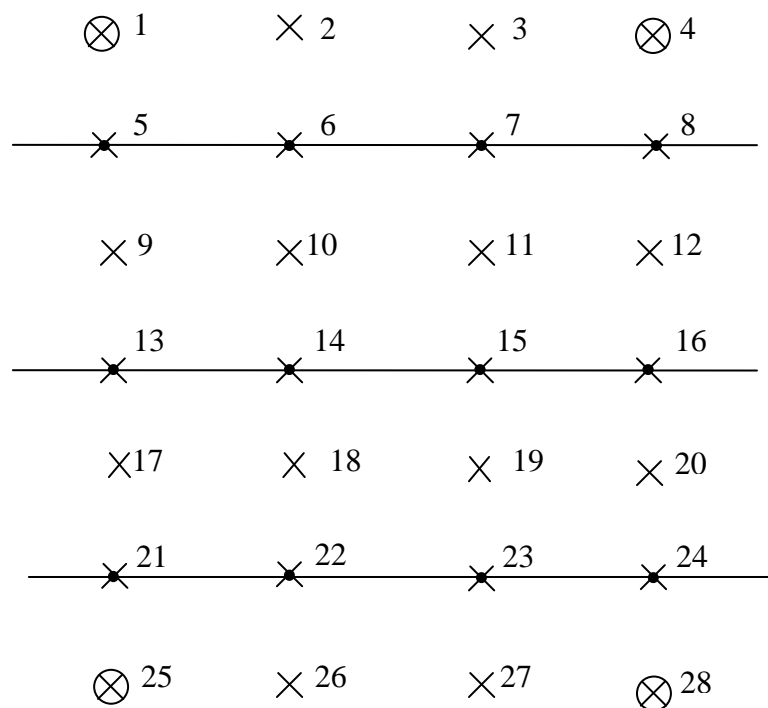


Рис. 4

Вариант 7: $\delta\alpha, \delta\omega, \delta\kappa, \delta X_S, \delta Y_S, \delta Z_S, \delta X, \delta Y, \delta Z$

Вариант 8: $\delta X, \delta Y, \delta Z, \delta\alpha, \delta\omega, \delta\kappa, \delta X_S, \delta Y_S, \delta Z_S$

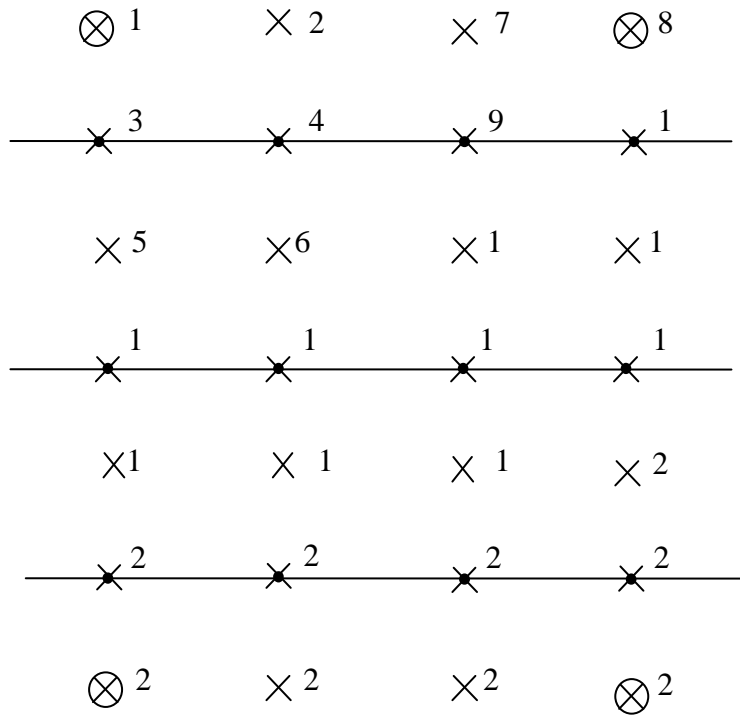


Рис. 5

Вариант 9: $\delta\alpha, \delta\omega, \delta\kappa, \delta X_S, \delta Y_S, \delta Z_S, \delta X, \delta Y, \delta Z$

Вариант 10: $\delta X, \delta Y, \delta Z, \delta\alpha, \delta\omega, \delta\kappa, \delta X_S, \delta Y_S, \delta Z_S$

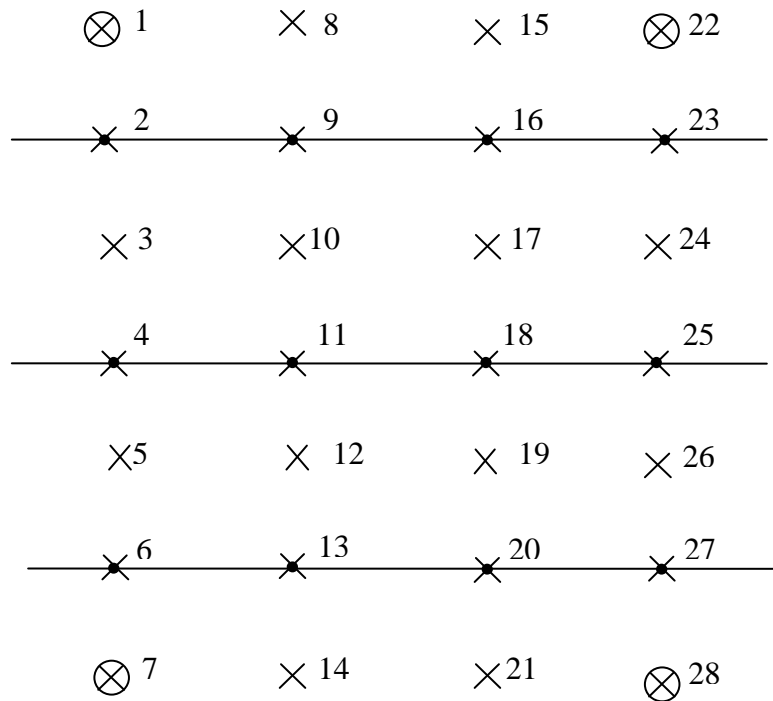


Рис. 6

Вариант 11: $\delta\alpha, \delta\omega, \delta\kappa, \delta X_S, \delta Y_S, \delta Z_S, \delta X, \delta Y, \delta Z$

Вариант 12: $\delta X, \delta Y, \delta Z, \delta\alpha, \delta\omega, \delta\kappa, \delta X_S, \delta Y_S, \delta Z_S$

ВОРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

Цифровые фотограмметрические станции (ЦФС)

1. Какие ЦФС Вы знаете?
2. Компоненты ЦФС.
3. Какие процедуры должна выполнять ЦФС?
4. Охарактеризовать процедуры, выполняемые на ЦФС.
5. Каков контроль выполняемых работ?

Фотограмметрические сканеры

1. Назовите основные части сканера.
2. Что собой представляет линейка ПЗС?
3. Требования к фотограмметрическим сканерам.
4. Разрешающая способность 1200dpi – как понять?
5. Как называют изображение, полученное в результате сканирования?
6. Как проверить сканер?
7. Что собой представляет контрольная сетка?
8. Геометрическое разрешение при сканировании – что это?
9. Радиометрическое разрешение.
10. Как обеспечивается на сканере сканирование с разным геометрическим разрешением?

Получение стереоэффекта и измерение моделей по цифровым изображениям

1. Что такое маркер?
2. Система координат цифрового изображения.
3. Система координат снимка.
4. Способы измерения растровых изображений.
5. Когда применяют монокулярный способ измерений?
6. Внутреннее ориентирование – для чего делают и как?
7. Способы получения стереоэффекта.
8. Что собой представляют способы: анаглифический, поляроидов, затворный, оптический?
9. Как осуществляется автоматическое измерение точек?
10. Возможно ли достижение 100% точности автоматической идентификации точек? Почему?

11. Коэффициент корреляции.
12. Методы создания цифровой модели рельефа.
13. Для какой цели используют цифровую модель ?

Построение сетей пространственной фототриангуляции

1. Способы построения сетей фототриангуляции на ЦФС.
2. В какой программе можно построить сеть фототриангуляции зависимыми моделями?
3. В какой программе строят сети фототриангуляции строгим способом?
4. Внутреннее ориентирование снимков – как делают и зачем?
5. Какие точки включают в сеть?
6. Какие ошибки фотоизображений учитывают?
7. Основные этапы построения сетей фототриангуляции зависимыми моделями.
8. В какой системе координат выполняют взаимное ориентирование?
9. Можно ли выполнить взаимное ориентирование всех снимков в системе координат левого снимка? в базисной системе координат?
10. Как на ЦФС проверяют, выполнено ли взаимное ориентирование?
11. Как объединяют построенные модели в сеть?
12. Как выполняют устранение деформаций построенной сети?
13. Какие исходные уравнения в строгом способе построения сетей фототриангуляции?
14. Как получают коэффициенты уравнений поправок?
15. От чего зависит структура матрицы уравнений поправок?
16. Как включают дополнительные данные (опознаки, данные бортовых приборов) при построении сети фототриангуляции строгим способом?
17. Как осуществляется учет систематических ошибок при построении сетей фототриангуляции строгим способом?
18. Для какой цели вычисляют корреляционную матрицу?

Создание цифровой модели рельефа (ЦМР)

1. Для каких целей создают ЦМР?
2. Какие бывают ЦМР?
3. Что такое TIN, DEM?
4. Что такое триангуляция Делоне? Для какой цели служит?

5. Основные варианты построения ЦМР в программном комплексе Photomod: когда какой вариант используют?
6. Какая ЦМР применяется при построении горизонталей?
7. Почему выполняют сглаживание горизонталей?

Ортотоансформирование и создание ортофотоплана

1. Для какой цели выполняют ортотрансформирование?
2. Зачем при ортотрансформировании нужна ЦМР?
3. Какая ЦМР используется при ортотрансформировании?
4. Как создают ортофотопланы?
5. Как выбирают линии порезов?
6. Как оценивается точность цифровых ортофотопланов?

Векторизация

1. Что такое векторизация?
2. Метрические данные – что это?
3. Семантические данные – что это?
4. Единый классификатор – что это?
5. Точечный объект, линейный, полигональный?
6. Очередность распознавания и выделения контуров.
7. Слои – что это?
8. Как распознают различные объекты местности (населенные пункты, леса, пашни и т.д.)?
9. Векторизация в модуле StereoDraw.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антипов, И. Т. Математические основы пространственной аналитической фототриангуляции / И. Т. Антипов. – М. : Картгеоцентр-Геодиздат, 2003. – 296 с.
2. Теория погрешностей измерений : метод. указания и задачи для выполнения лаб. работ по курсу «Теория мат. обраб. геодез. измерений» для студентов специальности Т.21.01 / сост. А. М. Дегтярев, Л. А. Черкас. – Новополюцк: ПГУ, 2001. – 48 с.
3. Векторизация растровых изображений : труды шестой всероссийской науч.-практ. конф. (с участием стран СНГ) / Институт автоматики и электрометрии СО РАН ; А. Н. Колесников. – Новосибирск : ИСОРАН, 2010.
4. Курков, В. М. Самокалибровка при уравнивании связок / В. М. Курков. – Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1981. – № 6. – с. 104-110.
5. Любивая, Л. С. Об определении систематических искажений изображений при самокалибровке снимков / Л. С. Любивая. – Геодезия и картография. – 1984. – №1. – с. 34-38.
6. «Photomod 3.0». Руководство пользователя (электронное издание) / Ракурс. – Москва, 1999.
7. «Photomod 5.24». Руководство пользователя (электронное издание) / Ракурс. – Москва, 2013.
8. Программный комплекс «ORIMA». Руководство пользователя (электронное издание).
9. Скворцов, А. В. Триангуляция Делоне и ее применение / А. В. Скворцов. – Томск, 2002. – с. 128.
10. Хромых, В. В. Цифровые модели рельефа : учеб. пособие / В.В. Хромых, О.В. Хромых. – Томск : Изд-во «ТМЛ-Пресс», 2007. – 178 с.

Учебное издание

МИХЕЕВА Алла Александровна
ЯЛТЫХОВ Вадим Викторович

ФОТОГРАММЕТРИЯ
ЦИФРОВАЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ

Учебно-методический комплекс
для студентов специальности 1-31 02 01 «География»

Редактор *А. Э. Цибульская*
Дизайн обложки *Е. Н. Бурцевой*

Подписано в печать 24.02.2016. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 8,12. Уч.-изд. л. 7,76. Тираж 30 экз. Заказ 579.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

Ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк.