

А. Н. ЛОБАНОВ

АЭРОФОТОТОПОГРАФИЯ



А. Н. ЛОБАНОВ

528.7

АЭРОФОТОТОПОГРАФИЯ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ, ДОПОЛНЕННОЕ

2339



МОСКВА «НЕДРА» 1978



Лобанов А. Н. Аэрофототопография. Изд. 2 доп. М., «Недра», 1978. 575 с.

В книге изложены основы аэрофототопографии: анализ одиночного снимка и стереопары; способы измерения снимков; фототрансформаторы, монокомпараторы, стереокомпараторы и универсальные стереоприборы; фототрансформирование снимков и составление фотопланов; взаимное ориентирование снимков и внешнее ориентирование модели, аналитическая и аналоговая пространственная фототриангуляция; составление и обновление топографических карт комбинированным и стереотопографическим методами.

Большое внимание уделено аналитической пространственной фототриангуляции с применением стереокомпаратора и ЭЦВМ, а также составлению карт и ортофотокарт на универсальных стереоприборах. Кратко рассмотрен дифференцированный способ составления карты.

Отражены новые достижения в области фотограмметрии в СССР и за рубежом и перспективы ее развития.

Предназначена для инженерно-технических работников аэрогеодезического производства и для студентов геодезических вузов.

Табл. 21, ил. 283, список лит. — 23 назв.

Современную аэрофототопографию характеризуют аналитические методы обработки снимков, основанные на применении автоматизированных прецизионных измерительных приборов и электронных цифровых вычислительных машин, а также универсальные стереофотограмметрические приборы, позволяющие составлять карту и фотокарту или цифровую модель местности.

В последние годы непрерывно растет объем работ по крупномасштабным съемкам различных районов страны. Большие успехи достигнуты в разработке методов съемки планет и их спутников по снимкам, полученным с космических кораблей. В связи с этим во второе издание данной книги внесены дополнения, отражающие новые достижения в области фототопографии.

Автор выражает благодарность Ф. В. Дробышеву, М. Д. Коншину и преподавателям кафедры фотограмметрии МИИГАиК за замечания и пожелания.

Предмет «Аэрофототопография» изучает методы создания карты местности по снимкам, полученным с самолета и других летательных аппаратов.

Комплекс процессов, позволяющих составить карту местности по аэроснимкам, называется *аэрофототопографической съемкой*. В этот комплекс входят аэрофотосъемка, геодезические и фотограмметрические работы.

Аэрофототопографическая съемка широко применяется в народном хозяйстве и в целях обороны страны. Она является основным видом топографической съемки, так как в отличие от мензульной и наземной фототопографической съемок наиболее полно отвечает современным высоким требованиям, предъявляемым к картографированию больших территорий. Аэрофототопографическая съемка позволяет создать подробную и точную карту в короткий срок при минимальных затратах сил и средств.

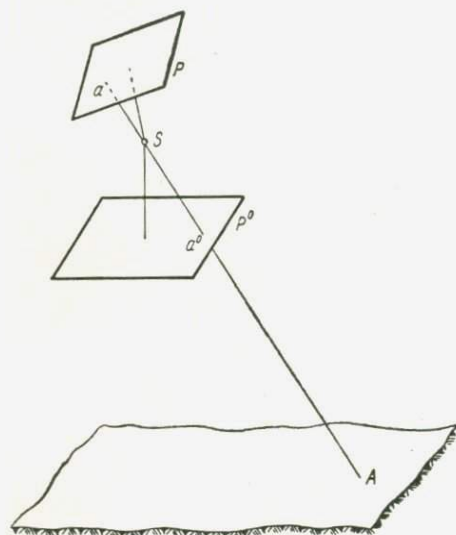


Рис. 1

По аэроснимкам топографические карты составляются комбинированным и стереотопографическим методами.

Комбинированный метод представляет собой сочетание фотограмметрического способа обработки одиночных снимков с мензульной съемкой: контуры на карте или фотоплане получают по снимкам, а рельеф — в поле в результате мензульной съемки.

В результате аэрофотосъемки обычно получают наклонные снимки (рис. 1). По сравнению с планом наклонный снимок P имеет искажения, вызванные углом наклона его и рельефом местности. Для составления фотоплана каждый наклонный снимок трансформируют, т. е. приводят к горизонтальному снимку P^0 заданного масштаба.

Трансформированный снимок равнинной местности M с геометрической точки зрения практически не отличается от плана, так как искажения за рельеф в этом случае малы, не превышают

ошибок графических построений. Поэтому фотоплан получают путем монтажа трансформированных снимков.

Трансформирование снимков и монтаж фотоплана выполняют обычно по опорным точкам, нанесенным на планшет. *Опорная точка* — это опознанная на снимке контурная точка местности с известными координатами. Опорные точки определяются в результате геодезических или фотограмметрических работ.

Рельеф местности изображают на фотоплане в поле с помощью мензулы и кипрегеля. На фотоплане отражают еще характеристики изобразившихся на нем объектов: названия населенных пунктов, класс дороги, ее ширину и состояние, название и глубину реки и т. д.

Определение значения и характеристик изобразившихся на снимках объектов называется *дешифрированием*.

Фотопланы с зарисованным рельефом и отдешифрированными контурами используются для составления топографической карты. Часто они используются как самостоятельный документ, содержащий более подробную информацию о местности по сравнению с картой.

Комбинированный метод применяется для съемки равнинных районов.

Стереотопографический метод позволяет изображать по снимкам в камеральных условиях не только контуры, но и рельеф. Он основан на использовании модели местности, построенной по снимкам.

Пусть по снимкам P_1 и P_2 (рис. 2) восстановлены лучи, существовавшие во время аэрофотосъемки. Совокупность лучей, полученных по снимку, называется связкой. Лучи связок, проходящие через изображения на снимках одной и той же точки местности, называются *соответственными*. Установим связки в такое положение относительно друг друга, в каком они были бы в момент фотографирования. Тогда каждая пара соответственных лучей, например a_1S_1 и a_2S_2 , будет пересекаться. Совокупность точек пересечения соответственных лучей образует модель, подобную местности. Точка a — одна из многих точек этой модели.

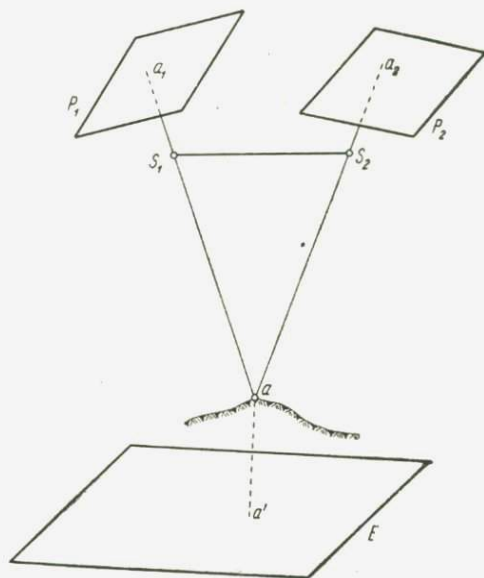


Рис. 2

Модель приводят к заданному масштабу и устанавливают относительно планшета E по опорным точкам. Затем ортогонально проектируют на планшет контуры, горизонтали и другие элементы, подлежащие отображению на карте. При этом используют результаты дешифрирования снимков, выполненного в поле или в камеральных условиях.

Установка связок (снимков) относительно друг друга в положение, существовавшее в момент фотографирования, называется *взаимным ориентированием связок (снимков)*, а установка модели

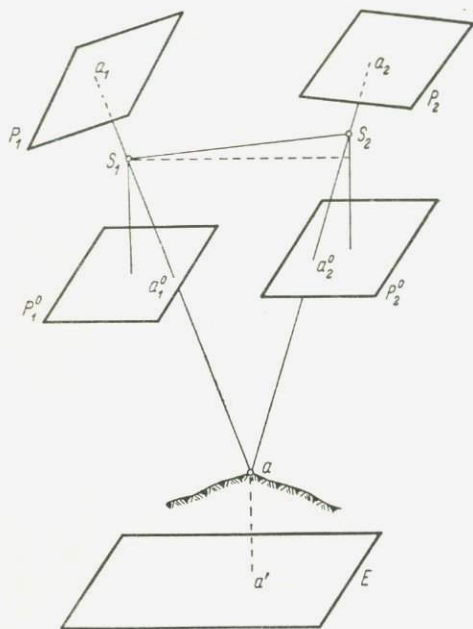


Рис. 3

относительно планшета по опорным точкам — *внешним ориентированием модели*.

Такова схема оптического решения задачи преобразования пары снимков в план, отличающегося наибольшей наглядностью. Эту задачу можно решить и аналитически, путем вычислений, а также графически или с помощью специальных механизмов.

В настоящее время модель часто строят и по преобразованным связкам. Вследствие изменения связок по сравнению с существовавшими во время аэрофотосъемки модель получается не подобной местности, а *преобразованной*. На практике используют такие способы пре-

образования связок, которые изменяют ее вертикальный масштаб по сравнению с горизонтальным.

Построение модели местности значительно облегчается, если снимки трансформированы, т. е. приведены к горизонтальным (рис. 3). Преимущество таких снимков выявляется особенно ярко при обработке их с преобразованными связками: изменение фокусного расстояния проектирующих камер вызывает изменение только вертикального масштаба модели.

Трансформирование пары снимков можно выполнить до построения модели, например, аналитически или на специальном приборе — фототрансформаторе. В настоящее время широко применяются оригинальные способы трансформирования стереопар в процессе построения модели, разработанные советскими учеными.

В зависимости от приборов, применяемых для обработки снимков, в стереотопографическом методе различают два способа составления карт — универсальный и дифференцированный.

В универсальном способе используются приборы, каждый из которых позволяет выполнять все процессы преобразования снимков в план: строить связки лучей, получать модель путем взаимного ориентирования снимков, ориентировать модель внешне, рисовать контуры и рельеф. Такие приборы называются универсальными стереоприборами. К ним относятся стереограф Ф. В. Дробышева, стереопроектор Г. В. Романовского, стереопланиграф Цейсса и др.

В дифференцированном способе применяются стереокомпаратор, стереометр Ф. В. Дробышева и оптический проектор или фототрансформатор. Каждый из этих приборов служит для выполнения только одного процесса обработки снимков. Стереокомпаратор используют для сгущения по снимкам сети опорных точек, стереометр — для нанесения на снимки горизонталей, а проектор или фототрансформатор — для переноса горизонталей и контуров со снимков на планшет.

При этом горизонтали на снимках получают в результате обработки стереопар, а перенос горизонталей и контуров на планшет выполняется путем обработки одиночных снимков. Если снимки не обеспечены достаточным количеством опорных точек для внешнего ориентирования моделей, то опорную сеть сгущают путем пространственной фототриангуляции.

Пространственная фототриангуляция заключается в последовательном построении одиночных моделей и соединении их в общую модель (рис. 4). С этой целью после построения по снимкам P_1 и P_2 первой модели ориентируют снимок P_3 относительно снимка P_2 , в результате чего создают вторую модель. Затем вторую модель приводят к масштабу первой, ориентируют снимок P_4 относительно P_3 и т. д. Полученную таким образом модель ориентируют внешне. В этом случае достаточно нескольких опорных точек на целый маршрут снимков, состоящий из ряда стереопар. После внешнего ориентирования общей модели определяют положение опорных точек, необходимых для обработки одиночных моделей.

Кроме маршрутных сетей строят многомаршрутные (блочные) фотограмметрические сети.

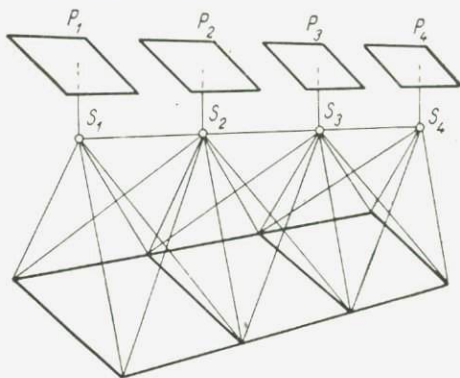


Рис. 4

Пространственная фототриангуляция выполняется аналитически при помощи стереокомпаратора (или монокомпаратора) и электронной вычислительной машины или на универсальных стереоприборах. Широкое применение получил аналитический способ фототриангулирования как наиболее точный, производительный и перспективный.

В аналитической фототриангуляции общую модель местности можно получить не только путем последовательного построения и ориентирования одиночных моделей, но и в результате одновременной установки всех связей лучей, принадлежащих данному маршруту или блоку, состоящему из нескольких маршрутов.

Пространственная фототриангуляция позволяет значительно сократить объем полевых работ. Максимальное сокращение полевых работ обеспечивается при использовании блочной фототриангуляции, которая не требует определения опорных точек для каждого маршрута.

Часто в процессе аэрофотосъемки фиксируют отдельные элементы внешнего ориентирования снимков: высоту полета, координаты точки фотографирования и др. Эти данные тоже позволяют существенно сократить полевую подготовку снимков.

Таким образом, основными процессами создания карты стереотопографическим методом являются:

- 1) аэрофотосъемка;
- 2) полевые работы — определение координат опорных точек и дешифрирование снимков;
- 3) камеральные работы — пространственная фототриангуляция и составление карты универсальным или дифференцированным способом.

В процессе аэрофотосъемки получают снимки местности, позволяющие опознавать на них и достаточно точно измерять по возможности все объекты, которые должны быть отображены на карте.

Если масштаб составляемой карты 1 : 25 000 и мельче, то местность фотографируют двумя фотоаппаратами с различными фокусными расстояниями. Таким образом получают мелкомасштабные и крупномасштабные аэроснимки. Первые используются для измерительных целей, а вторые — для дешифрирования.

Во время аэрофотосъемки обычно определяют высоты фотографирования и их разности с помощью высотомера и статоскопа, а в отдельных случаях находят и координаты точек фотографирования с помощью радиогодезических систем.

Если масштаб составляемой карты 1 : 10 000 и крупнее, то местность фотографируют одним фотоаппаратом.

Для применения стереотопографического метода необходимо, чтобы каждая точка картографируемого района изобразилась по крайней мере на двух снимках. Это условие выполняется, если расчетное продольное перекрытие снимков не меньше 60—65%, а поперечное 30—40%, в зависимости от рельефа местности.

Опорные точки, определяемые в поле¹, служат для внешнего ориентирования фототриангуляционной сети. В качестве геодезической основы для определения координат этих точек используются пункты государственной триангуляции, полигонометрии и нивелирования. Опорные точки должны быть контурными, легко и точно опознаваемыми на снимках. Если на местности нет четких контуров, то опорные точки выбирают и маркируют до аэрофотосъемки так, чтобы маркировочные знаки отчетливо изобразились на снимках.

Полевое дешифрирование снимков может быть сплошным (полным) или выборочным (частичным). В случае частичного дешифрирования, которое применяется обычно при создании карт мелких масштабов, в поле составляют снимки-эталоны, на которых показывают результаты дешифрирования наиболее характерных для данного района объектов. Снимки-эталоны используют для дешифрирования остальных снимков в камеральных условиях.

Эффективным способом составления топографических карт является универсальный, обеспечивающий высокую точность и большую производительность работ. Отдельные универсальные стереоприборы имеют электронные устройства, позволяющие автоматически получать по стереопарам фотографическое изображение местности в ортогональной проекции — ортофотоснимки.

Дифференцированный способ составления карты широко применялся в основном при картографировании территории СССР в масштабе 1 : 100 000. В настоящее время он используется при выполнении фотограмметрических работ в походных условиях, а также в случае недостатка универсальных стереоприборов.

Аэрофототопография тесно связана с авиацией, физикой, химией, электронной техникой, математикой, геодезией и картографией.

Самолеты как носители фотоаппаратов обеспечивают возможность фотографирования местности в короткие сроки. Более широкие возможности для фотограмметрического исследования поверхности Земли, Луны и других небесных тел открыли космические съемки.

Достижения физики и особенно оптики способствуют совершенствованию фотограмметрических приборов. Например, создание сверхширокоугольных объективов позволило применить для картографирования равнинной и холмистой местности стереотопографический метод вместо комбинированного, что значительно сократило полевые работы.

Химическая промышленность создает для фототопографии высококачественные черно-белые и цветные фотоматериалы и химикалии.

Электронные приборы и системы используются при самолетовождении и определении элементов внешнего ориентирования

¹ Точки полевой подготовки.

снимков в полете, а также для автоматизации процессов фотограмметрической обработки снимков.

Математика применяется в теории аэрофототопографии и при решении многих практических задач. Например, в основе аналитической фототриангуляции лежат строгие математические методы обработки результатов измерения снимков с помощью электронных вычислительных машин.

Геодезия обеспечивает аэрофототопографию сетью опорных точек, необходимых для определения элементов внешнего ориентирования снимков и для ориентирования фототриангуляционной сети.

Методы картографии используются при составлении и оформлении карт по снимкам.

Наиболее тесную связь аэрофототопография имеет с фотограмметрией, которая служит теоретической базой фототопографии.

Фотограмметрия изучает геометрические свойства снимков и методы определения по ним формы, размеров и положения объектов.

Фотограмметрия применяется не только в фототопографии, но и в других областях науки и техники: астрономии, архитектуре, баллистике, медицине и т. д. Например, в баллистике по снимкам летящего снаряда определяют траекторию и скорость движения.

Рассмотрим кратко развитие аэрофототопографии в России и в Советском Союзе.

Первые аэроснимки в России были сделаны с воздушного шара над Петербургом 18 мая 1886 г. командиром военно-воздухоплавательной части А. М. Кованько. Для фотографирования был применен отечественный аэрофотоаппарат В. Н. Срезневского. Этим было положено начало развитию отечественной аэрофото съемки.

Дальнейшие исследования в этой области направляются на разработку теории фотограмметрии, совершенствование аэрофотоаппаратуры и создание фототрансформаторов.

Большую роль сыграл изданный в 1908—1909 гг. капитальный трехтомный труд Р. Ю. Тилле «Фототопография в современном развитии», в котором обобщены результаты работ, выполненных в России и за рубежом, и намечены перспективы их развития.

В 1904—1905 гг. во время русско-японской войны В. Ф. Найденов фотографировал с воздушного шара районы расположения противника под Мукденом. В 1907 г. он опубликовал первый учебник «Измерительная фотография и применение ее в воздухоплавании».

Для фотографирования возможно большей территории с одной точки стояния воздушного шара Р. Ю. Тилле создал многообъективный аэрофотоаппарат. В. Ф. Найденов разработал фототрансформатор с целью преобразования наклонных снимков в горизонтальные.

В годы первой мировой войны аэрофотосъемка применялась главным образом для воздушной разведки противника. В этот период в России разработан новый аэрофотоаппарат В. Ф. Потте, который был более совершенным по сравнению с иностранными аэрофотоаппаратами.

Первое фотографирование с самолета выполнено 1 ноября 1914 г. при осаде Перемышля. Аэроснимки были использованы для составления схемы к плану Перемышля.

При военно-инженерном ведомстве были созданы фотограмметрические части. Однако аэрофототопография в царской России не нашла распространения.

Широкие перспективы развития аэрофототопографии открыла Великая Октябрьская социалистическая революция, которая по-новому поставила задачу изучения производительных сил страны с целью использования их для строительства социализма.

Исключительно большое значение для аэрофототопографии имел и имеет известный Декрет В. И. Ленина, изданный 23 марта 1919 г., об организации Государственной геодезической службы, перед которой была поставлена задача картографирования территории СССР с целью всемерной помощи развитию производительных сил страны.

При решении этой задачи аэрофотосъемка признана эффективным методом изучения территории для выявления природных ресурсов. Однако для широкого использования этого метода необходимо было организовать научные исследования, разработать технологию, подготовить кадры и создать базу для производства фотограмметрических аппаратов и приборов.

В развитии аэрофототопографии в Советском Союзе можно отметить три периода.

Первый период (1918—1929 гг.) характеризуется организацией фотограмметрических предприятий и подготовкой кадров, а также разработкой комбинированного метода и выполнением первых опытных и производственных работ по картографированию этим методом.

В 1919 г. в системе ВТС организуются фотограмметрические отделения, на базе которых формируется первый аэрофототопографический отряд.

В том же году открывается Высшая аэрофотограмметрическая школа Красного военно-воздушного флота (В. Ф. Найденов, П. П. Соколов, К. В. Чибисов, Н. С. Герасимов и др.).

В 1920 г. проф. Н. М. Александровский начал чтение курса фотограмметрии в Московском межвом институте, а в 1926 г. в этом же институте, названном Московским геодезическим, открывается аэрофотогеодезическое отделение, преобразованное затем в факультет.

Этим было положено начало планомерной подготовке кадров в области фотограмметрии. Несколько позже к подготовке специалистов в этой области приступили и другие вузы (Московский

институт землеустройства, Новосибирский институт геодезии, аэрофотосъемки и картографии, Львовский политехнический институт и др.), а также все топографические техникумы.

В 1925 г. при обществе «Добролет», а позже при обществе «Укрвоздухпуть» создаются производственные аэрофотосъемочные подразделения (Н. М. Алексапольский, П. П. Соколов, В. С. Цвет-Колядинский, Д. А. Сольский).

В этот же период в ВТС под руководством Н. М. Алексапольского разрабатывается комбинированный метод, который позволил повысить качество и производительность работ по сравнению с мензульной съемкой, применявшейся в то время как основной при топографической съемке.

Второй период (1930—1945 гг.) характеризуется использованием комбинированного метода, а также созданием и широким применением дифференцированного способа, обеспечившего значительное сокращение полевых работ по сравнению с мензульной съемкой и комбинированным методом. Аэрофототопографические методы становятся основными при картографировании страны в масштабе 1 : 400 000 и отдельных районов ее в масштабах 1 : 50 000 и 1 : 25 000.

В 1930 г. организуется лаборатория под руководством проф. Ф. В. Дробышева для разработки новых фотограмметрических приборов, а в 1931 г. — Научно-исследовательский институт аэрофотосъемки, в дальнейшем слившийся с Научно-исследовательским институтом геодезии и картографии. В последующие годы исследования в области аэрофототопографии выполняются в Центральном научно-исследовательском институте геодезии, аэрофотосъемки и картографии (ЦНИИГАиК), в системе ВТС, на кафедрах высших учебных заведений (Московский и Новосибирский институты инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии, Московский институт инженеров землеустройства, ВИА им. В. В. Куйбышева, Львовский политехнический институт, Киевский инженерно-строительный институт и др.), в Лаборатории аэрометодов АН СССР и во многих ведомственных организациях.

В начале 30-х годов коллектив ВТС (Г. Ф. Гапченко, Ф. Я. Герасимов и др.) разрабатывает способ ВТО, который отличается от комбинированного метода тем, что горизонтالي проводятся на снимках с помощью стереоскопа по пикетным точкам, набранным в поле или полученным упрощенными приемами фотограмметрического сгущения высот в пределах каждой стереопары. Со снимков контуры и горизонтали переносятся на планшет с помощью пантографа или путем трансформирования.

Однако объем полевых работ в способе ВТО оставался значительным. Поэтому исследования направляются на изыскание более эффективного метода создания топографических карт.

В результате этих исследований предлагаются дифференцированный способ составления карт по аэроснимкам (М. Д. Кон-

шин и Г. В. Романовский) и различные способы фотограмметрического сгущения геодезического обоснования: ромбическая фототриангуляция (Н. М. Алексапольский, Ф. В. Дробышев, Г. П. Жуков, В. Ф. Дейнеко), пространственная фототриангуляция (А. С. Скиридов), дифференцированный способ пространственной фототриангуляции (Г. П. Жуков), способ прямой линии (Г. В. Романовский), способ неискаженной модели (М. Д. Коншин и Г. В. Романовский).

Для практического применения этих способов создаются широкоугольные и сверхширокоугольные аэросъемочные объективы (М. М. Русинов), топографические аэрофотоаппараты (С. П. Шокин, Г. Г. Гордон), стереометры (Ф. В. Дробышев), мультиплекс (Н. В. Викторов, М. М. Русинов, М. Д. Коншин и др.).

Эти способы позволили выполнить картографирование больших территорий в ограниченные сроки.

В годы Великой Отечественной войны по аэроснимкам выявлялись укрепления противника, его боевые порядки и вооружение, составлялись и обновлялись топографические карты и планы городов и создавались различные фотодокументы — фото-схемы, фотокарты, фотопланы, трансформированные снимки с координатной сеткой и др.

Третий период развития аэрофототопографии связан с послевоенным восстановлением и развитием народного хозяйства. Для решения этой задачи необходимо было произвести картографирование многих районов страны в крупных масштабах и в весьма ограниченное время.

Этот период характеризуется дальнейшим развитием теории фотограмметрии, использованием последних достижений физики, электроники и механики для повышения точности и темпов фототопографических работ.

Успешному решению проблем, возникших перед фотограмметрией в послевоенное время, в значительной мере способствовали теоретические исследования члена-корреспондента Академии наук СССР Н. Г. Келля и проф. Н. А. Урмаева.

Разрабатывается теория стереофотограмметрической обработки снимков с преобразованными связками проектирующих лучей (М. Д. Коншин, Г. В. Романовский, Ф. В. Дробышев, А. Н. Лобанов, Г. П. Жуков, В. Я. Финковский и др.). На базе этой теории создаются новые универсальные приборы, из которых широкое применение получают стереограф Ф. В. Дробышева и стереопроектор Г. В. Романовского.

Г. А. Ошурков предлагает строгий способ исследования универсальных стереоприборов, основанный на использовании снимков-макетов.

В практику аэрофотосъемки внедряются способы фиксации элементов внешнего ориентирования снимков с помощью статоскопа (Ю. С. Доброхотов и К. П. Бычковский), радиовысотомера (М. Д. Коншин, Г. В. Романовский, Н. П. Кожевников,

И. Л. Гилль), гиостабилизированной установки (Н. Ф. Орелкин, С. П. Шокин, М. Д. Коншин) и радиогодезических станций (А. И. Грузинов, М. Д. Коншин, Н. Д. Назаров, И. А. Богданов). Разрабатываются аэрофотоаппарат АФА-41, радиогодезическая система «РЫМ» и комплект топографической аэрофотоустановки.

Для построения фотограмметрических сетей широко применяются универсальные стереоприборы (Г. В. Романовский, Ф. В. Дробышев, Н. А. Соколова, В. И. Кораблев, М. Н. Ютанов, П. В. Будылов и др.). В практику работ на этих приборах внедряется способ пространственной фототриангуляции с преобразованными связками проектирующих лучей (М. Д. Коншин, А. Н. Лобанов, Г. П. Жуков, Г. А. Ошурков).

Разрабатывается и применяется в производстве аналитический способ пространственной фототриангуляции, основанный на использовании стереокомпаратора и электронной вычислительной машины и позволивший значительно повысить точность фотограмметрического сгущения и производительность работ (А. Н. Лобанов, М. Д. Коншин, Г. В. Романовский, И. Д. Каргополов, Ф. Ф. Лысенко, В. А. Полякова, М. М. Машимов и др.). В связи с этим изготавливаются высокоточные автоматизированные стереокомпараторы (ЦНИИГАиК и др.). Расширяется область применения стереотопографического метода с целью создания карт масштаба 1 : 5000 и крупнее (Н. А. Соколова).

Одновременно с этим дальнейшее совершенствование получает аэрофотосъемочная оптика (М. М. Русинов, Д. С. Волосов); создаются прецизионные аэрофотоаппараты, разрабатываются объективные методы оценки качества изображения (О. А. Герасимова); применяются цветные фотоматериалы, расширившие возможности дешифрирования аэроснимков (Л. М. Гольдман, Н. П. Лаврова и др.); продолжаются работы по автоматизации стереофотограмметрических измерений, начатые проф. А. С. Скиридовым еще в 1924 г.; создаются электронный фототрансформатор (М. П. Бордюков) и дифференциальные фототрансформаторы (Е. И. Калантаров, Г. П. Жуков, Ф. В. Дробышев, Г. В. Романовский).

Автоматизация стереофотограмметрических измерений, основанная на измерении и сравнении фотографических плотностей соответственных зон стереопары, позволяет значительно облегчить труд операторов и повысить производительность стереотопографического метода.

Новые перспективы открылись перед фотограмметрией в связи с созданием космических летательных аппаратов. Космические снимки — один из основных видов информации, получаемой с этих аппаратов, которые успешно применяются для изучения природных ресурсов Земли, а также для исследований Луны, Марса, Венеры и других небесных тел (работы АН СССР, МИИГАиК, ЦНИИГАиК, Госцентра «Природа», Министерства геологии СССР и др.).

Глава 1

ТЕОРИЯ ОДИНОЧНОГО СНИМКА

§ 1. СНИМОК — ЦЕНТРАЛЬНАЯ ПРОЕКЦИЯ

Топографический план представляет собой ортогональную проекцию местности на горизонтальную плоскость и характеризуется двумя основными свойствами: 1) расстояния на плане пропорциональны соответствующим горизонтальным расстояниям на местности и 2) углы в любой точке плана равны соответствующим горизонтальным углам на местности.

Пусть A, B и C — точки местности (рис. 5). Проектируя ортогонально эти точки на горизонтальную плоскость E , получим план. Угол при точке A' на плане равен горизонтальному углу, образованному направлениями AB и AC на местности, а расстояния $A'B'$ и $A'C'$ являются горизонтальными проложениями расстояний AB и AC .

Предположим, что с точки S получен снимок P . Точки a, b и c на этом снимке — изображения точек A, B и C местности.

Очевидно, что снимок нельзя считать ортогональной проекцией, так как проектирующие лучи, с помощью которых он получается, не параллельны друг другу, а пересекаются в одной точке.

Проекция объекта, полученная в результате пересечения плоскости с проектирующими лучами, пересекающимися в одной точке, называется *центральной*, а точка пересечения этих лучей — *центром проекции*.

Задачей настоящей главы является исследование свойств снимка с целью использования их для определения координат точек местности, а также для составления топографических планов и карт.

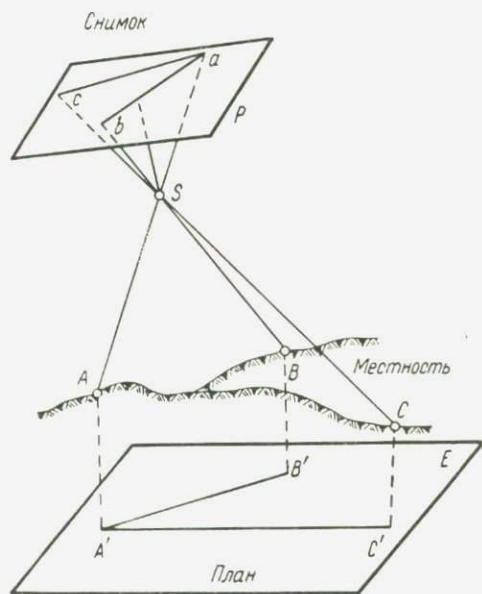


Рис. 5

§ 2. ЭЛЕМЕНТЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ПРОЕКЦИИ

При центральном проектировании различают позитивное (прямое) и негативное (обратное) изображения.

Позитивное изображение, или *позитив* P , получается, когда объект и плоскость проекции помещены по одну сторону от центра проекции (рис. 6). Если же объект и плоскость проекции находятся по разные стороны от центра проекции, то образуется негативное изображение, или *негатив* P' .

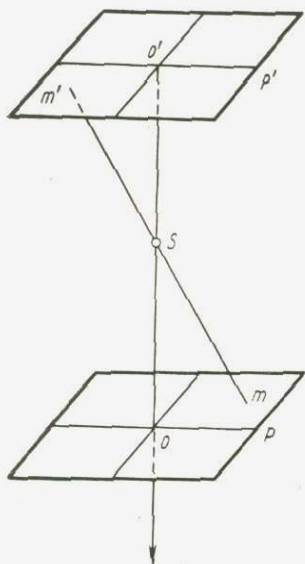


Рис. 6

Негатив и позитив располагаются симметрично относительно центра проекции. Переместим негатив параллельно самому себе по направлению луча So , перпендикулярного к плоскости P' , так, чтобы точка o' его совпала с точкой o позитива. Затем повернем негатив вокруг точки o' в своей плоскости на 180° . После этого все точки негатива совпадут с соответствующими точками позитива. Поэтому для анализа центрального изображения совершенно безразлично, что рассматривать — негатив или позитив. В дальнейшем чаще будем пользоваться позитивным изображением, называя его, как и негатив, снимком или картинной плоскостью.

На рис. 7: E — горизонтальная плоскость, проходящая через какую-либо точку местности и называемая *плоскостью основания*, P — плоскость снимка, S — центр проекции, или точка

фотографирования. На рисунке представлены и другие элементы центральной проекции:

So — *главный луч* — прямая, проходящая через центр проекции перпендикулярно к плоскости снимка. В фотокамерах с главным лучом совмещают главную оптическую ось объектива. Поэтому прямую So часто называют *оптической осью фотокамеры*.

o — *главная точка* — пересечение главного луча со снимком;

f — *фокусное расстояние фотокамеры* — расстояние от центра проекции до снимка вдоль главного луча;

$H = SS_o$ — *высота съёмки* — высота центра проекции относительно плоскости основания;

ε — *угол наклона снимка*;

TT — *линия основания* — пересечение плоскости основания с плоскостью снимка;

- Q — плоскость главного вертикала — вертикальная плоскость, проходящая через главный луч;
 S_0O — линия направления съемки — пересечение плоскости главного вертикала с плоскостью основания;
 vv — главная вертикаль — пересечение плоскости главного вертикала с плоскостью снимка;
 n — точка надира — пересечение отвесной линии, проходящей через центр проекции, с плоскостью снимка;
 qq — главная горизонталь — прямая на снимке, проходящая через главную точку перпендикулярно к главной вертикали;

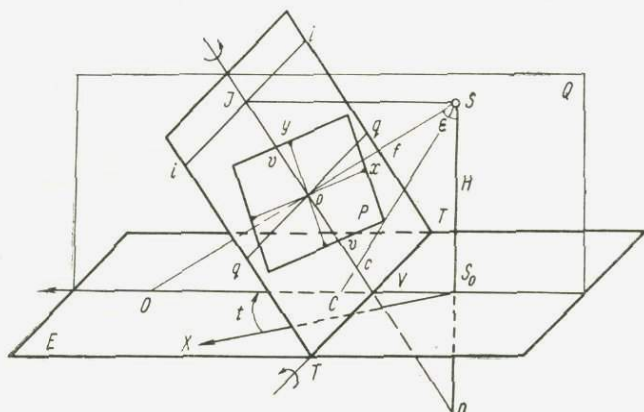


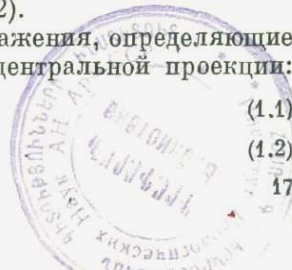
Рис. 7

- iSi — плоскость действительного горизонта — горизонтальная плоскость, проходящая через центр проекции;
 ii — линия действительного горизонта — пересечение плоскости действительного горизонта с плоскостью снимка;
 J — главная точка схода — пересечение горизонтальной прямой, проходящей через центр проекции в плоскости главного вертикала, с линией действительного горизонта;
 c — точка нулевых искажений — пересечение биссектрисы угла ϵ с плоскостью снимка. Такое название эта точка получила потому, что углы в ней равны соответствующим углам в плоскости основания и масштаб снимка в данной точке по всем направлениям имеет постоянное значение (см. § 12).

Из рис. 7 легко получим следующие выражения, определяющие расстояния между важнейшими точками центральной проекции:

$$on = f \operatorname{tg} \epsilon, \quad (1.1)$$

$$oJ = f \operatorname{ctg} \epsilon, \quad (1.2)$$



2339

$$SJ = \frac{f}{\sin \varepsilon}, \quad (1.3)$$

$$oc = f \operatorname{tg} \frac{1}{2} \varepsilon. \quad (1.4)$$

Совокупность лучей, с помощью которых получен снимок, называется связкой.

§ 3. КООРДИНАТЫ ТОЧЕК МЕСТНОСТИ И СНИМКА

Положение точки местности определяют в геодезической системе координат $O_r X_r Y_r Z_r$ или в фотограмметрической $OXYZ$ (рис. 8).

В качестве геодезической используют обычно систему прямоугольных координат Гаусса, в которой принято определять положение всех пунктов опорной геодезической сети. Начало

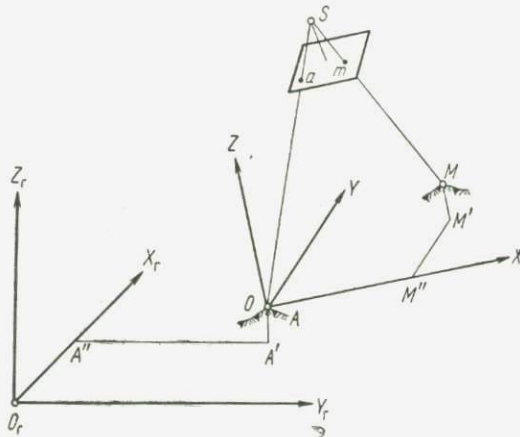


Рис. 8

этих координат находится в пересечении среднего меридиана соответствующей зоны с экватором. Ось X_r направлена на север, ось Y_r — на восток.

Таким образом, положение точки местности A в этой системе определяется координатами

$$X_r = O_r A'', \quad Y_r = A'' A', \\ Z_r = A' A.$$

При решении фотограмметрических задач на большие расстоя-

ния, а также в случае космических исследований, когда определяются координаты точек во внешнем пространстве Земли, применяют прямоугольную геоцентрическую систему координат $O'_r X'_r Y'_r Z'_r$ (рис. 9). При этом за начало координат принимают центр эллипсоида O'_r , ось Z'_r совмещают с полярной осью $O'_r P$, а ось X'_r устанавливают в плоскости начального меридиана.

Положение точки M , находящейся на поверхности Земли или за ее пределами, определяется координатами

$$X'_r = O'_r M'', \quad Y'_r = M'' M', \quad Z'_r = M' M.$$

Фотограмметрическая система координат $OXYZ$ (см. рис. 8), вообще говоря, может быть расположена произвольно. Например, начало ее можно совместить с какой-либо точкой местности A , как показано на рисунке. Оси координат направляются тоже про-

извольню, но так, чтобы система координат была прямоугольной и правой.

Положение точки местности M в этой системе определяется координатами

$$X = OM'', \quad Y = M''M', \quad Z = M'M.$$

Обычно фотограмметрическую систему координат устанавливают так, чтобы математическая зависимость между координатами соответственных точек местности и снимка имела наиболее простой вид. В этом случае облегчается изучение геометрических свойств снимка и решение различных задач фотограмметрии.

Для определения по снимкам координат точек местности необходимо знать положение изображений этих точек на снимках и элементы ориентирования снимков.

Положение точки на снимке определяют обычно в плоской прямоугольной системе координат $o'x'y'$ (рис. 10). Начало этих координат находится в точке o' , которая получается как пересечение прямых, соединяющих противоположные координатные метки 1, 2 и 3, 4. Эти метки представляют собой изображения координатных меток, установленных в плоскости прикладной рамки фотокамеры. Ось x совмещают с прямой 1—2 (рис. 10, а) или устанавливают параллельно прямой 3—2 (рис. 10, б).

Координатные метки в аэрофотоаппарате размещают так, чтобы начало координат o' совпало с главной точкой снимка o . Однако это условие не всегда выполняется с достаточной точностью.

Часто начало координат x и y совмещают с точкой снимка, координаты которой равны средним значениям координат меток 1—4. В общем случае эта точка не совпадает с пересечением

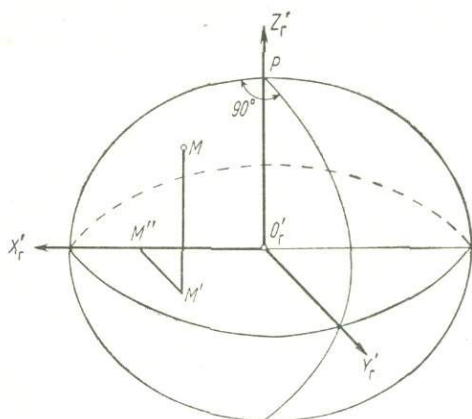


Рис. 9

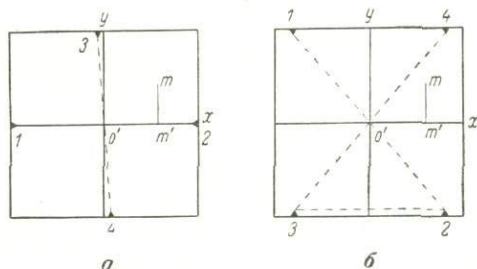


Рис. 10

прямых 1—2 и 3—4. Ось x устанавливают параллельно прямой 1—2 (см. рис. 10, а) или 3—2 (см. рис. 10, б).

Положение точки снимка m в системе $o'xy$ определяется координатами

$$x = o'm', \quad y = m'y.$$

§ 4. ЭЛЕМЕНТЫ ОРИЕНТИРОВАНИЯ СНИМКА

Элементами ориентирования снимка называются величины, определяющие положение его в момент фотографирования.

Элементы ориентирования снимка разделяются на элементы внутреннего и внешнего ориентирования.

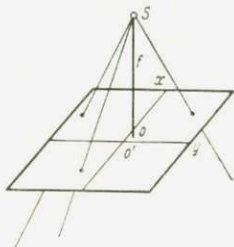


Рис. 11

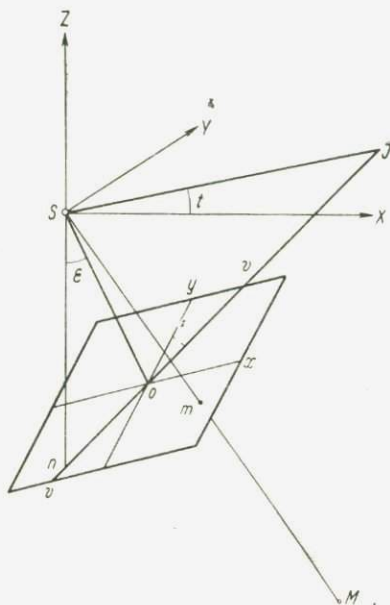


Рис. 12

Элементы внутреннего ориентирования определяют положение центра проекции относительно снимка. К ним относятся координаты главной точки снимка x_0, y_0 (в системе $o'xy$) и фокусное расстояние фотокамеры f (рис. 11).

Зная элементы внутреннего ориентирования снимка, можно найти центр проекции и восстановить по снимку связку лучей, существовавшую в момент фотографирования.

Элементы внешнего ориентирования снимка определяют положение связки в момент фотографирования. К ним относятся (рис. 12):

- X_0, Y_0, Z_0 — координаты точки фотографирования S ,
- t — дирекционный угол линии направления съемки,
- ϵ — угол наклона снимка,
- κ — угол поворота снимка — угол между осью y и главной вертикалью vv .

Таким образом, снимок имеет девять элементов ориентирования, из них три элемента внутреннего ориентирования и шесть внешнего. Из девяти элементов шесть линейных и три угловых.

Если восстановленную по снимку и элементам внутреннего ориентирования связку установить по элементам внешнего ориентирования, то снимок займет такое положение, в каком он был в момент фотографирования местности. При этом лучи связки пройдут через соответствующие точки местности. Например, луч S_m пройдет через точку M .

Часто вместо углов t , ε и κ в качестве элементов внешнего ориентирования используют углы α , ω и κ , представленные на рис. 13:

α — продольный угол наклона снимка, заключенный между осью Z и проекцией главного луча на плоскость XZ ;

ω — поперечный угол наклона снимка, составленный главным лучом с плоскостью XZ ;

κ — угол поворота снимка, находящийся в плоскости снимка и заключенный между осью y и следом плоскости, проходящей через главный луч So и ось Y .

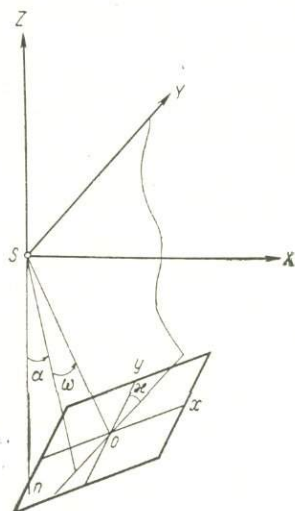


Рис. 13

Начало фотограмметрической системы координат, представленной на рис. 13, находится в центре проекции S , а ось X направлена вдоль маршрута. Поэтому плоскость XZ параллельна направлению маршрута и угол α , находящийся в этой плоскости, назван *продольным*.

Угол α называют еще *первичным углом наклона снимка*, а угол ω — *вторичным*. Соответственно и оси Y и X , вокруг которых осуществляются повороты α и ω , именуют *первичной* и *вторичной* осями вращения.

§ 5. ПОСТРОЕНИЕ НА СНИМКЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТОЧЕК И ПРЯМЫХ

Любая точка местности на снимке изображается точкой (рис. 14).

Прямой линии соответствует на снимке в общем случае тоже прямая. В частном случае, когда прямая проходит через центр проекции, например CD , изображение ее на снимке получается в виде точки.

Построим изображения прямых AA_1 и BB_1 , расположенных в плоскости основания параллельно направлению съемки (рис. 15). Для этого продолжим данные прямые до пересечения их

с плоскостью снимка. Пересечение получается на линии основания в точках A_0 и B_0 . Точки, лежащие на линии основания, одновременно являются и изображениями их в плоскости снимка. Поэтому изображения прямых AA_1 и BB_1 должны проходить через точки A_0 и B_0 . Теперь продолжим прямые AA_1 и BB_1 в обратную сторону и получим изображение бесконечно удаленных точек, находящихся на этих прямых. Проектирующий луч, идущий от бесконечно удаленной точки прямой AA_1 , параллелен этой прямой и пересекает плоскость снимка в главной точке схода J . Луч, идущий в центр проекции от бесконечно удаленной точки прямой BB_1 , очевидно, сливается с лучом JS и пересекает снимок в той же точке J .

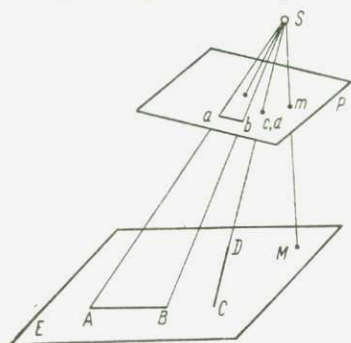


Рис. 14

Таким образом, в главной точке схода изображаются бесконечно удаленные точки любых прямых, параллельных линии направления съемки.

Конечные отрезки A_0J и B_0J являются изображениями прямых, начала которых находятся на линии основания, а концы бесконечно удалены. Проведем лучи из концов прямых AA_1 и BB_1

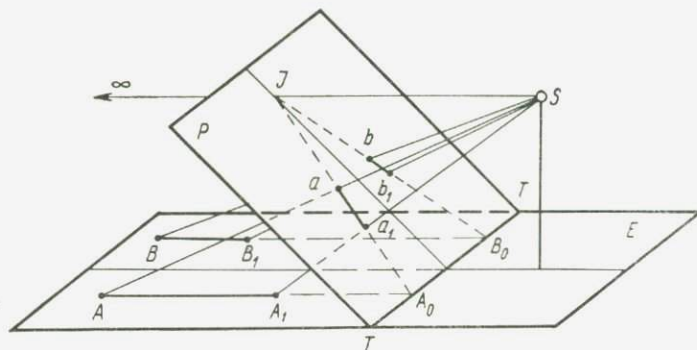


Рис. 15

в центр проекции. В пересечении этих лучей с прямыми A_0J и B_0J получим изображения a, a_1, b, b_1 точек A, A_1, B и B_1 . Следовательно, отрезки aa_1 и bb_1 представляют собой изображения прямых AA_1 и BB_1 .

Итак, параллельные прямые изображаются на снимке сходящимися прямыми. Точкой схода изображений прямых, параллельных линии направления съемки, служит главная точка схода. Если параллельные линии находятся в горизонтальной плоскости,

то точка схода их изображений лежит на линии действительного горизонта.

Из изложенного выше вытекают следующие правила построения изображений параллельных прямых:

1. Продолжить прямые до пересечения с плоскостью снимка.
2. Провести через центр проекции луч, параллельный данным прямым. Пересечение этого луча с плоскостью снимка определяет точку схода изображений данных прямых.
3. Точку схода соединить прямыми линиями с точками встречи данных прямых с плоскостью снимка.
4. Провести проектирующие лучи из концов данных прямых в центр проекции. Пересечения этих лучей с соответствующими

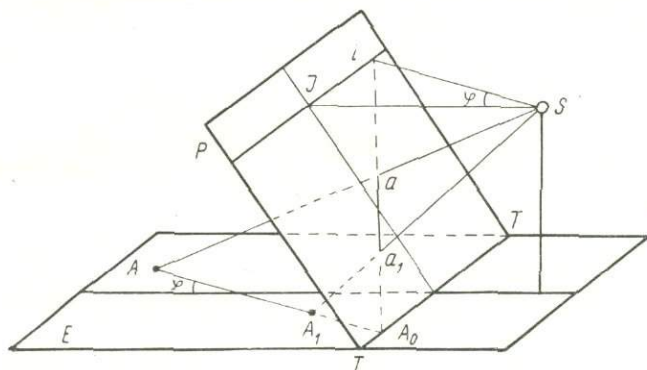


Рис. 16

прямыми, полученными в плоскости снимка, определяют положения изображений данных прямых.

По этим правилам на рис. 16 построено изображение прямой, лежащей в плоскости основания под углом φ к направлению съемки. В этом случае точка схода находится на линии действительного горизонта и удалена от главной точки схода на расстояние

$$Ji = SJ \operatorname{tg} \varphi$$

или, так как, согласно выражению (1.3), $SJ = f : \sin \varepsilon$,

$$Ji = f \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sin \varepsilon}. \quad (1.5)$$

Точка схода изображений горизонтальных прямых, перпендикулярных к направлению съемки, находится в бесконечности, так как луч, проходящий через центр проекции параллельно этим прямым, параллелен и снимку (рис. 17). Для построения изображения прямой AA_1 , перпендикулярной к направлению съемки, воспользуемся точкой пересечения этой прямой с направлением съемки A' . Проектирующий луч, идущий из этой точки, строит

ее изображение a' на главной вертикали. Изображение прямой AA_1 проходит через точку a' параллельно линии действительного горизонта, так как точка схода изображений прямых, параллельных AA_1 , находится на этой линии и бесконечно удалена.

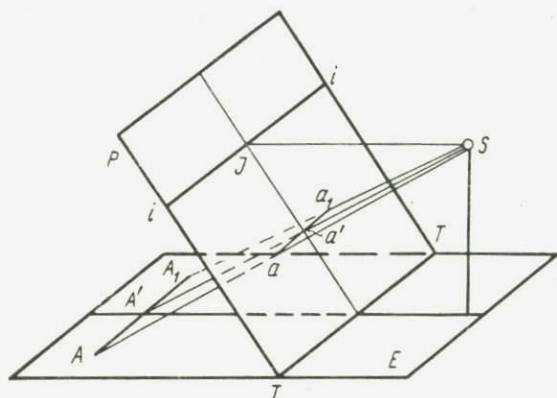


Рис. 17

Изображения горизонтальных прямых, перпендикулярных к направлению съемки, называются *горизонталями*. Они параллельны главной горизонтали снимка.

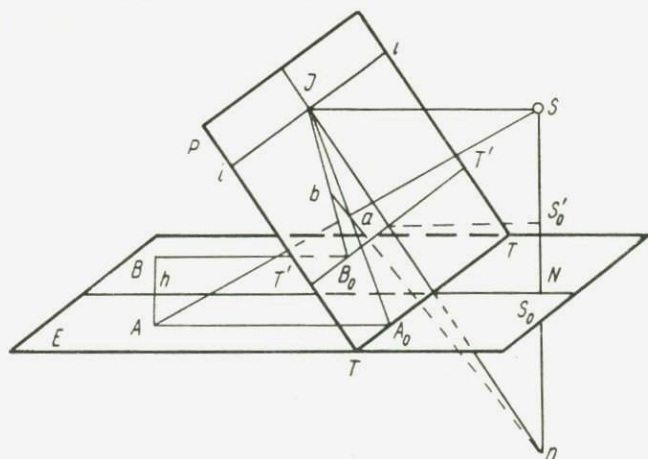


Рис. 18

Точкой схода изображений вертикальных прямых служит точка надира n (рис. 18). Изображение вертикальной прямой AB построим следующим образом. Проведем через A прямую, параллельную направлению съемки, и найдем ее изображение на снимке. Изображение точки A находится на прямой A_0J и получается как пересечение проектирующего луча AS с этой прямой. Следова-

тельно, изображение прямой AB должно быть на направлении ap . Теперь представим себе, что плоскость основания поднята на величину $AB = h$. Тогда плоскость E пройдет через точку B , и получим новую линию основания $T'T'$. Проведем через B прямую, параллельную направлению съемки, и соответствующую ей прямую B_0J на снимке. Положение точки b , в которой изображается второй конец данной прямой AB , определяется пересечением линии B_0J с направлением ap .

§ 6. МЕТОД СЛОЖЕНИЯ ПЛОСКОСТЕЙ

Построения в плоскости снимка и в плоскости основания можно выполнять методом сложения основных плоскостей.

Совместим плоскость главного вертикала Q с плоскостью снимка P , поворачивая первую вокруг главной вертикали по направлению, указанному стрелкой (см. рис. 7). Затем совмещенные плоскости Q и P сложим с плоскостью основания E , вращая их вокруг линии TT' . В результате этого главная вертикаль совпадет с направлением съемки, а точка нулевых искажений c — с соответствующей ей точкой C в плоскости основания. На рис. 19 представлено совмещенное положение плоскостей P , Q и E .

Если известны элементы ориентирования снимка, то такой чертеж можно построить следующим образом.

Проведем прямую VV и будем считать ее линией направления съемки и главной вертикалью. На этой прямой выберем произвольно точку o и примем ее за главную точку. От этой точки отложим по перпендикуляру к главной вертикали фокусное расстояние камеры f , в результате чего получим центр проекции S , из которого проведем прямую под углом ε к направлению oS . На этой прямой отложим от точки S высоту съемки в масштабе. Получим точку S_0 . Пересечение перпендикуляра, восстановленного в этой точке к прямой SS_0 , с направлением съемки определяет точку V , через которую проходит линия основания TT' . Из центра проекции прочертим прямую под углом 90° к линии SS_0 . Пересечение этой прямой с главной вертикалью представляет собой главную точку схода J . Положение точки надира

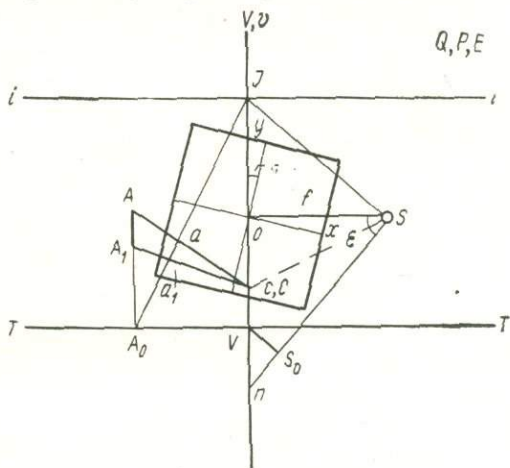


Рис. 19

получается как пересечение прямой SS_0 с главной вертикалью. Чтобы найти точку нулевых искажений, построим биссектрису угла ϵ или отложим на главной вертикали отрезок $Jc = JS$.

Проведем на снимке ось координат y под углом κ к главной вертикали. Зная размеры снимка, можно вычертить его границы.

Положение осей координат x и y на рис. 19 соответствует случаю, когда координаты главной точки x_0 и y_0 равны нулю.

В противном случае систему координат следует установить на снимке так, чтобы координаты главной точки были равны данным значениям x_0 и y_0 .

Теперь построим изображение прямой AA_1 , лежащей в плоскости основания, параллельно направлению съемки.

Продолжим эту прямую до пересечения с линией основания. Полученную точку A_0 соединим прямой с главной точкой схода. Изображение отрезка AA_1 должно быть на этой

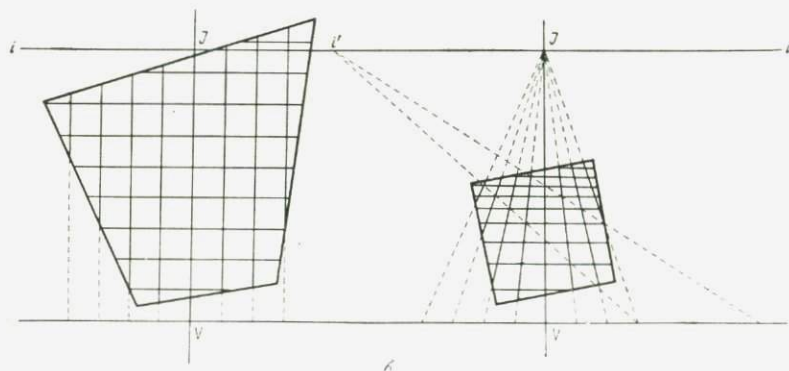
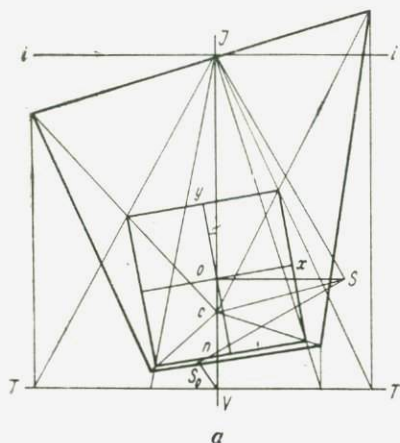


Рис. 20

прямой. Чтобы найти его, воспользуемся точкой нулевых искажений c . Как отмечено в § 2, угловых искажений в этой точке нет. Поэтому любое направление, прочерченное из точки C в плоскости основания, будет и соответствующей прямой на снимке. Проведем прямые AC и A_1C . Пересечения этих прямых с линией A_0J дают точки a и a_1 , которые являются изображениями точек A и A_1 .

Нетрудно решить и обратную задачу: по данной точке или прямой на снимке найти соответствующую точку или прямую в плоскости основания.

Результаты построения в плоскости основания представляют собой план, масштаб которого равен масштабу изображения высоты съемки $H = SS_0$ на совмещенном чертеже.

Если местность равнинная и элементы внешнего ориентирования снимка известны, то методом сложения плоскостей можно построить контур сфотографированного участка (рис. 20, а). На рис. 20, б в пределах этого контура нанесена квадратная сетка и получено ее изображение на снимке. С помощью таких взаимно перспективных сеток можно легко перенести контуры со снимка на планшет, т. е. составить план равнинной местности.

§ 7. ПРЯМАЯ ПРОЕКТИВНАЯ ЗАСЕЧКА

Если элементы ориентирования снимка неизвестны, то фотограмметрическая обработка его может быть выполнена способом прямой проективной засечки.

На рис. 21: S — центр проекции, m — изображение на снимке точки M . Возьмем ряд точек A, B, C и D на линии основания. Очевидно, что прямые mA, mB, mC и mD представляют собой изображения прямых MA, MB, MC и MD .

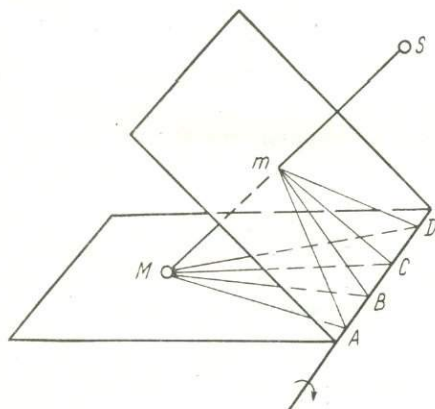


Рис. 21

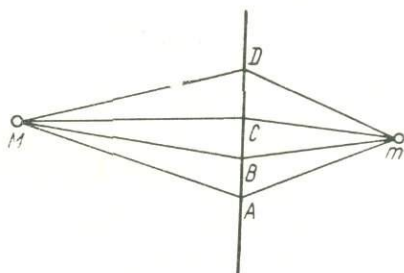


Рис. 22

При изменении угла между плоскостями снимка и основания положение точек m и M в своих плоскостях, а также положение соответствующих пучков прямых не меняется. Если увеличивать угол между плоскостями, то наступит момент, когда он будет равен 180° и обе плоскости сольются в одну (рис. 22). Пучки лучей с центрами в m и M в этом случае называются *проективными*.

Пусть даны два проективных пучка m и M (рис. 23). Первый пучок состоит из четырех прямых mA, mB, mC и mD , второй —

из трех прямых MA , MC и MD . Построим четвертую прямую в пучке M .

Для этого положим полоску бумаги на пучок m и отметим на ней точки A , B , C , D . Затем полоску наложим на пучок M

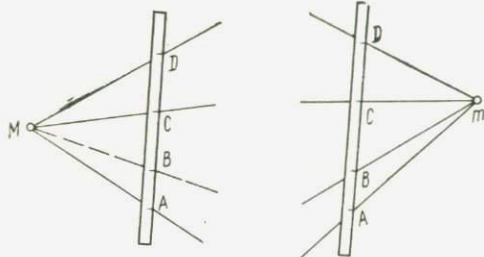


Рис. 23

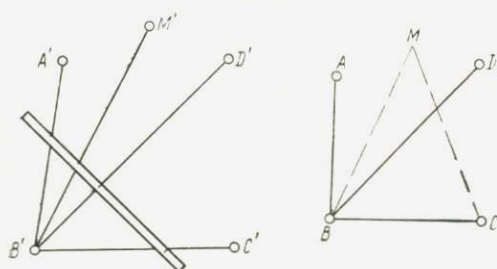


Рис. 24

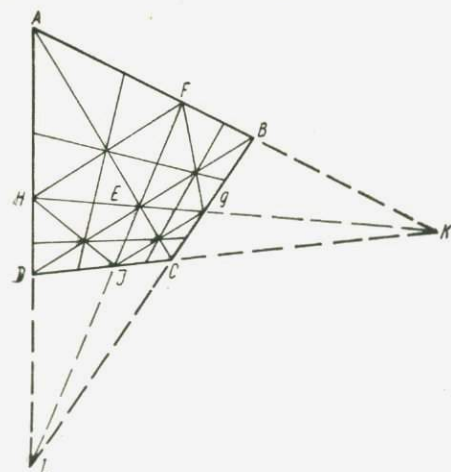


Рис. 25

Проективная сетка строится на плане и на снимке по опорным точкам. Опорные точки на плане соединяются прямыми, которые продолжают до их пересечения. На рис. 25 получены таким образом точки K и L как пересечения прямых AB , CD и BC , AD .

и установим ее в такое положение, при котором прямые MA , MC и MD проходят через точки A , C и D , нанесенные на полоску. Теперь остается только соединить точки B и M прямой линией.

Рассмотренный прием можно применить к решению следующей задачи. Даны четыре опорные точки A' , B' , C' и D' на снимке плоской местности и соответствующие точки A , B , C и D на плане (рис. 24). Требуется перенести точку M' снимка на план.

В этом случае на снимке имеем пучок B' с четырьмя прямыми, а на плане — пучок B с тремя прямыми. С помощью полоски бумаги построим четвертую прямую BM пучка B . Далее берем пучок C' и строим прямую CM . Определяемая точка лежит в пересечении построенных прямых.

Изложенный способ определения точки на плане называется *прямой проективной засечкой*.

Если количество точек велико, то для их перенесения на план можно построить вспомогательную проективную сетку.

В четырехугольнике $ABCD$ проводятся диагонали BD и AC . Точка их пересечения E соединяется прямыми с K и L . Тогда четырехугольник $ABCD$ будет разбит на четыре четырехугольника. Этот прием продолжается до тех пор, пока не получится сетка желаемой густоты. Совершенно аналогично строится сетка и на снимке. После этого точки и контуры снимка переносятся на план.

Если противоположные стороны четырехугольника $ABCD$ приблизительно параллельны, то точки K и L будут за пределами чертежа. В этом случае вместо одной из вершин четырехугольника выбирают произвольную точку на плане, при которой точки K и L помещаются в пределах чертежа. Выбранная точка переносится на снимок способом проективной засечки. Дальнейшее построение выполняется так, как рассмотрено выше.

§ 8. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КООРДИНАТЫ ТОЧЕК СНИМКА

Кроме плоских координат точек снимка, рассмотренных в § 3, применяются *пространственные* прямоугольные координаты.

Начало этих координат находится в точке S , а координатные оси параллельны соответствующим осям фотограмметрической системы координат $OXYZ$ (рис. 26).

Обозначим пространственные координаты точки m снимка в системе $SXYZ$ через X' , Y' , Z' . Их можно найти по плоским координатам x и y , если известны элементы внутреннего ориентирования f , x_0 , y_0 и угловые элементы внешнего ориентирования t , ε , κ .

Чтобы получить зависимости между пространственными и плоскими координатами точки снимка, введем вспомогательную систему координат $Sxyz$, оси x и y которой параллельны соответствующим осям системы oxy , а ось z совмещена с главным лучом So .

Координаты точки m в системе $Sxyz$ обозначим через x , y , z . Очевидно, что для любой точки снимка $z = -f$.

Применив известные из аналитической геометрии формулы преобразования координат, напишем

$$\left. \begin{aligned} X' &= a_1(x-x_0) + a_2(y-y_0) - a_3f \\ Y' &= b_1(x-x_0) + b_2(y-y_0) - b_3f \\ Z' &= c_1(x-x_0) + c_2(y-y_0) - c_3f \end{aligned} \right\}, \quad (1.6)$$

где a_i — косинусы углов, составленных осью X с осями x , y , z ,
 b_i — косинусы углов, составленных осью Y с осями x , y , z ,
 c_i — косинусы углов, составленных осью Z с осями x , y , z
 (табл. 1).

Таблица 1

Оси	x	y	z
X	a_1	a_2	a_3
Y	b_1	b_2	b_3
Z	c_1	c_2	c_3

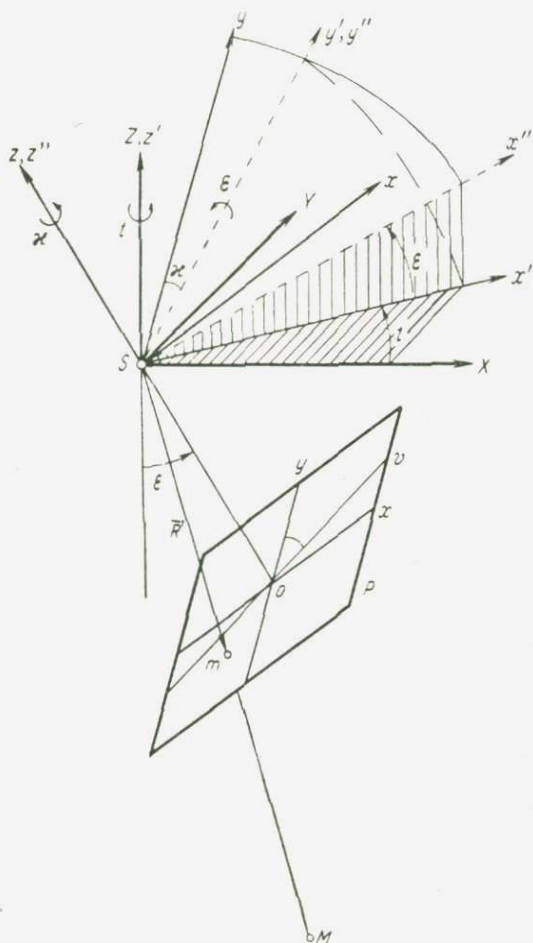


Рис. 26

Формулы (1.6) позволяют перейти от плоских координат точки снимка к пространственным. Формулы обратного перехода имеют вид

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 &= a_1 X' + b_1 Y' + c_1 Z' \\ y - y_0 &= a_2 X' + b_2 Y' + c_2 Z' \\ z &= a_3 X' + b_3 Y' + c_3 Z' \end{aligned} \right\}. \quad (1.7)$$

Косинусы a_i, b_i, c_i называются *направляющими косинусами*, так как они определяют взаимное положение двух систем координат — $SXYZ$ и $Sxyz$. Эти косинусы связаны между собой шестью независимыми уравнениями

$$\left. \begin{aligned} a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 &= 1, & a_1b_1 + a_2b_2 + a_3b_3 &= 0 \\ b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 &= 1, & b_1c_1 + b_2c_2 + b_3c_3 &= 0 \\ c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 &= 1; & c_1a_1 + c_2a_2 + c_3a_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

Отсюда следует, что из девяти косинусов независимы только три, или, что то же самое, девять косинусов зависят от трех параметров.

Преобразование координат (1.6) определяет квадратная матрица, составленная из коэффициентов a_i, b_i, c_i :

$$A = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

и называемая квадратной матрицей третьего порядка, или матрицей преобразования координат.

Преобразование (1.7) определяется матрицей

$$A' = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix}, \quad (1.10)$$

которая получается из матрицы A заменой строк столбцами и называется *транспонированной*.

В матричной форме выражения (1.6) и (1.7) можно представить так:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

и

$$\begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{pmatrix} = A' \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}. \quad (1.12)$$

§ 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЯЮЩИХ КОСИНУСОВ

Направляющие косинусы являются функциями угловых элементов внешнего ориентирования снимка ε, t и κ . Эти элементы представляют собой углы Эйлера. Поэтому нетрудно получить формулы, выражающие девять косинусов через три параметра — ε, t и κ .

Для этого повернем систему координат $SXYZ$ на углы t, ε, κ (см. рис. 26).

Первый поворот вокруг оси Z на угол t преобразует систему $SXYZ$ в $Sx'y'z'$. Запишем углы между осями X, Y, Z и x', y', z' (табл. 2).

Таблица 2

Оси	x'	y'	z'
X	t	$\frac{\pi}{2} + t$	$\frac{\pi}{2}$
Y	$\frac{\pi}{2} - t$	t	$\frac{\pi}{2}$
Z	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	0

Составим матрицу рассматриваемого преобразования координат. Коэффициенты этой матрицы равны косинусам углов, представленных в табл. 2,

$$A_t = \begin{pmatrix} \cos t & -\sin t & 0 \\ \sin t & \cos t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Второй поворот вокруг оси y' на угол ε преобразует систему координат $Sx'y'z'$ в $Sx''y''z''$. Составим таблицу углов между осями x', y', z' и x'', y'', z'' (табл. 3) и матрицу

$$A_\varepsilon = \begin{pmatrix} \cos \varepsilon & 0 & -\sin \varepsilon \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varepsilon & 0 & \cos \varepsilon \end{pmatrix}.$$

Таблица 3

Оси	x''	y''	z''
x'	ε	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2} + \varepsilon$
y'	$\frac{\pi}{2}$	0	$\frac{\pi}{2}$
z'	$\frac{\pi}{2} - \varepsilon$	$\frac{\pi}{2}$	ε

Третий поворот вокруг оси z'' на угол κ позволяет совместить систему координат $Sx''y''z''$ с системой $Sxyz$. Этому повороту соответствуют углы между осями x'', y'', z'' и x, y, z , представленные в табл. 4,

и матрица

$$A_\kappa = \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Таблица 4

Оси	x	y	z
x''	κ	$\frac{\pi}{2} + \kappa$	$\frac{\pi}{2}$
y''	$\frac{\pi}{2} - \kappa$	κ	$\frac{\pi}{2}$
z''	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	0

Матрицу A , определяющую переход от координат x, y, z к координатам X', Y', Z' , получим как произведение матриц, составленных для поворотов t, ε, κ ;

$$A = A_t A_\varepsilon A_\kappa$$

или

$$A = \begin{pmatrix} \cos t & -\sin t & 0 \\ \sin t & \cos t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varepsilon & 0 & -\sin \varepsilon \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varepsilon & 0 & \cos \varepsilon \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Умножить матрицу A_t на матрицу A_ε — значит составить новую матрицу $A_{t\varepsilon}$, компоненты которой получаются в результате умножения строк матрицы A_t на столбцы матрицы A_ε . Действуя по этому правилу, получим

$$A = \begin{pmatrix} \cos t \cos \varepsilon & -\sin t & -\cos t \sin \varepsilon \\ \sin t \cos \varepsilon & \cos t & -\sin t \sin \varepsilon \\ \sin \varepsilon & 0 & \cos \varepsilon \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Перемножим и эти матрицы

$$A = \begin{pmatrix} (\cos t \cos \varepsilon \cos \kappa - \sin t \sin \kappa) & (-\cos t \cos \varepsilon \sin \kappa - \sin t \cos \kappa) & -\cos t \sin \varepsilon \\ (\sin t \cos \varepsilon \cos \kappa + \cos t \sin \kappa) & (-\sin t \cos \varepsilon \sin \kappa + \cos t \cos \kappa) & -\sin t \sin \varepsilon \\ \sin \varepsilon \cos \kappa & -\sin \varepsilon \sin \kappa & \cos \varepsilon \end{pmatrix}.$$

Теперь сопоставим это выражение с (1.9) и напомним формулы для определения направляющих косинусов

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \cos t \cos \varepsilon \cos \kappa - \sin t \sin \kappa \\ a_2 &= -\cos t \cos \varepsilon \sin \kappa - \sin t \cos \kappa \\ a_3 &= -\cos t \sin \varepsilon \\ b_1 &= \sin t \cos \varepsilon \cos \kappa + \cos t \sin \kappa \\ b_2 &= -\sin t \cos \varepsilon \sin \kappa + \cos t \cos \kappa \\ b_3 &= -\sin t \sin \varepsilon \\ c_1 &= \sin \varepsilon \cos \kappa \\ c_2 &= -\sin \varepsilon \sin \kappa \\ c_3 &= \cos \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

Если направляющие косинусы известны, то параметры t , ε и κ можно найти, исходя из (1.13):

$$\operatorname{tg} t = \frac{b_3}{a_3}, \quad \cos \varepsilon = c_3, \quad \operatorname{tg} \kappa = -\frac{c_2}{c_1}. \quad (1.14)$$

Аналогично получим формулы для определения направляющих косинусов по угловым элементам внешнего ориентирования α ,

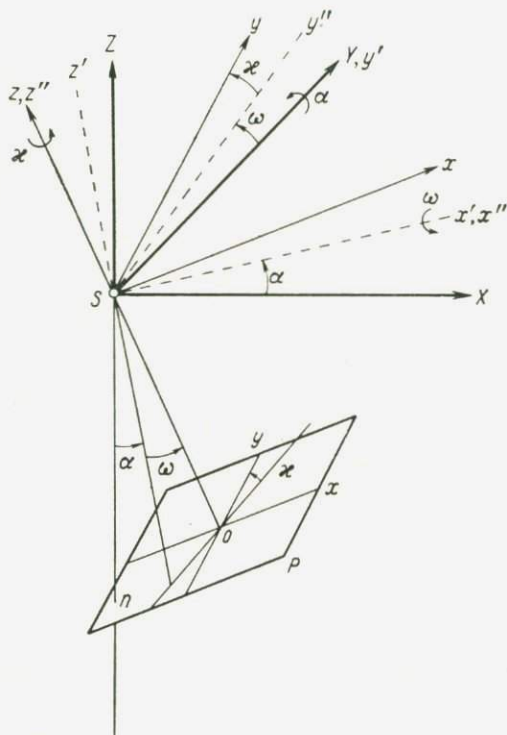


Рис. 27

ω и κ (рис. 27). Для этого систему координат $SXYZ$ последовательно повернем на углы: α вокруг оси Y ($Sx'y'z'$), ω вокруг оси x' ($Sx''y''z''$) и κ вокруг оси z'' ($Sxyz$).

Составим табл. 5 углов между координатными осями.

Пользуясь этой таблицей, напомним матрицы, соответствующие поворотам α , ω и κ :

$$A_{\alpha} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad A_{\omega} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix},$$

$$A_{\kappa} = \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Оси	x'	y'	z'	Оси	x''	y''	z''	Оси	x	y	z
X	α	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2} + \alpha$	x'	0	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	x''	κ	$\frac{\pi}{2} + \kappa$	$\frac{\pi}{2}$
Y	$\frac{\pi}{2}$	0	$\frac{\pi}{2}$	y'	$\frac{\pi}{2}$	ω	$\frac{\pi}{2} + \omega$	y''	$\frac{\pi}{2} - \kappa$	κ	$\frac{\pi}{2}$
Z	$\frac{\pi}{2} - \alpha$	$\frac{\pi}{2}$	α	z'	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2} - \omega$	ω	z''	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	0

Теперь составим произведение этих матриц

$$A = A_{\alpha} A_{\omega} A_{\kappa}.$$

После перемножения найдем

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \cos \alpha \cos \kappa - \sin \alpha \sin \omega \sin \kappa \\ a_2 &= -\cos \alpha \sin \kappa - \sin \alpha \sin \omega \cos \kappa \\ a_3 &= -\sin \alpha \cos \omega \\ b_1 &= \cos \omega \sin \kappa \\ b_2 &= \cos \omega \cos \kappa \\ b_3 &= -\sin \omega \\ c_1 &= \sin \alpha \cos \kappa + \cos \alpha \sin \omega \sin \kappa \\ c_2 &= -\sin \alpha \sin \kappa + \cos \alpha \sin \omega \cos \kappa \\ c_3 &= \cos \alpha \cos \omega \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

Отсюда следует

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{a_3}{c_3}, \quad \sin \omega = -b_3, \quad \operatorname{tg} \kappa = \frac{b_1}{b_2}. \quad (1.16)$$

Полученные выше формулы для определения направляющих косинусов являются строгими и пригодными для любых значений угловых элементов внешнего ориентирования снимка.

Угловые элементы внешнего ориентирования планового снимка α , ω и κ — величины малые, так как при плановой аэрофото съемке плоскость прикладной рамки фотокамеры находится приблизительно в горизонтальном положении, а координатная ось x снимка составляет небольшой угол с осью X фотограмметрической системы координат. Поэтому можно разложить в ряды тригонометрические функции углов α , ω и κ , входящие в формулы (1.15), и получить более простые выражения, определяющие направляющие косинусы для планового снимка.

При разложении тригонометрических функций в ряды учтем члены первого и второго порядков малости. Получим

$$a_1 = \left(1 - \frac{1}{2} \alpha^2\right) \left(1 - \frac{1}{2} \kappa^2\right) = 1 - \frac{1}{2} \alpha^2 - \frac{1}{2} \kappa^2, \\ a_2 = -\kappa - \alpha \omega.$$

Аналогично найдем остальные косинусы и представим формулы (1.15) в таком виде:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= 1 - \frac{1}{2} \alpha^2 - \frac{1}{2} \kappa^2 \\ a_2 &= -\kappa - \alpha\omega \\ a_3 &= -\alpha \\ b_1 &= \kappa \\ b_2 &= 1 - \frac{1}{2} \omega^2 - \frac{1}{2} \kappa^2 \\ b_3 &= -\omega \\ c_1 &= \alpha + \omega\kappa \\ c_2 &= \omega - \alpha\kappa \\ c_3 &= 1 - \frac{1}{2} \alpha^2 - \frac{1}{2} \omega^2 \end{aligned} \right\}. \quad (1.17)$$

§ 10. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ КООРДИНАТАМИ ТОЧЕК МЕСТНОСТИ И СНИМКА

Пусть с точки S получен снимок P (рис. 28). Точка местности M изобразилась в точке m . Найдем зависимость между координатами этих точек.

Положение точки фотографирования относительно некоторого начала O определяет вектор \bar{R}_0 или координаты X_0 , Y_0 и Z_0 . Положение точки M относительно того же начала определяет вектор \bar{R} или координаты X , Y и Z , а положение точки m относительно точки S — вектор \bar{R}' или координаты X' , Y' и Z' .

Векторы \bar{R}' и $SM = \bar{R} - \bar{R}_0$ коллинеарны, следовательно,

$$\bar{R}' = m(\bar{R} - \bar{R}_0), \quad (1.18)$$

где m — скаляр.

Так как компоненты этих векторов пропорциональны, то можно написать

$$\frac{X - X_0}{X'} = \frac{Y - Y_0}{Y'} = \frac{Z - Z_0}{Z'}$$

или, учитывая (1.6),

$$\left. \begin{aligned} X - X_0 &= (Z - Z_0) \frac{a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f} \\ Y - Y_0 &= (Z - Z_0) \frac{b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f} \end{aligned} \right\}. \quad (1.19)$$

Итак, один снимок позволяет составить для каждой изобразившейся на нем точки два уравнения с тремя неизвестными — координатами X , Y и Z точки местности. Отсюда следует, что данных одного снимка недостаточно для определения положения

точки местности. Координаты точки местности можно найти по одиночному снимку лишь в частном случае, когда высота фотографирования $H = Z_0 - Z$ известна. На практике это может быть, когда местность почти не отличается от горизонтальной плоскости.

Из уравнений (1.19) следует, что координаты точки местности зависят от координат ее изображения на снимке, а также от элементов внутреннего и внешнего ориентирования снимка.

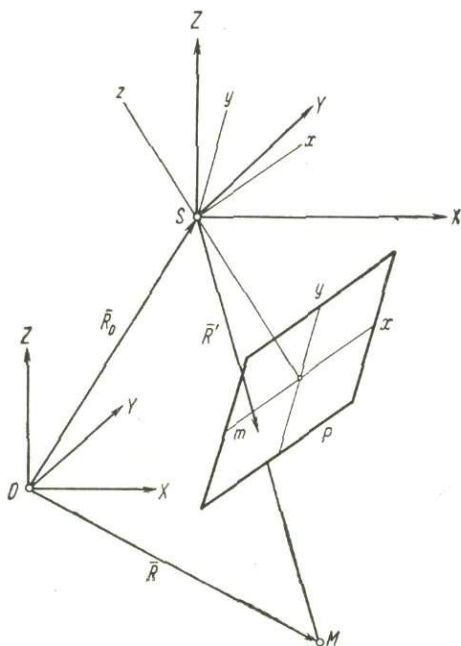


Рис. 28

Получим формулы, выражающие обратную связь, т. е. зависимость между координатами точки снимка и координатами соответствующей точки местности. Для этого спроектируем векторы (1.18) на координатные оси x , y и z

$$\frac{x'}{x-x_0} = \frac{y'}{y-y_0} = \frac{z'}{z-z_0},$$

где x' , y' и z' — координаты точки M в системе $Sxyz$,

$$x' = a_1(X - X_0) + b_1(Y - Y_0) + c_1(Z - Z_0),$$

$$y' = a_2(X - X_0) + b_2(Y - Y_0) + c_2(Z - Z_0),$$

$$z' = a_3(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + c_3(Z - Z_0).$$

Следовательно,

$$\left. \begin{aligned} x-x_0 &= -f \frac{a_1(X-X_0)+b_1(Y-Y_0)+c_1(Z-Z_0)}{a_3(X-X_0)+b_3(Y-Y_0)+c_3(Z-Z_0)} \\ y-y_0 &= -f \frac{a_2(X-X_0)+b_2(Y-Y_0)+c_2(Z-Z_0)}{a_3(X-X_0)+b_3(Y-Y_0)+c_3(Z-Z_0)} \end{aligned} \right\} \quad (1.20)$$

Рассмотрим частные случаи зависимости между координатами соответственных точек местности и снимка.

1. Снимок горизонтальный. В этом случае угловые элементы внешнего ориентирования снимка $t = \varepsilon = \kappa = 0$.

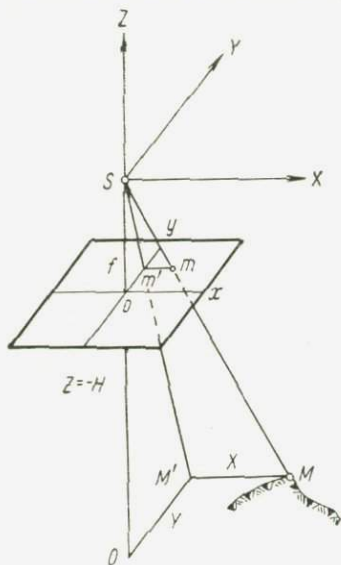


Рис. 29

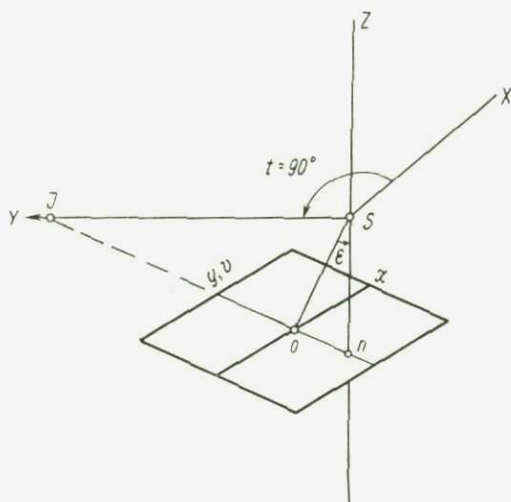


Рис. 30

Оси координат x, y параллельны осям X, Y (рис. 29). Пусть $X_0 = Y_0 = Z_0 = 0, x_0 = y_0 = 0$.

Согласно (1.13) направляющие косинусы

$$a_1 = b_2 = c_3 = 1,$$

а остальные равны нулю. Поэтому формулы (1.19) и (1.20) принимают такой вид:

$$X = H \frac{x}{f}, \quad Y = H \frac{y}{f}; \quad (1.21)$$

$$x = f \frac{X}{H}, \quad y = f \frac{Y}{H}. \quad (1.22)$$

Эти формулы можно легко получить и другим путем, если рассмотреть подобные треугольники $MM'S, mm'S$ и $M'O'S, m'o'S$.

2. Снимок наклонный. $\varepsilon \neq 0$, $t = 90^\circ$, $\kappa = -90^\circ$ (рис. 30), $X_0 = Y_0 = Z_0 = 0$, $x_0 = y_0 = 0$.

Согласно (1.13) направляющие косинусы в данном случае имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} a_1 &= 1, & b_1 &= 0, & c_1 &= 0, \\ a_2 &= 0, & b_2 &= \cos \varepsilon, & c_2 &= \sin \varepsilon, \\ a_3 &= 0; & b_3 &= -\sin \varepsilon; & c_3 &= \cos \varepsilon. \end{aligned}$$

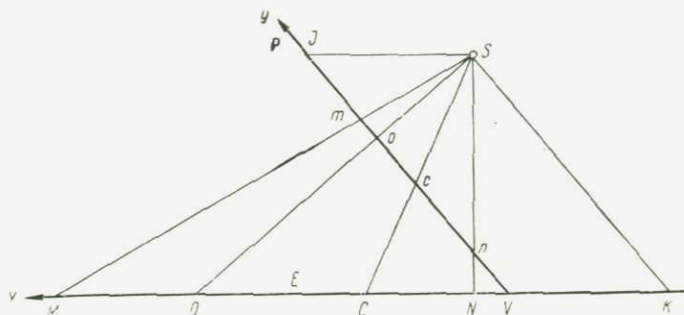


Рис. 31

Подставив их в выражения (1.19) и (1.20), получим

$$X = H \frac{x}{f \cos \varepsilon - y \sin \varepsilon}, \quad Y = H \frac{f \sin \varepsilon + y \cos \varepsilon}{f \cos \varepsilon - y \sin \varepsilon}; \quad (1.23)$$

$$x = f \frac{X}{H \cos \varepsilon + Y \sin \varepsilon}, \quad y = f \frac{Z \sin \varepsilon + Y \cos \varepsilon}{H \cos \varepsilon + Y \sin \varepsilon}. \quad (1.24)$$

Зависимости (1.23) и (1.24) получены для случая, когда начало координат на снимке находится в главной точке, а начало координат на местности совмещено с центром проекции S или точкой N , соответствующей точке надира n (рис. 31). В фотограмметрии используются также формулы, выведенные для других случаев расположения начала координат на снимке и на местности. Эти формулы приводятся ниже. Их можно получить из выражений (1.23) и (1.24) путем параллельного переноса систем координат xy и XU .

Начало координат на снимке — в главной точке o , а на местности — в точке O , соответствующей главной точке,

$$X = H \frac{x}{f \cos \varepsilon - y \sin \varepsilon}, \quad Y = H \frac{y}{(f \cos \varepsilon - y \sin \varepsilon) \cos \varepsilon}; \quad (1.25)$$

$$x = f \frac{H \sin \varepsilon + X \cos \varepsilon}{(H \cos \varepsilon + Y \sin \varepsilon) \cos \varepsilon}, \quad y = f \frac{Y \cos \varepsilon - H \sin \varepsilon}{H \cos \varepsilon + Y \sin \varepsilon}. \quad (1.26)$$

Начало координат на снимке — в точке надира n , а на местности — в точке N , соответствующей точке надира,

$$X = H \frac{x \cos \varepsilon}{f - y \sin \varepsilon \cos \varepsilon}, \quad Y = H \frac{y \cos^2 \varepsilon}{f - y \sin \varepsilon \cos \varepsilon}; \quad (1.27)$$

$$x = f \frac{X}{H \cos \varepsilon + Y \sin \varepsilon}, \quad y = f \frac{Y}{(H \cos \varepsilon + Y \sin \varepsilon) \cos \varepsilon}. \quad (1.28)$$

Начало координат на снимке — в точке нулевых искажений c , а на местности — в точке C , которая соответствует точке нулевых искажений:

$$X = H \frac{x}{f - y \sin \varepsilon}, \quad Y = H \frac{y}{f - y \sin \varepsilon}; \quad (1.29)$$

$$x = f \frac{X}{H + Y \sin \varepsilon}, \quad y = f \frac{Y}{H + Y \sin \varepsilon}. \quad (1.30)$$

Начало координат на снимке — в главной точке схода J , а на местности — в точке K , лежащей на линии направления съемки и образующей параллелограмм с точками S , J , V ,

$$X = -H \frac{x}{y \sin \varepsilon}, \quad Y = H \frac{f}{y \sin^2 \varepsilon}; \quad (1.31)$$

$$x = f \frac{X}{Y \sin \varepsilon}, \quad y = -f \frac{H}{Y \sin^2 \varepsilon}. \quad (1.32)$$

Начало координат x , y и X , Y — в точке V ,

$$X = H \frac{x}{H - y \sin \varepsilon}, \quad Y = f \frac{y}{H - y \sin \varepsilon}; \quad (1.33)$$

$$x = f \frac{X}{f + Y \sin \varepsilon}, \quad y = H \frac{Y}{f + Y \sin \varepsilon}. \quad (1.34)$$

Формулы, выражающие зависимость между координатами соответствующих точек местности и снимка, часто называют формулами трансформирования координат.

§ 11. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ КООРДИНАТАМИ СООТВЕТСТВЕННЫХ ТОЧЕК ГОРИЗОНТАЛЬНОГО И НАКЛОННОГО СНИМКОВ

Получить строго горизонтальные снимки в процессе аэрофотосъемки пока невозможно. Однако можно перейти от координат точки, измеренных на наклонном снимке, к координатам соответствующей точки горизонтального снимка, если известны угловые элементы внешнего ориентирования наклонного снимка. Этот процесс называется трансформированием координат.

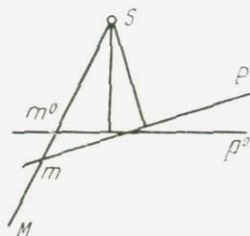


Рис. 32

Пусть x^0 и y^0 — координаты изображения m^0 точки M местности на горизонтальном снимке P^0 , полученном с точки S (рис. 32), а x и y — координаты изображения той же точки на наклонном снимке P , полученном с точки S .

Применив формулы (1.19), напомним

$$\begin{aligned} X - X_0 &= -(Z - Z_0) \frac{x^0}{f} = (Z - Z_0) \frac{a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f}, \\ Y - Y_0 &= -(Z - Z_0) \frac{y^0}{f} = (Z - Z_0) \frac{b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f}. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\left. \begin{aligned} x^0 &= -f \frac{a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f} \\ y^0 &= -f \frac{b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f} \end{aligned} \right\}. \quad (1.35)$$

Эти формулы трансформирования координат пригодны при любых значениях угловых элементов внешнего ориентирования наклонного снимка.

Получим формулы трансформирования координат точек плоского снимка. Для этого подставим в выражения (1.35) значения косинусов a_i , b_i и c_i из (1.17). Полагая, что координаты главной точки x_0 и y_0 равны нулю, получим

$$\begin{aligned} x^0 &= -f \left(x - \frac{1}{2} x \alpha^2 - \frac{1}{2} x \kappa^2 - y \kappa - y \alpha \omega + f \alpha \right) \times \\ &\times \left(x \alpha + x \omega \kappa + y \omega - y \alpha \kappa - f + \frac{1}{2} f \alpha^2 + \frac{1}{2} f \omega^2 \right)^{-1} \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} x^0 &= \left(x + f \alpha - y \kappa - \frac{1}{2} x \alpha^2 - \frac{1}{2} x \kappa^2 - y \alpha \omega \right) \times \\ &\times \left[1 - \left(\frac{x}{f} \alpha + \frac{y}{f} \omega + \frac{1}{2} \alpha^2 + \frac{1}{2} \omega^2 - \frac{y}{f} \alpha \kappa + \frac{x}{f} \omega \kappa \right) \right]^{-1}. \end{aligned}$$

Известно, что

$$(1 - \varepsilon)^{-1} = 1 + \varepsilon + \varepsilon^2 + \dots$$

Поэтому

$$\begin{aligned} x^0 &= \left(x + f \alpha - y \kappa - \frac{1}{2} x \alpha^2 - \frac{1}{2} x \kappa^2 - y \alpha \omega \right) \left(1 + \frac{x}{f} \alpha + \frac{y}{f} \omega + \frac{1}{2} \alpha^2 + \right. \\ &\left. + \frac{1}{2} \omega^2 - \frac{y}{f} \alpha \kappa + \frac{x}{f} \omega \kappa + \frac{x^2}{f^2} \alpha^2 + \frac{y^2}{f^2} \omega^2 + 2 \frac{xy}{f^2} \alpha \omega \right). \end{aligned}$$

После перемножения будем иметь

$$\begin{aligned} x^0 &= x + \left(f + \frac{x^2}{f} \right) \alpha + \frac{xy}{f} \omega - y \kappa + x \left(1 + \frac{\kappa^2}{f^2} \right) \alpha^2 + x \left(\frac{1}{2} + \frac{y^2}{f^2} \right) \omega^2 - \\ &- \frac{1}{2} x \kappa^2 + 2 \frac{x^2}{f^2} \alpha \omega - 2 \frac{xy}{f} \alpha \kappa + \frac{x^2 - y^2}{f} \omega \kappa. \end{aligned} \quad (1.36)$$

Аналогично найдем и координату

$$y^0 = y + \frac{xy}{f} \alpha + \left(f + \frac{y^2}{f}\right) \omega + x\kappa + y \left(\frac{1}{2} + \frac{x^2}{f^2}\right) \alpha^2 + y \left(1 + \frac{y^2}{f^2}\right) \omega^2 - \\ - \frac{1}{2} y\kappa^2 + x \left(1 + 2\frac{y^2}{f^2}\right) \alpha\omega + \frac{x^2 - y^2}{f} \alpha\kappa + 2\frac{xy}{f} \omega\kappa. \quad (1.37)$$

§ 12. МАСШТАБ СНИМКА

Пусть на снимке изображился участок местности, представляющий собой горизонтальную плоскость. В этом случае причиной изменения масштаба снимка являются как заранее заданные, так и случайные отклонения оптической оси фотокамеры от вертикального положения.

Рассматривая рис. 20, б, на котором изображены квадратная сетка на местности и соответствующая сетка на снимке, нетрудно установить, что масштаб изменяется не только при переходе от одной точки снимка к другой, но и при изменении направления в одной и той же точке.

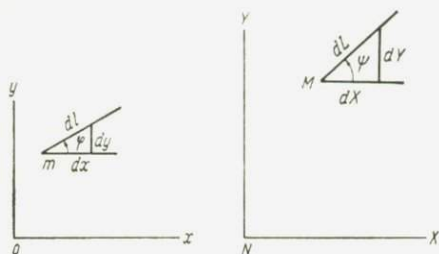


Рис. 33

Поэтому для определения масштаба снимка в какой-либо точке, например в точке m (рис. 33), по направлению φ нужно взять отношение бесконечно малого отрезка, исходящего из этой точки и расположенного на данном направлении, к соответствующему отрезку на местности:

$$\frac{1}{m} = \frac{dl}{dL}.$$

Обозначив проекции отрезков dl и dL на соответствующие координатные оси через dx , dy и dX , dY , напишем

$$\frac{1}{m} = \frac{dx}{\cos \varphi \sqrt{dX^2 + dY^2}}.$$

Теперь воспользуемся формулами (1.23), выражающими зависимость между координатами соответственных точек M и m . После дифференцирования этих выражений по переменным x и y найдем

$$dX = H \frac{f \cos \varepsilon - y \sin \varepsilon + x \sin \varepsilon \operatorname{tg} \varphi}{(f \cos \varepsilon - y \sin \varepsilon)^2} dx,$$

$$dY = H \frac{f dy}{(f \cos \varepsilon - y \sin \varepsilon)^2} = H \frac{f \operatorname{tg} \varphi}{(f \cos \varepsilon - y \sin \varepsilon)^2} dx.$$

Учитывая значения dX и dY , после простых преобразований окончательно получим

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \kappa^2 [(\kappa \cos \varphi + c \sin \varphi)^2 + \sin^2 \varphi]^{-1/2}, \quad (1.38)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \kappa &= \cos \varepsilon - \frac{y}{f} \sin \varepsilon \\ c &= \frac{x}{f} \sin \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (1.39)$$

представляют собой постоянные величины для данной точки снимка.

Таким образом, масштаб снимка зависит от фокусного расстояния фотокамеры, высоты фотографирования, угла наклона снимка, положения точки, в которой взят бесконечно малый элемент dl , а также от направления этого элемента.

Направления φ_n , соответствующие максимальному и минимальному значениям масштабов в данной точке снимка, можно найти по формуле

$$\operatorname{tg} 2\varphi_n = \frac{2\kappa c}{\kappa^2 - c^2 - 1}, \quad (1.40)$$

которая получается из выражения (1.38) по известному из математики правилу определения предельных значений функции.

Пусть от какой-либо точки снимка по различным направлениям отложены соответствующие значения масштабов. Из математической картографии известно, что линия, соединяющая концы построенных таким образом отрезков, представляет собой *эллипс масштабных искажений*. При этом большая и малая полуоси эллипса изображают предельные значения масштабов в данной точке.

На рис. 34 показан снимок, в различных точках которого построены эллипсы масштабных искажений. Размер снимка 24×18 см, $\varepsilon = 30^\circ$, $\kappa = 0^\circ$, $f = 200$ мм. Значение масштаба в точке нулевых искажений принято за единицу.

Такое построение, называемое *индикатрисой масштабных искажений*, дает наглядную картину искажений масштаба в пределах всего снимка.

Для снимков, имеющих другие значения угла наклона и фокусного расстояния, индикатриса масштабных искажений будет иметь несколько иной вид по сравнению с представленной на рис. 34, однако общий характер распространения искажений сохранится.

Найдем по формуле (1.38) значения масштаба снимка для различных частных случаев.

1. Масштаб горизонтального снимка ($\varepsilon = 0$). Согласно (1.39) в этом случае $\kappa = 1$, $c = 0$. Поэтому формула (1.38) принимает вид

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H}. \quad (1.41)$$

Таким образом, масштаб горизонтального снимка плоской местности — величина постоянная.

2. Масштаб наклонного снимка в точке нулевых искажений ($x = 0, y = -f \operatorname{tg} \varepsilon/2$). Подставив эти значения координат точки нулевых искажений в выражения (1.39), получим $\kappa = 1$ и $c = 0$. Затем по формуле (1.38) найдем

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H},$$

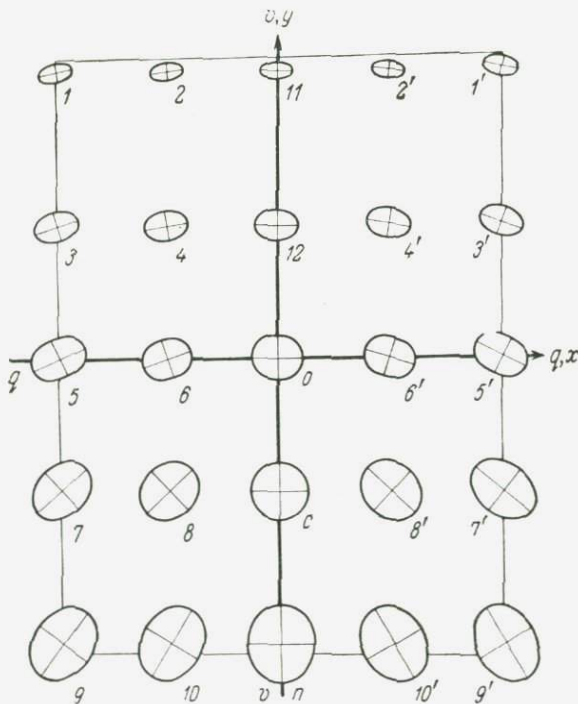


Рис. 34

т. е. масштаб наклонного снимка в точке нулевых искажений равен масштабу горизонтального снимка. Поэтому масштаб в точке нулевых искажений называется *главным масштабом снимка*.

3. Масштаб наклонного снимка в главной точке ($x = 0, y = 0$).

$$\kappa = \cos \varepsilon, \quad c = 0,$$

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \cos^2 \varepsilon [1 - \sin^2 \varepsilon \cos^2 \varphi]^{-1/2}. \quad (1.42)$$

Отсюда следует, что масштаб в главной точке меньше главного масштаба. Этот вывод демонстрирует и рис. 34.

4. Масштаб в точке надира ($x = 0, y = -f \operatorname{tg} \varepsilon$).

$$\kappa = \frac{1}{\cos \varepsilon}, \quad c = 0,$$

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H \cos \varepsilon} (1 - \sin^2 \varepsilon \sin^2 \varphi)^{-1/2}. \quad (1.43)$$

Это равенство показывает, что масштаб в точке надира крупнее главного масштаба.

5. Масштаб по направлению горизонтали ($\varphi = 0$).

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \left(\cos \varepsilon - \frac{y}{f} \sin \varepsilon \right). \quad (1.44)$$

Следовательно, масштаб данной горизонтали ($y = \text{const}$) — величина постоянная.

Масштаб главной горизонтали ($y = 0$).

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \cos \varepsilon. \quad (1.45)$$

6. Масштаб по направлению главной вертикали ($x = 0, \varphi = 90^\circ$).

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \left(\cos \varepsilon - \frac{y}{f} \sin \varepsilon \right)^2, \quad (1.46)$$

т. е. изменяется при переходе от одной точки этой линии к другой.

7. Масштаб планового снимка. Угол наклона планового снимка обычно меньше 2° . Поэтому выражения (1.39) можно представить в таком виде:

$$\kappa = 1 - \frac{y}{f} \varepsilon, \quad c = \frac{x}{f} \varepsilon.$$

Подставив эти значения κ и c в равенство (1.38), получим масштаб планового снимка в произвольной точке по направлению φ

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \left\{ 1 - \frac{\varepsilon}{f} \left[y (1 + \sin^2 \varphi) + \frac{1}{2} x \sin 2\varphi \right] \right\}. \quad (1.47)$$

Теперь найдем средний масштаб планового снимка в произвольной точке

$$\frac{1}{m_{\text{ср}}} = \frac{f}{H} \left\{ 1 - \frac{\varepsilon}{f} \left[y \left(1 + \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2 \varphi d\varphi \right) + \frac{1}{4\pi} x \int_0^{2\pi} \sin 2\varphi d\varphi \right] \right\}.$$

Так как

$$\int_0^{2\pi} \sin^2 \varphi d\varphi = \int_0^{2\pi} \left(\frac{1}{2} \varphi - \frac{1}{2} \sin \varphi \cos \varphi \right) = \pi,$$

а

$$\int_0^{2\pi} \sin 2\varphi d\varphi = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \cos 2\varphi = 0,$$

то

$$\frac{1}{m_{\text{ср}}} = \frac{f}{H} \left(1 - \frac{3y}{2f} \varepsilon \right). \quad (1.48)$$

Рассмотрим две горизонтали на плановом снимке, определяемые координатами $y = \pm a$ (рис. 35). Как следует из (1.48), средний масштаб в точках первой горизонтали ($y = a$) отличается от среднего масштаба в точках второй горизонтали ($y = -a$) и от главного масштаба снимка $f : H$. Однако среднее арифметическое из средних масштабов для этих двух симметричных горизонталей равно главному масштабу снимка.

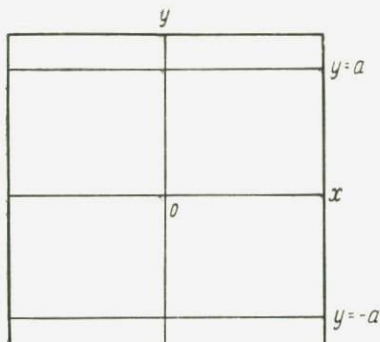


Рис. 35

Поэтому можно считать, что средний масштаб планового снимка в зоне, ограниченной симметричными горизонталями, равен $f : H$.

§ 13. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ УГЛАМИ НА МЕСТНОСТИ И НА СНИМКЕ

Найдем значение угла ψ на местности, соответствующее углу φ на снимке (см. рис. 33).

Согласно этому рисунку,

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{dY}{dX}$$

Подставив сюда значения dX и dY , полученные в предыдущем параграфе, будем иметь

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{f \operatorname{tg} \varphi}{f \cos \varepsilon + (x \operatorname{tg} \varphi - y) \sin \varepsilon}. \quad (1.49)$$

Рассмотрим частные случаи.

1. Снимок горизонтальный ($\varepsilon = 0$). В этом случае

$$\operatorname{tg} \psi = \operatorname{tg} \varphi,$$

т. е. на горизонтальном снимке равнинной местности нет угловых искажений.

2. Вершина угла на снимке в точке нулевых искажений ($x = 0$, $y = -f \operatorname{tg} \varepsilon / 2$). Подставив эти координаты в (1.49), найдем

$$\operatorname{tg} \psi = \operatorname{tg} \varphi$$

— угол в точке нулевых искажений равен соответствующему углу на равнинной местности.

3. Вершина угла φ в главной точке снимка ($x = 0, y = 0$). В этом случае формула (I.49) принимает такой вид:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos \varepsilon}. \quad (1.50)$$

4. Вершина угла φ в точке надира ($x = 0, y = -f \operatorname{tg} \varepsilon$). После подстановки этих значений x и y в (I.49) получим

$$\operatorname{tg} \psi = \cos \varepsilon \operatorname{tg} \varphi. \quad (1.51)$$

Найдем разность углов φ и ψ , называемую *угловым искажением*,

$$\operatorname{tg} (\varphi - \psi) = \frac{\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \psi}{1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \psi}.$$

Подставим сюда значение $\operatorname{tg} \psi$ из (I.49). Тогда

$$\operatorname{tg} (\varphi - \psi) = \frac{(x \operatorname{tg} \varphi - y) \sin \varepsilon - 2f \sin^2 \frac{\varepsilon}{2}}{(x \operatorname{tg} \varphi - y) \sin \varepsilon + f (\cos \varepsilon + \operatorname{tg}^2 \varphi)} \operatorname{tg} \varphi. \quad (1.52)$$

Отсюда следует, что угловое искажение равно нулю в следующих случаях:

1. $\varepsilon = 0$; f, φ, x, y произвольны.
2. $\varphi = 0$; ε, f, x, y произвольны.
3. $x = 0, y = -f \operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2}$; ε, f, φ произвольны.
4. $x = 0, \varphi = 90^\circ$; ε, f, y произвольны.

5. $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{y + f \operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2}}{x}$; ε, f, x, y произвольны.

Значение угла φ в пятом случае получается, если принять числитель в равенстве (1.49) равным нулю и решить полученное таким образом уравнение. Это значение φ соответствует направлению, проходящему из данной точки через точку нулевых искажений (рис. 36).

На рис. 36 представлен снимок, в различных точках которого построены *индикатрисы угловых искажений* ($\varepsilon = 30^\circ, f = 200$ мм, размер снимка 24×18 см). Искажение направления в какой-либо точке снимка, например в точке 5, определяет отрезок, заключенный между пересечениями этого направления с окружностью и индикатрисой угловых искажений.

Если начало координат на снимке перенести параллельно из главной точки в точку нулевых искажений, то формула (1.52) примет вид

$$\operatorname{tg} (\varphi - \psi) = \frac{x \operatorname{tg} \varphi - y}{x \operatorname{tg} \varphi - y + f' (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)} \operatorname{tg} \varphi, \quad (1.53)$$

где

$$f' = \frac{f}{\sin \varepsilon}.$$

Найдем наибольшую разность $\varphi - \psi$. Для этого дифференцируем (1.53)

$$\frac{d \operatorname{tg}(\varphi - \psi)}{d \operatorname{tg} \varphi} = \frac{(2x \operatorname{tg} \varphi - y)(x \operatorname{tg} \varphi - y + f' + f' \operatorname{tg}^2 \varphi) - (x + 2f' \operatorname{tg} \varphi)(x \operatorname{tg}^2 \varphi - y \operatorname{tg} \varphi)}{[x \operatorname{tg} \varphi - y + f'(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)]^2}.$$

Пусть то значение φ , при котором $\varphi - \psi$ — экстремум, будет φ_0 . Тогда

$$(2x \operatorname{tg} \varphi_0 - y)(x \operatorname{tg} \varphi_0 - y + f' + f' \operatorname{tg}^2 \varphi_0) - (x + 2f' \operatorname{tg} \varphi_0)(x \operatorname{tg}^2 \varphi_0 - y \operatorname{tg} \varphi_0) = 0.$$

После перемножения получим

$$(x^2 + f'y) \operatorname{tg}^2 \varphi_0 + 2(f'x - 2xy) \operatorname{tg} \varphi_0 + f'y = 0.$$

Отсюда

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{-(f'x - xy) \pm \sqrt{(f'x - xy)^2 + f'y(x^2 + f'y)}}{x^2 + f'y} \quad (1.54)$$

На рис. 36 направления, соответствующие максимальным искажениям, показаны сплошными линиями, а направления, соответствующие минимальным искажениям, — пунктирными.

Пусть вершина направлений находится на главной вертикали ($x = 0$). Из формулы (1.54) следует, что в этом случае

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \pm 1,$$

т. е. в точках главной вертикали предельные искажения испытывают углы φ , равные 45, 135, 225 и 315°.

Величины этих искажений получим по формуле (1.53), подставив значения

$$\operatorname{tg} \varphi = \pm 1 \quad \text{и} \quad f' = \frac{f}{\sin \varepsilon},$$

$$\operatorname{tg}(\varphi - \psi)_{\text{пр}} = \frac{\mp y \sin \varepsilon}{2f - y \sin \varepsilon}. \quad (1.55)$$

Если снимок плановый, то

$$\varphi - \psi = \omega = \frac{\pm y \varepsilon}{2f}$$

Выражая ε в градусах, а ω в минутах, найдем

$$\omega' = \pm 30 \frac{y}{f} \varepsilon. \quad (1.56)$$

Это равенство можно использовать для определения радиуса окружности с центром в точке нулевых искажений, в пределах

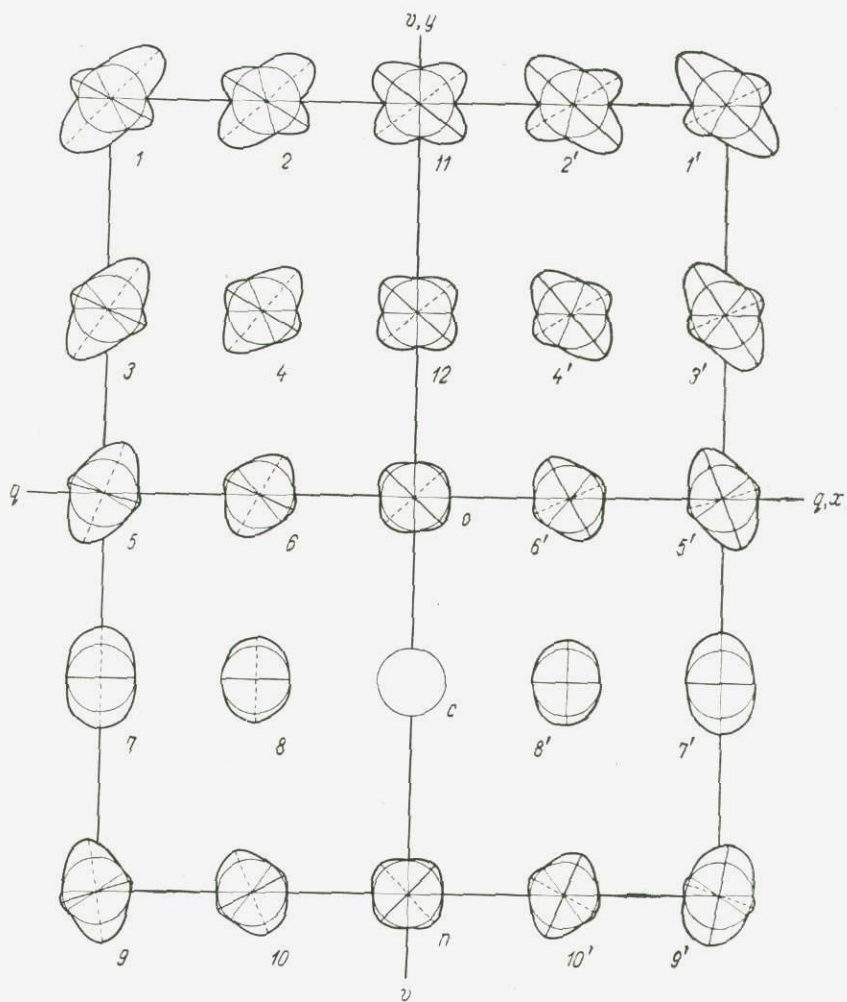


Рис. 36

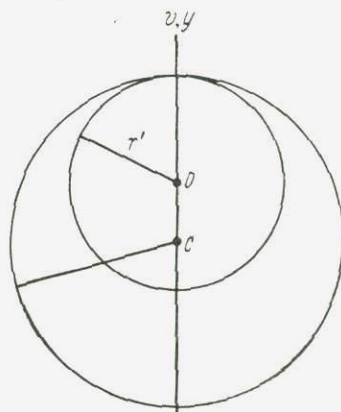


Рис. 37

которой любая точка не имеет угловых искажений, превышающих заданного значения ω . Заменяя y на r , получим

$$r = \frac{1}{30} f \frac{\omega'}{\varepsilon}. \quad (1.57)$$

Пусть $\omega' = 6'$, $\varepsilon = 3^\circ$. Тогда $r = f/15$.

Положение точки нулевых искажений не фиксируется. Поэтому окружность описывают из главной точки снимка так, чтобы она не выходила за пределы круга, радиус которого определяется выражением (1.57). Как следует из рис. 37, радиус этой окружности

$$r' = r - oc = \frac{f}{30} \frac{\omega'}{\varepsilon} - \frac{1}{120} f \varepsilon. \quad (1.58)$$

Если $\omega = 6'$ и $\varepsilon = 3^\circ$, то

$$r' = \frac{f}{24}. \quad (1.59)$$

Контурная точка снимка, выбранная в пределах круга радиуса, равного $f : 24$, называется *центральной точкой*.

§ 14. ЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

Рассмотрим линейные искажения на снимке, вызванные его наклоном.

Пусть наклонный и горизонтальный снимки P и P^0 имеют общий центр проекции S (рис. 38). В этом случае снимки пересекаются по горизонтали hh , проходящей через точку нулевых искажений c , так как прямая Sc представляет собой биссектрису угла наклона снимка ε и фокусные расстояния снимков P и P^0 одинаковы.

Обозначим через m и m^0 изображения точки местности на наклонном и горизонтальном снимках. Проведем радиусы-векторы r и r^0 от точки c к точкам m и m^0 . Углы, составленные r и r^0 с линией hh , одинаковы, как показано в предыдущем параграфе. Поэтому если снимок P повернуть вокруг горизонтали hh и совместить со снимком P^0 , то радиус-вектор r совпадет с r^0 , а точка m наклонного снимка будет смещена относительно точки m^0 горизонтального снимка по радиусу-вектору (рис. 39).

Таким образом, наклон снимка вызывает радиальные смещения точек. Точка m , лежащая выше линии неискаженного масштаба, при наклоне снимка приближается к точке нулевых искажений c . Нетрудно видеть, что точка k , расположенная ниже линии hh , удаляется от точки c . Точка l , лежащая на линии неискаженного масштаба, занимает одинаковое положение на наклонном и горизонтальном снимках. Это следует из того, что масштаб наклонного снимка — величина переменная: выше линии неискаженного масштаба он меньше масштаба горизонтального снимка $f : H$, ниже линии hh — больше $f : H$, а на линии hh равен $f : H$.

Пусть начало координат на снимке P находится в точке нулевых искажений c . Обозначим через x и y координаты точки m на снимке P , а через x^0 и y^0 — координаты точки m^0 на плане масштаба $f : H$. Применяв формулы (1.29), напишем

$$X = (H-h) \frac{x}{f-y \sin \varepsilon} = H \frac{x^0}{f},$$

$$Y = (H-h) \frac{y}{f-y \sin \varepsilon} = H \frac{y^0}{f},$$

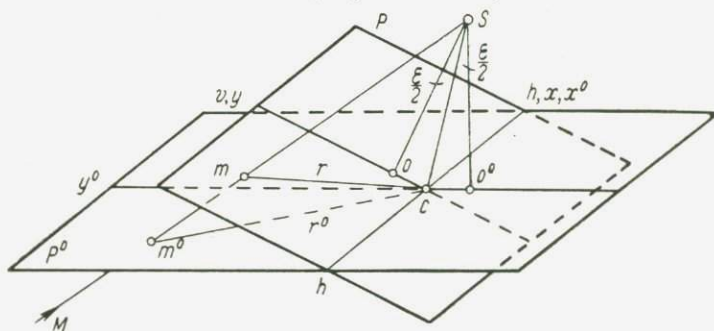


Рис. 38

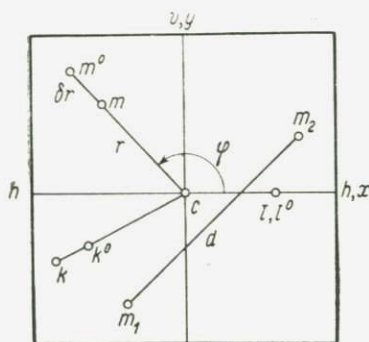


Рис. 39

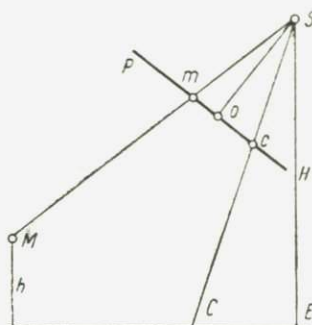


Рис. 40

где X и Y — координаты точки M (начало координат в точке C , соответствующей точке нулевых искажений), H — высота фотографирования относительно горизонтальной плоскости E , h — превышение точки M над плоскостью E (рис. 40). Следовательно,

$$\left. \begin{aligned} x^0 &= \left(1 - \frac{h}{H}\right) f \frac{x}{f - y \sin \varepsilon} \\ y^0 &= \left(1 - \frac{h}{H}\right) f \frac{y}{f - y \sin \varepsilon} \end{aligned} \right\}. \quad (1.60)$$

Эти формулы позволяют перейти от координат точки наклонного снимка к координатам соответствующей точки плана

масштаба $f : H$, если известны элементы ориентирования снимка и превышение точки местности относительно горизонтальной плоскости.

Теперь найдем зависимость между соответственными отрезками на плане и на наклонном снимке. Пусть x_1^0, y_1^0 и x_2^0, y_2^0 — координаты концов отрезка $m_1^0 m_2^0$ на плане, а $x_1 y_1$ и $x_2 y_2$ — координаты концов отрезка $m_1 m_2$ на наклонном снимке (см. рис. 39).

Используя формулы (1.60), напомним

$$\left. \begin{aligned} x_1^0 &= \left(1 - \frac{h_1}{H}\right) \frac{x_1}{1 - \frac{y_1}{f} \sin \varepsilon}, & y_1^0 &= \left(1 - \frac{h_1}{H}\right) \frac{y_1}{1 - \frac{y_1}{f} \sin \varepsilon} \\ x_2^0 &= \left(1 - \frac{h_2}{H}\right) \frac{x_2}{1 - \frac{y_2}{f} \sin \varepsilon}, & y_2^0 &= \left(1 - \frac{h_2}{H}\right) \frac{y_2}{1 - \frac{y_2}{f} \sin \varepsilon} \end{aligned} \right\} \quad (1.61)$$

Очевидно,

$$d^0 = m_1^0 m_2^0 = [(x_2^0 - x_1^0)^2 + (y_2^0 - y_1^0)^2]^{1/2}. \quad (1.62)$$

Для случая плоской горизонтальной местности ($h = 0$) это выражение можно представить в таком виде:

$$d^0 = \frac{d}{\left(1 - \frac{y_1}{f} \sin \varepsilon\right) \left(1 - \frac{y_2}{f} \sin \varepsilon\right)} \left\{ 1 + [(x_1 y_2 - x_2 y_1)^2 \sin \varepsilon + \right. \\ \left. + 2(x_2 - x_1)(x_1 y_2 - x_2 y_1)] \frac{\sin \varepsilon}{f^2 d^2} \right\}^{1/2}. \quad (1.63)$$

Рассмотрим частные случаи.

1. Отрезок d расположен на линии неискаженного масштаба hh . В этом случае $y_1 = y_2 = 0$ и $d^0 = d$, т. е. соответственные отрезки на горизонтальном и наклонном снимках одинаковы.

2. Отрезок находится на горизонтали ($y_1 = y_2 = y$).

$$d^0 = \frac{f}{f - y \sin \varepsilon} d. \quad (1.64)$$

Отсюда следует, что $d < d^0$, если отрезок лежит над линией неискаженного масштаба ($y > 0$), и $d > d^0$, если он расположен под этой линией ($y < 0$).

3. Отрезок находится на главной вертикали cv ($x_1 = x_2 = 0$).

$$d^0 = \frac{d}{\left(1 - \frac{y_1}{f} \sin \varepsilon\right) \left(1 - \frac{y_2}{f} \sin \varepsilon\right)}. \quad (1.65)$$

Очевидно, и в этом случае $d < d^0$, если отрезок находится на верхней части вертикали, и наоборот.

4. Отрезок представляет собой радиус-вектор, соединяющий точку нулевых искажений с произвольной точкой наклонного снимка ($x_1 = y_1 = 0$, $x_2 = x$, $y_2 = y$, $d = r$, $d^0 = r^0$).

$$r^0 = \frac{f}{f - y \sin \varepsilon} r. \quad (1.66)$$

Подставив значение $y = r \sin \varphi$, получим

$$r^0 = \frac{f}{f - r \sin \varepsilon \sin \varphi} r. \quad (1.67)$$

Теперь найдем смещение точки снимка δr , вызванное углом наклона ε . Для этого заменим в равенстве (1.67) r^0 на $r - \delta r$ и решим его относительно δr :

$$\delta r = - \frac{r^2 \sin \varphi \sin \varepsilon}{f - r \sin \varphi \sin \varepsilon}. \quad (1.68)$$

Угол наклона снимка всегда положительный. Поэтому знак δr зависит от знака синуса угла φ . При положительном значении синуса, т. е. когда r направлен в точку, лежащую выше линии неискаженного масштаба, величина δr отрицательна ($r < r^0$). При отрицательном значении синуса угла φ , т. е. когда r направлен в точку, расположенную ниже линии неискаженного масштаба, смещение δr положительное ($r > r^0$). При φ , равном 0 или 180° , $\delta r = 0$ и $r = r^0$.

Из выражения (1.68) следует, что максимальное значение δr будет при максимальном значении r и $\sin \varphi = 90^\circ$, т. е. для точки, расположенной на главной вертикали и максимально удаленной от точки нулевых искажений.

Если снимок плановый, то формулу (1.68) можно упростить:

$$\delta r = - \frac{r^2}{f} \varepsilon \sin \varphi. \quad (1.69)$$

Пусть $\varepsilon = 3^\circ$, $\varphi = 90^\circ$, $r = 70$ мм, $f = 200$ мм, тогда $\delta r = -1,3$ мм.

Из формулы (1.69) следует, что

$$\delta r_{\max} = \frac{r_{\max}^2}{f} \varepsilon. \quad (1.70)$$

Получим геометрическое место точек, для которых смещение $\delta r = \text{const}$. Для этого решим уравнение (2.68) относительно r :

$$r = \frac{\delta r}{2} + \sqrt{\frac{\delta r^2}{4} - \frac{f \delta r}{\sin \varepsilon \sin \varphi}} \quad (1.71)$$

В этом уравнении переменными являются r и φ . На рис. 41 представлены две кривые, изображающие это уравнение. Они симметричны относительно главной вертикали и асимптотически приближаются к линии неискаженного масштаба. Верхняя и

нижняя кривые пересекают главную вертикаль в точках l и l' . При этом точка l лежит ближе к c , чем к l' . Для верхней кривой $\delta r < 0$, для нижней $\delta r > 0$.

Кривые ограничивают на снимке зону, в пределах которой радиальные смещения, вызванные наклоном ϵ , не превышают заданной величины.

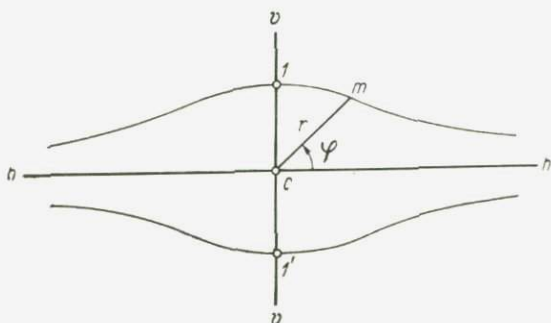


Рис. 41

Для планового снимка выражение (1.71) можно представить в виде

$$r = \sqrt{-\frac{f\delta r}{\sin \epsilon \sin \varphi}} \quad (1.72)$$

и считать, что кривые симметричны относительно линии неискаженного масштаба.

§ 15. ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА

Рассмотрим смещения точек и угловые искажения на снимке, вызванные рельефом местности.

Пусть h — превышение точки B местности над горизонтальной плоскостью E (см. рис. 18). Изображение точки B получается в точке b .

Если бы точка B находилась в горизонтальной плоскости, то ее изображение было бы в точке a . Таким образом, отрезок ab , изображающий вертикальную прямую AB , представляет собой смещение точки снимка, вызванное рельефом местности. Оно направлено по радиусу-вектору, соединяющему данную точку с точкой надира n , так как изображения вертикальных прямых сходятся в точке надира. При этом точка снимка смещается от точки надира, если $h > 0$, или к точке надира, если $h < 0$. Изображения точек, лежащих в плоскости E ($h = 0$), и точка надира не испытывают смещений, обусловленных рельефом.

Будем считать, что по сравнению с высотой съемки H над горизонтальной плоскостью E превышения h отдельных точек местности над той же плоскостью малы, т. е. величина h — малая

первого порядка, вторыми и высшими степенями которой можно пренебречь.

Для определения величины смещения за рельеф воспользуемся формулами (1.28), выражающими зависимость между координатами соответственных точек снимка и местности в случае, когда начало координат на снимке находится в точке надира n , а на местности — в точке $N (S_0)$.

Дифференцируя эти выражения, получим

$$dx = -f \frac{X \cos \varepsilon}{(H \cos \varepsilon + Y \sin \varepsilon)^2} dH = -\frac{x^2 \cos \varepsilon}{Xf} dH,$$

$$dy = -f \frac{Y}{H \cos \varepsilon + Y \sin \varepsilon} dH = -\frac{y^2 \cos^2 \varepsilon}{Yf} dH.$$

Подставим сюда значения X и Y из (1.27) и $dH = -dh$. Переходя к конечным приращениям, найдем

$$\left. \begin{aligned} \delta x &= \frac{h}{H} x \left(1 - \frac{y}{2f} \sin 2\varepsilon \right) \\ \delta y &= \frac{h}{H} y \left(1 - \frac{y}{2f} \sin 2\varepsilon \right) \end{aligned} \right\}. \quad (1.73)$$

Эти формулы позволяют найти проекции смещения точки снимка за рельеф на координатные оси x и y . Очевидно, что смещение

$$\delta r = \sqrt{\delta x^2 + \delta y^2}.$$

Учитывая значения δx и δy , а также $y = r \sin \varphi$, получим

$$\delta r = \frac{h}{H} r \left(1 - \frac{r \sin \varphi \sin 2\varepsilon}{2f} \right). \quad (1.74)$$

Если снимок плановый, то

$$\delta r = \frac{h}{H} r \left(1 - \frac{y}{f} \varepsilon \right). \quad (1.75)$$

Для горизонтального снимка

$$\delta r = \frac{h}{H} r. \quad (1.76)$$

Теперь рассмотрим угловые искажения, вызванные рельефом. Согласно рис. 39,

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{y}{x}.$$

Дифференцирование дает

$$\sec^2 \varphi d\varphi = \frac{x dy - y dx}{x^2}$$

или

$$\frac{x^2 + y^2}{x^2} \delta \varphi = \frac{x \delta y - y \delta x}{x^2}.$$

Отсюда

$$\delta\varphi = \frac{x \delta y - y \delta x}{r^2}. \quad (1.77)$$

Подставив сюда значения δx и δy из (1.73), найдем

$$\delta\varphi = 0,$$

т. е. направления, проведенные из точки надира, свободны от искажений, обусловленных рельефом местности.

Преобразуем формулы (1.73) применительно к случаю, когда начало координат на снимке находится в главной точке. Для этого вместо y подставим $y + f \operatorname{tg} \varepsilon$. Полагая, что снимок плановый, получим

$$\left. \begin{aligned} \delta x &= \frac{h}{H} x \left(1 - \frac{y}{f}\right) \varepsilon \\ \delta y &= \frac{h}{H} \left[y + \left(f + \frac{y^2}{f}\right) \varepsilon \right] \end{aligned} \right\}. \quad (1.78)$$

Используя эти значения δx и δy , подсчитаем по формуле (1.77) влияние рельефа местности на направления, проведенные из главной точки,

$$\delta\varphi = \frac{hxf}{Hr^2} \varepsilon. \quad (1.79)$$

Если выразить ε в градусах, а $\delta\varphi$ в минутах, то эта формула примет вид

$$\delta\varphi' = 60 \frac{hxf}{Hr^2} \varepsilon^0. \quad (1.80)$$

При $\varepsilon = 3^\circ$, $f = r = x$ и $h : H = 1 : 60$ искажение $\delta\varphi = 3'$.

§ 16. ВЛИЯНИЕ РЕФРАКЦИИ И КРИВИЗНЫ ЗЕМЛИ

При выводе основных формул фотограмметрии предполагалось, что луч света, идущий от точки объекта до центра проекции, прямолинеен. В действительности происходит искривление светового луча, так как он распространяется в среде переменной плотности. Это явление, называемое *рефракцией*, необходимо учитывать при обработке результатов точных фотограмметрических измерений.

Разделим атмосферу на ряд горизонтальных слоев и условимся считать эти слои и земную поверхность плоскими (рис. 42).

Из физики известно, что световой луч преломляется на границе двух сред разной плотности. При этом падающий и преломленный лучи лежат в плоскости, которая проходит через точку падения и нормальна к поверхности, разделяющей эти среды. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно обратному отношению абсолютных показателей преломления этих сред.

Сначала рассмотрим рефракцию применительно к случаю, когда фотографируемый объект бесконечно удален (звезда) и луч света проходит всю толщину земной атмосферы.

Пусть n, n_1, n_2, \dots, n_n — абсолютные показатели преломления слоев воздуха, i — угол падения на первый верхний слой, r_1 — угол преломления и угол падения на второй слой и т. д. Все элементы пути светового луча лежат в вертикальной плоскости, содержащей падающий луч. Наблюдатель в точке M видит звезду по направлению последнего элемента луча MN . При этом видимое зенитное расстояние равно ζ , а истинное — i ,

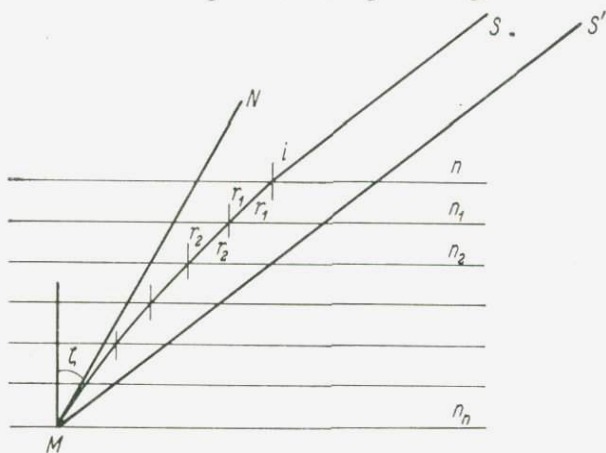


Рис. 42

так как лучи S и S' параллельны. Следовательно, рефракция уменьшает зенитное расстояние, т. е. приближает светило к зениту.

Обозначив влияние рефракции через R , напишем $R = i - \zeta$. При этом

$$\frac{\sin i}{\sin r_1} = \frac{n_1}{n}, \quad \frac{\sin r_1}{\sin r_2} = \frac{n_2}{n_1} \dots \frac{\sin r_{n-1}}{\sin \zeta} = \frac{n_n}{n_{n-1}}$$

После перемножения этих равенств получим

$$\frac{\sin i}{\sin \zeta} = \frac{n_n}{n} = v,$$

где v — относительный показатель преломления нижнего слоя воздуха. Заменив i равной величиной $R + \zeta$, напишем

$$\frac{\sin (R + \zeta)}{\sin \zeta} = v$$

или

$$\frac{\sin R \cos \zeta + \cos R \sin \zeta}{\sin \zeta} = v.$$

Далее имеем

$$\sin R = (v - \cos R) \operatorname{tg} \zeta.$$

Так как рефракция — малый угол, то можно принять $\cos R = 1$ и $R = R/\rho''$, где R выражено в секундах.

Введем обозначение

$$A = (v - 1) \rho'', \quad \rho'' = 206\,265,$$

тогда

$$R = A \operatorname{tg} \zeta.$$

Показатель преломления воздуха зависит от его плотности δ , а именно: разность между показателем преломления и единицей прямо пропорциональна плотности:

$$\frac{v - 1}{v_0 - 1} = \frac{\delta}{\delta_0}.$$

Но плотность воздуха зависит от его температуры и давления согласно закону Бойля — Мариотта — Гей-Люссака. Поэтому, если δ_0 соответствует нормальным условиям, т. е. температуре 0°C и давлению 760 мм рт. ст., то при температуре t и давлении B плотность δ можно вычислить так:

$$\frac{\delta}{\delta_0} = \frac{B}{760} \frac{1}{1 + kt},$$

где k — коэффициент расширения, равный 0,00369 или 1 : 271.

Следовательно,

$$A (v_0 - 1) \rho'' \frac{B}{760} \frac{1}{1 + kt}$$

или

$$A = (v_0 - 1) \rho'' \frac{B}{760} \frac{271}{271 + t}.$$

Величина v_0 равна 1,000292 при нормальных условиях и для желтой линии натрия D . Поэтому, учитывая, что

$$(v_0 - 1) \rho'' = 0,000292 \cdot 206\,265 = 60,23'',$$

получим

$$A = 60,23'' \frac{B}{760} \frac{271}{271 + t}. \quad (1.81)$$

В табл. 6 приведены величины A , вычисленные по этой формуле.

Формулу (1.81) не следует применять при больших зенитных расстояниях. В таких случаях необходимо пользоваться другими формулами, которые даются в курсах сферической астрономии.

Теперь рассмотрим влияние рефракции в случае, когда фотографируемый объект находится на конечном расстоянии от центра проекции и световой луч не выходит за пределы земной атмосферы.

На рис. 43 представлены: M — точка земной поверхности; S — центр проекции; MS — прямая, проходящая через эти две

В, мм	t°, C						
	-30	-20	-10	-0	+10	+20	+30
	A"						
300	26,9	25,6	24,6	23,7	23,0	22,0	21,4
350	31,1	29,8	28,8	27,9	26,9	25,9	24,9
400	35,6	34,3	33,0	31,8	30,5	29,5	28,5
450	40,2	38,6	36,9	35,6	34,3	33,4	32,1
500	44,7	42,8	41,1	39,5	38,2	36,9	35,6
550	48,9	47,0	45,4	43,7	42,1	40,5	39,2
600	53,5	51,5	49,2	47,6	46,0	44,4	42,8
650	58,0	55,7	53,5	51,5	49,6	48,0	46,3
700	62,5	59,9	57,7	55,4	53,5	51,8	49,9
750	66,7	64,1	61,9	59,6	57,3	55,4	53,5
800	71,3	68,4	65,8	63,5	61,2	59,0	57,0

точки; MFS — криволинейный путь луча в атмосфере; MT_1 — касательная к нему в точке M ; ST_2 — касательная к лучу в точке S .

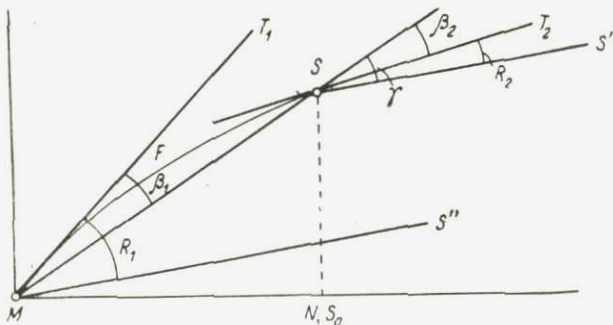


Рис. 43

Углы β_1 и β_2 между касательными и хордой MS представляют собой отклонения луча в точках M и S , вызванные рефракцией. Пусть MS'' и SS'' — прямые, параллельные последнему элементу луча MFS , который выйдет из верхнего слоя атмосферы в случае, когда центр проекции бесконечно удален от точки M . Обозначив через γ угол между прямой MS'' и прямой MS , напишем

$$R_1 = \gamma + \beta_1,$$

$$R_2 = \gamma - \beta_2.$$

Исключая угол γ , получим

$$\beta_1 + \beta_2 = R_1 - R_2.$$

Учитывая, что путь светового луча в атмосфере представляет собой кривую малой кривизны, и полагая, что высота фотографирования составляет малую долю толщи земной атмосферы, можно считать, что $\beta_1 = \beta_2$. Тогда

$$\lambda = (R_1 - R_2) = \frac{1}{2} (A_1 - A_2) \operatorname{tg} \zeta. \quad (1.82)$$

Следовательно, рефракция, вызванная слоем атмосферы между земной поверхностью и центром проекции, равна полуразности астрономических рефракций в точках M и S .

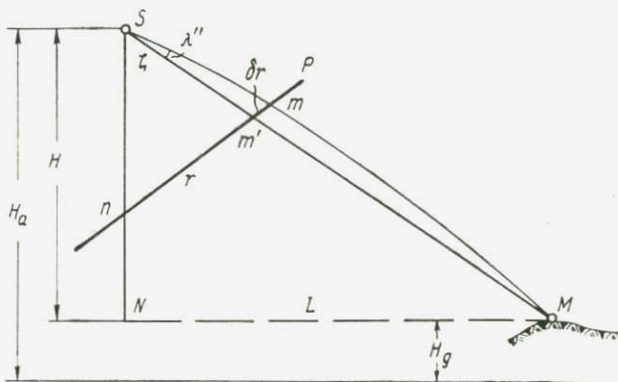


Рис. 44

Зенитное расстояние ζ , входящее в формулу для астрономической рефракции, в данном случае равно надирному расстоянию точки местности, т. е. $\zeta = \angle MSS_0$.

Пусть на земной поверхности давление $B = 765$ мм рт. ст. и температура $t = 15^\circ \text{C}$, а на высоте фотографирования $B = 410$ мм рт. ст. и $t = -15^\circ \text{C}$.

По табл. 6 найдем

$$A_1 = 57,5'', \quad A_2 = 34,4''.$$

Отсюда рефракция

$$\lambda'' = 12,6'' \operatorname{tg} \zeta.$$

Формула (1.82) для определения фотограмметрической рефракции предложена проф. Н. А. Урмаевым.

Фотограмметрическую рефракцию можно найти и по формуле Ашенбрэннера

$$\lambda'' = 3,1L [1 - 0,035 (3H_a - H)], \quad (1.83)$$

где H_a и H — высоты фотографирования в километрах относительно уровня моря и точки местности M (рис. 44), L — расстояние в километрах от точки N до точки M .

Формулы (1.82) и (1.83) позволяют получить достаточно точные результаты в случае, когда высота фотографирования не превышает 5 км.

Кроме Ашенбреннера, за рубежом влияние рефракции при аэрофотосъемке исследовали Шутте, Гаст, Лейонхувуд, Джонс и Берроу.

В настоящее время за границей часто используются формулы Лейонхувуда. При выводе их использована модель стандартной атмосферы *JCAN*: давление на уровне моря равно 760 мм рт. ст., абсолютная температура $T = 288^\circ \text{ К}$ (15° С), температура изменяется линейно с градиентом $0,65^\circ$ на 100 м до высоты 11 км, а от 11 до 30 км остается неизменной и равна $216,5^\circ \text{ К}$ ($-56,5^\circ \text{ С}$).

В формуле Лейонхувуда рефракция является функцией шести аргументов. И. Ф. Куштин предложил формулу, позволяющую определить рефракцию только по трем аргументам. Для стандартной атмосферы эта формула имеет такой вид:

$$\lambda'' = \frac{481,3'' \operatorname{tg} \zeta}{H_a - H_g} \left\{ (1 - 0,02257 H_g)^{5,253} - \left[1 + \frac{34,14 (H_a - H_g)}{288 - 6,5 H_a} \right] (1 - 0,02257 H_a)^{5,253} \right\}, \quad (1.84)$$

где H_a — абсолютная высота фотографирования,

H_g — высота точки местности M ,

ζ — угол между надирным и проектирующим лучами.

Значения, полученные по этой формуле, хорошо совпадают с величинами, найденными по формуле Лейонхувуда.

При фотографировании с больших высот

$$\lambda'' = \left[\frac{481,3''}{H_a - H_g} (1 - 0,02257 H_g)^{5,253} - \left(\frac{108,0}{H_a - H_g} + \frac{3686}{T_S} \right) e^{-34,15 \frac{H_a - 11}{T}} \right] \operatorname{tg} \zeta, \quad (1.85)$$

если высота фотографирования больше 11 км, и

$$\lambda'' = 481,3'' \frac{\operatorname{tg} \zeta}{H_a} e^{-0,1423 H_g}, \quad (1.86)$$

если высота фотографирования порядка 70 км и более.

В этих формулах:

T — среднее значение температуры для слоя атмосферы от 11 км до точки фотографирования S ,

T_S — температура в точке фотографирования,

ζ — зенитное расстояние.

Значения T и T_S можно найти в курсах метеорологии.

Если $H_g \leq 0,2$ км, то формулу (1.86) можно упростить:

$$\lambda'' = 481,3'' \frac{\operatorname{tg} \zeta}{H_a} \quad (1.87)$$

Формула (1.85) получена при предположении, что до 11 км атмосфера политропная с вертикальным градиентом температуры $\gamma = 6,5^\circ/\text{км}$, а выше 11 км — изотермическая. Формула (1.86) выведена для изотермической атмосферы с $T = 240^\circ \text{ К}$.

Пусть $H_a = 100$ км и $H_g = 0$. Тогда для $\zeta = 50^\circ$ получим $\lambda'' = 5,7''$.

Смещение точки m снимка, обусловленное рефракцией, направлено вдоль радиуса-вектора r , соединяющего эту точку с точкой надира n (см. рис. 44). Оно всегда приводит к увеличению радиуса-вектора.

Рис. 44 сделан в вертикальной плоскости, проходящей через точку фотографикования S и точку M местности. Здесь m — изображение точки M на снимке P . Если бы рефракции не было, то M изобразилась бы в точке m' . Таким образом, отрезок $m'm = \delta r$ — смещение точки снимка, вызванное рефракцией (рис. 45).

Для определения этого смещения сначала найдем зависимость между радиусом-вектором r и углом ζ (см. рис. 44), который составляет луч MS с надирным лучом Sn . Обозначив отрезки Sn и S_m через s_n и s , напишем

$$r = \sqrt{s_n^2 + s^2 - 2s_n s \cos \zeta}. \quad (1.88)$$

Величины s_n и s вычислим по пространственным координатам точек n и m

$$s_n = -Z'_n, \quad s = \sqrt{X'^2 + Y'^2 + Z'^2}. \quad (1.89)$$

Координаты X' , Y' и Z' точки снимка можно получить по формулам (1.6) как функции плоских координат x , y и угловых элементов внешнего ориентирования снимка.

Угол ζ найдем также по пространственным координатам точки m

$$\operatorname{tg} \zeta = \frac{\sqrt{X'^2 + Y'^2}}{Z'}. \quad (1.90)$$

Теперь продифференцируем (1.88) по ζ :

$$dr = \frac{1}{2} (s_n^2 + s^2 - 2s_n s \cos \zeta)^{-1/2} 2s_n s \sin \zeta d\zeta.$$

Заменив dr и $d\zeta$ на δr и λ , получим смещение точки снимка, вызванное рефракцией,

$$\delta r = \frac{s_n \sin \zeta}{\sqrt{s_n^2 + s^2 - 2s_n s \cos \zeta}} \lambda. \quad (1.91)$$

Если снимок горизонтальный, то

$$r = f \operatorname{tg} \zeta, \\ \delta r = \left(f + \frac{r^2}{f} \right) \lambda. \quad (1.92)$$

Пусть $H \leq 5$ км. Тогда, применив формулу (1.83) и учтя, что $\rho'' = 206\,265''$, а $L = mr$, получим

$$\delta r = 1,51 \cdot 10^{-11} m r \left(f + \frac{r^2}{f} \right) [1 - 0,035 (3H_a - H)], \quad (1.93)$$

где m — знаменатель масштаба снимка.

Чтобы получить δr в миллиметрах, нужны величины f и r выразить тоже в миллиметрах, а H_a и H — в километрах.

Формулу (1.93) можно использовать и для плановых снимков.

Искажения координат точки снимка, вызванные рефракцией, получим как проекции смещения δr на координатные оси x и y :

$$\left. \begin{aligned} \delta x &= \delta r \cos \varphi \\ \delta y &= \delta r \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (1.94)$$

(см. рис. 45). Здесь φ — угол, составленный радиусом-вектором с осью x . При этом

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{y - y_n}{x - x_n}, \quad (1.95)$$

где x_n и y_n — координаты точки надира n .

При выводе формулы фотограмметрической рефракции (1.84) атмосфера была разделена на ряд слоев, параллельных уровенной поверхности. Плотность воздуха в пределах каждого слоя считалась одинаковой. В этом случае луч находится в вертикальной плоскости, проходящей через точку фотографирования и точку местности, а точка снимка смещается по направлению из точки надира. В действительности, особенно вблизи поверхности земли, слои воздуха одинаковой плотности не всегда параллельны уровенной поверхности. Основной причиной наклона слоев является различная температура подстилающей поверхности. Вследствие этого траектория светового луча получается более сложной. Проектируя ее на вертикальную поверхность и перпендикулярную к ней плоскость, получим вертикальную и боковую рефракции. Исследования показали, что поправочные члены к выведенным выше формулам, учитывающие влияние наклона слоев воздуха одинаковой плотности, выражаются в десятых долях микрона.

Теперь рассмотрим влияние кривизны Земли на положение точки снимка.

На рис. 46 представлены: плановый снимок P , точка местности M и ее изображение m . Чертеж сделан в вертикальной плоскости, проходящей через точку фотографирования S и точку M .

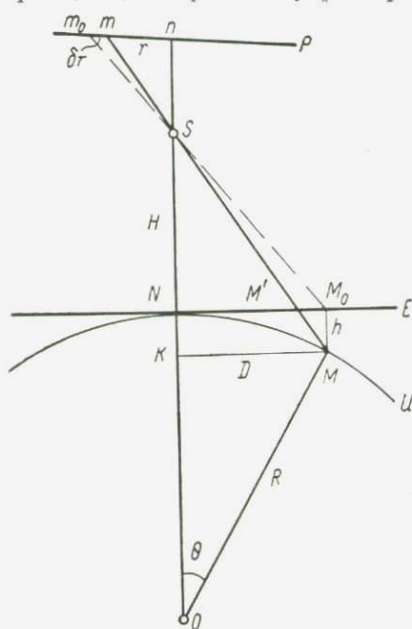


Рис. 46

Проведя прямую M_0S , получим на снимке точку m_0 , в которой изобразилась бы данная точка местности, если бы Земля была не сферой U , а плоскостью E .

Таким образом, смещение точки снимка, вызванное кривизной Земли, направлено к точке надира n и выражается отрезком $m_0m = \delta r$.

Для определения этого смещения используем формулу (1.76).

$$\delta r = \frac{h}{H} r,$$

полагая, что $h = M_0M$. В этой формуле H — высота фотографирования над плоскостью E , а $r = nm$.

Как следует из чертежа,

$$h = ON - OK = R(1 - \cos \theta) = \frac{1}{2} R \theta^2.$$

Но

$$\theta = \frac{D}{R} = \frac{Hr}{Rf}.$$

Поэтому

$$h = \frac{H^2 r^2}{2Rf^2}$$

и

$$\delta r = \frac{Hr^3}{2Rf^2} \quad (1.96)$$

Пусть $H = 15$ км, $f = r = 100$ мм. Полагая $R = 6000$ км, получим $\delta r = 0,13$ мм.

Кроме атмосферной рефракции и кривизны Земли на положение точки снимка влияют деформация снимка, дисторсия объектива съемочной камеры и невыравнивание пленки в плоскость.

Различают систематическую и случайную деформацию снимка.

Систематическая деформация вызывает аффинное преобразование снимка. Она может быть равномерной или неравномерной. При равномерной систематической деформации квадрат на снимке преобразуется в квадрат, изменяя только размеры. При неравномерной систематической деформации квадрат преобразуется в прямоугольник.

Аэропленке свойственна неравномерная деформация. Она характеризуется разностью деформаций вдоль и поперек фильма.

Случайная деформация не подчиняется закону аффинного преобразования. Как правило, она меньше систематической.

Деформация обычной фотобумаги в 2—3 раза больше деформации аэропленки. Специальная фотобумага с металлической прослойкой практически не деформируется.

Способ определения деформации фотоматериалов изложен в гл. 4.

Дисторсия современных аэросъемочных объективов мала, не больше 15 мкм. Поэтому она учитывается лишь в случае высокоточных измерений снимков, например в пространственной фототриангуляции.

Влияние дисторсии на положение точки снимка рассмотрено в гл. 13.

§ 17. ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ПАНОРАМНОГО СНИМКА

Выше были получены основные формулы для обычно применяемых в фотограмметрии снимков, представляющих собой центральные проекции сфотографированного объекта на плоскость. Однако для специальных работ используются и панорамные, или цилиндрические, снимки, которые получают с помощью панорамных камер и представляют собой центральные проекции на поверхность цилиндра.

Основным и весьма существенным достоинством панорамных камер по сравнению с обычными является большой угол поля зрения — до 360° .

Зависимость между координатами точки местности и координатами ее изображения на цилиндрическом снимке можно получить путем преобразования соответствующих формул, выведенных для плоскостного снимка. С этой целью найдем связь между координатами соответственных точек a и a' плоскостного P и цилиндрического P' снимков, имеющих общий центр проекции S и расположенных взаимно так, как показано на рис. 47.

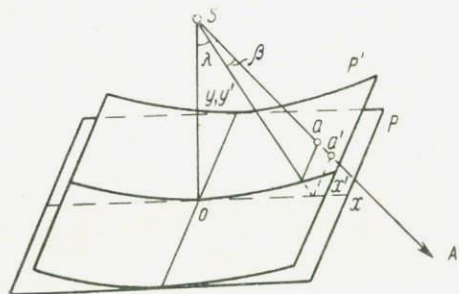


Рис. 47

Радиус цилиндрической поверхности снимка P' равен фокусному расстоянию f фотокамеры, с помощью которой получен снимок P . Пусть oxy — координатная система плоскостного снимка и ось x совпадает с образующей цилиндрического снимка. За начало координат на снимке P' выберем точку o , совмещающуюся с главной точкой снимка P , за ось y' — образующую, совпадающую с осью y , а за ось x' — след плоскости Soy на снимке P' . Координаты точек a и a' обозначим через x, y и x', y' .

Из рис. 47 следует

$$x = f \operatorname{tg} \lambda,$$

$$y = \frac{f}{\cos \lambda} \operatorname{tg} \beta,$$

где λ и β — координаты направления Sa . Так как

$$\lambda = \frac{x'}{f},$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{y'}{f},$$

то

$$\left. \begin{aligned} x &= f \operatorname{tg} \frac{x'}{f} \\ y &= \frac{y'}{\cos \frac{x'}{f}} \end{aligned} \right\} \quad (1.97)$$

Формулы (1.97) выражают зависимость между координатами соответственных точек обычного и панорамного снимков.

Подставив значения x и y из (1.97) в выражения (1.19) и полагая $x_0 = y_0 = 0$, получим формулы связи между координатами

точки местности и координатами ее изображения на панорамном снимке:

$$\left. \begin{aligned} X - X_0 &= (Z - Z_0) \frac{a_1 f \operatorname{tg} \frac{x'}{f} + a_2 y' \sec \frac{x'}{f} - a_3 f}{c_1 f \operatorname{tg} \frac{x'}{f} + c_2 y' \sec \frac{x'}{f} - c_3 f} \\ Y - Y_0 &= (Z - Z_0) \frac{b_1 f \operatorname{tg} \frac{x'}{f} + b_2 y' \sec \frac{x'}{f} - b_3 f}{c_1 f \operatorname{tg} \frac{x'}{f} + c_2 y' \sec \frac{x'}{f} - c_3 f} \end{aligned} \right\}. \quad (1.98)$$

Если угловые элементы внешнего ориентирования панорамного снимка равны нулю, то эти формулы принимают вид

$$\left. \begin{aligned} X - X_0 &= (Z_0 - Z) \operatorname{tg} \frac{x'}{f} \\ Y - Y_0 &= (Z_0 - Z) \frac{y'}{f} \sec \frac{x'}{f} \end{aligned} \right\}. \quad (1.99)$$

Масштаб в произвольной точке $a(x', y')$ панорамного снимка по направлению, составляющему угол φ с осью x' , можно найти по формуле

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \left(\cos \varepsilon \cos \frac{x'}{f} - \frac{y'}{f} \sin \varepsilon \right) \left[\left(\cos \frac{x'}{f} \sin \varphi + \frac{y'}{f} \sin \frac{x'}{f} \cos \varphi \right)^2 + \left(\cos \varepsilon \cos \varphi - \frac{y'}{f} \sin \varepsilon \cos \frac{x'}{f} \cos \varphi + \sin \varepsilon \sin \frac{x'}{f} \sin \varphi \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (1.100)$$

где H — высота фотографирования над точкой местности, соответствующей точке a , а ε — угол наклона снимка, составленный главным лучом S_0 с отвесной линией, проходящей через центр проекции S .

Если $\varepsilon = 0$, то

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \frac{\cos^2 \frac{x'}{f}}{\sqrt{\cos^2 \varphi + \left(\cos \frac{x'}{f} \sin \varphi + \frac{y'}{f} \sin \frac{x'}{f} \cos \varphi \right)^2}}. \quad (1.101)$$

Отсюда следует, что масштаб панорамного снимка равнинной местности — величина переменная не только в случае, когда оптическая ось S_0 фотокамеры наклонена, но и в случае, когда она занимает вертикальное положение.

Горизонтальный угол ψ на местности, соответствующий углу φ на панорамном снимке, можно получить по формуле

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \psi &= \\ &= \frac{\cos \frac{x'}{f} \operatorname{tg} \varphi + \frac{y'}{f} \sin \frac{x'}{f}}{\left(\cos \varepsilon \cos \frac{x'}{f} - \frac{y'}{f} \sin \varepsilon \right) \cos \frac{x'}{f} + \left(\cos \varepsilon \sin \frac{x'}{f} + \sin \varepsilon \operatorname{tg} \varphi \right) \sin \frac{x'}{f}}, \end{aligned} \quad (1.102)$$

где x' и y' — координаты вершины угла φ .

НАБЛЮДЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ СНИМКОВ

§ 18. ГЛАЗ И ЗРИТЕЛЬНЫЕ ОЩУЩЕНИЯ

Окружающие объекты люди познают посредством органов чувств, из которых для фотограмметристов особое значение имеет зрительный аппарат — глаз.

Все способы наблюдения и измерения снимков основаны на свойствах глаза. Особенности зрения используются и при создании систем для автоматической обработки снимков.

Изучению устройства и свойств зрительного аппарата посвящен капитальный труд чл.-корр. АН СССР С. В. Кравкова «Глаз и его работа».

Глаз состоит из трех оболочек, хрусталика и стекловидного тела (рис. 48).

Белая наружная оболочка — *склера* обеспечивает глазу сохранение формы шара и защищает его внутренние части от внешних воздействий. Передняя часть склеры, называемая *роговой оболочкой*, или *роговицей*, более изогнута и прозрачна.

Под склерой находится *сосудистая оболочка*, состоящая из кровеносных сосудов, питающих глаз. Спереди эта оболочка утолщается и переходит в *ресничное тело* и *радужную оболочку*, в состав которых кроме кровеносных сосудов входят пигментные клетки и мышечные волокна. В середине радужной оболочки имеется отверстие — *зрачок*, играющий роль диафрагмы фотографического аппарата. Под воздействием мышц радужной оболочки зрачок может расширяться или сужаться.

Следующая оболочка выстилает внутреннюю поверхность глаза и называется *сетчаткой*. В сетчатке различают десять слоев, из которых для нас особо важное значение имеет второй слой, раздражение которого вызывает зрительные ощущения. Этот слой состоит из *палочек* и *колбочек*, представляющих собой окончания разветвлений зрительного нерва. Палочки и колбочки распределены по сетчатке неравномерно. В середине сетчатки преобладают колбочки, а в боковых частях ее — палочки.

Чрезвычайно важный участок сетчатки — желтое пятно является местом наиболее ясного видения. Оно лежит несколько ближе к виску и вверх от места вхождения зрительного нерва, называемого слезным пятном. Желтое пятно состоит главным образом из колбочек.

В середине желтого пятна имеется *центральная ямка*, диаметр которой около 0,4 мм. В ней находятся только колбочки. Колбочки лежат здесь очень тесно и имеют наименьший диаметр по сравнению с другими — 1–5 мкм.

Слепое пятно не имеет ни палочек, ни колбочек. Диаметр слепого пятна 1,3—1,8 мм. Обычно мы не замечаем в поле зрения глаза пробелов, вызванных слепым пятном, так как изображению, попадающему на это пятно в одном глазу, в другом соответствует изображение, расположенное за пределами слепого пятна.

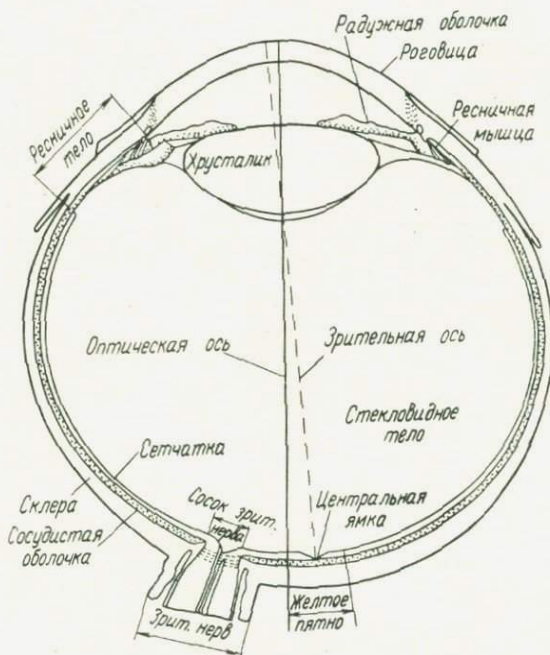


Рис. 48

Хрусталик представляет собой прозрачную слегка желтоватую, двояковыпуклую линзу. Он служит для построения на сетчатке изображений наблюдаемых объектов. Таким образом, хрусталик играет роль фотографического объектива.

Чтобы получить на пластинке в фотоаппарате резкое изображение близких или дальних предметов, приходится, как известно, фокусировать фотоаппарат движением объектива относительно кассеты. Человеческий глаз тоже приспособляется при собирании в фокус на сетчатке лучей от предметов, находящихся на различных расстояниях от глаза. Этот процесс называется *аккомодацией*. Аккомодация глаза достигается изменением с помощью ресничной мышцы кривизны хрусталика.

Границы, в которых глаз в состоянии аккомодировать и благодаря этому ясно видеть, определяются ближней и дальней точками ясного зрения. Ближней точке соответствует то расстояние, ближе которого глаз при всем напряжении ресничной мышцы

не может отчетливо видеть предметы. Дальняя точка находится на таком расстоянии от глаза, с которого он при полном покое аккомодационной мышцы способен четко видеть предмет. Пространство между ближней и дальней точками ясного зрения, в пределах которых глаз может аккомодировать, называется *областью, или длиной аккомодации*. Для нормального глаза дальняя точка лежит в бесконечности, для близорукого и дальнозоркого — на конечном расстоянии.

С возрастом хрусталик теряет свою эластичность и ближняя точка ясного зрения отодвигается: развивается старческая дальнозоркость. Удаление ближней точки от роговицы меняется с возрастом в пределах от 8 см (10 лет) до 100 см (70 лет).

Процесс аккомодации происходит не мгновенно, а в течение 0,5—1,0 с. При переводе взора с близкого предмета на дальний аккомодация происходит быстрее, чем в обратном направлении.

Наблюдатель с нормальным зрением держит книгу при чтении на расстоянии 25 см от глаз. На такое же расстояние помещают снимки и другие предметы, когда их желают детально рассмотреть. Это расстояние называется *расстоянием наилучшего зрения*. Для близоруких расстояния наилучшего зрения меньше нормального, для дальнозорких — больше. Чтобы близорукие и дальнозоркие могли ясно видеть предметы с расстояния 25 см, им необходимо пользоваться очками.

Пространство глазного яблока заполнено студенистым прозрачным веществом — стекловидным телом.

Расстояние от задней узловой точки хрусталика (глаза) до середины центральной ямки изменяется в пределах от 12 до 16 мм, в зависимости от аккомодации.

Прямая, проходящая через центры кривизны поверхностей роговицы и хрусталика, называется *оптической осью глаза*, а прямая, проходящая через середину центральной ямки и заднюю узловую точку, — *зрительной осью глаза*. Угол между этими осями равен 5° .

С помощью мышц глазное яблоко поворачивается вправо и влево, вверх и вниз.

Зрительный нерв представляет собой соединение нервных волоконцев, идущих от сетчатки. Каждая колбочка центральной ямки соединена с отдельным нервным волоконцем. На периферии с одним волоконцем связаны сотни палочек и колбочек. Нервные волокна, составляющие зрительный нерв, направляются от глазного яблока к коре большого мозга.

Раздражителем глаза, вызывающим зрительные ощущения, является свет. Обычно глаз ощущает электромагнитные волны длиной 396—760 нм. Однако цвета спектра воспринимаются неодинаково по их яркости. Максимум цветовой чувствительности глаза лежит в желтой области спектра (555 нм).

Раздражения, получаемые на сетчатке при дневном зрении, воспринимаются с помощью колбочек, а при сумеречном — с по-

мощью палочек. При яркости больше 30 лк на белой поверхности работают почти исключительно колбочки.

Восприятие цветов объясняется теорией трехкомпонентности цветового зрения. Согласно этой теории, в глазу существуют три вида нервных аппаратов. Возбуждение одного из них дает ощущение красного цвета, другого — зеленого цвета, третьего — синего цвета. Обычно свет действует на все три или на два аппарата. При этом волны различной длины возбуждают эти аппараты в различной степени. Глаз как бы анализирует воздействующие на него спектры предметов, оценивая участие в них коротковолновых, средневолновых и длинноволновых лучей. Кора головного мозга синтезирует эти относительные величины красного, зеленого и синего возбуждений, в результате чего мы видим цвет предмета.

Между моментом воздействия света на сетчатку и моментом возникновения зрительного ощущения проходит некоторое время, называемое *временем ощущения* (0,1—0,25 с).

Зрительное ощущение вначале быстро возрастает, достигая некоторого максимума яркости, а затем постепенно тускнеет, понижаясь до более или менее стационарного уровня. Этим объясняется то, что несколько кратких световых раздражений заметнее для глаза, чем одно продолжительное (при одинаковой интенсивности раздражителей и длительности продолжительного раздражения, равной суммарной длительности отдельных кратких световых вспышек).

Зрительное ощущение не исчезает одновременно с прекращением раздражения. Например, отведя взор от яркой лампы, мы видим ее еще некоторое время.

Когда на глаз действует периодически прерывающийся раздражитель, возникает неприятное *ощущение мигания*. Однако если свет прерывается достаточно часто, со создается ощущение не мигания, а ровного света. Например, мы не замечаем мигания электрического освещения, если накад лампы меняется 50 раз в секунду.

Минимальная частота прерывов света в секунду, при которой наступает слияние мельканий, называется *критической частотой мельканий*. Она изменяется от 10 до 45 в зависимости от освещенности сетчатки.

Глаз, как и любой оптический прибор, имеет недостатки: неполную центровку, сферическую и хроматическую аберрации. Вследствие этих недостатков наблюдаемая точка изображается на сетчатке не в виде точки, а в виде кружка.

Получению от точечного объекта строго точечного изображения на сетчатке мешает и *явление дифракции света*, вызываемое интерференцией световых волн. Свет, идущий от точки, пройдя зрачок, дает на сетчатке изображение в виде кружка, окруженного рядом световых колец, яркость которых резко убывает.

Из физики известно, что диаметр D центрального светлого кружка зависит от диаметра d отверстия (зрачка), через которое

проходит свет, длины волны светового луча λ и расстояния l отверстия от экрана (сетчатки):

$$D = 2,44 \frac{\lambda l}{d}. \quad (2.1)$$

Отсюда следует, что с увеличением зрачкового отверстия диаметр дифракционного кружка светорассеяния уменьшается. Однако увеличение диаметра зрачка вызывает увеличение кругов светорассеяния, обусловленных *сферической аберрацией*. Следовательно, зависимости аберрации и дифракции от величины зрачка являются обратными. Наилучшему зрению соответствует диаметр зрачка, равный 2—4 мм.

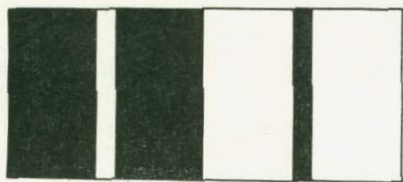


Рис. 49

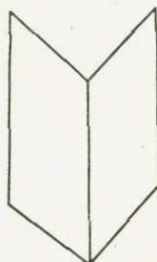


Рис. 50

Работе глаза несколько вредит и светорассеяние в нем, особенно заметное при наблюдении ярких предметов, находящихся на темном фоне.

Недостатки глаза вызывают явление *иррадиации*, которое играет большую роль в нашем зрении и состоит в следующем. В результате образования кругов светорассеяния очертание изображений на сетчатке никогда не бывает вполне резким; граница светлого и темного очертаний размыта и мы видим ее не там, где она находится в действительности, а несколько смещенной в ту или другую сторону. Границы светлого объекта мы видим или расширенными (положительная иррадиация), или суженными (отрицательная иррадиация).

Пример положительной зрительной иррадиации можно наблюдать на рис. 49. Белая полоска на этом рисунке кажется шире черной, хотя на самом деле ширина обеих полос одинакова. Кроме зрительной, бывает фотографическая иррадиация, которая состоит в том, что ширина дороги или другого объекта, измеренная по снимку, оказывается больше или меньше, чем в натуре.

К иллюзорным восприятиям относятся также и изменяющиеся восприятия нарисованного рельефа. Например, рис. 50 мы видим как раскрытую книгу, лежащую корешком то к нам, то от нас. Эти изменения могут наступать как по нашему желанию, так и произвольно, порой даже наперекор нашей воле. Зрительная иллюзия изменения рельефа здесь происходит, вероятно, от из-

менения аккомодации: то, что мы фиксируем и на что, следовательно, аккомодируем глаза, кажется нам ближе.

Глаз, в котором параллельно падающие на него лучи не фокусируются в одной точке вследствие различной кривизны роговицы в разных меридианах, называется *астигматическим*. Чтобы убедиться в наличии или отсутствии астигматизма, достаточно посмотреть одним глазом с расстояния наилучшего зрения на концентрические окружности (рис. 51). При астигматизме одновременно будут четко видны лишь отдельные секторы диска, а остальная часть диска покажется расплывчатой. Астигматизм исправляется установкой перед глазом цилиндрических линз.

У некоторых лиц один и тот же объект для одного глаза кажется больше, чем для другого, несмотря на равенство расстояний от объекта до глаз. Такое явление зависит от диоптрических особенностей глаз и называется *анизэйконией*. Она может оказывать вредное влияние при стереоскопическом рассматривании снимков.

Анизэйкония исправляется особыми стеклами, изменяющими величину изображений на сетчатке.

Несмотря на отмеченные выше недостатки, глаз является совершенным зрительным аппаратом, позволяющим объективно познавать окружающие нас предметы и явления, в частности с высокой точностью наблюдать и измерять снимки.

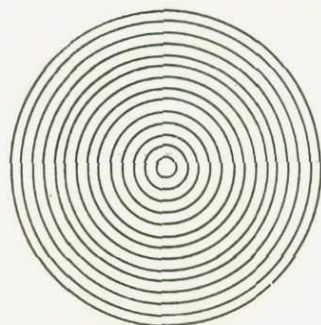


Рис. 51

§ 19. МОНОКУЛЯРНОЕ ЗРЕНИЕ

Наблюдатель подсознательно устанавливает глаз так, чтобы изображение рассматриваемого объекта было в наиболее чувствительном месте сетчатки — в центральной ямке желтого пятна (рис. 52).

Пересечение зрительной оси глаза с рассматриваемым предметом O называется *точкой фиксации* монокулярного взора F .

Поле зрения неподвижного глаза довольнообширно: 150° по горизонтали и 120° по вертикали. Однако боковые предметы глаз видит неясно.

Угол, составленный лучами, идущими из задней узловой точки глаза к краям центральной ямки, равен $1,5^\circ$ (при наблюдении удаленных объектов) и называется *углом отчетливого зрения*.

Чтобы охватить зрением большие предметы, мы поворачиваем глаз, т. е. переводим его зрительную ось с одной точки на другую.

Две светящиеся точки не воспринимаются отдельно, если их изображения образуются на одной колбочке, так как каждая

колбочка передает мозгу только одно ощущение. Две точки видны раздельно только в том случае, если между их изображениями на сетчатке имеется нераздраженная клеточка — колбочка или палочка. Таким образом, предельная острота зрения характеризуется углом, под которым из задней узловой точки глаза виден диаметр колбочки.

Минимальный угол, под которым наблюдатель еще видит раздельно две светящиеся точки, определяет *остроту монокулярного зрения первого рода*. Опытным путем получено, что для нормального глаза этот угол равен $45''$.

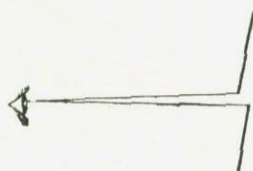
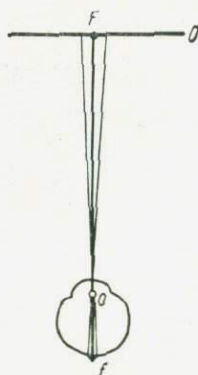


Рис. 53

Рис. 52

Остроту монокулярного зрения второго рода характеризует минимальный угол, под которым глаз раздельно видит две параллельные линии. Для вертикальных линий этот угол равен $20''$ (рис. 53).

Острота зрения при наблюдении линий повышается потому, что линия изображается на целой группе колбочек. Вследствие этого видно, например, телеграфный провод на расстоянии, во много раз превышающем то расстояние, с которого можно видеть шарик, диаметр которого равен сечению провода. Черную нить на светлом фоне можно заметить даже при ее угловой толщине около $0,5''$.

Приведенные выше значения остроты монокулярного зрения относятся к случаю, когда изображения предметов попадают в центральную ямку. Острота зрения зависит от освещенности и формы объектов, от контрастности между объектами и фоном, опытности наблюдателя и от многих других факторов. Величина ее у различных наблюдателей и в различных условиях наблюдения колеблется в больших пределах — от нескольких секунд и даже десятых секунды до десяти минут.

Воспринимать глубину, т. е. оценивать расстояния до наблюдаемых предметов, при монокулярном зрении можно с помощью *косвенных признаков*. Например, если один предмет частично закрывает другой, то считаем, что он ближе к нам, чем другой.

Законы перспективы также помогают нам оценивать удаленность объектов. Когда в поле зрения имеется ряд объектов одинаковой величины, то расстояния до этих объектов оцениваем по сравнительной величине их кажущихся размеров. Так определяем расстояния вдоль полотна железной дороги по кажущемуся уменьшению ширины дороги или высоты телеграфных столбов.

Тени, отбрасываемые предметами, и уменьшение яркости и выпуклости отдаленных объектов вследствие поглощения света атмосферой тоже способствуют восприятию глубины.

Определять расстояния до близких предметов помогает еще аккомодация глаза. Чем ближе к наблюдателю предмет, тем интенсивнее напрягаются мускулы, изменяющие кривизну хрусталика. Каждому расстоянию от глаза до объекта соответствует определенное сокращение мускулов. Это позволяет нам судить о глубине, подобно тому как сокращение мускулов руки дает понятие о тяжести поднимаемых предметов.

Косвенные признаки оценки глубины одним глазом дают приблизительно, а иногда и вовсе неверное представление о расстояниях. Точную оценку глубины обеспечивает прямой ее признак — физиологический параллакс, который возникает при бинокулярном зрении.

§ 20. БИНОКУЛЯРНОЕ ЗРЕНИЕ

Зрение двумя глазами имеет существенное значение для восприятия пространственных соотношений рассматриваемых предметов.

При бинокулярном зрении наблюдатель устанавливает глаза так, чтобы их зрительные оси пересекались в том месте предмета, которое он желает отчетливо рассмотреть (рис. 54).

Точка пересечения зрительных осей F называется *точкой фиксации бинокулярного взора*. Изображения точки фиксации F находятся в центральных ямках f_1 и f_2 .

Расстояние между передними узловыми точками глаз o_1 и o_2 называется *глазным базисом*. Величина глазного базиса у различных людей различна и колеблется в пределах от 58 до 72 мм; среднее значение глазного базиса считается равным 65 мм.

Изображения одной и той же точки предмета, полученные на сетчатках обоих глаз, называются *соответственными точками*,

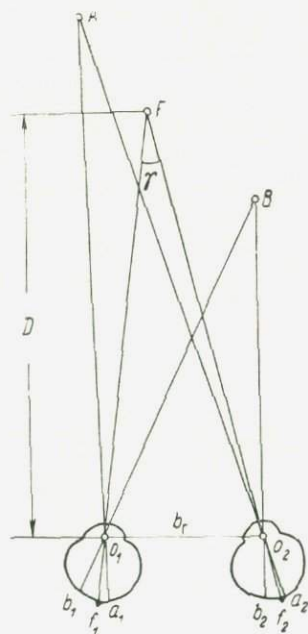


Рис. 54

а лучи, строящие эти изображения и проходящие через узловые точки, — *соответственными лучами*.

Любая пара соответственных лучей, например Aa_1 и Aa_2 , находится в одной плоскости, проходящей через глазной базис и называемой *зрительной плоскостью*. Плоскость, в которой лежат зрительные оси обоих глаз, называется *главной зрительной плоскостью*. Положение этой плоскости определяется узловыми точками o_1 и o_2 и точкой фиксации F .

Угол между зрительными осями глаз называется *углом конвергенции*, а угол между парой соответственных лучей — *параллактическим углом*. Эти углы для нормального зрения малы, особенно при наблюдении удаленных объектов. Поэтому их можно определять по приближенной формуле

$$\gamma = \frac{b_r}{D}, \quad (2.2)$$

где b_r — глазной базис, а D — расстояние до рассматриваемой точки.

Если точка находится на расстоянии наилучшего зрения, то параллактический угол равен 15° . При близорукости расстояние наилучшего зрения уменьшается иногда до 8 см, а значение параллактического угла возрастает до 40° .

Конвергенция зрительных осей физиологически связана с аккомодацией глаз. Эта связь заключается в том, что определенное состояние аккомодации стремится вызвать и определенную степень сведения зрительных осей и, наоборот, тому или иному сведению зрительных осей соответствует определенная степень аккомодации. Однако связь между конвергенцией и аккомодацией не является весьма строгой.

Бинокулярное зрение обладает двумя замечательными свойствами. Первым свойством является слияние в нашем зрительном впечатлении двух изображений, получаемых на сетчатках, в одно пространственное изображение. Второе свойство — оценка глубины, т. е. удаленности наблюдаемых объектов. Эти свойства тесно связаны с понятиями о симметричных и несимметричных точках на сетчатках, а также с физиологическим параллаксом.

Симметричные точки — такие точки сетчаток, которые лежат в одном и том же направлении и на одном и том же расстоянии относительно соответствующих центральных ямок сетчаток. Например, точки a_1 и a_2 на рис. 55 — пара симметричных точек. Положение их на сетчатках вполне определяется направлением и величиной дуг f_1a_1 и f_2a_2 . К симметричным точкам относятся, очевидно, и центральные ямки сетчаток.

Точки сетчаток, лежащие на различных расстояниях от центральных ямок, называются *несимметричными*. На рис. 55 точки b_1 и b_2 несимметричны.

Если точка фиксации и какая-либо другая рассматриваемая точка, например точки F и A на рис. 55, находятся в бесконеч-

ности, то изображения каждой из этих точек получаются на симметричных точках сетчаток.

Точка фиксации изображается на симметричных точках сетчаток и при любом другом положении ее в пространстве (см. рис. 54 и 55).

Совокупность всех точек пространства, которые при заданном положении точки фиксации дают изображения на симметричных точках сетчаток, называется *горроптером*. Для различных положений точки фиксации горроптер имеет различную форму.

Раздражение симметричных точек сетчаток всегда вызывает впечатление одиночного предмета. В этом случае два изображения всегда сливаются в нашем зрительном впечатлении в одно.

Если изображение предмета падает в обоих глазах на несимметричные точки, то тогда на сетчатках могут возникнуть двойные изображения. В существовании их легко убедиться на

следующем опыте. Возьмем в руки два карандаша и будем их держать перед глазами так, чтобы они находились приблизительно в медиальной плоскости головы и стояли друг за другом на расстоянии 15—20 см. Будем фиксировать глазами дальний карандаш. Изображения ближнего карандаша получаются на несимметричных точках сетчаток: в левом глазу — влево от центральной ямки, в правом глазу — вправо от нее. Поэтому ближний карандаш мы увидим двойным. Если же взор фиксировать на ближнем карандаше, то двойным представится дальний карандаш.

Однако при раздражении несимметричных мест сетчаток двойное изображение не всегда. Если несимметричность раздраженных мест сетчаток не чрезмерна, то вместо двоения может возникнуть впечатление большей или меньшей удаленности данного объекта по сравнению с фиксируемым. Перемещая в указанном опыте ближний карандаш по направлению к дальнему, можно установить их в такое взаимное положение, при котором двоение исчезнет и представится возможность оценить расстояние между карандашами.

Опыт показал, что не делятся только те точки рассматриваемых предметов, параллактические углы которых не

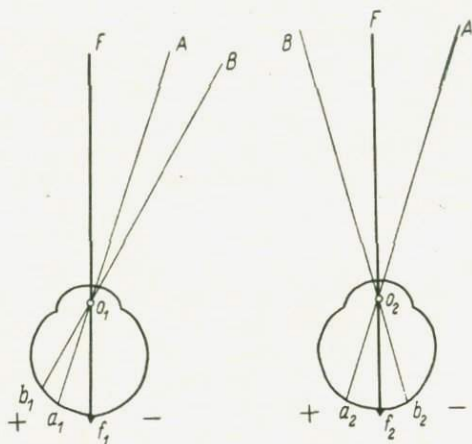


Рис. 55

отличаются от параллактического угла точки фиксации больше чем на $70'$:

$$|\gamma - \gamma_F| \leq 70'. \quad (2.3)$$

Основным фактором оценки глубины при бинокулярном зрении является *физиологический параллакс*, представляющий собой разность дуг, определяющих положение пары соответственных точек на сетчатках. Например, физиологический параллакс точки A (см. рис. 54)

$$\eta = \sphericalangle f_1 a_1 - \sphericalangle f_2 a_2.$$

Дуга считается положительной, если она расположена слева от центральной ямки.

Физиологический параллакс точки фиксации всегда равен нулю. Значение физиологического параллакса для какой-либо другой точки рассматриваемого предмета зависит от положения ее относительно точки фиксации. Если физиологический параллакс $\eta < 0$, то наблюдатель видит, что соответствующая точка (точка A) расположена дальше точки фиксации. Если же $\eta > 0$, то наблюдатель видит, что соответствующая точка (точка B) лежит ближе точки фиксации. Для всех точек, находящихся на горизонте, физиологический параллакс равен нулю. Поэтому мы не замечаем удаления точек горизонта относительно точки фиксации.

Таким образом, при заданной точке фиксации бинокулярного зрения наблюдатель отчетливо видит только те предметы, которые

находятся в поле отчетливого зрения глаз и которые имеют параллактические углы, отличающиеся от параллактического угла точки фиксации не более чем на $70'$. На рис. 56 область отчетливого бинокулярного зрения при данной точке фиксации заштрихована. Если не все рассматриваемые предметы попадают в эту область, то наблюдатель непрерывно меняет точку фиксации.

Боковые отклонения зрительных осей составляют 45° . Вследствие этого возникают разность расстояний от глаз до наблюдаемого предмета и разность масштабов его изображений на сетчатках глаз. Максимальное значение этой разности равно 16% , оно образуется, когда угол отклонения зрительной оси имеет предельную величину, а расстояние до объекта равно расстоянию наилучшего зрения. Это значение разности масштабов изображений не вызывает двоения рассматриваемого предмета.

Двоение наблюдаемой точки возникает также и в случае, когда ее изображения попадают на несоответственные параллели сетча-

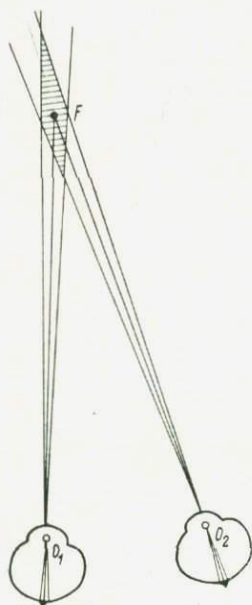


Рис. 56

ток, т. е. когда зрительные оси глаз не лежат в одной плоскости. Такого двоения у человека с нормальным зрением при наблюдении в естественном пространстве не бывает. Оно может возникнуть в процессе стереоскопического рассматривания снимков, если не выполнены некоторые условия, которые будут изложены ниже. Это двоение можно также вызвать искусственным путем, слегка нажимая при наблюдении какого-либо объекта на нижнюю часть глазного яблока. Тогда изображение на сетчатке сдвинется в вертикальном направлении и объект увидим двойным.

Пусть отчетливо видна разность глубин точек A и F (см. рис. 54) и точка A движется по направлению к точке фиксации F . По мере приближения точки A к точке F будем ощущать уменьшение разности глубин этих точек. Наконец, точка A займет такое положение, при котором будет казаться, что она и точка F находятся на одинаковом удалении от нас, хотя в действительности разность глубин данных точек не равна нулю. Это явление объясняется ограниченностью остроты бинокулярного зрения.

Остротой бинокулярного зрения первого рода называется наименьшая разность параллактических углов двух точек, при которой еще заметна разность глубин этих точек. Опытным путем установлено, что острота бинокулярного зрения первого рода равна $30''$.

Пусть разность параллактических углов точек A и F равна остроте бинокулярного зрения $\Delta\gamma$. Найдем разность глубин, соответствующую этой разности параллактических углов.

Согласно формуле (2.2) и рис. 54, для точки фиксации напишем

$$D = \frac{b_r}{\gamma}, \quad (2.4)$$

откуда

$$\Delta D = -D^2 \frac{\Delta\gamma}{b_r}. \quad (2.5)$$

Таблица 7

$D, \text{ м}$	$\Delta D_1, \text{ мм}$	$\Delta D_2, \text{ мм}$
0,3	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$
1,0	2,2	0,7
5,0	56	19
10,0	220	73
15,0	500	166

Следовательно, минимальная разность глубин, воспринимаемая при бинокулярном зрении, пропорциональна квадрату расстояния до точки фиксации.

Остротой бинокулярного зрения второго рода называется наименьшая разность параллактических углов для двух вертикальных прямых, при которой еще заметна разность глубин этих прямых. опыты показали, что острота бинокулярного зрения второго рода равна $10''$.

В табл. 7 приведены минимальные разности глубин, вычисленные по формуле (2.5) для двух случаев: 1) когда наблюдаются точки (ΔD_1) и 2) когда рассматриваются вертикальные прямые (ΔD_2).

Острота бинокулярного зрения у людей различна. Кроме того, она зависит от освещенности наблюдаемых предметов,

контрастности их относительно фона, формы предметов, продолжительности рассматривания их и от других факторов. Приведенные выше значения остроты бинокулярного зрения являются средними для наблюдателей с нормальными глазами, рассматривающих объекты в благоприятных условиях. Эти величины приняты в фотограмметрии для расчета.

Пусть точка фиксации удалена от наблюдателя настолько, что параллактический угол равен остроте бинокулярного зрения $30''$. В этом случае наблюдатель не может оценивать разность глубин точки фиксации и точек, лежащих дальше нее.

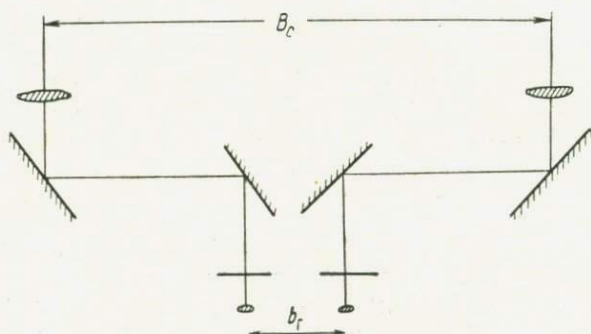


Рис. 57

Расстояние, соответствующее параллактическому углу, равному остроте бинокулярного зрения, называется *радиусом невооруженного бинокулярного зрения*. Обозначив эту величину через R , найдем ее по формуле (2.4)

$$R = \frac{b_r}{\Delta\gamma} = \frac{65 \text{ мм } \rho''}{30''} = 450 \text{ м.}$$

Однако опыт показывает, что заметна разность глубин и при расстояниях, значительно превышающих 450 м. Этот факт объясняется не физиологическим параллаксом, а косвенными признаками восприятия глубины: законами перспективы, тенями, уменьшением яркости и вышуклости удаленных предметов и др.

Радиус бинокулярного зрения можно увеличить с помощью телестереоскопа (рис. 57), призмного бинокля или стереотрубы, искусственно увеличивающих глазной базис (B_c вместо b_r) и повышающих остроту бинокулярного зрения благодаря увеличению, даваемому этими приборами.

Обозначив *радиус вооруженного бинокулярного зрения* через R' , а увеличение прибора через v , получим

$$R' = \frac{B_c}{b_r} vR. \quad (2.6)$$

Коэффициент, стоящий перед R в правой части этого выражения, называется *общей пластичностью*,

$$\omega = \frac{B_c}{b_r} v. \quad (2.7)$$

Итак, минимальная разность глубин, которая еще воспринимается с помощью стереоприбора, в ω раз меньше соответствующей разности глубин, оцениваемой при невооруженном бинокулярном зрении.



Рис. 58]

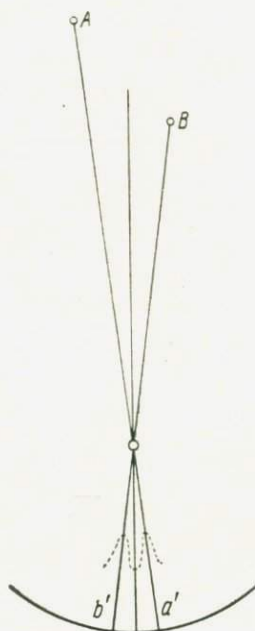


Рис. 59

Острота зрения некоторых наблюдателей намного выше по сравнению с указанным средним значением. В результате изучения этого вопроса предложены статическая и динамическая теории остроты зрения. В основе динамической теории лежат малые произвольные движения глаз. Статическая теория этими движениями пренебрегает.

Статическую теорию иллюстрирует рис. 58, на котором представлена часть сетчатки с пятью колбочками. Вследствие несовершенства глаза изображение точки получается в виде пятна, покрывающего несколько колбочек. Распределение интенсивности расплывчатого изображения на рисунке представлено в виде колоколообразной кривой. Статическая теория утверждает, что глаз способен с высокой точностью оценивать разности возбуждений соседних колбочек, возникающие вследствие различной интенсивности расплывчатого изображения. Путем интерполяции

этих разностей в мозгу можно различать даже часть диаметра колбочки.

Рассмотрим *динамическую теорию*. Кроме значительных поворотов, необходимых для изменения направления взгляда, наши глаза имеют еще малые *непроизвольные движения*. Они бывают даже тогда, когда наблюдатель зафиксировал свой взор на какой-либо точке предмета. Различают три группы непроизвольных движений глаз:

— дрожание — покачивание с угловой скоростью около $20'$ в секунду и амплитудой $10-15''$,

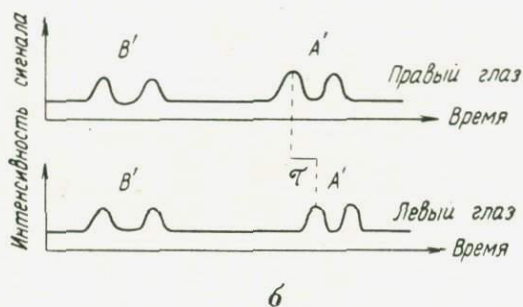
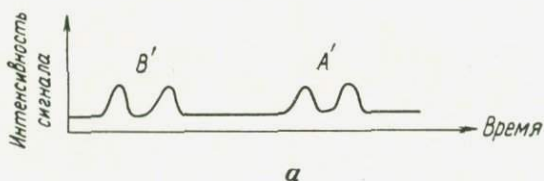


Рис. 60

— мерцание — вращение со скоростью около $600'$ в секунду и амплитудой от $0,03$ до $5''$,

— дрейфование — очень медленное покачивание с угловой скоростью около $1'$ и амплитудой в $5'$.

В процессе этих движений происходит *сканирование* изображений колбочками сетчатки. При этом зрительный аппарат преобразует градиенты интенсивности изображений в градиенты времени. На рис. 59 представлены две наблюдаемые точки и их изображения на сетчатке, которые сканируются в результате малых непроизвольных движений глаза. На рис. 60, а изображена интенсивность возбуждения нескольких колбочек как функция времени. Мозг воспринимает сигналы, идущие от сканируемых изображений в левом и правом глазах. Предполагается, что движения глаз согласованы. В этом случае эти сигналы должны быть синхронизированы, как показано на рис. 60, б. Верхняя и нижняя части этого рисунка иллюстрируют интенсивность сигналов.

полученных от правого и левого глаз. В этом случае два сигнала совпадают по времени для точки B , но не совпадают для точки A . Приняв сигнал точки B за начальный, видим, что сигнал точки A смещен на оси времени на величину τ . Это смещение позволяет с высокой точностью оценивать глубины предметов.

Динамическая теория оценки глубины используется при разработке автоматизированных систем для измерения снимков.

§ 21. СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЕ НАБЛЮДЕНИЕ СНИМКОВ

Восприятие глубины возможно не только при наблюдении предметов, но и при рассматривании их плоских перспективных изображений.

Пусть A , F и B (рис. 61) — точки рассматриваемого наблюдателем предмета, o_1 и o_2 — узловые точки глаз, a_1, f_1, b_1 и a_2, f_2, b_2 — изображения точек A, F и B на сетчатках левого и правого глаз, F — точка фиксации.

Пересечем пучки лучей o_1AFB и o_2AFB плоскостями P_1 и P_2 , которые могут быть расположены произвольно. Точки a'_1, f'_1, b'_1 и a'_2, f'_2, b'_2 являются следами пучков на плоскостях и представляют собой перспективные изображения предмета с центрами проекций в точках o_1 и o_2 .

Теперь удалим предмет и поставим между глазами вертикальный экран так, чтобы каждый глаз видел только соответствующую ему перспективу. Тогда левый глаз будет восстанавливать точку A на линии $o_1a'_1$, а правый — на линии $o_2a'_2$. Поэтому при наблюдении двумя глазами точка будет казаться расположенной на пересечении линий $o_1a'_1$ и $o_2a'_2$, т. е. в том месте,

которое занимала в пространстве соответствующая точка предмета. То же самое можно сказать и в отношении точек F и B .

Следовательно, рассматривая два плоских перспективных изображения одного и того же предмета, например два снимка, можно получить одно пространственное изображение, или, как говорят, *стереоскопический эффект*. Однако для этого необходимо выполнить ряд условий, вытекающих из рассмотренных выше особенностей бинокулярного зрения, а именно:

1. Снимки предмета должны быть получены с двух различных точек пространства.
2. Разность масштабов снимков не должна превышать 16% от их значений.

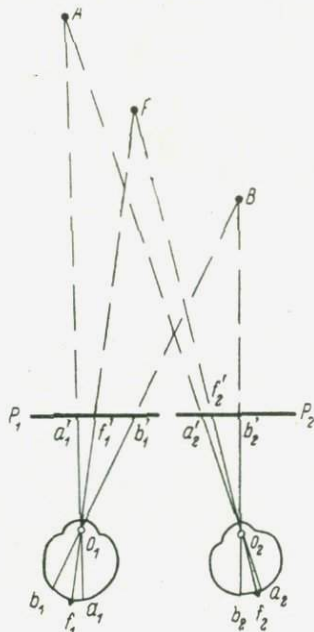


Рис. 61

3. Каждым глазом должен наблюдаться отдельный снимок.

4. Снимки должны быть расположены относительно глаз так, чтобы соответственные зрительные лучи, например $o_1a'_1$ и $o_2a'_2$, пересекались. Это требование не является строгим, так как стереоэффект возникает и при небольшом расхождении соответственных зрительных лучей.

5. Угол, под которым пересекаются соответственные лучи, не должен превышать 16° .

6. При данном значении параллактического угла должна обеспечиваться соответствующая аккомодация.

Стереоскопический эффект можно получить визуально. Для этого снимки устанавливают перед глазами так, чтобы расстояние

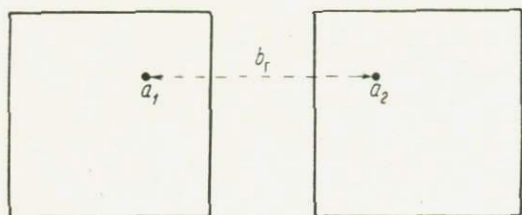


Рис. 62

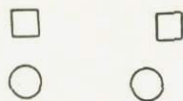


Рис. 63

между соответственными точками a_1 и a_2 было близким к величине глазного базиса, а линия, соединяющая эти точки, была параллельна ему (рис. 62). Затем снимки наблюдают, стараясь направить зрительные оси глаз параллельно друг другу, для чего требуется некоторое напряжение зрения. В результате вместо двух плоских изображений наблюдатель увидит одно рельефное. Обычно это достигается только после более или менее продолжительной тренировки, которую целесообразно начинать с простых стереоскопических чертежей (рис. 63).

Стереоскопическое рассматривание снимков затрудняется тем, что конвергенция зрительных осей в этом случае значительно не соответствует аккомодации глаз: зрительные оси устанавливаются почти параллельно, а глаза аккомодируются на расстояние около 25 см.

Стереоскопический эффект легче получается с помощью стереоскопа.

Стереоскопы бывают простые и топографические. Топографические стереоскопы имеют приспособления для измерения разностей продольных параллаксов; в простых стереоскопах таких приспособлений нет.

Для рассматривания снимков небольшого формата (6×6 см) изготовляют линзовые стереоскопы (рис. 64, а), а для наблюдения снимков большого формата — зеркальные стереоскопы (рис. 64, б) Зеркальные стереоскопы часто снабжаются и линзами для рассматривания снимков с увеличением и устранения несоответствия

между аккомодацией и конвергенцией зрительных осей глаз (рис. 65).

В стереоскопе с линзами снимки помещают в фокальных плоскостях линз так, чтобы расстояние между какими-либо одноименными точками было равно расстоянию между центрами линз. В этом случае лучи, идущие от одноименных точек, направляются

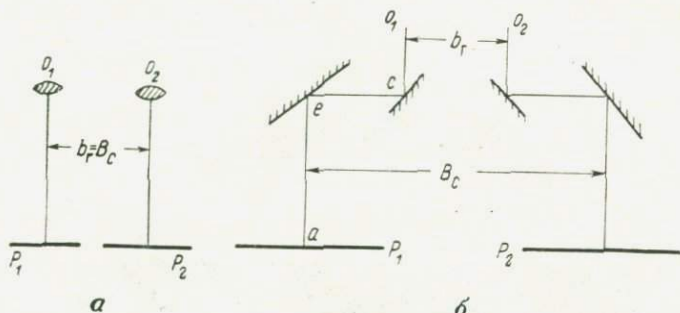


Рис. 64

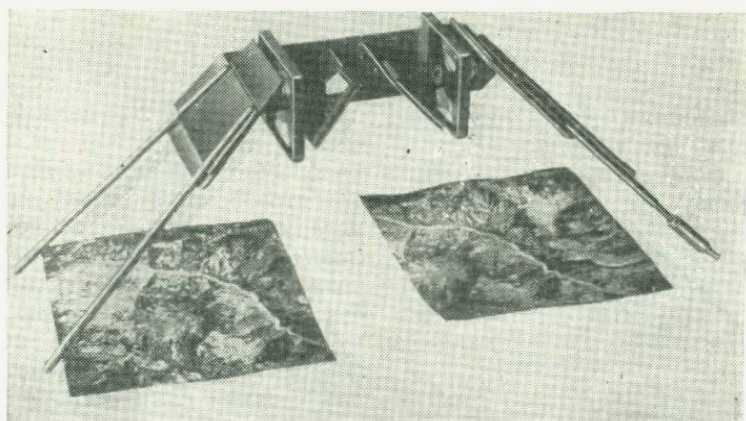


Рис. 65

параллельно друг другу. Благодаря этому глаза аккомодируются на бесконечность. Однако расстояние между другими одноименными точками отличается от расстояния между линзами, что тоже вызывает расхождение между аккомодацией и конвергенцией. Но это расхождение наблюдатель, как правило, не замечает, так как разность между названными расстояниями мала. В противном случае необходимо изменить установку снимков.

Расстояние d от глаза наблюдателя по ходу центрального луча до снимка называется *главным расстоянием стереоскопа*. Если

в стереоскопе имеются линзы, то d измеряется от центра линзы по ходу центрального луча до снимка.

Увеличение стереоскопа

$$v = \frac{250}{d}, \quad (2.8)$$

где d должно быть выражено в миллиметрах.

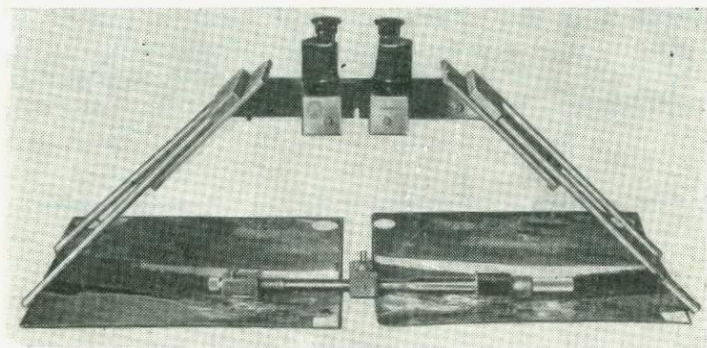


Рис. 66

Расстояние между центрами больших зеркал B_c называется *базисом стереоскопа*.

В фототопографии применяются обычно зеркально-линзовый стереоскоп (см. рис. 65) и зеркальный стереоскоп с бинокулярной насадкой и параллаксометром (рис. 66). Второй стереоскоп позволяет рассматривать снимки без увеличения и с увеличением. Для наблюдения снимков без увеличения бинокулярная насадка снимается. В этом случае стереоскопически можно видеть всю стереопару одновременно. Ход лучей в зеркальном стереоскопе показан на рис. 67. Здесь $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2$ — три пары соответственных точек на снимках, а a, b и c — точки пространственной модели.

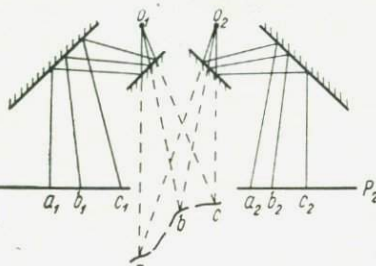


Рис. 67

Бинокулярная насадка служит для рассматривания снимков с увеличением порядка $4-6\times$. В этом случае стереоскопически видна только часть стереопары. Поэтому для наблюдения других частей необходимо перемещать стереоскоп относительно снимков. Параллаксометр используется для измерения разностей продольных параллаксов.

Для стереоскопического рассматривания снимки устанавливают так, чтобы начальные направления были на одной прямой, параллельной базису стереоскопа, а расстояние между какой-либо парой соответственных точек, например a_1 и a_2 (рис. 68, *a*), приблизительно равнялось базису стереоскопа.

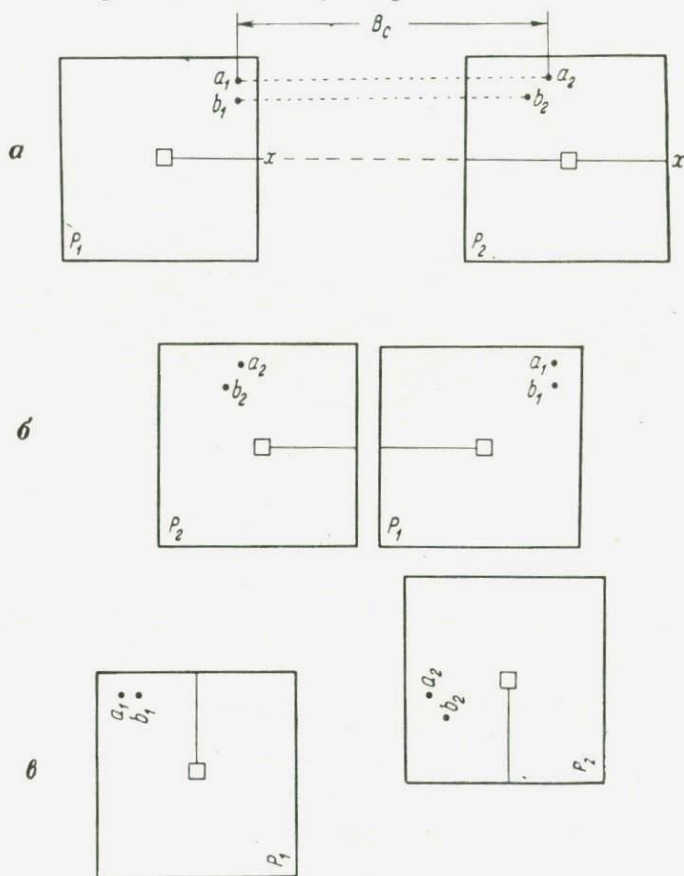


Рис. 68

Стереоскопический эффект получается прямым (горы изображаются горами, а низины — низинами), если левый глаз видит левый снимок, а правый глаз — правый (рис. 68, *a*), или обратным (горы изображаются низинами, низины — горами), если перед левым глазом установлен правый снимок, а перед правым — левый (рис. 68, *б*).

Пластичность стереоскопической модели будет максимальной, если начальные направления параллельны главному базису. Если же начальные направления составляют некоторый угол с главным базисом, то пластичность становится меньше. Она уменьшается

по мере возрастания этого угла от 0 до 90°. Когда начальные направления перпендикулярны к главному базису (рис. 68, *е*), пространственное изображение объекта становится плоским, получается так называемый нулевой стереоэффект.

Причина возникновения стереоэффекта при наблюдении снимков заключается в том, что продольные параллаксы¹ на снимках у различных пар соответственных точек различны. На рис. 69 a_1, a_2 и b_1, b_2 — изображения точек A и B местности на снимках P_1 и P_2 . Продольные параллаксы этих точек

$$P_A = o_1 a_1 + o_2 a_2,$$

$$P_B = o_1 b_1 + o_2 b_2.$$

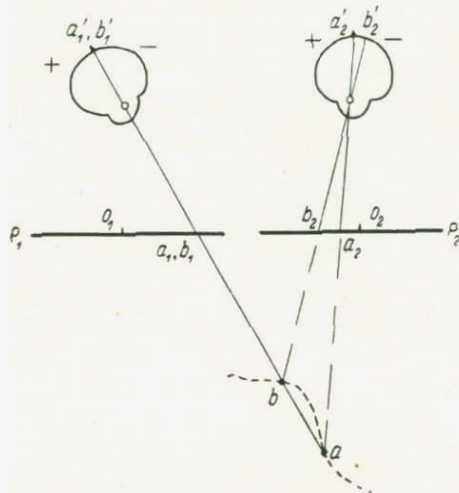


Рис. 69

Разность продольных параллаксов точек B и A равна разности расстояний $a_1 a_2$ и $b_1 b_2$. Наблюдая снимки, получим стереомодель, a и b — точки этой модели. Пусть точкой фиксации служит точка a . Тогда физиологический параллакс ее равен нулю. Физиологический параллакс точки b больше нуля, так как разность продольных параллаксов точек b и a положительная. Поэтому

мы видим, что точка b находится ближе к нам, чем точка a . Разность высот точек видимой модели увеличивается с увеличением разности продольных параллаксов.

Перестановка снимков вызывает изменение знака разности продольных параллаксов и знака физиологического параллакса, что приводит к обратному стереоэффекту.

Если снимки установлены так, что начальные направления перпендикулярны к зрительному базису, то отрезки, изображающие разности продольных параллаксов, тоже перпендикулярны к главному базису (см. рис. 68, *е*). В этом случае расстояния между соответственными точками одинаковы. Поэтому физиологический параллакс равен нулю, и видно плоское изображение (нулевой стереоэффект). Разности продольных параллаксов здесь мешают наблюдению, так как они вызывают вертикальный зрительный параллакс. В горных районах разности продольных параллаксов часто достигают значительных величин (10 мм и больше) и не позволяют получить нулевой стереоэффект.

¹ См. гл. 7.

Подсчитаем *минимальную разность высот* Δh , оцениваемую с помощью стереоскопа при максимальном прямом (или обратном) стереоэффекте. Для этого используем формулу (2.5), заменив в ней расстояние от наблюдателя до объекта D и глазной базис b_i соответственно высотой съемки H и базисом фотографирования B . Кроме того, разделим правую часть формулы на коэффициент $f:d$, представляющий собой увеличение изображения, наблюдаемого в стереоприборе, по сравнению с изображением, видимым невооруженным глазом в естественном пространстве с точки фотографирования. Получим

$$\Delta h = \frac{H^2 d}{Bf} \Delta \gamma, \quad (2.9)$$

где f — фокусное расстояние фотокамеры,
 d — главное расстояние стереоскопа,
 $\Delta \gamma$ — острота бинокулярного зрения первого рода.
 Подставив в выражение (2.9) значения

$$B = \frac{H}{f} b \quad \text{и} \quad d = \frac{250}{v},$$

где b — базис фотографирования в масштабе снимка, а v — увеличение стереоприбора, найдем

$$\Delta h = 250 \frac{H}{vb} \Delta \gamma. \quad (2.10)$$

В табл. 8 приведены значения Δh для различных значений высоты фотографирования H и увеличения стереоприбора v . При составлении таблицы принято $\Delta \gamma = 30''$ и $b = 70$ мм (размер снимков 18×18 см, продольное перекрытие 60%).

Т а б л и ц а 8

d , мм	v	Значения Δh (в м) при высоте H (в км)					
		0,5	1,0	2,0	5	20	300
500	0,5	0,5	1,0	2,1	5,2	20,8	312
250	1,0	0,3	0,5	1,0	2,6	10,4	156
167	1,5	0,2	0,3	0,7	1,7	6,8	102
125	2,0	0,1	0,2	0,5	1,3	5,2	78
62	4,0	0,06	0,1	0,3	0,6	2,4	39
42	6,0	0,04	0,09	0,2	0,5	1,8	26
31	8,0	0,03	0,07	0,1	0,3	1,3	19

Если формат снимков 23×23 см, то при том же продольном перекрытии их (60%) величины Δh будут в 1,7 раза меньше по сравнению с приведенными в этой таблице.

Для стереоскопического рассматривания и дешифрирования снимков фирма «Цейсс» (Иена) изготовила специальный прибор,

названный *интерпретоскопом* (рис. 70). Он позволяет наблюдать негативы, диапозитивы и контактные отпечатки формата до 30×30 см.

Прибор состоит из стола с прозрачным стеклянным экраном, на котором устанавливаются снимки, и бинокулярного микроскопа. Микроскоп имеет две части — подвижную и неподвижную. Подвижная перемещается по двум взаимно перпендикулярным

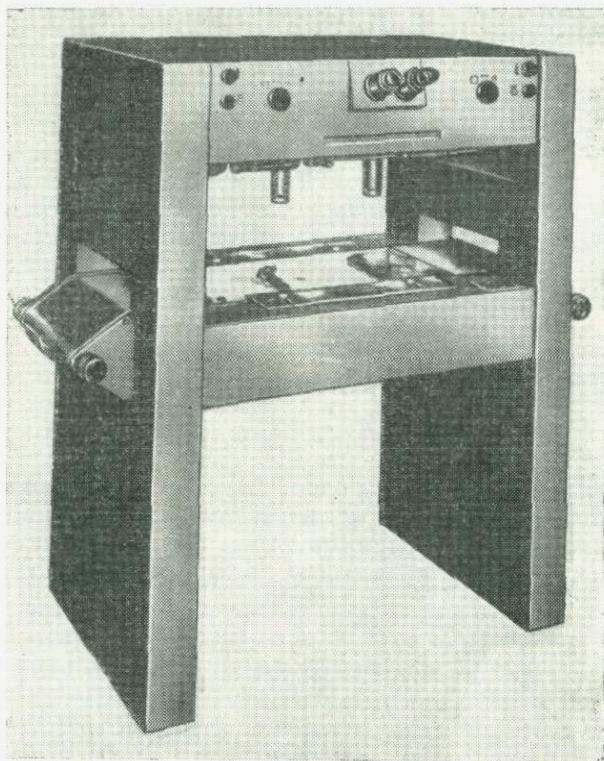


Рис. 70

направлениям, что позволяет рассматривать различные части стереопары. Увеличение бинокулярного микроскопа в пределах от 2 до $15\times$ можно изменять с помощью панкратической системы и двух взаимозаменяемых объективов с различными фокусными расстояниями. Изменение увеличения осуществляется плавно как одновременно в левой и правой ветвях бинокля, так и отдельно в каждой ветви. Это обеспечивает возможность выравнивания масштабов левого и правого изображений даже в случае, когда масштабы снимков, составляющих стереопару, значительно отли-

чаются друг от друга. Изображения снимков можно оптически поворачивать, что позволяет наблюдать неразрезанный фильм и быстро переходить от прямого стереоэффекта к обратному или нулевому.

В приборе имеется верхнее освещение для контактных отпечатков на непрозрачной основе и нижнее для негативов и диапозитивов.

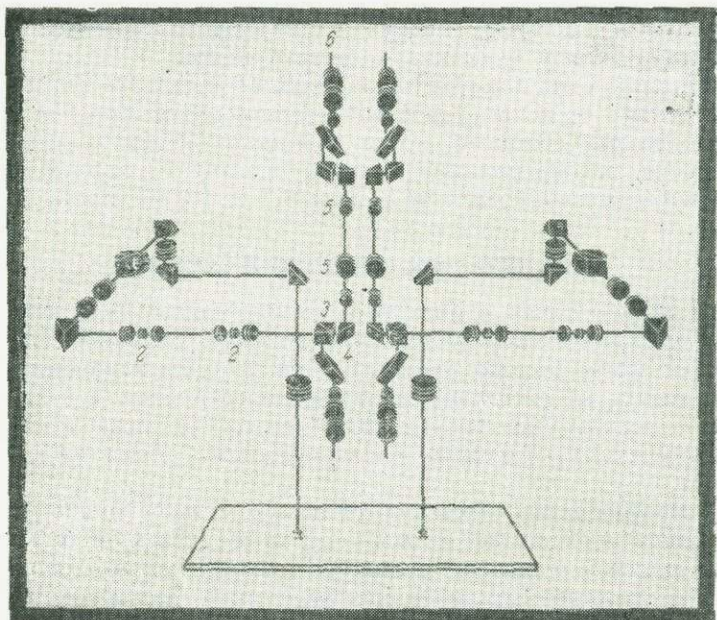


Рис. 71

Измерительную марку бинокля наводят на точку стереомодели четырьмя движениями подвижной части наблюдательной системы: совместными движениями левого и правого объективов в продольном и поперечном направлениях и движениями одного объектива относительно другого в тех же направлениях. Перемещение одного объектива относительно другого в продольном направлении можно отсчитать, что необходимо для измерения разностей продольных параллаксов.

Интерпретоскоп выпускается в двух вариантах — с одним бинокляром и с двумя. Для учебных целей второй вариант представляет наибольший интерес. На рис. 71 изображена оптическая схема интерпретоскопа с двумя биноклярами. Здесь: 1 — первый бинокляр, 2 — панкратическая система, 3 — светоделительный кубик, 4 — прямоугольная призма, 5 — оборачивающая

система и *б* — второй бинокляр. Этот вариант интерпретоскопа отличается от первого тем, что вместо прямоугольной призмы, направляющей все лучи от панкратической системы *2* в первый бинокляр, применяется полупосеребренный кубик *3*, склеенный из двух прямоугольных призм и обеспечивающий пропускание 50% света через дополнительную прямоугольную призму *4* в плоскость промежуточного изображения. В этой плоскости расположена марка второго бинокляра *б*. При помощи двухкомпонентной оборачивающей системы *5* промежуточное изображение проектируется в плоскость изображения второго бинокляра. Оба бинокляра имеют одинаковую конструкцию.

Интерпретоскоп с двумя биноклярами используется не только для обучения, но и для производственных целей при дешифрировании сложных объектов, когда возникает необходимость одновременного рассматривания стереопары двумя наблюдателями.

Размеры интерпретоскопа $1,3 \times 0,7 \times 1,3$ м, масса 176 кг.

§ 22. СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ СНИМКОВ

Координаты точек одиночного снимка можно измерить с помощью циркуля и масштабной линейки или с помощью специального прибора — монокомпаратора. Эти способы измерения снимков основаны на свойствах монокулярного зрения и называются *монокулярными*. Они весьма простые, но не позволяют точно отождествлять неконтурные соответственные точки на соседних снимках.

В фототопографии применяются обычно стереоскопические способы измерения снимков, основанные на свойствах биноклярного зрения и обеспечивающие высокую точность определения координат соответственных точек как контурных, так и неконтурных.

Способы измерения модели разделяются тоже на *монокулярные* и *стереоскопические*.

Рассмотрим способы измерения пары снимков и модели.

С п о с о б м н и м о й м а р к и. Способ мнимой марки предложен в 1899 г. Пульфрихом для измерения пары снимков и модели.

Сущность этого способа состоит в следующем. На пару снимков накладывают две марки — одну на левый снимок, другую — на правый. При стереоскопическом рассматривании снимков и марок наблюдатель видит пространственную модель и одну марку вместо двух. Две марки сливаются в нашем зрительном впечатлении в одну, как сливаются два снимка в одно рельефное изображение. Получаются мнимое изображение местности — стереоэффект и мнимая марка. Изменение положения марок на снимках вызывает пространственное перемещение мнимой марки. Благодаря этому мнимую марку можно совместить с любой точкой видимой модели. Если такое совмещение достигнуто, значит действительные марки находятся на соответственных точках стереопары. Движения

действительных марок учитываются, что позволяет измерять координаты и параллаксы точек стереопары.

Пусть, наблюдая; например, с помощью стереоскопа пару снимков P_1 и P_2 (рис. 72, а), получили стереоэффект. При этом

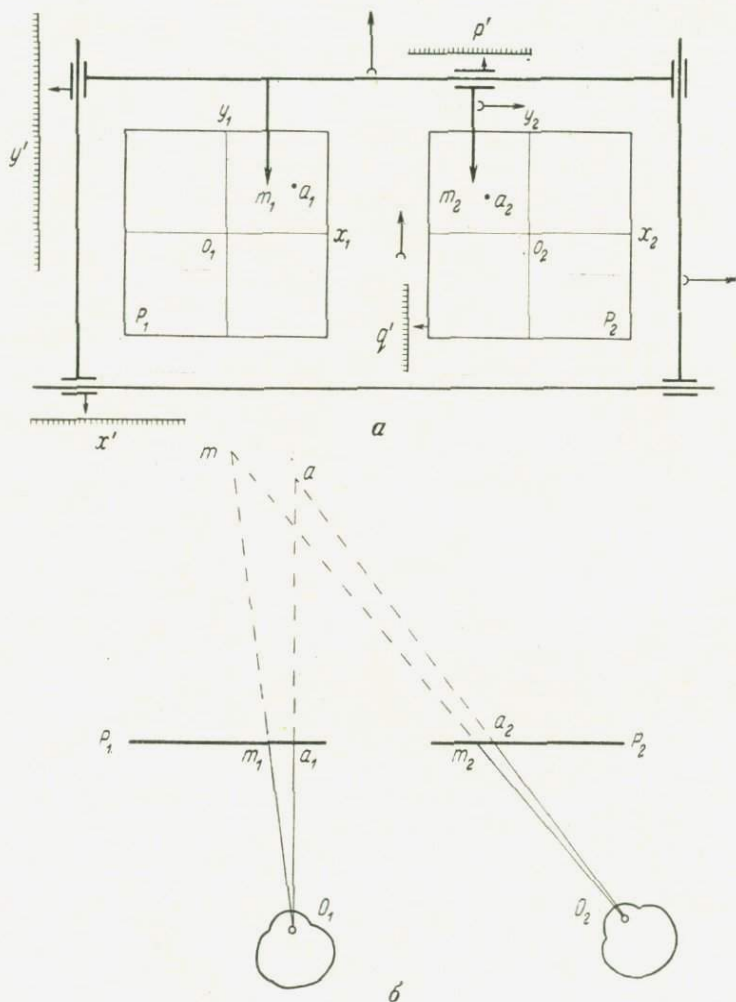


Рис. 72

снимки установлены так, что оси x их находятся на одной прямой. Наложим на снимки две одинаковые по форме и размерам марки m_1 и m_2 так, чтобы прямая m_1m_2 была параллельна оси x . Пусть марки имеют следующие движения:

— совместное движение, параллельное оси x ,

- совместное движение, перпендикулярное к оси x ,
- движение одной марки относительно другой, параллельное оси x .

Кроме этих движений марок необходимо предусмотреть еще возможность смещения одного снимка относительно другого перпендикулярно к оси x .

Четырех движений вполне достаточно для совмещения марки m_1 с любой точкой снимка P_1 , например с точкой a_1 , и марки m_2 с соответствующей точкой снимка a_2 .

Наблюдая снимки с помощью стереоскопа, увидим модель и мнимую марку m (рис. 72, б). Изменение расстояния между действительными марками m_1 и m_2 вызывает перемещение мнимой

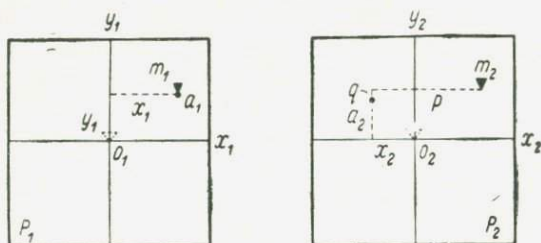


Рис. 73

марки m по глубине. Если расстояние между действительными марками больше расстояния между соответственными точками a_1 и a_2 , то мнимая марка будет дальше точки a модели и наоборот.

Если мнимая марка совмещена с точкой a модели, то действительные марки m_1 и m_2 совмещены с соответственными точками a_1 и a_2 . Наоборот, если действительные марки совмещены с соответственными точками, то мнимая марка наведена на данную точку модели. Таким образом можно стереоскопически опознавать на снимке точку, соответствующую данной точке на другом снимке. Пусть марка m_1 наведена на какую-либо точку снимка P_1 , которая не является куртурной точкой и не может быть опознана монокулярно на снимке P_2 . Найдем соответствующую точку на снимке P_2 стереоскопически. Для решения этой задачи достаточно, не изменяя положения марки m_1 на снимке P_1 , перемещать марку m_2 параллельно оси x и снимок P_2 перпендикулярно к оси x до тех пор, пока мнимая марка не коснется модели.

Для измерения координат и параллаксов соответственных точек a_1 и a_2 сначала наведем марки на начала координат o_1 и o_2 на снимках (рис. 73) и сделаем отсчеты по шкалам x' , y' , p' и q' . Эти отсчеты представляют собой нульпункты шкал. Обозначим их через x'_0 , y'_0 , p'_0 и q'_0 . Затем, действуя совместными движениями марок, наведем левую марку m_1 на точку a_1 левого снимка

и отсчитаем по шкалам x' и y' . Разности этих отсчетов и нуль-пунктов шкал равны координатам точки a_1 левого снимка:

$$\begin{aligned}x_1 &= x' - x'_0, \\y_1 &= y' - y'_0.\end{aligned}\quad (2.11)$$

При наведении левой марки на точку левого снимка правая марка не смещалась относительно левой. Поэтому проекции расстояния между правой маркой m_2 и точкой a_2 правого снимка на координатные оси x и y представляют собой продольный и поперечный параллаксы.

Чтобы измерить эти величины, наведем марку m_2 на точку a_2 , не нарушая совмещения марки m_1 с точкой a_1 . Затем возьмем отсчеты по шкалам p' и q' и найдем параллаксы

$$\begin{aligned}p &= p' - p'_0, \\q &= q' - q'_0.\end{aligned}\quad (2.12)$$

Зная координаты точки левого снимка и параллаксы, можно получить координаты точки правого снимка

$$\begin{aligned}x_2 &= x_1 - p, \\y_2 &= y_1 - q.\end{aligned}\quad (2.13)$$

Способ мнимой марки осуществлен, например, в стереокомпараторе. Но вместо совместного и относительного смещения марок вдоль оси x в этом приборе перемещаются снимки. Кроме того, действительные марки находятся не на снимках, а в фокальных плоскостях бинокулярного микроскопа, с помощью которого рассматриваются снимки. Однако эти особенности не являются принципиальными.

Способ мнимой марки используется и при измерении модели. Для этого со стереокомпаратором связывают механизмы или другие устройства, решающие уравнения зависимости между координатами точки местности и координатами ее изображений на стереопаре. Такие устройства позволяют получить координаты точки модели в результате совмещения марок с соответственными точками стереопары. Стереокомпаратор, снабженный механизмами для определения координат точек модели, называется *стереоавтографом* и служит для составления карт по наземным снимкам.

На рис. 74 представлена другая схема измерения модели способом мнимой марки. Здесь действительные марки m_1 и m_2 нанесены на зеркальных экранах, находящихся в пространстве модели и перемещающихся по трем взаимно перпендикулярным направлениям. С помощью проектирующих камер с объективами S_1

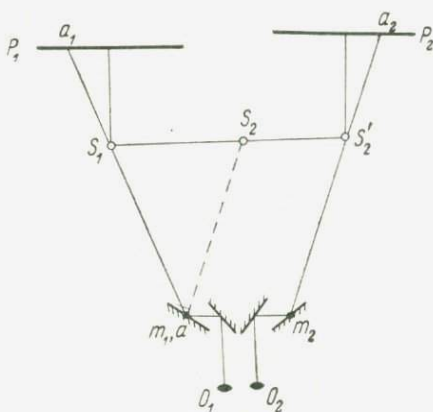


Рис. 74

и S_2 на экранах получают изображения снимков P_1 и P_2 . Рассматривая через бинокляр эти изображения и марки, наблюдатель видит стереоскопическую модель и мнимую марку. Совместными движениями действительных марок можно навести мнимую марку на любую точку видимой модели, а затем отсчитать координаты соответствующей точки действительной модели, например точки a .

Эта схема измерения модели применена в стереопланиграфе. Так как она требует, чтобы изображения снимков получались на отдельных экранах, то расстояние между проектирующими камерами увеличивается ($S_1S'_2$ вместо S_1S_2). Вследствие этого соответственные лучи, например a_1S_1 и $a_2S'_2$, непосредственно не пересекаются.

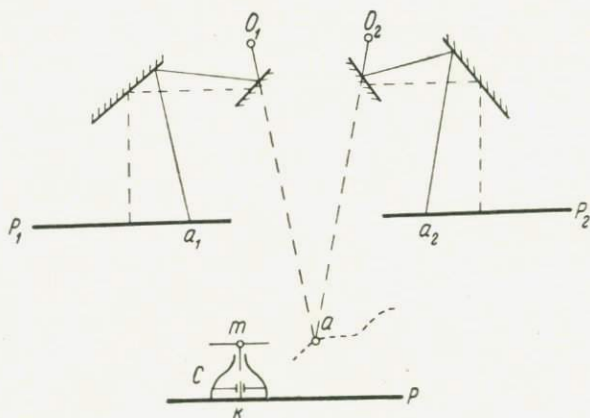


Рис. 75

Способ действительной марки. Этот способ предложен Девилем в 1902 г. для измерения модели.

Стереоскоп, с помощью которого рассматривается пара снимков P_1 и P_2 , состоит из двух пар зеркал (рис. 75). Внутренние зеркала, находящиеся перед глазами наблюдателя O_1 и O_2 , посеребрены на 50%. Благодаря этому наблюдатель видит не только модель, но и действительную марку m , расположенную в пространстве мнимой модели.

На рисунке a_1 и a_2 — пара соответственных точек на снимках, a — точка мнимой модели. Марка m находится на экране измерительного столика C , который можно перемещать на планшете P . Высота марки изменяется путем передвижения экрана относительно столика. Столик имеет карандаш k , острие которого лежит на прямой, проходящей через марку перпендикулярно к планшету. Таким образом, марку можно совместить с любой точкой модели и нанести соответствующую точку на планшет.

Пусть модель ориентирована относительно планшета. Тогда для составления карты местности достаточно с помощью измери-

тельного столика ортогонально спроектировать на планшет контуры, видимые на модели, и горизонтали.

Способ действительной марки применен в стереоскопическом рисовальном приборе проф. М. Д. Коншина и в приборе КЕК (США). Эти приборы использовались для создания карт мелких масштабов.

Достоинством способа является простая наблюдательная система и возможность одновременного рассматривания модели и оригинала составляемой карты. Однако увеличение наблюдательной системы недостаточное — меньше $1\times$. Условия наблюдения неблагоприятные. Форма модели меняется и зависит от положения головы наблюдателя, так как центрами проекции служат узловые точки глаз. Вследствие этого точность измерения низкая. Способ не нашел широкого применения.

Хорошие результаты получены путем сочетания схем Пульфриха и Девиля в итальянском универсальном стереоприборе — фотостереографе Нистри. Первая схема в этом приборе использована для стереоскопического рассматривания снимков, а вторая — для введения в наблюдательную систему оптических марок, которые накладываются на изображения снимков.

Анаглифический способ. Анаглифический способ применяется для наблюдения и измерения модели. Сущность способа состоит в рассматривании совмещенных изображений пары снимков, окрашенных в дополнительные цвета. Для наблюдения используются цветные очки, позволяющие каждому глазом видеть только одно из совмещенных изображений. Благодаря этому наблюдатель воспринимает одноцветную пространственную модель сфотографированного объекта. Модель измеряется с помощью марки.

Пусть снимки P_1 и P_2 (рис. 76, *a*) проектируются на экран E с помощью камер K_1 и K_2 . При этом изображения снимков накладываются друг на друга. Если снимки ориентированы, то каждая пара соответственных лучей пересекается, в результате чего образуется модель.

Чтобы видеть модель, перед одним снимком устанавливают красный фильтр κ , перед другим — зеленый z . Вследствие этого изображения на экране окрашиваются в красный и зеленый цвета. Окрашенные изображения наблюдают через очки с поглотительными фильтрами. Эти фильтры изготовлены так, чтобы каждый из них пропускал лучи, исходящие только от одного изображения, и поглощал лучи, идущие от другого. Зеленый фильтр пропускает зеленые лучи и задерживает красные. Поэтому, рассматривая через зеленый фильтр красную и зеленую точки, находящиеся на неосвещенном экране, мы видим только зеленую точку.

Наблюдая изображения на экране (рис. 76, *b*), один глаз, перед которым установлен красный фильтр, видит красную точку c'_1 и не видит зеленую c'_2 . Другой глаз, перед которым находится зеленый фильтр, видит зеленую точку c'_2 и не видит красную c'_1 . Таким образом, выполняется основное условие рассматривания

пары снимков при получении стереоэффекта: каждый глаз должен видеть только один снимок. Поэтому точки c'_1 и c'_2 наблюдатель воспринимает как одну точку, находящуюся в пересечении соответственных зрительных лучей $O_1c'_1$ и $O_2c'_2$. Эта точка — c_1 — одна из точек видимой модели. Аналогично можно показать и другие точки видимой модели, например d' , по точкам d'_1 и d'_2 .

Из рис. 76, б видно, что видимая модель $c'a'd'$ в общем случае не совпадает с действительной cad . Форма видимой модели зависит от положения наблюдателя относительно экрана. Если

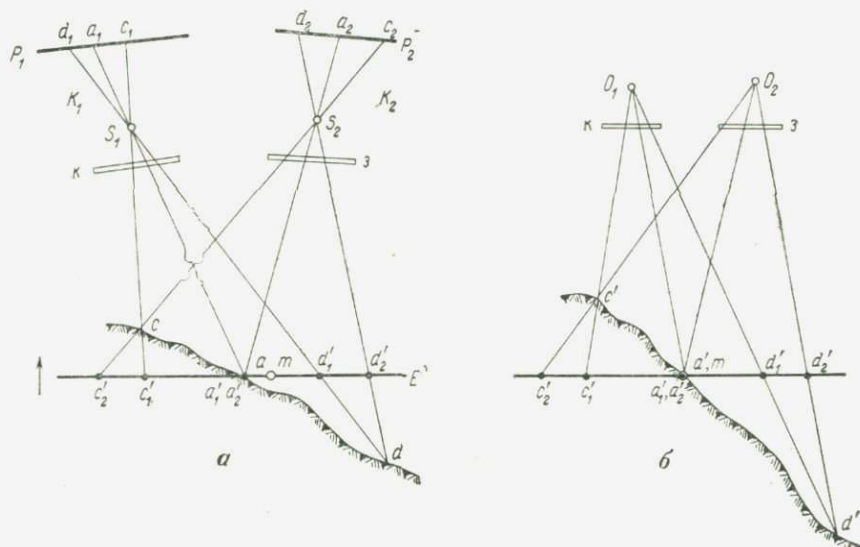


Рис. 76

расстояние от глаз наблюдателя до экрана увеличивается, то видимая модель вытягивается. Наоборот, при уменьшении этого расстояния модель сплющивается. Видимая модель деформируется и при боковом смещении головы наблюдателя. Если переставить фильтры, то рельеф видимой модели изменится на обратный. Такой же эффект получается в результате перестановки очков, когда перед одним глазом устанавливают зеленый фильтр вместо красного, а перед другим — красный вместо зеленого.

Марка, применяемая для измерения действительной модели, представляет собой светящуюся точку. Она находится на экране измерительного столика и наблюдается как левым, так и правым глазом. Перемещая измерительный столик на планшете и изменяя высоту экрана, можно совместить марку с любой точкой действительной модели, например с точкой a . Для этого достаточно навести марку на соответствующую точку видимой модели. С помощью измерительного столика можно спроектировать на планшет контуры и горизонтали модели, т. е. составить карту.

Анаглифический способ применяется в двойных проекторах и мультиплексах.

Успех работы на этих приборах в значительной мере зависит от качества светофильтров. Вследствие неизбежных погрешностей изготовления фильтров через левую (правую) половину очков видно, хотя и слабо, и правое (левое) изображение на экране. Это изображение называется левым (правым) *мешающим изображением*.

Отношение яркости мешающего к яркости основного изображения называется *мешающим фактором*. Если светофильтры подобраны хорошо, то мешающий фактор меньше 10%.

Согласно исследованиям Н. А. Соколовой, яркость изображения, наблюдаемого даже через наиболее прозрачные светофильтры, в четыре раза меньше яркости изображения, видимого без фильтров. Эти данные говорят о колоссальных потерях света при использовании анаглифического способа. Кроме того, установлено, что точность измерений заметно снижается, если яркость одного изображения превышает яркость другого в три раза и больше.

Анаглифический способ как способ наблюдения спроектированных изображений предложен д'Алмейда в 1858 г.

Рельефное изображение можно получить и по окрашенным снимкам — *анаглифам*. Анаглиф изготавливают так. Снимки, составляющие стереопару, отпечатывают прозрачными красками на белой подложке в дополнительных цветах. Например, один снимок — в красном, другой — в зеленом. В этом случае через зеленое стекло очков наблюдатель видит красный снимок и не видит зеленого, так как зеленый снимок сливается с зеленым фоном (через зеленый фильтр белая подложка воспринимается зеленой). Через красное стекло очков наблюдатель видит зеленый снимок и не видит красного, так как красный снимок не выделяется из красного фона (рис. 77). Такой вариант анаглифического способа рассматривания стереопары предложен Роллманом в 1853 г.

Анаглифы можно построить и по чертежам, например по карте. На анаглифических картах одно изображение геометрически не отличается от обычной карты, а другое изменено с таким расчетом, чтобы при стереоскопическом рассматривании анаглифа получить пространственную модель местности.

Дальтоники с ярко выраженной потерей отличия цветов, особенно красного и зеленого, затрудняются, а иногда и не могут получить пространственное восприятие анаглифических изображений.

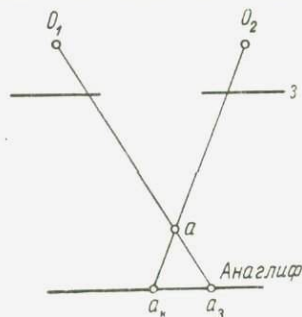


Рис. 77

Способ анаглифов неприменим для наблюдения цветных снимков.

Способ поляроидов. Способ поляроидов используется для наблюдения и измерения модели. Существенное отличие его от анаглифического способа состоит в том, что разделение двух совмещенных изображений на два отдельно наблюдаемых достигается путем поляризации света.

Из электромагнитной теории света известно, что световые колебания являются поперечными. Световые лучи, пройдя через систему, обладающую свойствами асимметрии (кристалл исландского шпата, турмалин и др.), раздваиваются. Каждый из полученных таким образом лучей при прохождении через второй кристалл исландского шпата ведет себя иначе, чем обычные лучи.

Пусть на пути светового луча установлен кристалл турмалина (поляроид), на пути луча, поляризованного этим кристаллом, — другой кристалл турмалина (анализатор). Тогда, поворачивая анализатор вокруг светового луча, наблюдатель заметит, что интенсивность света изменяется. При этом наступает момент, когда свет полностью погашается. Это явление поляризации света подчиняется закону

$$J_2 = J_1 \cos^2 \alpha, \quad (2.14)$$

где J_2 — интенсивность света, пропущенного обоими кристаллами,

α — угол между плоскостями поляризации поляризатора и анализатора,

J_1 — интенсивность света, пропущенного обоими кристаллами, когда их плоскости поляризации взаимно параллельны ($\alpha = 0$).

Пусть при проектировании пары снимков на экран (см. рис. 76) вместо цветных светофильтров установлены два поляризатора так, что угол между плоскостями поляризации равен 90° . Тогда на экране получаются два совмещенных изображения, построенных поляризованными лучами. Чтобы каждым глазом видеть только одно изображение, воспользуемся очками-анализаторами, настроенными параллельно каждому из поляризаторов.

Наблюдая таким образом, получим стереозффект. Модель будет иметь нормальные тона, свойственные фотоизображениям. Благодаря этому сетчатка глаз раздражаются более естественно, чем в способе анаглифов, и результаты измерений получаются достаточно точные и устойчивые.

Измерение действительной модели производится, как и в способе анаглифов, с помощью марки.

При наблюдении снимков способом поляроидов очки необходимо держать так, чтобы поляризационные плоскости их фильтров были достаточно точно параллельны плоскостям соответствующих фильтров проекторов. Если параллельность нарушена на половину прямого угла, то каждый глаз видит оба изображения

одинаково светлыми. Поворот на 10° вызывает заметное мешающее изображение.

Исследованию способа поляропдов посвящена работа Н. А. Соколовой.

Способ бленд. Способ бленд служит для наблюдения и измерения модели. Сущность его состоит в том, что на экране получают совмещенные изображения левого и правого снимков, а наблюдение каждым глазом только одного изображения обеспечивается вращающимися блендами, которые устанавливаются перед объективами проектирующих камер и глазами наблюдателя.

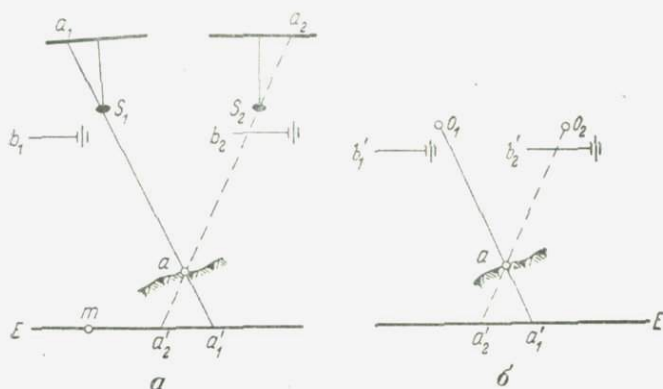


Рис. 78

На рис. 78, а представлены две взаимно ориентированные проектирующие камеры и экран E , на котором получены совмещенные изображения снимков P_1 и P_2 . Точка a — пересечение пары соответственных лучей a_1S_1 и a_2S_2 — является одной из точек модели. Бленды b_1 и b_2 установлены перед объективами проектирующих камер S_1 и S_2 , а бленды b_1' и b_2' — перед глазами наблюдателя (рис. 78, б).

При вращении каждая из этих бленд закрывает и открывает объектив проектирующей камеры или глаз наблюдателя. Бленды b_1 и b_1' открывают левый объектив и левый глаз одновременно. В этот момент правые бленды b_2 и b_2' закрыты, и левый глаз видит только левое изображение. Затем левые бленды закрываются, а правые открываются, и правый глаз видит только правое изображение. При этом частота перерывов света равна критической частоте мельканий (не меньше 10 мельканий в секунду). Таким образом, наблюдатель непрерывно видит левым глазом только левое изображение, а правым — только правое. Эти изображения сливаются в зрительном ощущении в одно пространственное изображение.

Видимая модель не совпадает с действительной и деформируется при изменении положения головы наблюдателя относительно экрана.

Способ бленд позволяет обрабатывать как черно-белые, так и цветные снимки. Модель измеряется с помощью марки, находящейся на экране измерительного столика.

Электронный способ. Электронный способ основан на преобразовании фотографических изображений в электрические

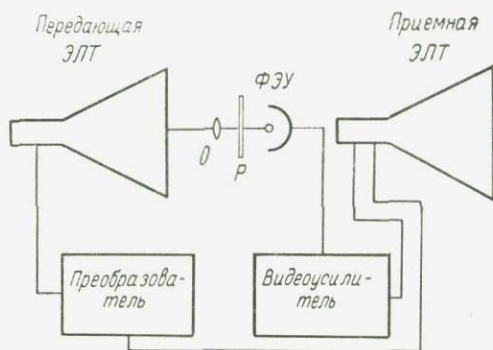
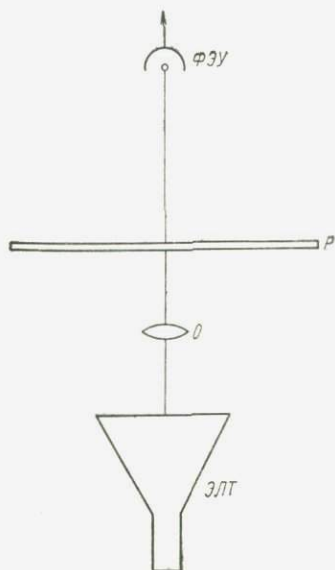


Рис. 80

Рис. 79

сигналы. Эти сигналы используются для построения трансформированных изображений, измерения модели и для составления топографических карт и фотокарт.

Преобразование фотографических изображений в электрические сигналы осуществляется методом сканирования, схема которого представлена на рис. 79. Электроннолучевая трубка создает яркое светящееся пятно, которое при помощи объектива *O* проектируется на снимок *P* (диапозитив). Свет, прошедший через снимок, попадает на фотоэлектронный умножитель, преобразующий световой сигнал в электрический.

Световое пятно на электроннолучевой трубке перемещается в соответствии с управляющими электрическими сигналами, создаваемыми специальной схемой развертки. Поэтому перемещается и изображение светового пятна равномерно от одного края снимка к другому, после чего быстро возвращается к исходному положению и вновь продолжает равномерное движение. Таким образом обеспечивается «строчная» развертка снимка. Сам снимок медленно сдвигается перпендикулярно к направлению движения пятна, что обеспечивает «кадровую» развертку.

Сила света, прошедшего от электроннолучевой трубки через снимок на фотоэлектронный умножитель, зависит от плотности снимка. При движении пятна по снимку сила тока в фотоэлектронном умножителе изменяется в соответствии с законом изменения плотности изображения вдоль сканируемой строки. Таким образом, на выходе фотоэлектронного умножителя создаются электрические сигналы, повторяющие закон изменения плотности снимка вдоль строки разложения.

Электронный способ применен в картографическом трансформаторе, предложенном М. П. Бордюковым в 1955 г. Основными частями этого прибора являются две электроннолучевые трубки — передающая и приемная и преобразователь напряжения развертки (рис. 80).

Световой поток от передающей трубки проходит через объектив O и трансформируемый снимок P и попадает на фотоэлектронный умножитель ФЭУ. Световое пятно развертки, проходя через точки снимка различной плотности, создает переменную освещенность катода фотоэлектронного умножителя, и на выходе последнего генерируются электрические сигналы. После усиления эти сигналы поступают на модулятор приемной трубки и изменяют яркость светового пятна на экране этой трубки по тому же закону, по которому изменяется интенсивность светового потока, падающего на фотоэлектронный умножитель от передающей трубки.

Если на приемную трубку подаются те же напряжения развертки, что и на передающую, то изображение снимка на экране трубки подобно снимку. Чтобы получить трансформированное изображение, напряжения развертки на приемную трубку подаются через преобразователь, который изменяет их в соответствии с формулами перехода от координат точки наклонного снимка к координатам соответствующей точки горизонтального снимка.

Электронный способ позволяет передавать фотографические изображения на большие расстояния. Фотографии обратной стороны Луны, впервые полученные советскими учеными в 1959 г. с помощью межпланетной станции, были переданы с борта этой станции на Землю по линии радиосвязи в виде электрических сигналов.

На рис. 81 представлена схема универсального прибора, в котором электронный метод «наблюдения» снимков использован для автоматического проведения горизонталей. Прибор состоит из двух проектирующих камер, измерительного столика и корреляционного устройства. С помощью проектирующих камер по стереопаре получается модель, которая ориентируется относительно планшета.

Экраном измерительного столика служит экран электроннолучевой трубки. Световое пятно трубки, пройдя объективы S_1 и S_2 проектирующих камер, сканирует снимки. Световые сигналы проходят через снимки и попадают на фотоэлементы, которые преобразуют эти сигналы в электрические. Корреляционное

устройство анализирует сигналы, поступившие от левого и правого снимков, и приводит в действие моторы, перемещающие измерительный столик вдоль осей X и Y прибора. При этом столик перемещается так, чтобы центр экрана находился на горизонтали. Следовательно, карандаш, прикрепленный к столику, вычерчивает горизонталь на планшете.

Стереопару в виде электрических сигналов можно ввести в электронную вычислительную машину для автоматического

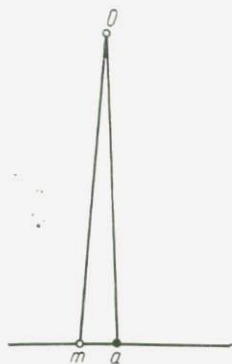
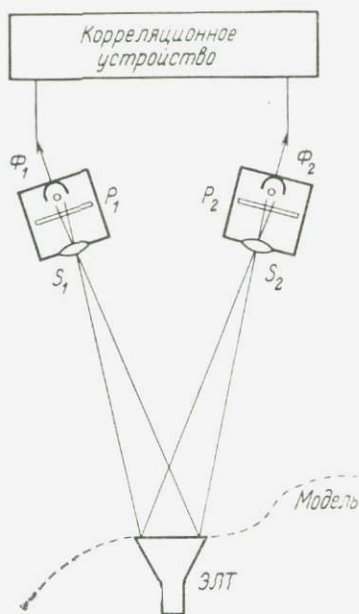


Рис. 82

Рис. 81

определения координат точек местности и других данных, позволяющих составить фотокарту. В этом случае в машину вводят три параметра каждой точки: две координаты, определяющие положение точки на снимке, и плотность фотографического изображения. Эти параметры находятся автоматически в процессе сканирования снимков.

Электронный способ наблюдения и измерения снимков и модели — наиболее перспективный, он позволяет автоматизировать процессы фотограмметрической обработки снимков и значительно повысить производительность труда.

Точность наведения марки. Пусть наблюдатель наводит марку m на точку a снимка, рассматривая эти два объекта невооруженным глазом (рис. 82). Наблюдатель заметит несоответствие ma только в случае, если оно рассматривается глазом под

углом, превышающим остроту монокулярного зрения $\Delta\gamma$. Поэтому ошибку наведения марки можно найти по формуле

$$m_x = D \Delta\gamma,$$

где D — расстояние наилучшего зрения.

При $D = 250$ мм и $\Delta\gamma = 45''$ получим $m_x = 55$ мкм. С такой точностью можно навести марку на точку при невооруженном монокулярном зрении.

Если снимок измеряется с помощью монокомпаратора с увеличением v , то ошибка наведения марки будет меньше:

$$m_x = D \frac{\Delta\gamma}{v}. \quad (2.15)$$

Однако увеличение наблюдательной системы прибора не может быть беспределным. Оно должно соответствовать разрешающей силе объектива аэрофотоаппарата

$$\varepsilon'' = \frac{140}{d},$$

где d — диаметр действующего отверстия объектива.

Целесообразно потребовать, чтобы произведение $v\varepsilon''$ было равно остроте монокулярного зрения $\Delta\gamma$:

$$v\varepsilon'' = \Delta\gamma = v \frac{140}{d}.$$

Отсюда

$$v = \frac{d}{140} \Delta\gamma. \quad (2.16)$$

Пусть $d = 30$ мм, $\Delta\gamma = 45''$. Тогда $v = 10\times$.

Предпочтение следует отдать наблюдательной системе с переменным увеличением. Она позволяет устанавливать оптимальное увеличение в зависимости от выполняемого на приборе процесса. Например, при юстировке прибора желательно иметь увеличение порядка $20\times$, а при измерении координат отдельных точек снимка — $10\times$. Для съемки рельефа и контуров важно иметь достаточно большое поле зрения наблюдательной системы. Это условие выполняется при увеличении от 4 до $8\times$.

Стереоскопические способы позволяют измерять снимки и модель с большей точностью, чем монокулярные. Пусть наблюдатель совмещает марку m с точкой модели a (рис. 83). Разность удалений ΔD точек m и a относительно наблюдателя может быть замечена, как известно, только в случае, когда разность параллактических углов этих точек больше остроты стереоскопического

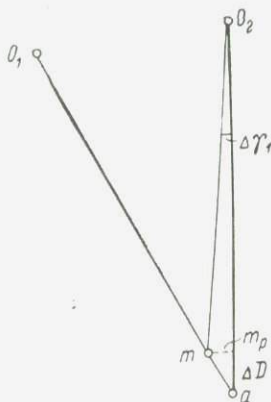


Рис. 83

зрения $\Delta\gamma_1$. Величины ΔD и $\Delta\gamma_1$ связаны между собой уравнением (2.5)

$$\Delta D = -D^2 \frac{\Delta\gamma_1}{b_r},$$

где D — расстояние наилучшего зрения, b_r — глазной базис наблюдателя.

Подставив в это выражение $D = 250$ мм, $b_r = 65$ мм и $\Delta\gamma_1 = \pm 30''$, получим погрешность стереоскопического совмещения марки по глубине $\Delta D = \pm 0,14$ мм. Погрешность в плановом положении марки можно подсчитать так:

$$m_p = D \Delta\gamma_1.$$

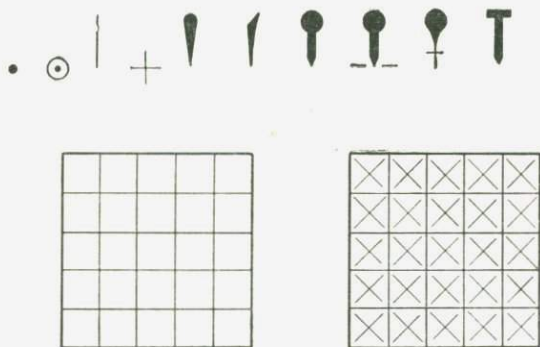


Рис. 84

При тех же значениях D и $\Delta\gamma_1$ получим $m_p = 36$ мкм. Такова точность совмещения марки с точкой при невооруженном бинокулярном зрении.

Если увеличение наблюдательной системы прибора равно v , то

$$\Delta D = -D^2 \frac{\Delta\gamma_1}{b_r v} \quad (2.17)$$

$$m_p = D \frac{\Delta\gamma_1}{v} \quad (2.18)$$

Например, при $v = 10\times$ будем иметь $\Delta D = 14$ мкм и $m_p = 3,6$ мкм. Таким образом, точность наведения марки на точку зависит от остроты зрения и увеличения наблюдательной системы. Заметное влияние на точность визирования оказывают и другие параметры: форма и размеры измерительных марок, контраст их относительно наблюдаемого изображения, освещенность снимков или модели, степень утомления зрения и т. д.

В фотограмметрических приборах применяются различные марки (рис. 84). Стремление различать марку одинаково отчетливо на различных деталях снимка привело к созданию светящейся цветной марки. Такая марка была применена А. С. Скиридовым

в стереоуниверсале и получила широкое распространение в фотограмметрии.

В способе мнимой марки используются, как известно, две марки. Они должны быть одинаковыми по форме и размерам. Разность размеров марок не должна превышать 10%, в противном случае точность визирования заметно падает.

Детальные исследования измерительных марок выполнены в ЦНИИГАиК О. А. Герасимовой.

И. Н. Румянцев выявил зависимость средней квадратической погрешности наведения нити стереометра Ф. В. Дробышева на

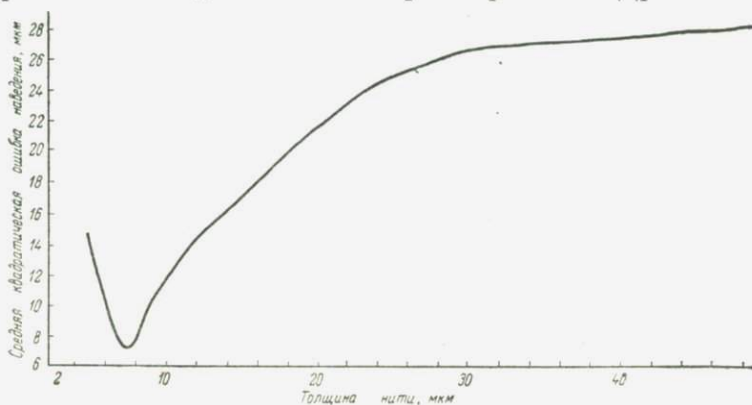


Рис. 85

точки снимков от толщины нити (рис. 85). Увеличение наблюдательной системы в этом приборе около $1,5\times$. Наиболее высокая точность (7 мкм) получается при толщине нити 70 мкм. При толщине нити 500 мкм погрешность наведения возрастает до 30 мкм.

Из рассмотренных выше способов измерения снимков и модели способ мнимой марки занимает первое место по точности и широко применяется в различных фотограмметрических приборах.

Кроме погрешности визирования на точность измерения снимков влияют погрешность отсчета по шкале прибора и другие инструментальные погрешности. Обычные стереокомпараторы позволяют измерять снимки с точностью 10—30 мкм, а высокоточные — с точностью 2—5 мкм.

Современные универсальные стереоприборы первого класса обеспечивают точность измерения снимков порядка 5—20 мкм.

§ 23. СТЕРЕОКОМПАРАТОРЫ

Стереокомпаратор служит для измерения прямоугольных координат точек левого (правого) снимка и параллаксов соответственных точек стереопары или координат соответственных точек.

Основными частями прибора являются станина S , общая каретка K , параллактические каретки K_p и K_q , левый и правый

снимкодержатели D_1 и D_2 , мостик M' и бинокулярный микроскоп M (рис. 86).

Общая каретка при помощи штурвала M_x перемещается по направляющим, прикрепленным к станине. Параллактические каретки находятся на общей каретке и смонтированы в правой части прибора. Каретка K_p параллактическим винтом M_p смещается параллельно направляющим общей каретки. Каретка K_q расположена на каретке K_p и параллактическим винтом M_q передвигается перпендикулярно к направляющим общей каретки. Мостик M' прикреплен к станине. Бинокулярный микроскоп

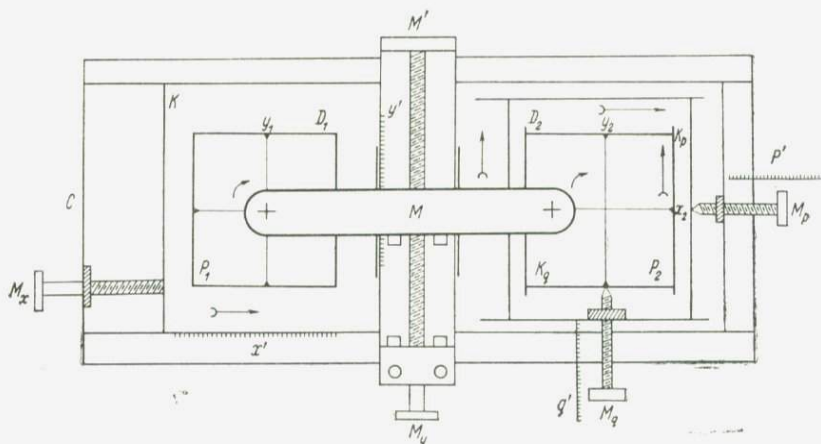


Рис. 86

штурвалом M_y перемещается вдоль мостика перпендикулярно к направляющим общей каретки. Снимкодержатель D_1 находится на общей каретке, а снимкодержатель D_2 — на параллактической каретке K_q . Каждый снимкодержатель можно поворачивать в его плоскости. Перемещения общей каретки и бинокулярного микроскопа учитываются по шкалам x' и y' , а смещения параллактических кареток измеряются параллактическими винтами и отсчитываются по шкалам p' и q' .

Таким образом, оба снимка передвигаются вдоль оси X прибора при помощи штурвала M_x . Правый снимок относительно левого перемещается вдоль осей X и Y прибора с помощью параллактических винтов.

На рис. 87 представлен стереокомпаратор СК-3, а на рис. 88 — схема бинокулярного микроскопа этого прибора.

На рис. 88 показана правая ветвь микроскопа. Лучи света от снимка P_2 проходят призму 1 и попадают на объектив 2, который строит изображение в фокальной плоскости 4, где находится измерительная марка. Призма 3 служит для удлинения пути и изменения направления лучей. Пройдя линзу 5, призму 6 и

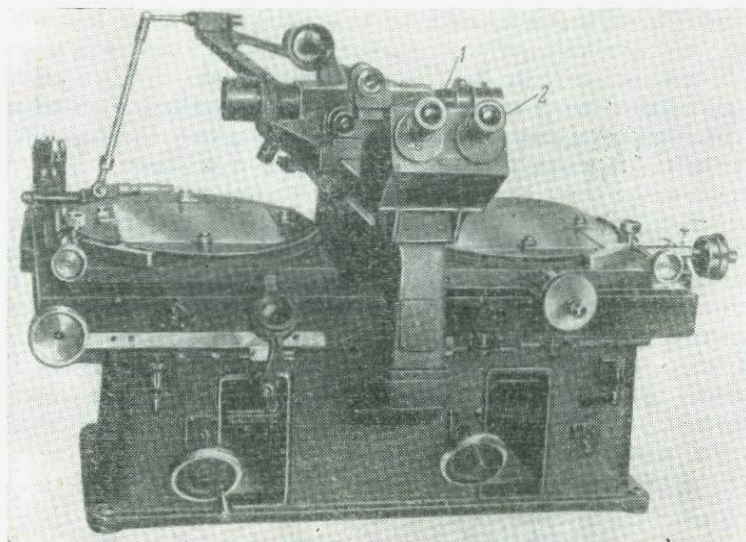


Рис. 87

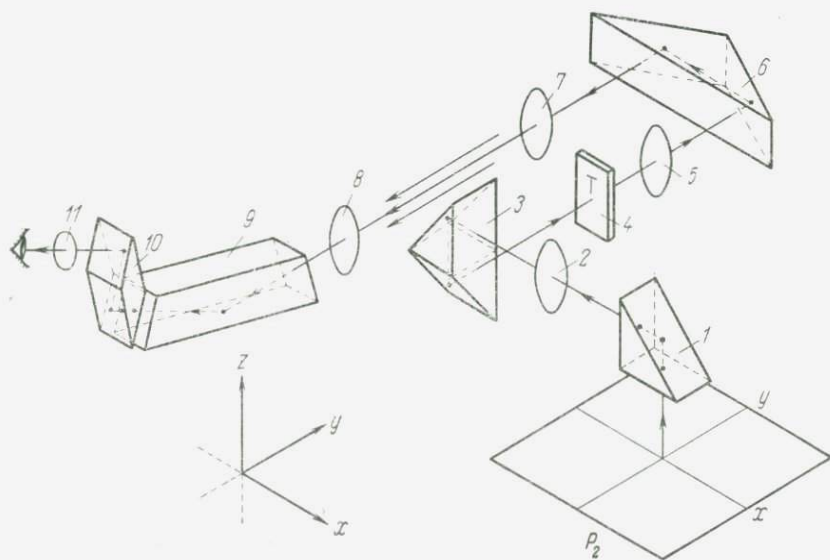


Рис. 88

линзу 7, лучи выходят параллельным пучком и попадают в объектив 8, который строит изображение в фокальной плоскости окуляра 11. Призмы 9 и 10 служат для изменения направления хода лучей. Оптические детали 1—7 составляют подвижную часть микроскопа, а детали 8—11 — неподвижную.

Аналогично устроена левая ветвь бинокулярного микроскопа.

Объективы фокусируются вращением втулок 1 (см. рис. 87), а окуляры — вращением окулярных трубок 2. Правая марка при юстировках может перемещаться при помощи исправительных винтов в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Снимки освещаются лампами: негативы и диапозитивы снизу, а контактные отпечатки — сверху. Возможна также работа и при дневном освещении. Для регулирования освещения снизу имеются поворачивающиеся зеркала.

Прибор снабжен коррекционным приспособлением Г. В. Романовского, которое используется при сгущении высот способом неискаженной модели.

Основные характеристики стереокомпаратора СК-3:

Формат снимков	до 18×18 мм
Увеличение наблюдательной системы	3^x
Диаметр поля зрения объектива	45 мм
Диаметр выходного зрачка окуляра	15 мм
Пределы измерений:	
абсцисс x	до 234 мм
ординат y	» 204 мм
продольных параллакс p без удлинителя	» 60 мм
» » с удлинителем	» 110 мм
поперечных параллакс q	» 20 мм
Точность отсчетов:	
по шкалам x' и y'	$\pm 0,02$ мм
» » p' и q'	$\pm 0,002$ мм
» » вращения снимкодержателей	5'
Рабочий ток для освещения	12 В
Размеры прибора	$0,8 \times 0,6 \times 0,6$ м
Масса прибора	70 кг

Существенным недостатком стереокомпаратора СК-3 является малое увеличение наблюдательной системы и невысокая точность измерения снимков. В настоящее время он используется в основном для учебных целей.

В стереокомпараторе должны быть осуществлены:

- 1) легкость и плавность всех рабочих движений;
- 2) резкость изображения визирных марок и снимков; наблюдения должны выполняться при наименьшем напряжении глаз;
- 3) прямолинейное движение кареток и без люфтов;
- 4) перпендикулярное движение бинокулярного микроскопа по отношению к движению общей каретки;
- 5) параллельное движение параллактической каретки K_p (см. рис. 86) относительно движения общей каретки;
- 6) перпендикулярное движение параллактической каретки K_q относительно движения общей каретки.

Чтобы прибор удовлетворял этим требованиям, его проверяют после перевозки и установки, а также периодически один-два раза в месяц в процессе работы. Проверка производится при помощи контрольных сеток или индикаторов.

Контрольные сетки представляют собой плоскопараллельные стеклянные пластины, на которых с высокой точностью награвированы взаимно перпендикулярные линии, образующие квадраты со стороной, равной обычно 5 мм. Такие сетки устанавливаются в снимкодержателе вместо снимков.

Процесс измерения снимков на стереокомпараторе включает:

- 1) установку снимков;
- 2) определение начальных отсчетов шкал;
- 3) наведение бинокулярного микроскопа на точки снимков и отсчитывание по шкалам;
- 4) вычисление координат и параллакс;

Левый снимок стереопары устанавливают в левый, а правый — в правый снимкодержатели так, чтобы главные точки снимков приблизительно совместились с центрами вращения снимкодержателей. Затем, наблюдая координатные метки, отмечающие оси x на снимках, и поворачивая снимкодержатели, добиваются, чтобы эти оси были параллельны движению общей каретки¹.

Для этого левую марку наводят на левую метку оси x левого снимка и, перемещая общую каретку штурвалом M_x , наблюдают за положением марки и правой метки оси x . Если марка пройдет через правую метку, то ось x левого снимка параллельна движению общей каретки. В противном случае половина видимого уклонения марки от метки устраняется поворотом снимка, а остальная часть — штурвалом M_y . Окончательная установка левого снимка достигается путем последовательных приближений. Аналогично устанавливают правый снимок, при этом вместо штурвала M_y используют винт поперечных параллакс.

Начальные отсчеты шкал определяются в следующем порядке. Левую марку наводят на верхнюю или нижнюю метку оси y левого снимка с помощью штурвалов M_x и M_y , а правую марку — на соответствующую метку оси y правого снимка винтами M_p и M_q . Получаемые после этого отсчеты по шкалам x' и p' будут начальными, т. е. нульпунктами этих шкал. Затем левую марку наводят на метку оси x левого снимка, а правую — на соответствующую метку оси x правого снимка. В этом случае отсчеты по шкалам y' и q' равны начальным.

Для облегчения вычислений начальные отсчеты обычно устанавливают кратными 10 или 5, что достигается перемещением нониусов шкал или независимыми вращениями счетных барабанов.

¹ Если после ориентирования снимков по координатным меткам начальные направления не параллельны друг другу, то стереоэффект уменьшается, а при больших углах между начальными направлениями не возникает.

После определения начальных отсчетов шкал последовательно наводят бинокулярный микроскоп на точки снимков и берут отсчеты по шкалам.

Начинающим наблюдателям можно рекомендовать следующий порядок визирования на точки. Сначала закрыть правый микроскоп, а левый штурвалами общей каретки и бинокулярного микроскопа навести на точку левого снимка. Потом закрыть левый микроскоп, открыть правый и параллактическими винтами навести его на точку правого снимка. Затем, открыв левый микроскоп, наблюдать одновременно оба снимка. В общем случае стереоскопическая марка не совпадет с наблюдаемой точкой стереомодели, что объясняется ошибками монокулярного визирования. Далее следует совместить стереоскопическую марку с наблюдаемой точкой стереомодели, пользуясь штурвалами и параллактическими винтами.

Опытный наблюдатель обычно не применяет монокулярное визирование, а наводит бинокулярный микроскоп при стереоскопическом рассматривании снимков.

Совмещение стереоскопической марки с точкой модели закапчивают, как правило, движением винта продольных параллаксов, перемещаю марку с «воздуха на землю».

С целью контроля измерений и исключения грубых промахов визирование на точки и отсчеты по шкалам производят не менее двух раз. Из двух отсчетов, полученных для определяемой точки по каждой шкале, берут среднее.

Чтобы найти координаты точки левого снимка и параллаксы соответственных точек, из каждого среднего отсчета вычитают начальный отсчет соответствующей шкалы.

В процессе изготовления и юстировок стереокомпаратора, а также при выполнении рабочих проверок этого прибора стремятся к тому, чтобы инструментальные ошибки были малыми и практически не влияли на результаты измерений.

С целью выявления инструментальных ошибок производят *исследование* оптической и измерительной систем *стереокомпаратора*. Эти исследования выполняют после установки прибора или капитального ремонта и периодически в процессе эксплуатации.

При исследовании оптической системы получают основные характеристики, от которых зависит точность стереоскопических измерений: разрешающую способность, увеличение, размер и качество измерительных марок, точность стереоскопического визирования.

Разрешающую силу бинокулярного микроскопа можно определить путем рассматривания специальных микроскопических мишеней.

Высота измерительной марки находится как разность отсчетов по шкале y , полученных при наведении горизонтального штриха контрольной сетки на верхний и нижний края марки. Аналогично измеряется ширина марки. Марки должны иметь

одинаковую форму и размеры и четкое очертание. Освещение марок должно быть равномерным.

Для определения точности стереоскопического визирования выбирают на стереопаре точки на различных по ландшафту участках. На каждую точку делают несколько наведений; после каждого наведения отсчитывают по шкалам. Из наблюдений выводят средние отсчеты и находят отклонения отдельных отсчетов от среднего, по которым вычисляют среднюю квадратическую ошибку стереоскопического визирования.

Исследования измерительной системы стереокомпаратора имеют целью выявить систематические и случайные ошибки изготовления и юстировки деталей и узлов прибора.

К систематическим ошибкам стереокомпаратора относятся: кривизна направляющих, неперпендикулярность направляющих, изменение масштаба измерительных шкал и винтов, ходовые и периодические ошибки измерительных винтов.

Смысл исследования измерительной системы заключается в эталонировании стереокомпаратора. В качестве эталона используется контрольная сетка.

Для выявления кривизны направляющих контрольную сетку, установленную в шпикодержатель, тщательно ориентируют вдоль соответствующей оси прибора. Наводят марку на одну из линий сетки и, перемещая каретку, следят, не сходит ли марка с этой линии. Отклонения характеризуют непрямолинейность направляющих и люфты в регулировке роликов.

Взаимную неперпендикулярность направляющих и масштабы измерительных шкал можно найти, если измерить координаты нескольких точек контрольной сетки. При этом линии сетки должны быть примерно параллельны осям X и Y прибора. Тогда для каждой точки можно написать два уравнения поправок

$$\left. \begin{aligned} a_0 - \vartheta y' - \alpha x' + (x - x') &= v' \\ b_0 + \vartheta x' - \beta y' + \varepsilon x' + (y - y') &= v'' \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

где x и y — координаты точки контрольной сетки в системе координат на сетке,

x' и y' — измеренные координаты той же точки,

ϑ — угол между осью x контрольной сетки и осью x' прибора,

ε — отклонение угла между направляющими X и Y прибора от прямого,

α и β — масштабы шкал x' и y' ,

$$a_0 = a + \vartheta b, \quad b_0 = b - \vartheta a, \quad (2.20)$$

a и b — величины, характеризующие смещение начала координат прибора относительно начала координат контрольной сетки.

В уравнениях (2.19) шесть неизвестных. Три из них — a_0 , b_0 и ϑ обусловлены ошибками установки контрольной сетки

в стереокомпараторе, а остальные три — α , β и ϵ характеризуют инструментальные ошибки прибора. Для определения неизвестных достаточно измерить координаты трех точек контрольной сетки, а затем составить и решить шесть уравнений. Обычно измеряют координаты более чем трех точек и уравнения решают при условии $[v'^2] + [v''^2] = \min$.

Расположение точек может быть произвольное, но для упрощения вычислений точки следует выбирать симметрично относительно начала координат на сетке и через равные интервалы одна от другой.

Ходовые ошибки измерительного винта выражаются в неравенстве поступательных движений при равном числе оборотов винта. Для их исследования контрольную сетку устанавливают в приборе так, чтобы линии ее были параллельны направлению движения каретки. Действуя винтом, наводят марку микроскопа на крайний штрих сетки, перпендикулярный к данному движению, и делают отсчет по соответствующей шкале. Затем наводят марку на последующие штрихи, пока позволяет движение данного винта. То же выполняют в обратном порядке. Ход вперед и обратно составляет один прием. Таких приемов делают два или три. Из прямого и обратного приемов выводят среднее и каждое среднее вычитают из начального, соответствующего первому штриху. Затем для каждого штриха находят среднее из всех приемов и полученные разности «сглаживают» по первым разностям. В результате получают таблицу поправок за ходовые ошибки винта.

Периодическая ошибка измерительного винта вызывается неравномерностью изменений отсчетов в пределах одного оборота винта. Причинами ее могут быть, например, изменение угла подъема винтовой нарезки, эксцентриситет отсчетного барабана, систематические погрешности делений барабана.

Эта ошибка представляет собой периодическую функцию отсчета измерительного винта, причем период этой функции равен 2π , или одному обороту. Пусть Δ — периодическая ошибка, u — отсчет по барабану. Тогда можно написать

$$\Delta = a_1 \cos u + b_1 \sin u + a_2 \cos 2u + b_2 \sin 2u + \dots \quad (2.21)$$

Для определения коэффициентов этой формулы измеряют некоторый интервал различными частями винта. Вероятнейшее значение интервала в делениях барабана пусть будет f . Интервал образуется при помощи приспособления, состоящего из коробки микроскопа-микрометра, вделанной в пластину. Пластины устанавливают в снимкодержатель. При наблюдениях марку наводят на подвижную и неподвижную нити микроскопа-микрометра, расстояние между которыми можно установить по желанию.

Если установка при первом измерении на правую нить была 0, то при втором измерении устанавливают некоторый отсчет u , равный какой-либо доле оборота винта, при третьем — $2u$, при

четвертом — $3u$ и т. д. Очевидно, отсчеты при наведении на левую нить будут больше отсчетов при наведении на правую нить приблизительно на f . В результате обработки полученных отсчетов определяют коэффициенты a и b . Зная величину Δ , можно найти исправленный отсчет, который равен $u + \Delta$.

Если влияние инструментальных ошибок на точность измерения снимков больше средней квадратической ошибки визирования, то они должны быть устранены или снижены. В противном случае следует вводить поправки в результаты измерений.

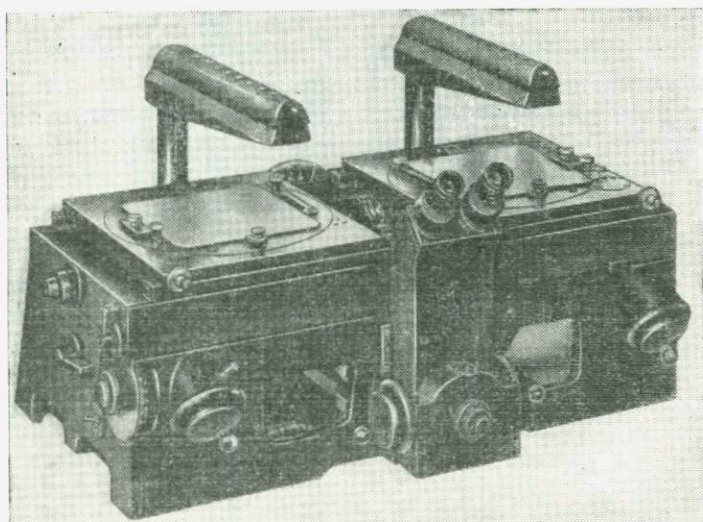


Рис. 89

Методике исследования стереокомпаратора посвящены работы Н. А. Урмаева, М. Д. Коншина, Г. В. Романовского (СССР) и Б. П. Халлерта (Швеция).

Стереокомпаратор 1818 фирмы «Цейсс» (ГДР) отличается от описанного выше стереокомпаратора СК-3 расположением наблюдательной системы, осветительного и счетных устройств и другими конструктивными особенностями, а также большей точностью измерений (рис. 89).

Бинокулярный микроскоп в этом приборе, как и в стереокомпараторе СК-3, состоит из подвижной и неподвижной частей. Но подвижная часть находится под общей кареткой. Негативы и диапозитивы освещаются верхними, а контактные отпечатки — нижними лампами.

Общая каретка перемещается левым штурвалом, а подвижная часть бинокулярного микроскопа — средним штурвалом перпендикулярно к движению главной каретки. Смещения общей

каретки и подвижной части бинокулярного микроскопа, соответствующие координатам точки левого снимка, учитываются по барабанам. Для установки по барабанам начальных отсчетов штурвалы отключаются.

Левую каретку со снимкодержателем можно смещать относительно общей каретки влево и вправо от начального положения и закреплять в нужном положении.

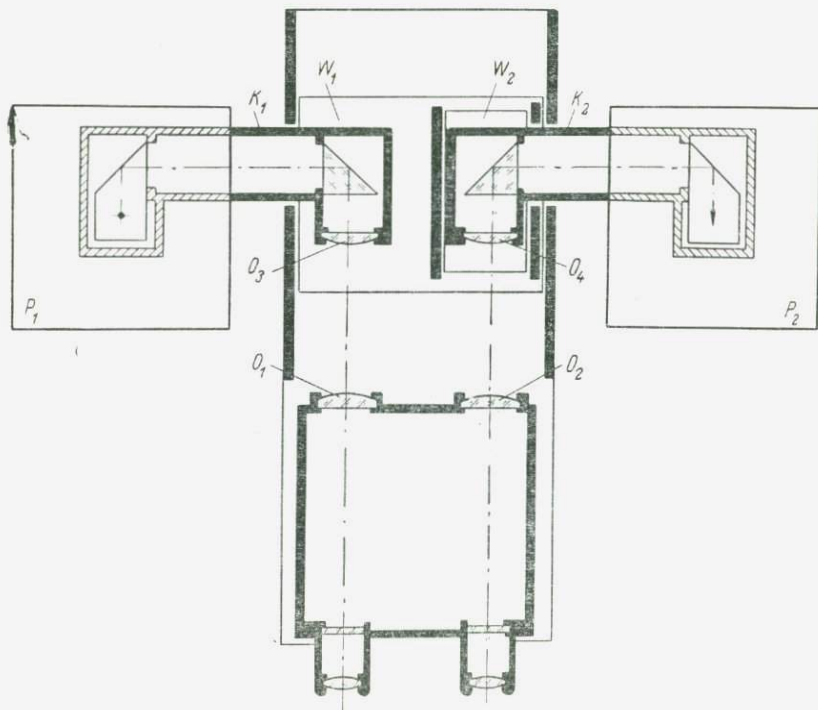


Рис. 90

Правая каретка со снимкодержателем перемещается правым штурвалом параллельно направляющим общей каретки. Это движение, соответствующее продольному параллаксу, учитывается по барабану, расположенному между снимкодержателями.

Для измерения поперечных параллаксов правая подвижная часть бинокулярного микроскопа перемещается при помощи шайбы относительно левой подвижной части вдоль оси Y прибора. Поперечный параллакс отсчитывается по барабану.

Объективы O_1 и O_2 (рис. 90) с измерительными марками и окулярами, составляющие неподвижную часть наблюдательной системы, представляют собой отфокусированные на бесконечность трубы. Подвижную часть наблюдательной системы, включающую объективы O_3 и O_4 , можно считать коллиматорами K_1 и K_2 , в фо-

кальных плоскостях которых находятся снимки P_1 и P_2 . Между объективами O_1 , O_2 и O_3 , O_4 ход лучей всегда параллельный. Поэтому изображение снимков в плоскости измерительных марок получается резким независимо от перемещения кареток W_1 и W_2 , с которыми соединены подвижные части наблюдательной системы.

Резкость изображения снимка достигается вращением кольца подвижного объектива, доступ к которому возможен через отверстие в передней части прибора.

К правой стороне прибора можно прикрепить чертежный столик.

Для предохранения прибора от повреждений при транспортировке имеются приспособления, отключающие ведущие ролики и закрепляющие общую каретку.

В поле зрения окуляра видны две марки — верхняя и нижняя, а также четыре перекрестия. Верхняя марка предназначена для измерения наземных снимков, а нижняя — для измерения аэро-снимков. Перекрестия служат для юстировок микроскопа в заводских условиях и для специальных измерений.

Основные характеристики стереокомпаратора 1818:

Формат снимков	до 18×18 см
Увеличение наблюдательной системы	8^x
Диаметр поля зрения	16 мм
Диаметр выходного зрачка окуляра	3 мм
Высота средней марки	0,35 мм
Расстояние между центром точечной марки и острием средней марки	0,35 мм
Расстояние от острия средней марки до перекрестий	5 мм
Точность отсчетов по шкалам:	
x' и y'	± 4 мкм
p'	± 1 мкм
q'	± 2 мкм
вращения снимкодержателей	± 10 с
Пределы измерений:	
абсцисс x	до 235 мм
ординат y	» 180 мм
продольных параллаксов p	75 мм
с удлинителем	131 мм
поперечных параллаксов q	± 10 мм
поворота снимкодержателей	$\pm 5^g$
Рабочий ток для освещения — переменный или постоянный с напряжением	200 В
Масса прибора	132 кг

§ 24. МУЛЬТИПЛЕКСЫ

Мультиплекс — универсальный стереоприбор, состоящий из трех проекторов или более (рис. 91). Он позволяет построить фотограмметрическую сеть и составить топографическую карту.

С целью сокращения размеров прибора мультиплекс рассчитан на обработку уменьшенных в 3—4 раза снимков (диапозитивов).

Основные части мультиплекса: стол с экраном, две стойки, штанга, базисные каретки, проекторы и измерительный столик.

На стойках имеются муфты, поддерживающие штангу, которая служит осью X прибора. Штурвалами можно изменить высоту штанги, а винтами закрепить ее в нужном положении. Стойки опираются на подъемные винты, концы которых входят в гнезда подшипников, прикрепленных к столу.

К штанге шарнирно прикреплены держатели предохранительной планки. На штанге имеются направляющая и зубчатая рейки для перемещения базисных кареток вдоль оси X , шкала для учета этого перемещения, штепсельные розетки для проекторов, измерительного столика и ручной лампы, а также штепсельная вилка для включения подводящего кабеля.

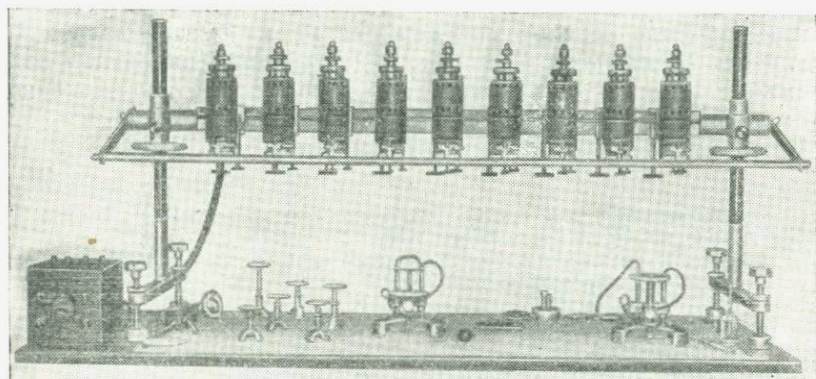


Рис. 91

Базисная каретка (рис. 92), состоящая из двух суппортов и карданного кольца, надевается на штангу и может перемещаться по ней рукояткой (движение b_X). В карданном кольце находится проектирующая камера. Суппорты позволяют передвигать проектирующую камеру вдоль осей Y и Z прибора (движения b_Y и b_Z). Карданное кольцо обеспечивает наклоны проектирующей камеры α и ω вокруг взаимно перпендикулярных осей. Прикладная рамка камеры поворачивается вокруг оптической оси от руки или с помощью микрометричного винта. Оси кардана и оптическая ось камеры пересекаются в центре выходного зрачка объектива.

Проектор состоит из проектирующей камеры и осветителя. Проектирующая камера имеет корпус, объектив и прикладную рамку в виде стеклянной пластинки, на которой отмечена главная точка. Для установки и центрирования диапозитива служат зажимы и два эксцентрика. Осветитель составляют кожух, конденсор и лампа. Кожух имеет охлаждающие каналы и паз для анаглифического светофильтра.

Для распределения тока по проекторам и регулировки накала ламп служит электропульт.

Измерительный столик служит для измерения модели. На подковообразном основании столика укреплены вертикальные направляющие, по которым с помощью червячного винта перемещается хомут, несущий экранчик. В центре экранчика находится светящаяся марка. Высота экранчика отсчитывается по счетчику. К основанию столика прикреплено карандашное приспособление. Кроме измерительного столика имеются ориентирные столики для внешнего ориентирования модели по опорным точкам.

В мультиплексе применен анаглифический способ наблюдения снимков.

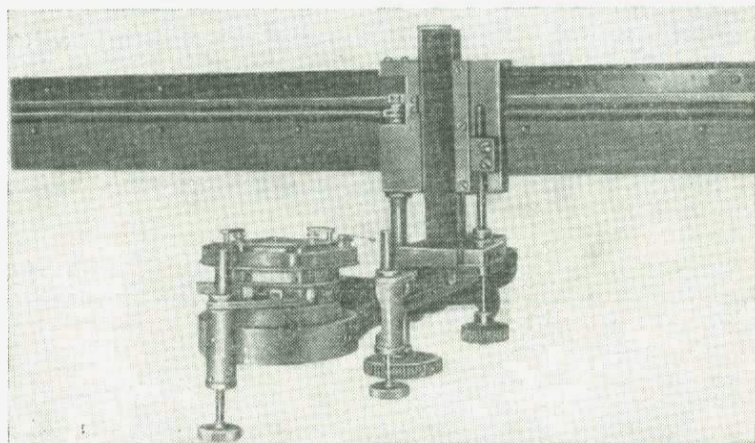


Рис. 92

Обработка снимков на мультиплексе включает:

- изготовление уменьшенных снимков — диапозитивов,
- внутреннее ориентирование снимков,
- взаимное ориентирование снимков,
- внешнее ориентирование модели,
- определение положения отдельных точек местности,
- рисовку контуров и рельефа.

Если обработка снимков производится с подобными связками проектирующих лучей, то коэффициент уменьшения диапозитивов

$$k = \frac{f}{f_{\Pi}}, \quad (2.22)$$

где f — фокусное расстояние снимка, подлежащего уменьшению, f_{Π} — фокусное расстояние проектирующей камеры мультиплекса.

Для внутреннего ориентирования снимков каждый диапозитив устанавливается в соответствующую камеру так, чтобы главная

точка его совпала с главной точкой, отмеченной на прикладной рамке.

Взаимное ориентирование снимков выполняется путем перемещения и поворота проекторов. В результате взаимного ориентирования соответственные лучи связок пересекаются, т. е. образуется модель местности.

Внешнее ориентирование модели производится по опорным точкам, нанесенным на планшет.

Отдельные точки местности, контуры и горизонтالي изображаются на планшете с помощью измерительного столика. Для этого наблюдатель визирует на соответствующие точки модели или обводит маркой контуры и линии равных высот на модели. С помощью карандашного устройства столика эти элементы вычерчиваются на планшете.

В зависимости от величины угла зрения проектора (2β) мультиплексы делятся на нормальноугольные, широкоугольные и сверхширокоугольные.

В табл. 9 приведены основные характеристики советских мультиплексов.

Т а б л и ц а 9

Основные характеристики мультиплекса	Тип мультиплекса			
	нормально- угольный $2\beta = 62^\circ$ $f = 210$ мм	широко- угольный $2\beta = 105^\circ$ $f = 100$ мм	М-9 $2\beta = 87^\circ$ $f = 100$ мм	сверхшироко- угольный $2\beta = 122^\circ$ $f = 70$ мм
Число проекторов	6—9	6—9	9	9
Коэффициент уменьшения снимков	4	4,5	3,3	3,3
Фокусное расстояние камеры проектора f_n , мм	45	22	31,5	21
Размер диапозитивов, мм	40 × 60	40 × 60	40 × 60	58 × 58
Фокусное расстояние объектива камеры F , мм	40,0	20,7	28,6	19,6
Зона резкого изображения снимка, мм	250—360	250—360	250—360	250—360
Значения b_X , мм	80—100	80—120	80—120	100—140
» b_Y , мм	±65	±60	±55	±60
» b_Z , мм	±40	±40	±35	±40
Углы наклона α и ω камеры, °	±8	±8	±7	±8
Углы поворота камеры κ , °	360	360	360	360

За создание сверхширокоугольного мультиплекса Н. В. Викторову, Д. И. Аронову, А. Ш. Шахвердову, М. Д. Коншину и М. М. Русинову присуждена Государственная премия.

По предложению В. И. Кораблева изготовлен универсальный уменьшитель, позволяющий получать диапозитивы с различными коэффициентами уменьшения, т. е. для любых мультиплексов.

Н. П. Михайлов разработал профилограф для построения профилей и визирную насадку на измерительный столик для определения полей невидимости по модели местности, созданной на мультиплексе.

Вследствие уменьшения снимков и недостатков анаглифического способа наблюдения их точность измерений на мультиплексе в 2—3 раза ниже по сравнению с высокоточными универсальными стереоприборами. Поэтому в настоящее время мультиплекс применяется главным образом для обучения как простой и сравнительно недорогой прибор, позволяющий наглядно показать и быстро освоить все основные процессы пространственной фототриангуляции и составления карты на универсальных стереоприборах.

§ 25. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Плоскостная фототриангуляция позволяет определять по снимкам плановое положение точек местности. Она применяется для сгущения опорной сети в равнинных и холмистых районах. В результате плоскостной фототриангуляции снимки обеспечиваются опорными точками, необходимыми для трансформирования их и составления фотоплана.

В основу плоскостной фототриангуляции положено выведенное в гл. 1 свойство планового снимка: центральные углы на снимке практически равны соответствующим горизонтальным углам на местности, если угол наклона снимка мал, а местность равнинная или холмистая. При этом в качестве центральной точки можно выбрать любую точку, расположенную в пределах круга с центром в главной точке снимка и радиусом, равным $1:24$ доли фокусного расстояния фотокамеры. Обычно за вершину центральных углов принимают контурную точку, легко опознаваемую на соседних снимках.

Если вершина направлений не выходит за пределы названного круга, то, как установлено в § 13, угловые искажения, вызванные наклоном снимка $\epsilon = 3^\circ$, не превышают $6'$.

Угловые искажения на плановых снимках, вызванные рельефом местности, иллюстрирует табл. 10, где представлены искажения $\delta\varphi'$ направлений, исходящих из главной точки снимка. Величины $\delta\varphi'$ получены по формуле (1.80) для различных значений угла наклона ϵ снимка и отношения превышения h к высоте полета H ($f = r = 100$ мм, $x = 70$ мм).

Таблица 10

ϵ°	$h : H$		
	1 : 25	1 : 50	1 : 100
$\delta\varphi'$			
0,25	0,4'	0,2'	0,1'
0,5	0,8	0,4	0,2
1	1,7	0,8	0,4
2	3,3	1,7	0,8
3	5,0	2,5	1,3

В зависимости от технических средств, используемых для построения плоскостной фототриангуляции, ее разделяют на аналитическую, графическую и механическую.

В *аналитической* плоскостной фототриангуляции центральные углы измеряются на специальном приборе — радиалтриангуляторе, а результаты этих измерений используются для вычисления координат точек сети. Для построения аналитической плоскостной фототриангуляции вместо радиалтриангулятора можно использовать более распространенный прибор — стереокомпаратор. В этом случае координаты точек сети вычисляются по измеренным прямоугольным координатам их изображений на снимках. Вычисление фотограмметрической сети целесообразно выполнять на электронной цифровой вычислительной машине, особенно в случае, когда объем работ значительный.

В *графической* плоскостной фототриангуляции центральные углы со снимков переносятся на восковки, которые используются для построения сети.

В *механической* фототриангуляции вместо восковок применяются целевые шаблоны.

Аналитическая плоскостная фототриангуляция позволяет определять координаты точек местности с большей точностью, чем графическая и механическая.

Плоскостную фототриангуляцию, основанную на использовании свойств центральных углов на снимках, часто называют радиальной фототриангуляцией, или радиалтриангуляцией.

По числу маршрутов, одновременно обрабатываемых для построения свободной сети, различают одномаршрутную, двухмаршрутную и многомаршрутную радиальную триангуляцию.

Графическая одномаршрутная радиалтриангуляция широко применялась при картографировании СССР в масштабе 1 : 100 000. В настоящее время она используется лишь в отдельных случаях при съемке равнинных и холмистых районов. Основным способом сгущения опорной сети теперь является аналитическая пространственная фототриангуляция. В равнинных районах, когда нет необходимости определять высоты по снимкам, можно применить аналитическую радиалтриангуляцию.

§ 26. АНАЛИТИЧЕСКАЯ РАДИАЛЬНАЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ

Пусть P_1, P_2, P_3 — плановые снимки равнинного или холмистого района с продольным перекрытием около 60% (рис. 93).

Для построения маршрутной фотограмметрической сети выберем на снимках центральные точки $1, 2, 3$ и связующие $1', 2', 3'$ и $1'', 2'', 3''$.

Связующей точкой называется контурная точка, расположенная в зоне тройного перекрытия снимков, т. е. общая для смежных стереопар.

Направление, проходящее из центральной точки данного снимка через точку, соответствующую центральной точке соседнего снимка, называется *начальным*.

Измерим на снимках центральные углы между начальными направлениями и направлениями на связующие точки. Тогда

можно найти координаты всех точек сети путем решения прямых и обратных засечек.

Например, выбрав произвольно длину и плановое положение первого базиса b_1 , прямыми засечками с точек 1 и 2 получим точки $1'$, $2'$ и $1''$, $2''$ (рис. 94). Затем, используя точки $2'$ и $2''$

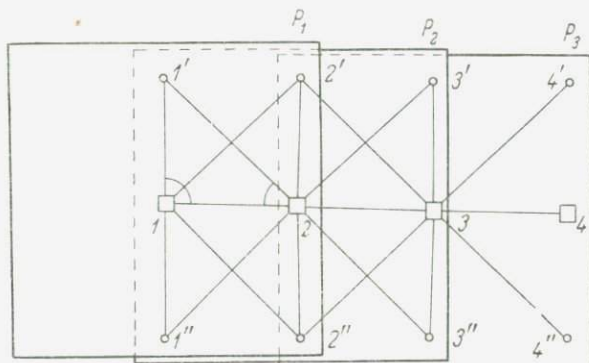


Рис. 93

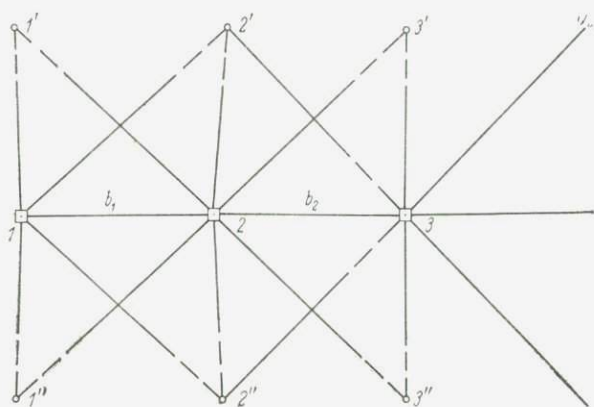


Рис. 94

и направление $2-3$, обратными засечками найдем и проконтролируем положение точки 3 . С базиса b_2 прямыми засечками получим точки $3'$ и $3''$.

Аналогично продолжим построение фотограмметрической сети по другим снимкам данного маршрута. В результате этих построений получим свободную маршрутную сеть в произвольном масштабе. Для приведения ее к заданному масштабу и ориентирования относительно геодезической системы координат необходимо иметь не менее двух опорных точек, например в начале и в конце маршрута. Геодезические координаты этих точек должны быть

известны. Кроме того, опорные точки должны быть опознаны на снимках и включены в маршрутную сеть.

Для измерения центральных углов на снимках служит радиалтриангулятор.

Теория аналитической фототриангуляции с применением радиалтриангулятора детально разработана в трудах Н. А. Урмаева.

Рассмотрим способ, позволяющий развить сеть радиальной фототриангуляции при помощи стереокомпаратора и электронной цифровой вычислительной машины.

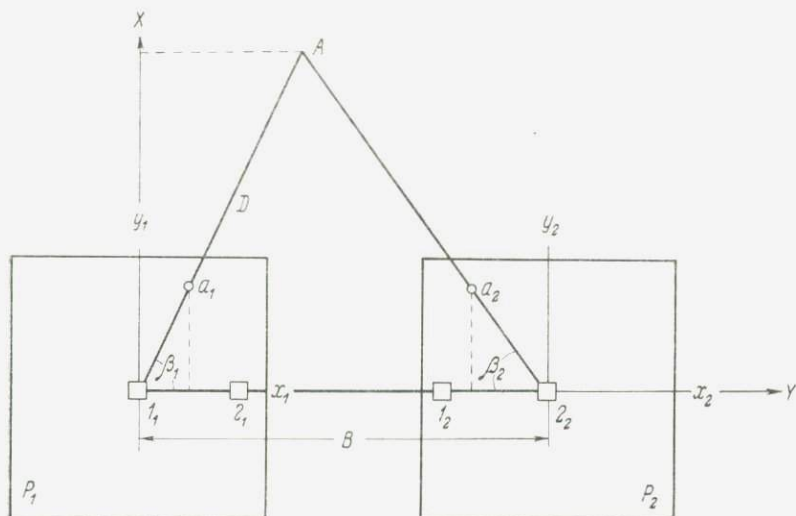


Рис. 95

Пусть a_1 и a_2 — изображения определяемой точки сети на снимках P_1 и P_2 (рис. 95). Выберем центральные точки I_1 и I_2 и отметим начальные направления $I_1—Z_1$ и $I_2—Z_2$. Начала координат на снимках совместим с центральными точками, а координатные оси x_1 и x_2 — с начальными направлениями. Координаты точек a_1 и a_2 обозначим через x_1, y_1 и x_2, y_2 .

Обозначим через I, Z и A точки местности, соответствующие центральным точкам и точке a_1 (a_2).

Для определения положения точек сети используем прямоугольную систему координат XU с началом в точке I . Ось U этой системы совместим с направлением, соответствующим начальному.

Из рисунка следует

$$X = D \sin \beta_1, \quad Y = D \cos \beta_1,$$

$$D = B \frac{\sin \beta_2}{\sin (\beta_1 + \beta_2)},$$

где B и D — горизонтальные расстояния на местности от точки I до точек 2 и A ,

β_1 и β_2 — центральные углы на левом и правом снимках.
После простых преобразований получим

$$\left. \begin{aligned} X &= B \frac{y_1 y_2}{x_1 y_2 - x_2 y_1} \\ Y &= B \frac{x_1 y_2}{x_1 y_2 - x_2 y_1} \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

Для измерения координат точек стереопары снимки следует устанавливать так, чтобы начальные направления были параллельны оси x стереокомпаратора.

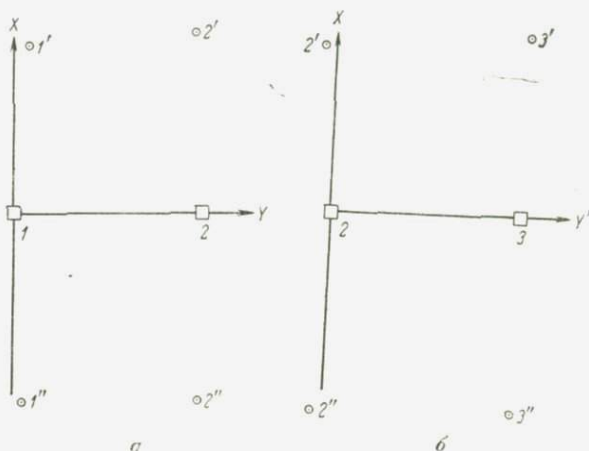


Рис. 96

Измерим координаты центральных и связующих точек первой стереопары $P_1 - P_2$ (см. рис. 93). Затем вычислим по формулам (3.1) фотограмметрические координаты соответствующих точек местности, выбрав произвольно длину базиса B . Таким образом получим первое звено радиальной фототриангуляции, имеющее произвольный масштаб (рис. 96, а). Аналогично построим второе звено по второй стереопаре $P_2 - P_3$ (рис. 96, б). Эти звенья независимы, так как каждое имеет свою систему координат и свой масштаб.

Присоединим второе звено к первому по связующим точкам $2'$ и $2''$. Для этого сначала найдем масштабный коэффициент

$$r = \frac{D}{D'} = \frac{\sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2}}{\sqrt{(X' - X'_0)^2 + (Y' - Y'_0)^2}}, \quad (3.2)$$

где D и D' — расстояния между связующими точками в первом и втором звеньях,

X, Y и X', Y' — координаты точки $2'$ в системах XU и $X'Y'$,
 X_0, Y_0 и X'_0, Y'_0 — координаты точки $2''$, принимаемой за начальную, в тех же системах координат.

Обозначив

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= (X' - X'_0) r \\ \Delta Y &= (Y' - Y'_0) r \end{aligned} \right\}, \quad (3.3)$$

можно написать

$$\left. \begin{aligned} X^* &= X_0 + \Delta X' \cos t - \Delta Y' \sin t \\ Y^* &= Y_0 + \Delta Y' \cos t + \Delta X' \sin t \end{aligned} \right\}, \quad (3.4)$$

где t — угол поворота системы координат $X'Y'$ относительно системы XU .

Представим уравнения (3.4) в виде

$$\left. \begin{aligned} \Delta X' u - \Delta Y' v - \Delta X &= 0 \\ \Delta Y' u + \Delta X' v - \Delta Y &= 0 \end{aligned} \right\}; \quad (3.5)$$

здесь

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= X^* - X_0, \quad u = \cos t \\ \Delta Y &= Y^* - Y_0, \quad v = \sin t \end{aligned} \right\}. \quad (3.6)$$

Решив уравнения (3.5), найдем

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{\Delta X \Delta X' + \Delta Y \Delta Y'}{\Delta X'^2 + \Delta Y'^2} \\ v &= \frac{\Delta Y \Delta X' - \Delta X \Delta Y'}{\Delta X'^2 + \Delta Y'^2} \end{aligned} \right\}. \quad (3.7)$$

Теперь по формулам (3.4) вычислим координаты точек $3, 3'$ и $3''$ в системе координат XU , принятой при построении первого звена.

Обычно в каждой зоне тройного перекрытия снимков выбирают три связующие точки и больше. Поэтому элементы ориентирования смежных звеньев, т. е. величины r и t , и координаты X^*Y^* точек второго звена, полученные выше по двум связующим точкам, следует рассматривать как первое приближение. Вероятнейшее значение координат точек второго звена в системе XU найдем по формулам

$$\left. \begin{aligned} X &= X^* + \delta X_0 + (X^* - X_0^*) \delta r - (Y^* - Y_0^*) \delta t \\ Y &= Y^* + \delta Y_0 + (Y^* - Y_0^*) \delta r + (X^* - X_0^*) \delta t \end{aligned} \right\}, \quad (3.8)$$

где $\delta X_0, \delta Y_0, \delta r, \delta t$ — поправки к элементам ориентирования второго звена относительно первого.

Для определения этих поправок необходимо составить уравнения (3.8) для связующих точек $2, 2'$ и $2''$ и решить их по способу наименьших квадратов.

Аналогично построим третье звено по третьей стереопаре $P_3 - P_4$ и присоединим его к первым двум по связующим точкам Z, Z' и Z'' .

Продолжив такие построения до конца маршрута, получим свободную маршрутную сеть, имеющую произвольный масштаб и единую систему координат, произвольно ориентированную относительно геодезической системы координат.

Рассматривая фототриангуляцию как неизменную систему, ориентируем ее вероятнейшим образом по опорным точкам.

Пусть известны приближенные значения: угла T , на который надо повернуть вычисленную фототриангуляционную сеть для приведения ее в систему геодезических координат, масштабного коэффициента R и геодезических координат $X_{г0}, Y_{г0}$ начала системы, в которой вычислена фототриангуляционная сеть.

С этими приближенными данными точно находим вычисленные координаты.

$$\left. \begin{aligned} X_{г}^* &= X_{г0} + (X \cos T - Y \sin T) R \\ Y_{г}^* &= Y_{г0} + (Y \cos T + X \sin T) R \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

Приближенные значения элементов R и T можно получить по двум опорным точкам. Для этого следует применить формулы (3.2) и (3.7), заменив в них координаты X, Y и X', Y' на $X_{г} Y_{г}$ и X, Y соответственно. Чтобы найти приближенно величины $X_{г0}$ и $Y_{г0}$ достаточно перенести начало координат X и Y в опорную точку.

Для определения поправок к приближенным значениям элементов ориентирования фототриангуляции составим уравнения

$$\left. \begin{aligned} \delta X_{г0} + (X^* - X_0^*) \delta R - (Y^* - Y_0^*) \delta T + X_{г}^* - X_{г} &= v \\ \delta Y_{г0} + (Y^* - Y_0^*) \delta R + (X^* - X_0^*) \delta T + Y_{г}^* - Y_{г} &= v' \end{aligned} \right\}, \quad (3.10)$$

где $X_{г}$ и $Y_{г}$ — геодезические координаты опорной точки.

Уравнения (3.10) решим по способу наименьших квадратов.

Геодезические координаты любой точки сети вычислим по формулам

$$\left. \begin{aligned} X_{г} &= X^* + \delta X_0 + (X^* - X_0^*) \delta R - (Y^* - Y_0^*) \delta T \\ Y_{г} &= Y^* + \delta Y_0 + (Y^* - Y_0^*) \delta R + (X^* - X_0^*) \delta T \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

Если опорных точек недостаточно для внешнего ориентирования каждой маршрутной сети, то маршрутные сети сначала объединяют в блок по связующим точкам, расположенным в зонах поперечного перекрытия снимков, а затем ориентируют внешне блочную сеть. Способ решения этих задач не отличается от изложенного в этом параграфе.

Построение маршрутной сети фототриангуляции графическим способом начинают с выбора и накальвания на снимках центральных и связующих точек. В качестве центральной точки выбирают контурную точку, находящуюся в пределах круга с центром в главной точке снимка и радиусом, равным $f : 24$. Центральные точки опознают на смежных снимках. Связующими точками служат также контурные точки, расположенные в зонах тройного перекрытия снимков (см. рис. 93). В фотограмметрическую сеть включают еще опорные точки, необходимые для ориентирования ее относительно геодезической системы координат. Таких точек должно быть не меньше двух: одна в начале маршрута и одна в конце. Обычно с целью контроля используют еще несколько дополнительных опорных точек.

С каждого снимка изготовляют восковку направлений. Для этого обычную восковку кладут на снимок и перекальвают на нее центральную и другие точки, выбранные для построения сети. Затем проводят направления на восковке из центральной точки на другие.

На прозрачной основе произвольно накальвают точки 1 и 2 (см. рис. 94) обычно так, чтобы расстояние между ними было несколько меньше отрезка $1-2$ на первом снимке (см. рис. 95). Эти точки принимают за плановое положение точек местности, соответствующих центральным точкам первого и второго снимков.

Первую восковку, полученную по снимку P_1 , кладут на основу, совмещают ее центральную точку с точкой 1 и ориентируют эту восковку так, чтобы с базисом $1-2$ совместилось соответствующее начальное направление восковки. Аналогично устанавливают на основу вторую восковку, составленную по снимку P_2 . В результате пересечения соответственных направлений получается плановое положение точек $1'$, $2'$ и $1''$, $2''$. Одновременно на основе определяется и направление $2-3$ на точку, которая соответствует центральной точке третьего снимка. Точки $1'$ и $1''$ накальвают на основу.

Положение точки 3 получают с помощью третьей восковки путем обратной засечки по направлению $2-3$ и точкам $2'$ и $2''$. Так как при этом имеется одно избыточное направление, то в общем случае возникает невязка. В качестве вероятнейшего положения точки 3 принимается среднее из двух, полученных на направлении $2-3$. С этой точкой совмещают центральную точку третьей восковки, ориентируя ее по направлению $3-2$. Тогда на точках $2'$ и $2''$ могут быть треугольники погрешности. Окончательным положением этих точек служат центры треугольников погрешностей. Их переносят на основу.

Аналогично получают положение точек 4 , $4'$ и $4''$ с помощью четвертой восковки направлений. Эти построения продолжают

до конца маршрута, в результате чего создается свободная маршрутная сеть произвольного масштаба.

Для приведения сети к заданному масштабу и ориентирования ее относительно геодезической системы координат применяют обычно *оптический редуктор* (рис. 97). Он представляет собой проекционный аппарат, состоящий из объектива, кассеты и экрана, плоскости которых параллельны друг другу. В кассету закладывают маршрутную сеть, а на экран устанавливают планшет с опорными точками. Оптический редуктор имеет еще устройство

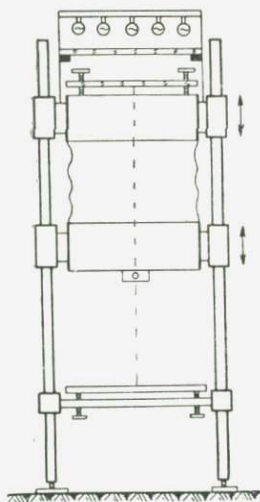


Рис. 97

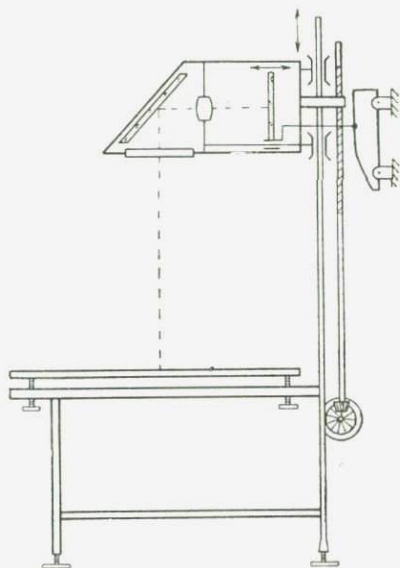


Рис. 98

для освещения сети и механизм — инверсор, автоматически выполняющий основное уравнение оптики, т. е. обеспечивающий резкое изображение сети на планшете при изменении положения объектива относительно экрана.

Изменяя масштаб изображения сети и положение планшета на экране, совмещают опорные точки, нанесенные на планшет, с изображениями соответствующих точек сети. Затем накальвают на планшете изображения определяемых точек сети. Таким образом на планшете получают редуцированную маршрутную сеть в масштабе, выбранном при нанесении на планшет опорных точек.

Недостатком представленного на рис. 97 оптического редуктора Н. А. Попова являются большие размеры — $1,4 \times 1,4 \times 3,0$ м. Ф. В. Дробышев предложил оптический редуктор, размеры которого значительно меньше (рис. 98). Он предназначен для редуцирования фототриангуляционных сетей, предварительно

уменьшенных в три раза при помощи специального пантографа. Прибор состоит из проектирующей камеры, перемещающейся по вертикальным направляющим, экрана и масштабного лекального инверсора. В проектирующую камеру входят объектив, кассета, люминесцентные лампы и зеркало, изменяющее направление оптической оси объектива на 90° .

Для редуцирования фототриангуляционных сетей изготовлена серия однопрокторных и многопрокторных редукторов, разработанных в ЦНИИГАиК.

Кроме оптико-механического способа, основанного на применении оптического редуктора, существуют другие способы редуцирования фототриангуляционных сетей: графический, графомеханический и графоаналитический. Однако они применяются редко, так как производительность их значительно ниже по сравнению с оптико-механическим способом.

Графический способ позволяет перенести свободную сеть на планшет прямыми засечками с опорных точек, расстояние между которыми принимается за базис. Графомеханический способ предусматривает применение пантографа. В графоаналитическом способе сеть переносится на планшет полярным способом. Для этого вычисляют коэффициент редуцирования сети

$$k = \frac{l}{l'} \quad (3.12)$$

где l и l' — соответственно расстояния между опорными точками на планшете и фототриангуляционной основе. Затем одну из опорных точек на основе принимают за полюс и соединяют ее с остальными опорными и определяемыми точками. Измеряют полярные расстояния и умножают их на коэффициент редуцирования сети. Новые значения полярных расстояний откладывают от полюса на соответствующих направлениях. Таким образом на основе получают редуцированную сеть. Ее ориентируют на планшете по опорным точкам. После этого накалывают на планшете определяемые точки.

Для построения маршрутной фототриангуляции продольное перекрытие снимков должно быть больше 50%.

При продольном и поперечном перекрытиях меньше 50% фототриангуляционную сеть можно развить одновременно по двум маршрутам. На рис. 99 показаны точки, которые выбирают на снимках в этом случае: $1-6$ — центральные точки, k, a', a'', b' и b'' — точки, лежащие в зоне двойного перекрытия снимков, $a, b,$ и c — связующие точки, расположенные в зоне перекрытия четырех снимков. Кроме того, в сеть включают опорные точки для ее редуцирования.

Каждая центральная точка изображается только на одном снимке. Поэтому в данном случае нет необходимости выбирать в качестве такой точки контурную. Любая точка, не выходящая за пределы окружности, описанной из главной точки радиусом

$f : 24$, принимается за центральную. Начальные направления проводят так, чтобы они проходили через соответственные точки перекрывающихся снимков. Наиболее точно эта задача решается стереоскопическим способом с помощью прибора, предложенного А. Н. Лобановым (рис. 100).

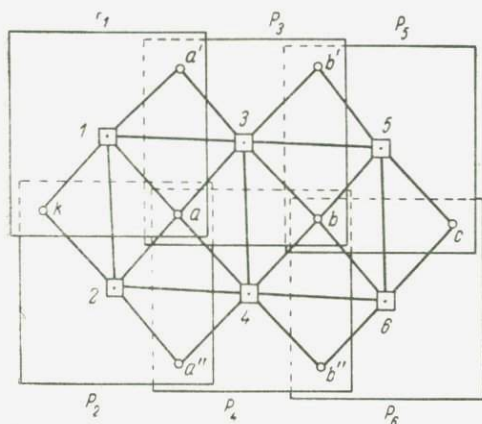


Рис. 99

Прибор состоит из двух прозрачных линеек. Каждая линейка вращается в корпусе. На конце линейки смонтирована накладка. На линейке нанесен штрих, проходящий через центр вращения ее и острие накладки.

Для проведения начальных направлений стереопару устанавливают под стереоскопом так, чтобы получился нулевой стереоэффект. Линейки кладут на снимки, совмещают центры вращения их с центральными точками и ориентируют штрихи приблизительно вдоль начальных направлений. Рассматривая снимки

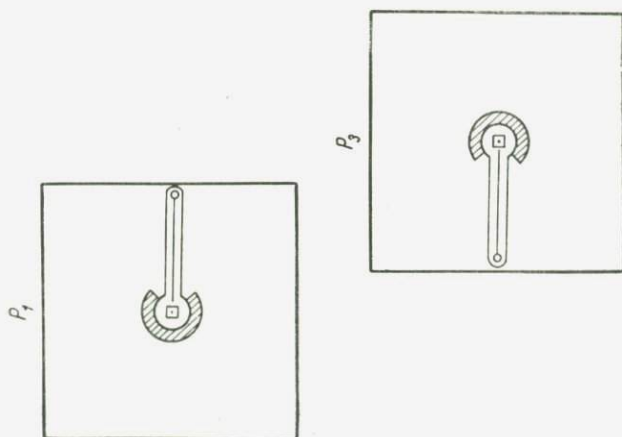


Рис. 100

стереоскопически, наблюдатель видит плоское изображение местности и стереоскопический штрих, в общем случае не совмещенный с этим изображением. Совмещение достигается поворотами линеек, после чего начальные направления фиксируют наколами на снимках.

Стереоскопический способ проведения начальных направлений целесообразно использовать и в маршрутной фототриангуляции, когда в центральной части снимка нет контурных точек и за вершину направлений выбирается точка, трудно опознаваемая на соседнем снимке.

После выбора точек и проведения начальных направлений на снимках первого и второго маршрутов изготавливают восковки направлений. Затем приступают к построению сети.

На прозрачной основе (рис. 101) произвольный отрезок 1—2 принимают за базис, с которого прямыми засечками определяют точки a и k с помощью восковок направлений, составленных по снимкам P_1 и P_2 . Обратной засечкой по направлению 1—3 и точке a находят точку 3 с помощью восковки направлений, полученной по снимку P_3 . Аналогично определяют точку 4 с помощью восковки направлений, изготовленной по снимку P_4 . Через эту точку должно пройти начальное направление 3—4. Точку a' получают прямой засечкой с базиса 1—3, а точку a'' — тоже прямой засечкой с базиса 2—4. Такими же приемами строят четырехугольник 3564 и находят точки b , b' и b'' , продолжая сеть до конца маршрутов. В результате этих построений образуется свободная сеть произвольного масштаба, которую редуцируют по опорным точкам.

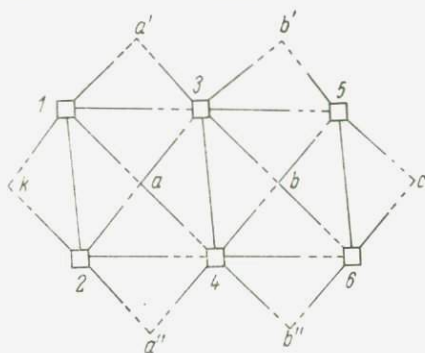


Рис. 101

§ 28. ТОЧНОСТЬ РАДИАЛЬНОЙ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ¹

Точность радиальной фототриангуляции зависит от искажений центральных углов, вызванных в основном углами наклона снимков и рельефом местности. Кроме этих ошибок в аналитической фототриангуляции действуют ошибки измерения снимков, а в графической — ошибки изготовления восковок направлений, а также погрешности развития сети по ним.

Относительная ошибка в длине маршрутной сети растет пропорционально корню квадратному из числа снимков n . Поэтому, обозначив линейную ошибку через m_L , а длину ряда через L , напишем

$$\frac{m_L}{L} = \lambda \sqrt{n},$$

где λ — коэффициент пропорциональности.

¹ Приводится упрощенный вывод формулы.

Чтобы получить окончательную формулу для вычисления m_L в масштабе составляемой карты, умножим правую часть на коэффициент k , равный отношению масштаба карты $1 : M$ к масштабу снимка $1 : m$:

$$k = \frac{m}{M} \cdot \quad (3.13)$$

Кроме того, полагая, что маршрутная сеть состоит из правильных фигур, напишем

$$L = nb, \quad (3.14)$$

где b — длина базиса фотографирования в масштабе снимка. Теперь найдем

$$m_L = \lambda kb n^{3/2}. \quad (3.15)$$

Если ряд опирается на две точки, находящиеся на его концах, то наибольшая ошибка будет в середине. Из опытных данных установлено, что в случае графической радиальной фототриангуляции по плановым снимкам формата 18×18 см величина λb составляет приблизительно 0,02 мм (местность равнинная или холмистая). Следовательно,

$$m_L = 0,02kn^{3/2}. \quad (3.16)$$

Если задать величину ошибки m_L , то из этой формулы можно найти n , а затем по формуле (3.14) — расстояние L между опорными точками, при котором ошибка фототриангуляции не превзойдет заданной величины m_L .

ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ СНИМКОВ

§ 29. НАЗНАЧЕНИЕ И СУЩНОСТЬ СПОСОБОВ
ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ СНИМКОВ

Фотограмметрические задачи проще решаются по горизонтальным снимкам, чем по наклонным. Горизонтальным снимком равнинной местности можно пользоваться как планом. Однако вследствие колебаний самолета в результате аэрофотосъемки получаются не горизонтальные, а наклонные снимки.

Преобразование наклонного снимка в горизонтальный снимок заданного масштаба называется *трансформированием*.

Трансформирование снимков можно выполнить различными способами: аналитическим, графическим, фотомеханическим, оптическим и графомеханическим. В каждом из этих способов в зависимости от исходных данных различают два случая трансформирования снимков: по элементам внешнего ориентирования (или по установочным элементам) и по опорным точкам.

Аналитический способ основан на вычислении координат точек горизонтального снимка по измеренным координатам точек наклонного снимка. При этом используются формулы (1.35), выражающие зависимость между координатами соответственных точек на горизонтальном и наклонном снимках.

К *графическим* способам относятся рассмотренные в гл. 1 метод сложения плоскостей, позволяющий трансформировать снимки по элементам внешнего ориентирования, и прямая проективная засечка, решающая эту задачу по опорным точкам.

Фотомеханический способ основан на применении специальных приборов — фототрансформаторов. В фототрансформаторе по наклонному снимку с помощью объектива строится на экране изображение, соответствующее горизонтальному снимку. Затем это изображение фиксируется на фотобумагу.

В *оптическом* способе изображение, соответствующее горизонтальному снимку, получается на планшете путем оптического проектирования наклонного снимка. Детали этого изображения, подлежащие отображению на карте, вычерчиваются в соответствии с принятыми условными знаками.

Графомеханический способ позволяет получить по наклонному снимку тоже графическое изображение, соответствующее горизонтальному снимку, но для решения этой задачи используется не оптический проектор, а прибор механического типа, например перспектограф Н. М. Алексапольского.

В настоящее время наиболее широкое применение имеют аналитический и фотомеханический способы. Аналитический

используется при построении фототриангуляционных сетей с помощью электронных вычислительных машин, а фотомеханический — для составления фотопланов.

Большую перспективу имеют разрабатываемые в настоящее время электронные способы трансформирования снимков. К ним относится способ, основанный на применении электронного фототрансформатора, предложенного М. П. Бордюковым. Сущность этого прибора изложена в гл. 2.

В некоторых случаях снимки трансформируют не по абсолютным элементам внешнего ориентирования, а по условным, отнесенным к наклонной плоскости, принятой за начальную. В этих случаях и трансформированные снимки не горизонтальны, а параллельны начальной плоскости.

§ 30. АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ

Пусть на наклонном снимке измерены координаты x и y ряда точек. Угловые элементы внешнего ориентирования наклонного снимка известны. Тогда координаты x^0 и y^0 соответственных точек горизонтального снимка найдем по формулам (1.35)

$$x^0 = -f \frac{a_1(x-x_0) + a_2(y-y_0) - a_3f}{c_1(x-x_0) + c_2(y-y_0) - c_3f},$$

$$y^0 = -f \frac{b_1(x-x_0) + b_2(y-y_0) - b_3f}{c_1(x-x_0) + c_2(y-y_0) - c_3f},$$

где f — фокусное расстояние наклонного снимка,

x_0, y_0 — координаты главной точки снимка,

a_i, b_i, c_i — направляющие косинусы, вычисленные по формулам (1.13) или (1.15) как функции угловых элементов внешнего ориентирования снимка.

Если элементы внешнего ориентирования неизвестны, то трансформирование снимка можно выполнить по опорным точкам.

Чтобы определить число опорных точек, необходимое для трансформирования снимка, используем формулы (1.19), выражающие зависимость между координатами X и Y точки местности и координатами x и y ее изображения на наклонном снимке. Полагая $X_0 = Y_0 = 0$ и $Z = Z_0 = -H$, напомним

$$X = -H \frac{a_1(x-x_0) + a_2(y-y_0) - a_3f}{c_1(x-x_0) + c_2(y-y_0) - c_3f},$$

$$Y = -H \frac{b_1(x-x_0) + b_2(y-y_0) - b_3f}{c_1(x-x_0) + c_2(y-y_0) - c_3f}.$$

Разделив числитель и знаменатель на $-c_3f$, получим

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{A_1(x-x_0) + A_2(y-y_0) + A_3f}{C_1(x-x_0) + C_2(y-y_0) + 1} \\ Y &= \frac{B_1(x-x_0) + B_2(y-y_0) + B_3f}{C_1(x-x_0) + C_2(y-y_0) + 1} \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= H \frac{a_1}{c_3 f}, & A_2 &= H \frac{a_2}{c_3 f}, & A_3 &= -H \frac{a_3}{c_3} \\ B_1 &= H \frac{b_1}{c_3 f}, & B_2 &= H \frac{b_2}{c_3 f}, & B_3 &= -H \frac{b_3}{c_3} \\ C_1 &= -\frac{c_1}{c_3 f}, & C_2 &= -\frac{c_2}{c_3 f} \end{aligned} \right\}. \quad (4.2)$$

Эти восемь коэффициентов вполне определяют перспективную зависимость между наклонным и горизонтальным снимками и называются *элементами трансформирования*.

Одна опорная точка позволяет составить два уравнения (4.1), содержащие восемь неизвестных.

Таким образом, для определения элементов трансформирования необходимо иметь не меньше четырех опорных точек.

Зная эти элементы, можно по формулам (4.1) найти координаты X и Y любой точки, если известны координаты x и y ее изображения на снимке.

§ 31. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОТОМЕХАНИЧЕСКОГО ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ СНИМКОВ

Чтобы получить горизонтальный снимок, достаточно по наклонному снимку P (рис. 102) восстановить связку проектирующих лучей, существовавшую в момент фотографирования, установить ее относительно экрана E в такое положение, в каком она находилась относительно горизонтальной плоскости во время аэрофото съемки, и зафиксировать изображение, построенное на экране.

Поэтому в качестве основных частей в фототрансформатор входят объектив S , кассета K , экран E и источник света L .

Фототрансформатор, в котором строится связка лучей, подобная существовавшей в момент фотографирования, называется *фототрансформатором первого рода*.

Чтобы изображение, полученное на экране фототрансформатора первого рода, соответствовало горизонтальному снимку и было достаточно резким, необходимо выполнить геометрические и оптические условия.

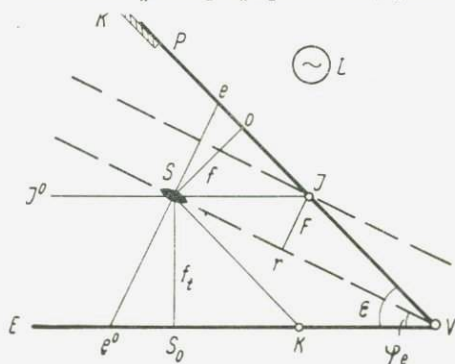


Рис. 102

К геометрическим условиям относятся:

1. Отрезок S_0O , соединяющий заднюю узловую точку объектива с главной точкой снимка, должен быть перпендикулярен к плоскости снимка и равен фокусному расстоянию снимка f .

2. Угол между снимком и экраном должен быть равен углу наклона снимка ε , существовавшему в момент фотографирования.

3. Главная вертикаль oI снимка должна находиться в плоскости угла ε .

4. Расстояние $SS_0 = f_t$ от задней узловой точки объектива до экрана должно быть равно высоте фотографирования, выраженной в заданном масштабе трансформированного снимка $1 : t$,

$$f_t = \frac{1}{t} H, \quad (4.3)$$

или, так как $H = fm$,

$$f_t = \frac{m}{t} f = nf, \quad (4.4)$$

где $1 : m$ — главный масштаб наклонного снимка, а

$$n = \frac{m}{t} \quad (4.5)$$

— коэффициент трансформирования снимка, равный отношению масштабов трансформированного и наклонного снимков.

В трансформаторе первого рода центр проекции трансформированного снимка совпадает с передней узловой точкой объектива. Поэтому расстояние от этой точки до экрана представляет собой фокусное расстояние f_t трансформированного снимка.

Чтобы изображение снимка на экране было резким, необходимо выполнить два оптических условия:

1. Расстояние $d = Se$ от задней узловой точки объектива по главной оптической оси до снимка и расстояние $d' = Se^\circ$ от передней узловой точки до экрана должны удовлетворять основному уравнению оптики

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{F}, \quad (4.6)$$

где F — фокусное расстояние объектива фототрансформатора.

2. Главная плоскость объектива должна проходить через линию пересечения плоскости снимка с плоскостью экрана.

Чтобы показать на чертеже фокусное расстояние объектива, воспользуемся лучом SJ , параллельным экрану E , т. е. идущим из бесконечно удаленной точки экрана в главную точку схода J . Очевидно, что изображение бесконечно удаленной точки экрана должно быть в главной фокальной плоскости объектива. Следовательно, главная фокальная плоскость объектива должна проходить через главную точку схода перпендикулярно к главной оптической оси Se . Поэтому расстояние Ir между главной фокаль-

ной плоскостью и главной плоскостью объектива равно фокусному расстоянию объектива фототрансформатора.

Из рис. 102 следует

$$F = f \frac{\sin \varphi_e}{\sin \varepsilon},$$

где φ_e — угол между главной плоскостью объектива и плоскостью экрана. При этом

$$\operatorname{tg} \varphi_e = \frac{SS_0}{S_0K + KV} = \frac{n \sin \varepsilon}{1 + n \cos \varepsilon}.$$

Отсюда

$$\sin \varphi_e = \frac{n \sin \varepsilon}{\sqrt{1 + n^2 + 2n \cos \varepsilon}}.$$

Следовательно,

$$F = \frac{fn}{\sqrt{1 + n^2 + 2n \cos \varepsilon}}. \quad (4.7)$$

Из этого выражения следует, что фототрансформатор первого рода должен быть снабжен набором объективов для трансформирования снимков с различными коэффициентами n , что усложняет конструкцию прибора и работу на нем.

В настоящее время применяются *фототрансформаторы второго рода*. Фототрансформатор второго рода позволяет трансформировать снимки с различными коэффициентами при помощи одного объектива. Эта задача решается путем построения в приборе не подобной, а преобразованной связки лучей по сравнению со связкой, существовавшей в момент фотографирования.

Возможность трансформирования снимка с преобразованной связкой лучей можно доказать, если использовать формулы (1.31), связывающие координаты точки местности (экрана) с координатами ее изображения на снимке:

$$\left. \begin{aligned} x^0 &= \frac{1}{t} X = -\frac{1}{t} H \frac{x}{y \sin \varepsilon} \\ y^0 &= \frac{1}{t} Y = \frac{1}{t} H \frac{f}{y \sin^2 \varepsilon} \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

Эти формулы получены при условии: начало координат x^0 и y^0 — в точке K , а начало координат x и y — в точке I (рис. 103). Обозначим

$$\left. \begin{aligned} F_p &= \frac{f}{\sin \varepsilon} \\ F_e &= \frac{H}{t \sin \varepsilon} \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

и представим выражения (4.8) в таком виде:

$$\left. \begin{aligned} x^0 &= -F_e \frac{x}{y} \\ y^0 &= F_p F_e \frac{1}{y} \end{aligned} \right\}. \quad (4.10)$$

Рассматривая эти выражения, можно сделать следующий очень важный вывод: если элементы f , H и ε изменяются так, что F_p и F_e остаются постоянными, то перспективная зависимость между плоскостями P и E не нарушается.

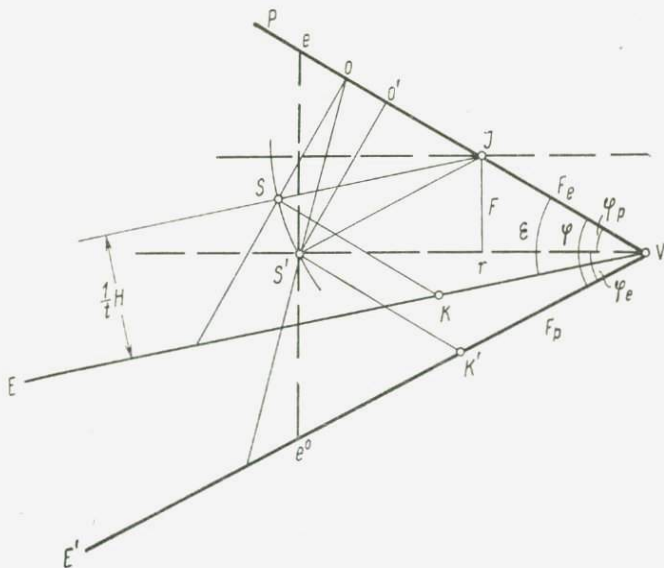


Рис. 103

Таким образом, при изменении углов между сторонами параллелограмма $SJVK$ на экране фототрансформатора получают одинаковые изображения, если длины этих сторон сохраняются.

Это условие выполняется во всех случаях, когда центр проекции S перемещается по окружности с радиусом JS и центром в главной точке схода J , а экран вращается вокруг линии основания V , оставаясь все время параллельным прямой JS' , соединяющей центр проекции с главной точкой схода.

Стороны параллелограмма E_p и F_e называются *инвариантами* трансформирования снимка.

Из рис. 103 следует, что в общем случае связка лучей в фототрансформаторе второго рода не подобна существовавшей в момент фотографирования местности. Только в частном случае, когда $S'o' = f$, связка, полученная в этом приборе, подобна съемочной.

Итак, в фототрансформаторе второго рода необходимо выполнить три геометрических условия:

1. Центр проектирования (узловая точка объектива)¹ должен находиться на окружности, описанной из главной точки схода J радиусом $JS = F_p$ в плоскости SoJ , проходящей через центр проекции и главную вертикаль наклонного снимка.

2. Расстояние от главной точки схода до линии пересечения плоскости наклонного снимка с экраном должно быть $JV = H/t \sin \varepsilon = F_e$.

3. Экран должен быть установлен параллельно линии $S'J$ и перпендикулярно к плоскости SoJ .

Таким образом, при выполнении только геометрических условий в фототрансформаторе второго рода положение объектива остается неопределенным: любая точка дуги SS' может быть принята за узловую точку объектива и угол φ между плоскостью снимка и экраном имеет различные значения.

Эта неопределенность устраняется при выполнении указанных выше двух оптических условий, которые являются общими для фототрансформаторов первого и второго рода.

На рис. 103 показаны главная плоскость объектива, проходящая через линию пересечения плоскостей P и E , и главная фокальная плоскость объектива фототрансформатора, проходящая через главную точку схода J .

Пусть дано фокусное расстояние F объектива фототрансформатора. Тогда вполне определяются углы φ_p и φ_e , которые должны быть между главной плоскостью объектива и плоскостями P и E :

$$\left. \begin{aligned} \sin \varphi_p &= \frac{F}{F_e} \\ \sin \varphi_e &= \frac{F}{F_p} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \uparrow \\ \bullet \end{array} \quad (4.11)$$

Одновременно определяется угол

$$\varphi = \varphi_p + \varphi_e \quad (4.12)$$

и положение объектива S' на дуге SS' .

§ 32. ЭЛЕМЕНТЫ ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ СНИМКА

В фототрансформаторе для изменения масштаба изображения снимка на экране объектив и кассета перемещаются по вертикальным направляющим.

Прямая, проходящая через центр (узловую точку) объектива параллельно направляющим, по которым перемещаются объектив и кассета, называется *конструктивной осью* фототрансформатора.

¹ Предполагается, что передняя и задняя узловые точки объектива фототрансформатора совмещены.

Снимок в фототрансформаторе устанавливают так, чтобы с конструктивной осью совпал основной луч связки, например главный $S'o$ (см. рис. 103) или луч, перпендикулярный к снимку, — $S'o'$. Луч связки, который должен быть совмещен с конструктивной осью, выбирается обычно при разработке фототрансформатора.

Величины, определяющие положение снимка в фототрансформаторе, при котором на экране получается изображение, соответствующее горизонтальному снимку, называются *элементами трансформирования* или *установочными элементами*.

В зависимости от лучей связки, совмещаемых с конструктивными осями фототрансформаторов, условимся различать четыре системы элементов трансформирования.

Первая система. Конструктивная ось — главная оптическая ось объектива. Главная плоскость объектива горизонтальна (рис. 104).

Элементами трансформирования служат:

φ_p — угол наклона кассеты, составлен плоскостью снимка с главной плоскостью объектива,

φ_e — угол наклона экрана, составлен плоскостью экрана с главной плоскостью объектива,

d — расстояние от узловой точки объектива по оптической оси до снимка,

d' — расстояние от узловой точки объектива по оптической оси до экрана,

κ — угол поворота снимка, элемент внешнего ориентирования,

δ — децентрация снимка, смещение главной точки o относительно конструктивной оси ee' .

Углы φ_p и φ_e находятся по формулам (4.11).

Из треугольника $S'eJ$ следует

$$d = F_p \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi_p} \quad (4.13)$$

где $\varphi = \varphi_p + \varphi_e$.

Рассматривая треугольники $S'S_0e'$ и $S'S_0K$, напомним

$$d' = F_e \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi_e} \quad (4.14)$$

Децентрация

$$\delta = eJ - oJ.$$

Но, как следует из треугольников $S'eJ$ и SoJ ,

$$eJ = F_p \frac{\cos \varphi_e}{\cos \varphi_p}; \quad oJ = F_p \cos \varepsilon.$$

Поэтому

$$\delta = F_p \left(\frac{\cos \varphi_e}{\cos \varphi_p} - \cos \varepsilon \right). \quad (4.15)$$

Для случая плановой съемки, когда угол наклона снимка ε мал, это выражение можно представить в виде

$$\delta = \frac{1}{2} f \varepsilon \left(1 + \frac{\varphi_p^2 - \varphi_e^2}{\varepsilon^2} \right).$$

Согласно (4.11)

$$\left. \begin{aligned} \varphi_p &= \frac{Ft\varepsilon}{H} \\ \varphi_e &= \frac{F\varepsilon}{f} \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

Поэтому

$$\delta = \frac{1}{2} f \varepsilon \left[1 - \left(\frac{F}{f} \right)^2 \times \right. \\ \left. \times \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \right], \quad (4.17)$$

где $n = m/t = H/ft$ — коэффициент трансформирования снимка.

Часто для определения децентрации используют не угол наклона снимка ε , а угол наклона экрана φ_e . Подставив в формулу (4.17) значение ε из выражения (4.16), получим

$$\delta = \frac{1}{2} F \varphi_e \left[\left(\frac{f}{F} \right)^2 - 1 + \frac{1}{n^2} \right] \quad (4.18)$$

Первая система элементов трансформирования применяется в фототрансформаторах ФТВ (СССР), Seg-1 и Ректимат Цейсса (ГДР), E-4 Вильда (Швейцария) и др.

Вторая система. Конструктивная ось — луч $S'o'$, перпендикулярный к снимку (рис. 105). Кассета горизонтальна.

Элементами трансформирования служат:

φ — угол наклона экрана, равный $\varphi_p + \varphi_e$,
 φ_p — угол наклона главной плоскости объектива,

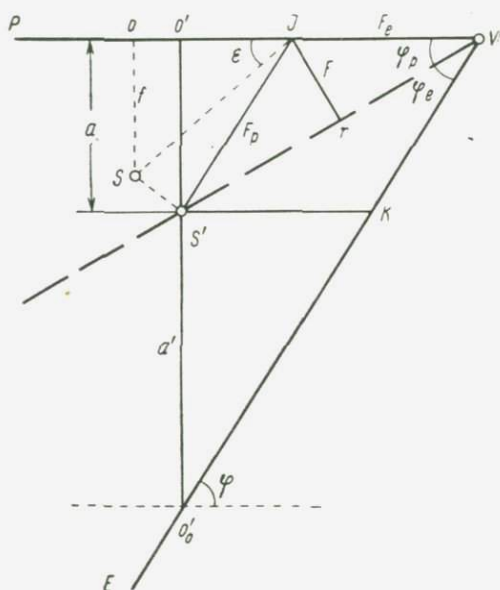


Рис. 105

- a — расстояние от узловой точки объектива по конструктивной оси до снимка,
 a' — расстояние от узловой точки объектива по конструктивной оси до экрана,
 κ — угол поворота снимка, элемент внешнего ориентирования,
 δ — децентрация снимка, смещение главной точки снимка o относительно конструктивной оси $S'o'$.

Углы φ_p и φ_e определяются по формулам (4.11).

Из прямоугольных треугольников $S'o'J$ и $K'S'o'_0$ следует:

$$\left. \begin{aligned} a &= F_p \sin \varphi \\ a' &= F_e \operatorname{tg} \varphi \end{aligned} \right\} \quad (4.19)$$

Децентрация

$$\delta = oJ - o'J.$$

Но

$$oJ = F_p \cos \varepsilon, \quad o'J = F_p' \cos \varphi.$$

Поэтому

$$\delta = F_p (\cos \varepsilon - \cos \varphi). \quad (4.20)$$

Если снимки плановые, то углы φ_p и φ_e можно найти по приближенным формулам (4.16). Суммируя эти углы, получим угол наклона экрана

$$\varphi = \frac{F}{f} \varepsilon \left(1 + \frac{1}{n} \right), \quad (4.21)$$

где n — коэффициент трансформирования снимка.

Формулу (4.20) можно тоже упростить и представить в виде

$$\delta = \frac{1}{2} f \varepsilon \left(\frac{\varphi^2}{\varepsilon^2} - 1 \right).$$

Подставим сюда значение угла φ из выражения (4.21). Получим

$$\delta = \frac{1}{2} f \varepsilon \left[\left(\frac{F}{f} \frac{n+1}{n} \right)^2 - 1 \right]. \quad (4.22)$$

Если вместо угла наклона снимка ε дан угол наклона экрана φ , то

$$\delta = \frac{1}{2} F \frac{n}{n+1} \varphi \left[\left(\frac{n+1}{n} \right)^2 - \left(\frac{f}{F} \right)^2 \right]. \quad (4.23)$$

Вторая система элементов трансформирования используется в фототрансформаторах ФТМ (СССР), Seg-IV (ФРГ) и др.

Третья система. Конструктивная ось — главный луч oS' (рис. 106). Вращаются кассета, объектив и экран. Линейная децентрация снимка $\delta = 0$.

Элементы трансформирования снимка:

φ_p' — угол наклона кассеты,

φ_e' — угол наклона экрана,

γ — угол наклона главной плоскости объектива, составлен главным лучом oS' с оптической осью объектива $S'e$,

l — расстояние от узловой точки объектива по конструктивной оси до снимка,
 l' — расстояние от узловой точки объектива по конструктивной оси до экрана,
 κ — угол поворота снимка, элемент внешнего ориентирования.
 Опустив из главной точки o перпендикуляры og и oh на оптическую ось и фокальную плоскость объектива, напишем

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{og}{S'g} = \frac{og}{Jr + oh}.$$

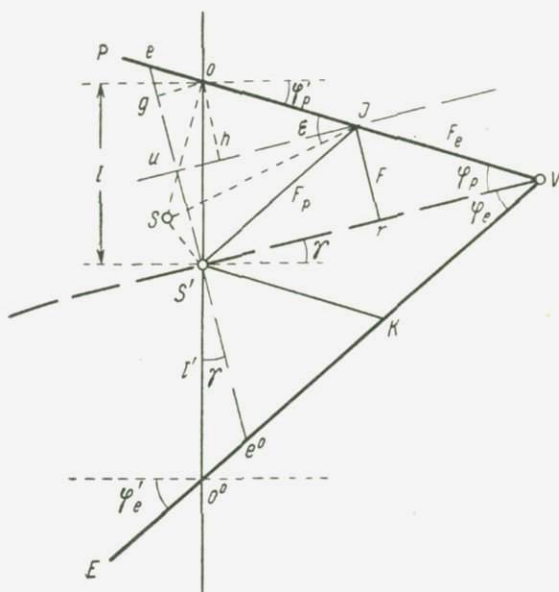


Рис. 106

Из чертежа следует

$$og = uh = uJ - hJ = F_p \cos \varphi_e - oJ \cos \varphi_p = F_p (\cos \varphi_e - \cos \varphi_p \cos \varepsilon),$$

$$Jr + oh = F_p \sin \varphi_e + oJ \sin \varphi_p = F_p (\sin \varphi_e + \sin \varphi_p \cos \varepsilon).$$

Поэтому

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\cos \varphi_e - \cos \varphi_p \cos \varepsilon}{\sin \varphi_e + \cos \varepsilon \sin \varphi_p}. \quad (4.24)$$

Углы φ_p и φ_e определяются по формулам (4.11). Зная эти углы и угол γ , получим углы наклона кассеты и экрана

$$\left. \begin{aligned} \varphi_p' &= \varphi_p - \gamma \\ \varphi_e' &= \varphi_e + \gamma \end{aligned} \right\}. \quad (4.25)$$

Элементы l и l' найдем из треугольников $oS'J$ и $o^0S'K$

$$\left. \begin{aligned} l &= F_p \frac{\sin \varphi}{\cos (\varphi_p - \gamma)} \\ l' &= F_e \frac{\sin \varphi}{\cos (\varphi_e + \gamma)} \end{aligned} \right\} \quad (4.26)$$

Третья система элементов трансформирования применена в фототрансформаторе МГИ, разработанном в МИИГАиКе Н. М. Александровским и П. П. Соколовым. Этот прибор широко применялся до 1950 г.

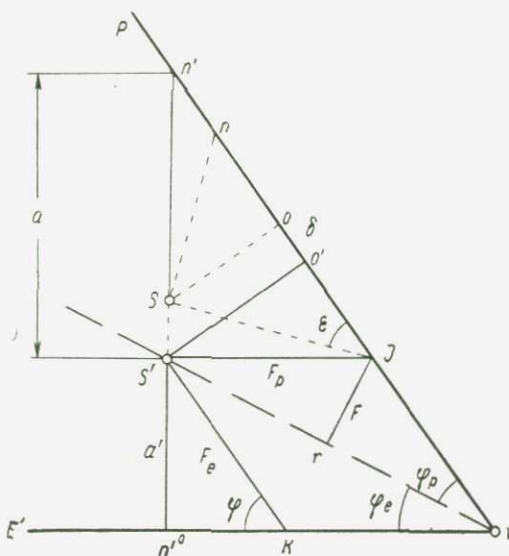


Рис. 107

Четвертая система. Конструктивная ось — луч $S'n'o$, перпендикулярный к экрану (рис. 107). Экран находится в горизонтальном положении.

Элементы трансформирования снимка:

- φ — угол наклона кассеты,
- φ_e — угол наклона главной плоскости объектива,
- a — расстояние от узловой точки объектива по конструктивной оси до снимка,
- a' — расстояние от узловой точки объектива до экрана,
- κ — угол поворота снимка, элемент внешнего ориентирования,
- δ — децентрация снимка, смещение главной точки o с прямой $S'o'$, перпендикулярной к снимку.

Угол наклона кассеты

$$\varphi = \varphi_p + \varphi_e. \quad (4.27)$$

Углы φ_p и φ_e находятся по формулам (4.11).

Расстояния a и a' получим из прямоугольных треугольников $n'S'J$ и $S'n'oK$:

$$\left. \begin{aligned} a &= F_p \operatorname{tg} \varphi \\ a' &= F_e \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (4.28)$$

Децентрация

$$\delta = oo' = oJ - o'J$$

или

$$\delta = F_p (\cos \varepsilon - \cos \varphi). \quad (4.29)$$

Четвертая система применяется при оптическом трансформировании одиночных снимков с помощью проектирующей камеры, а также при обработке снимков с преобразованными связками на универсальных стереоприборах (см. гл. 10). В этом случае величина $S'o' = \bar{f}$ постоянна для данной камеры и называется *фокусным расстоянием проектирующей камеры*. Учитывая это, напишем

$$\sin \varphi = \frac{\bar{f}}{F_p} = \frac{\bar{f}}{f} \sin \varepsilon. \quad (4.30)$$

Если снимки плановые, то элементы φ и δ можно найти по приближенным формулам

$$\varphi = \frac{\bar{f}}{f} \varepsilon, \quad (4.31)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \bar{f} \varphi \left(1 - \frac{f^2}{\bar{f}^2} \right). \quad (4.32)$$

Итак, в каждой системе — шесть элементов трансформирования, но независимыми из них являются три. Например, если в первой системе независимыми считать угол наклона экрана φ_e , расстояние d' от узловой точки объектива по конструктивной оси до экрана и угол поворота снимка κ , то зависимыми будут элементы φ_p , d и δ .

Зависимые элементы можно найти как функции независимых, используя условия трансформирования снимков.

В фототрансформаторах оператор устанавливает только независимые элементы, а зависимые вводятся автоматически с помощью специальных устройств, называемых инверсорами.

§ 33. МАСШТАБНЫЕ ИНВЕРСОРЫ

Инверсоры, предназначенные для автоматического выполнения условий трансформирования снимка, можно разделить на три группы: масштабные, перспективные, децентрационные.

Масштабные инверсоры выполняют первое оптическое условие, перспективные — второе. Децентрационные инверсоры служат для введения децентрации снимка, т. е. для выполнения геометрических условий.

Это уравнение решается ленточным инверсором, схема которого представлена на рис. 109.

С помощью ножного диска вращается ходовой винт, который перемещает каретку объектива K_S по направляющей N . На каретке объектива находится цилиндр, ось которого C перпендикулярна к направляющей N . К цилиндру прикреплена нижняя стальная лента, огибающая ролик, укрепленный на вспомогательной каретке K . Центр этого ролика обозначим через m' . Радиусы цилиндра и ролика одинаковы. Другой конец стальной ленты присоединен к нижнему концу вертикальной рейки t . Верхний конец рейки скреплен с кареткой снимка.

На вспомогательной каретке помещен еще один ролик n . Его огибает верхняя стальная лента, один конец которой присоединен к каретке снимка, а другой — к станине прибора. Вспомогательная каретка перемещается по направляющей N' . Расстояние между осями направляющих N и N' равно фокусному расстоянию объектива F .

Центр ролика m' соответствует точке симметрии m . Поэтому он должен находиться всегда в горизонтальной плоскости, проходящей через точку m . Для этого каретка K должна перемещаться вдвое медленнее каретки K_p . Это обеспечивается при помощи верхней стальной ленты и ролика n . Действительно, если каретка снимка поднимется на расстояние l , то верхняя стальная лента поднимет каретку K на расстояние $0,5l$. Таким образом, если в начале движения центр ролика m' был точкой симметрии, то симметричное положение его относительно точек e и e^0 не нарушится и при перемещении каретки снимка.

Расстояние между центрами C и m' равно p , что следует из прямоугольного треугольника Cdm' и равенства (4.34):

$$Cm' = q^2 + F^2 = p^2.$$

Ленточный инверсор строго выполняет первое оптическое условие в случае, когда конструктивной осью фототрансформатора служит оптическая ось объектива. Если в качестве конструктивной оси принят, например, луч, перпендикулярный к снимку, то при наклоне экрана и главной плоскости объектива оптическое сопряжение точек e и e^0 нарушится. Однако при трансформировании плановых снимков это нарушение не имеет существенного значения.

Ромбический инверсор. Ромбический инверсор состоит из шести металлических линеек a и b и пяти шарниров (рис. 110). Четыре линейки имеют одинаковую длину и составляют шарнирный ромб. Длины двух других линеек тоже одинаковы. В спрямленном виде эти линейки представляют собой диагональ ромба.

Шарнир B скреплен с направляющей N на расстоянии от экрана, равном фокусному расстоянию объектива F . Шарнир I прикреплен к каретке объектива K_s , а шарнир A — к каретке

и k_3 , связанные между собой в шарнирных узлах линейкой L , которая закреплена в одном из шарниров. Через шарнирные узлы проходят рычаги трех плоскостей.

Такая система обеспечивает пересечение трех плоскостей по одной линии.

Для доказательства этого достаточно показать, что при пересечении трех плоскостей по одной прямой линия $k_1k_2k_3$ должна быть прямой.

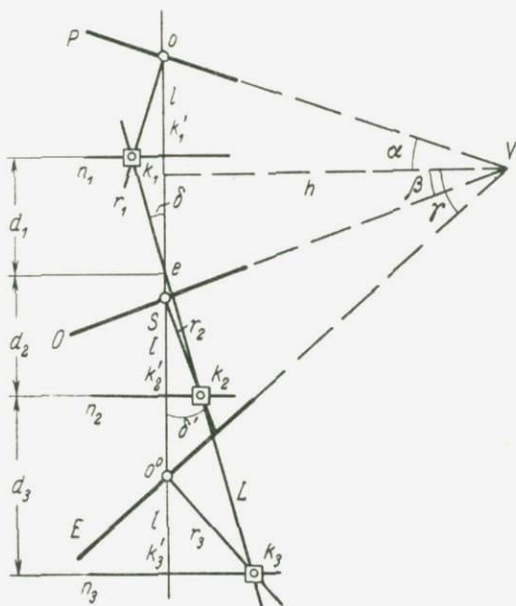


Рис. 111

Обозначим через δ угол $k_1ek'_1$, равный углу $k_2ek'_2$, и через δ' угол $k_3ek'_3$. Очевидно, что линия $k_1k_2k_3$ будет прямой, если $\delta = \delta'$.

Из рис. 111 следует

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= \frac{k_1k'_1}{d_1} = \frac{k_2k'_2}{d_2} \\ \operatorname{tg} \delta' &= \frac{k_3k'_3}{d_2 + d_3} \end{aligned} \right\} \quad (a)$$

Обозначив через α , β и γ углы наклона плоскостей P , O и E , напишем

$$k_1k'_1 = l \operatorname{tg} \alpha, \quad k_2k'_2 = l \operatorname{tg} \beta, \quad k_3k'_3 = l \operatorname{tg} \gamma.$$

Затем получим

$$d_1 + d_2 = k'_1 k'_2 = S o = h (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta),$$

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{k_1 k'_1}{k_2 k'_2} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta},$$

$$d_3 = h (\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \beta).$$

Отсюда

$$d_1 = h \operatorname{tg} \alpha,$$

$$d_2 = h \operatorname{tg} \beta,$$

$$d_2 + d_3 = h \operatorname{tg} \gamma.$$

Теперь подставим значения отрезков в выражения (а). В результате найдем

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta' = \frac{l}{h}, \quad (4.36)$$

т. е. δ и δ' , действительно, одинаковы.

Если плоскость объектива в фототрансформаторе не вращается, т. е. оптическая ось объектива совмещена с конструктивной осью, то рычаг r_2 занимает вертикальное положение, а точка k'_2 служит центром вращения линейки L .

Тангенциальный инверсор. Инверсор такого типа используется в фототрансформаторе, конструктивная ось которого совмещена с лучом, перпендикулярным к снимку (см. рис. 105). В этом случае снимкодержатель находится всегда в горизонтальном положении и задача инверсора состоит в том, чтобы при установке угла наклона экрана φ автоматически наклонять объектив на угол φ_p , обеспечивая пересечение трех плоскостей по одной линии.

Найдем соотношение между углами φ_p и φ .

Из рис. 105 следует, что расстояние на снимке от конструктивной оси до линии пересечения трех плоскостей

$$o'V = \frac{a}{\operatorname{tg} \varphi_p} = \frac{a + a'}{\operatorname{tg} \varphi} \bullet$$

где a и a' — расстояния от узловой точки объектива по конструктивной оси до снимка и экрана.

Следовательно,

$$\operatorname{tg} \varphi_p = \frac{a}{a + a'} \operatorname{tg} \varphi. \quad (4.37)$$

Полагая, что фототрансформатор предназначен для обработки плановых снимков, можно написать

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{F},$$

где F — фокусное расстояние объектива.

Определив из этого выражения величину a и подставив ее в равенство (4.37), найдем

$$\operatorname{tg} \varphi_p = \frac{F}{a_1} \operatorname{tg} \varphi. \quad (4.38)$$

Тангенциальный инверсор решает это уравнение.

Он содержит следующие основные части (рис. 112): рычаг r , прикрепленный к экрану; винт v , с помощью которого поворачиваются рычаг r и экран E ; гибкий вал p , позволяющий одновременно вращать винт v и винт v' , наклоняющий объектив; рычаг r' , прикрепленный к оси вращения объектива, и линейка L , установленная под углом τ относительно конструктивной оси и прикрепленная к направляющей N . Винт v' находится на конце рычага r' , который скользит по направляющим n . Другой конец этого рычага скользит по линейке L .

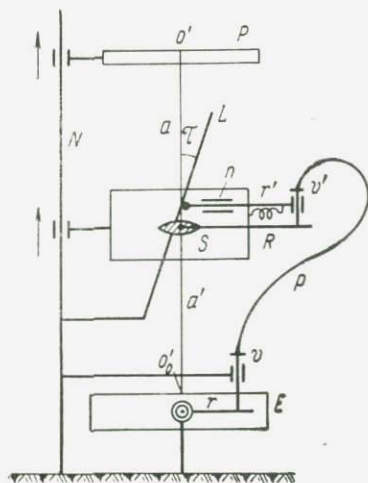


Рис. 112

Таким образом, расстояние от конструктивной оси до оси винта v' зависит от положения держателя объектива, т. е. от расстояний a и a' .

Положение основных плоскостей фототрансформатора, представленное на рис. 112, соответствует случаю, когда $a = a' = 2F$. В этом случае согласно формуле (4.37)

$$\operatorname{tg} \varphi_p = 0,5 \operatorname{tg} \varphi. \quad (4.39)$$

Отсюда и из рисунка следует, что для наклона объектива тангенциальным инверсором достаточно, чтобы рычаг r' был в два раза длиннее рычага r при одинаковых значениях шага винтов v и v' .

Теперь допустим, что $a' > 2F$. В этом случае расстояние от экрана до объектива увеличится на величину $\Delta a = a' - 2F$. Вследствие этого расстояние от конструктивной оси до оси винта v' изменится на величину, равную $\Delta a \operatorname{tg} \tau$. Вращая винт v , повернем экран и объектив.

Обозначим через e смещение винта v относительно начального положения. Тогда можно написать

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{e}{r}, \quad (a)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_p = \frac{e}{2r + (a' - 2F) \operatorname{tg} \tau}. \quad (б)$$

Выберем угол τ так, чтобы углы φ и φ_p удовлетворяли уравнению (4.38). Чтобы найти такое значение угла τ , приравняем друг другу правые части выражений (б) и (4.38)

$$\frac{e}{2r + (a' - 2F) \operatorname{tg} \tau} = \frac{F}{a'} \operatorname{tg} \varphi.$$

Отсюда, учитывая (а), получим

$$\operatorname{tg} \tau = \frac{r}{F}. \quad (4.40)$$

Итак, тангенциальный инверсор решает уравнение (4.38) при любых значениях коэффициента трансформирования, если выполнено условие (4.40).

Кроме масштабных и перспективных инверсоров в отдельных фототрансформаторах применяются децентрационные. Сведения об инверсоре, предназначенном для автоматической установки децентрации снимка, даны в § 37.

§ 35. БОЛЬШОЙ ФОТОТРАНСФОРМАТОР (ФТБ, Seg-I)

Большой фототрансформатор разработан и впервые изготовлен фирмой «Цейсс-Аэрофотограф».

ФТБ — фототрансформатор второго рода, позволяет трансформировать плановые и перспективные снимки (рис. 113 и 114).

Конструктивной осью прибора служит оптическая ось объектива. Поэтому главная плоскость объектива всегда горизонтальна.

Таким образом, в данном фототрансформаторе применена первая система элементов трансформирования:

φ_p — угол наклона кассеты,

φ_e — угол наклона экрана,

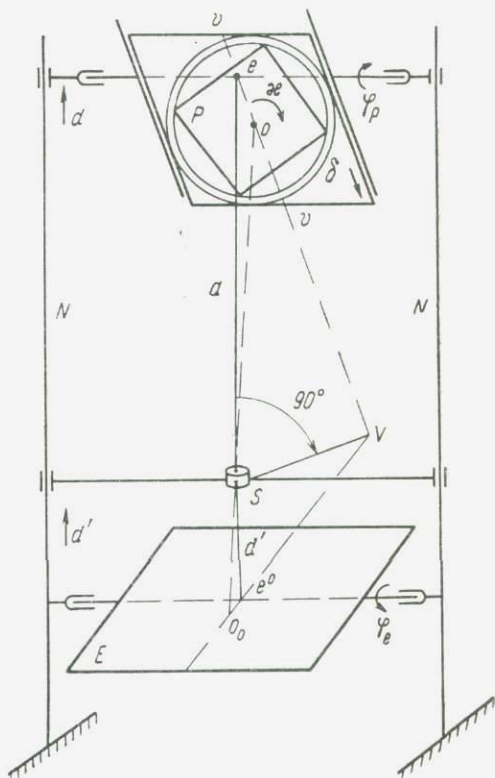


Рис. 113

- d, d' — расстояния от узловой точки объектива по конструктивной оси до снимка и экрана,
 κ — угол поворота снимка,
 δ — децентрация снимка (oe).

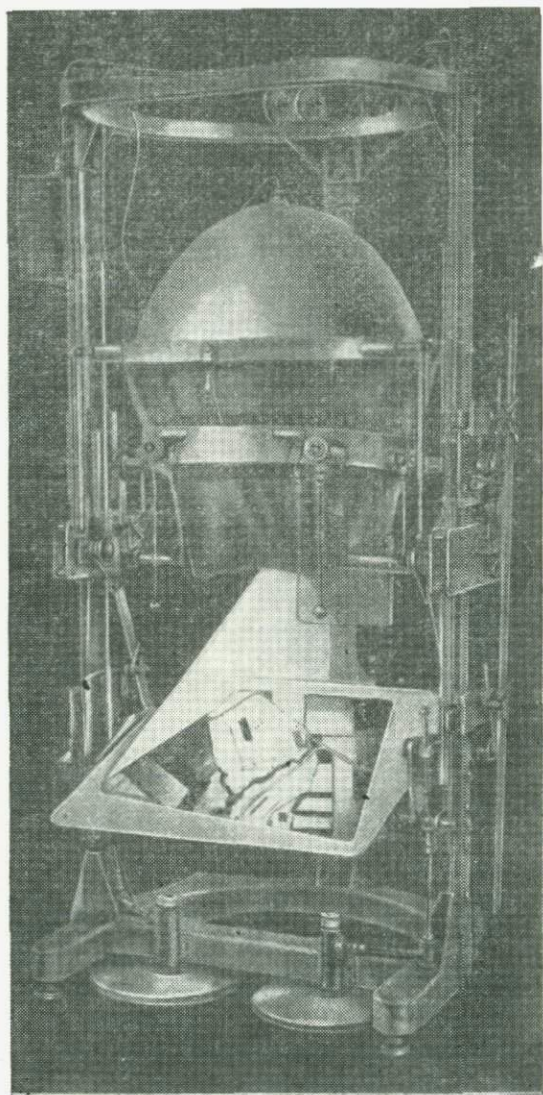


Рис. 114

Эти элементы можно найти по формулам, полученным в § 32.
Из шести элементов трансформирования оператор устанавливает только четыре — φ_e , d' , κ и δ . Расстояние d устанавливается

угловым инверсором, а угол наклона кассеты φ_p — инверсором Карпантье. По конструктивным соображениям в приборе установлены два угловых инверсора — левый и правый. Они действуют синхронно и не допускают перекоса движущихся массивных частей прибора.

На рис. 113 показаны движения основных частей фототрансформатора, соответствующие элементам трансформирования. Кроме этих движений ФТБ имеет дополнительное — перемещение кассеты параллельно оси вращения снимкодержателя, называемое поперечной децентрацией снимка в отличие от продольной децентрации δ . Поперечная децентрация используется в отдельных случаях для деформации трансформированного изображения. При обычной обработке снимков на ФТБ поперечная децентрация устанавливается равной нулю.

На рис. 114 представлен общий вид фототрансформатора и его основные части: станина, вертикальные направляющие, экран, объектив, каретка объектива, каретка снимка с кассетой и устройствами для децентрации снимка, левый и правый угловые инверсоры, инверсор Карпантье и осветительное устройство.

Каретка объектива перемещается по вертикальным направляющим с помощью левого ножного штурвала. При этом угловые инверсоры соответственно смещают каретку снимка по тем же направляющим.

Экран наклоняется с помощью правого ножного штурвала. При этом инверсор Карпантье поворачивает снимкодержатель так, чтобы плоскости снимка объектива и экрана пересекались по одной линии.

Продольная децентрация снимка вводится левой рукояткой, а поперечная — правой. Между этими рукоятками находится рукоятка для установки угла α .

Все элементы трансформирования можно отсчитать по соответствующим шкалам.

Кассета приспособлена для работы с отдельными негативами и целым фильмом. Негатив помещается между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинами. Нижняя пластина прижимная, вмонтирована в рамку кассеты, она имеет координатные метки. Верхняя пластина покровная съемная. Ось вращения снимкодержателя находится в плоскости нижней стеклянной пластины, на которую кладется эмульсионной стороной негатив и прижимается к ней покровным стеклом.

Осветительное устройство состоит из ртутной электролампы, дающей актиничный свет, и металлического рефлектора, имеющего форму эллипсоида вращения. В верхнем фокусе эллипсоида помещена лампа, а нижний фокус совмещен с центром зрачка объектива, через который проходят световые лучи от источника света. Оба фокуса находятся на конструктивной оси. Рефлектор скреплен с кареткой объектива. Поэтому нижний фокус рефлектора остается совмещенным с центром зрачка

объектива при любом положении каретки объектива на вертикальных направляющих.

Основные характеристики фототрансформатора ФТБ:

Формат снимков	18 × 18, 24 × 24, 30 × 30 см
Объектив «Луч»	$F = 180 \text{ мм } 1 : 6,8$
Коэффициент трансформирования снимка	от 0,7 до 5,0
Размер экрана	100 × 100 см
Наклон экрана	до 45°
Поворот снимка	до 360°
Продольная децентрация	+90— —70 мм
Поперечная децентрация	±50 мм
Мощность источника света	150 Вт
Размеры прибора	1,5 × 1,2 × 3,0 м
Масса	700 кг

Поверки фототрансформатора ФТБ. После установки прибора и периодически в процессе его эксплуатации выполняют следующие поверки:

1. *Горизонтальность оси вращения экрана.* На экран устанавливают цилиндрический уровень так, чтобы его ось была параллельна оси вращения экрана. Вращая передние подъемные винты станины, приводят пузырек уровня на середину.

2. *Вертикальность направляющих кареток объектива и снимка.* К ребрам направляющих прикладывают угольник с уровнем. Вращая задние подъемные винты станины, приводят пузырек уровня на середину.

3. *Равномерность освещения изображения на экране.* Экран приводят в горизонтальное положение. Матовое стекло, находящееся над кассетой, вынимают. Устанавливают полное отверстие объектива и средний коэффициент увеличения. Добиваются равномерности освещения экрана путем перемещения лампы за стержень, предварительно освободив накатанную гайку стержня. Затягивают гайку и ставят на место матовое стекло.

4. *Поверка масштабных инверсоров.* Эти инверсоры должны обеспечивать резкость изображения на оси вращения экрана при различных коэффициентах трансформирования. Экран приводят в горизонтальное положение. В кассету закладывают контрольную сетку эмульсионным слоем вниз. Резкость изображения сетки на экране около оси вращения оценивают на глаз при различных коэффициентах трансформирования, установив предварительно полное отверстие объектива.

Если резкость изображения недостаточна, определяют фокусное расстояние объектива и контролируют правильность установки его в масштабных инверсорах.

5. *Поверка перспективного инверсора.* Он должен обеспечивать резкость изображения на наклонном экране. При наибольшем угле наклона экрана, полном отверстии объектива и различных коэффициентах трансформирования оценивают резкость изображения контрольной сетки на экране.

Если резкость изображения недостаточна, регулируют инверсор при горизонтальном положении экрана. В этот момент линейка инверсора должна быть вертикальна, а кассета горизонтальна.

К линейке инверсора прикладывают угольник с уровнем и, вращая юстировочный винт, перемещают ось вращения этой линейки, пока пузырек уровня не будет на середине. При этом нижняя пластина кассеты займет горизонтальное положение, что обеспечивается при изготовлении прибора.

6. *Определение мест нулей шкал продольной и поперечной децентраций.* В кассету закладывают контрольную сетку эмульсионным слоем вниз, осевые линии сетки совмещают с координатными метками, нанесенными на прижимной пластине кассеты. Экран приводят в горизонтальное положение. На шкалах децентраций устанавливают нулевые отсчеты. Масштабный инверсор устанавливают на максимальный коэффициент трансформирования и отмечают проекцию центральной точки контрольной сетки на экране.

Вращая ножной штурвал масштабных инверсоров, устанавливают минимальный коэффициент трансформирования. Если изображение центральной точки контрольной сетки остается на прежнем месте, то места нулей шкал продольной и поперечной децентраций равны нулю. В противном случае изменяют отсчеты по шкалам так, чтобы изображение центральной точки контрольной сетки оставалось на одном месте при вращении ножного штурвала масштабных инверсоров. Полученные после этого отсчеты по шкалам и будут местами нулей.

§ 36. МАЛЫЙ ФОТОТРАНСФОРМАТОР (ФТМ, Seg-IV)

Малый фототрансформатор разработан и впервые изготовлен фирмой «Цейсс-Аэрофотограф».

ФТМ — фототрансформатор второго рода, предназначен для трансформирования плановых снимков.

Конструктивной осью прибора служит луч, перпендикулярный к снимку (рис. 115). Поэтому кассета всегда находится в горизонтальном положении.

Таким образом, в малом фототрансформаторе применена вторая система элементов трансформирования:

φ_x и φ_y — углы наклона экрана вокруг осей y и x ,
 φ_{px} и φ_{py} — углы наклона объектива вокруг осей y' и x' ,
 a и a' — расстояния от узловой точки объектива по конструктивной оси до снимка и экрана,

δ_x и δ_y — продольная и поперечная децентрации снимка.

Эта система несколько отличается от второй системы элементов трансформирования, изложенной в § 32: экран и объектив имеют не по одной, а по две оси вращения. Эта особенность конструкции создает большие удобства при трансформировании целого фильма, так как исключается поворот кассеты.

Элементы трансформирования для ФТМ можно найти так. По формулам (4.16) вычислим углы φ_e и φ_p . Затем найдем $\varphi'_e = \varphi_e + \varphi_p$. По формулам (4.19) получим a и a' . Учитывая, что на данном фототрансформаторе обрабатываются только плановые снимки, можно считать, что

$$\left. \begin{aligned} \varphi_x &= \varphi \cos \kappa, & \varphi_{px} &= \varphi_p \cos \kappa \\ \varphi_y &= \varphi \sin \kappa, & \varphi_{py} &= \varphi_p \sin \kappa \end{aligned} \right\} \quad (4.41)$$

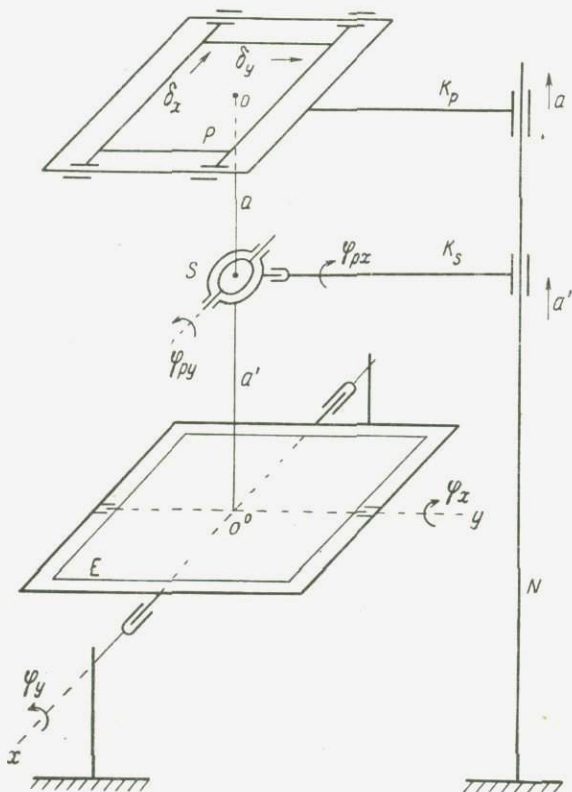


Рис. 115

Это следует из рис. 116, на котором малые повороты представлены в виде векторов на соответствующих осях. Продольную и поперечную децентрации подсчитаем по формуле (4.23), подставив в нее φ_x и φ_y вместо φ .

Из восьми элементов трансформирования оператор устанавливает пять — φ_x , φ_y , a' , $\delta_x \delta_y$. Элементы φ_{px} , φ_{py} и a вводятся масштабным и перспективными инверсорами.

На рис. 115 показаны движения основных частей фототрансформатора, соответствующие элементам трансформирования.

На рис. 117 представлен общий вид малого фототрансформатора и его основные части: станина, несущая карданную раму экрана; колонка с вертикальными направляющими, скрепленная со станиной; объектив; каретка объектива; каретка снимка с кассетой и устройствами для децентрации снимка; масштабный ленточный инверсор; два перспективных тангенциальных инверсора и осветитель.

Каретка объектива перемещается по вертикальным направляющим с помощью ножного штурвала. При этом масштабный инверсор соответственно смещает каретку снимка по тем же направляющим.

Экран наклоняется с помощью ручных штурвалов вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. Наклоны экрана приводят в действие перспективные инверсоры, которые поворачивают объектив

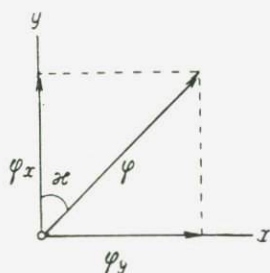


Рис. 116

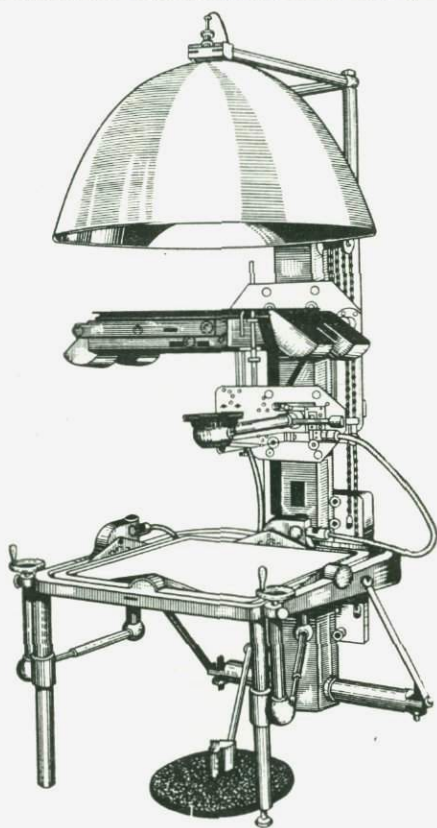


Рис. 117

вокруг двух взаимно перпендикулярных осей так, чтобы плоскости экрана, объектива и снимка пересекались по одной прямой.

Осветитель подвешен на кронштейне, прикрепленном к каретке объектива. Он состоит из ртутной лампы и рефлектора, имеющего форму эллипсоида вращения. В верхнем фокусе его находится лампа, а в нижнем — центр зрачка объектива.

Снимок (негатив) помещается в кассете между прижимной и покровной плоскопараллельными стеклянными пластинами. Кассета позволяет обрабатывать как одиночные снимки, так и целый фильм. Над кассетой установлено матовое стекло.

Прибор снабжен линейными и угловыми шкалами, по которым можно учесть движения основных частей.

Основные характеристики фототрансформатора ФТМ:

Формат снимков	до 30×30 см
Объектив «Луч»	$F = 180$ мм $1 : 6,8$
Коэффициент трансформирования снимка	от 0,7 до 2,5
Размер экрана	60×60 см
Наклон экрана	до 15°
Поворот снимка	0°
Продольная и поперечная децентрации	± 50 мм
Мощность источника света	150 Вт
Размеры прибора	$1,14 \times 0,95 \times 2,5$ м

Проверки фототрансформатора ФТМ. После установки прибора и периодически в процессе его эксплуатации выполняют следующие проверки.

1. *Горизонтальность кассеты.* Проверка выполняется при помощи цилиндрического уровня, который устанавливают на прижимную пластину кассеты. Пузырек уровня приводят на середину, действуя подъемными винтами станины. После этого вертикальные направляющие станины должны занять отвесное положение, в чем следует убедиться при помощи угольника с уровнем. Если это условие не выполняется, то причину неисправности устраняют.

2. *Равномерность освещения изображения на экране.* Проверка производится так же, как в большом фототрансформаторе.

3. *Проверка масштабного инверсора.* Проверка выполняется при полном отверстии объектива и горизонтальном положении экрана и главной плоскости объектива.

Экран приводят в горизонтальное положение по цилиндрическому уровню при помощи ручных штурвалов. Главную плоскость объектива устанавливают горизонтально тоже с помощью цилиндрического уровня, который кладут на торец оправы объектива. При этом объектив поворачивают юстировочными винтами, отключив гибкие валы перспективных инверсоров.

Резкость изображения на экране проверяют визуально. Если она недостаточна, необходимо выполнить юстировку масштабного инверсора.

Масштабный инверсор юстируют при коэффициенте трансформирования, равном 1. В этом случае оси цилиндра C и ролика m' (см. рис. 109) должны находиться на одной высоте. Расстояние между осями должно быть равно фокусному расстоянию объектива. Главная плоскость объектива должна занимать среднее положение между плоскостью прижимного стекла кассеты и экраном.

Чтобы выполнить эти условия, поступают следующим образом. На прижимное стекло кассеты кладут контрольную сетку эмульсионным слоем вниз. Действуя ножным штурвалом, участок стальной ленты между роликом m' и цилиндром C приводят

в горизонтальное положение по цилиндрическому уровню, который устанавливают на ленте. Затем измеряют штангенциркулем, расстояние между роликом и цилиндром. Если оно не равно F , то, ослабив винты, скрепляющие цилиндр с кареткой объектива, перемещают цилиндр вдоль горизонтальных прорезей, пока расстояние между осями ролика m' и цилиндра C не будет равно F , после чего винты закрепляют.

Наблюдают изображение контрольной сетки на экране. Если оно нерезкое или коэффициент трансформирования не равен 1, то главная плоскость объектива не находится посередине расстояния между плоскостью прижимного стекла и экраном. Тогда укорачивают или удлиняют ленту, присоединенную к цилиндру. Для этого нужно ослабить зажимной рычаг юстировочного винта и, вращая винт, повернуть цилиндр, чтобы изображение контрольной сетки на экране было резким, а размеры его не отличались от размеров оригинала. Юстировочный винт закрепляют зажимным рычагом. Теперь при вращении ножного штурвала резкость изображения на горизонтальном экране должна сохраняться, в чем следует убедиться. Если при этом резкость изображения будет заметно нарушаться, то неисправности устраняют.

4. *Проверка перспективных инверсоров.* Гибкие валы присоединяются к соответствующим кареткам. Резкость изображения на экране проверяют при полном отверстии объектива, максимальных углах наклона экрана и различных значениях коэффициента трансформирования.

Если резкость изображения недостаточная, то следует произвести юстировку перспективных инверсоров. Для этого следует установить равенство расстояний r' в обоих инверсорах (см. рис. 112). Юстировка выполняется при коэффициенте трансформирования, равном 1.

Если после этой юстировки резкость изображения не восстанавливается, то неисправности устраняют.

Недостатком фототрансформатора ФТМ является отсутствие приспособлений для автоматического введения децентраций и трансформирования снимков по установочным элементам.

§ 37. ФОТОТРАНСФОРМАТОР Seg-V

Seg-V — фототрансформатор второго рода, разработан фирмой «Цейсс-Аэрофотограф»¹ для трансформирования плановых снимков (рис. 118, а).

Конструктивной осью прибора служит оптическая ось объектива. Поэтому объектив имеет только поступательное движение вдоль вертикальных направляющих, а главная плоскость его горизонтальна.

Экран можно наклонять вокруг двух взаимно перпендикулярных осей.

¹ В настоящее время изготавливается фирмой Opton (ФРГ).

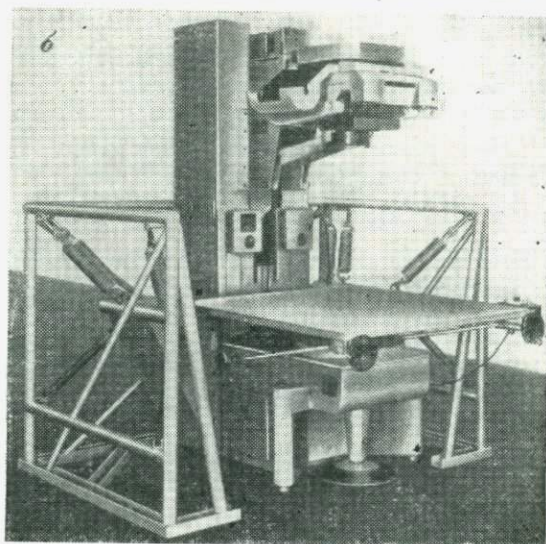
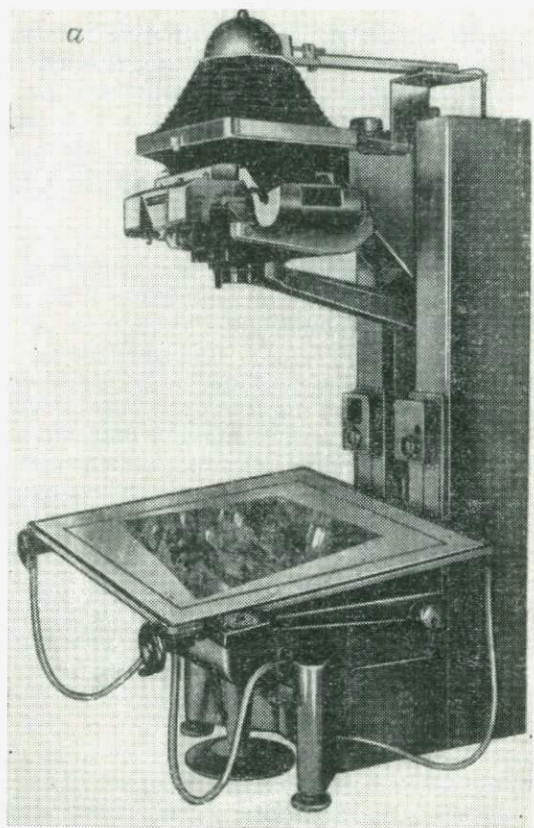


Рис. 118

Плоскость снимка перемещается по вертикальным направляющим и наклоняется в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Кассета имеет два движения в плоскости снимка для введения продольной и поперечной децентраций.

Таким образом, в приборе применена первая система элементов трансформирования

$$\varphi_{ex}, \varphi_{ey}, \varphi_{px}, \varphi_{py}, d, d', \delta_x, \delta_y.$$

отличающаяся от описанной в § 32 тем, что вместо углов наклона экрана и объектива и вместо децентрации снимка используются их составляющие по двум взаимно перпендикулярным осям. Это позволило исключить поворот кассеты.

Из восьми элементов трансформирования оператор устанавливает только три: φ_{ex} , φ_{ey} и d' . Остальные вводятся автоматически: углы φ_{px} и φ_{py} — перспективным инверсором Карпантье, расстояние d — масштабным лекальным инверсором, децентрации δ_x и δ_y — децентрационным инверсором.

Углы φ_e и φ_p можно найти по формулам (4.16). Зная эти элементы, получим по (4.41)

$$\varphi_{ex} = \varphi_e \cos \kappa, \quad \varphi_{px} = \varphi_p \cos \kappa,$$

$$\varphi_{ey} = \varphi_e \sin \kappa, \quad \varphi_{py} = \varphi_p \sin \kappa.$$

Расстояния d и d' вычислим по формулам (4.13) и (4.14), а децентрации δ_x и δ_y — по формуле (4.18), используя углы φ_{ex} и φ_{ey} вместо φ_e .

Из выражения (4.18) следует, что при данном значении фокусного расстояния снимка f децентрация зависит от двух переменных — угла наклона экрана и коэффициента трансформирования снимка, так как фокусное расстояние объектива постоянно.

Децентрационный инверсор состоит из счетно-решающего устройства механического типа и трансляционного электрического устройства. Первое устройство вычисляет продольную и поперечную децентрации в зависимости от углов наклона экрана и коэффициента трансформирования. В этом устройстве устанавливается фокусное расстояние снимка f . Второе устройство передает на кассету вычисленные децентрации. При этом смещение кассеты осуществляется сервомоторами.

Децентрационный инверсор можно отключить и вводить децентрацию вручную.

Осветительное устройство состоит из ртутной лампы и конденсора. Конденсором служат две линзы Френеля, позволившие уменьшить размеры осветительного устройства по сравнению с осветителями, примененными в фототрансформаторах ФТБ и ФТМ.

На держателе объектива укреплен экспонометр для автоматического регулирования выдержки в соответствии с плотностью негатива.

Основные характеристики фототрансформатора Seg-V:

Формат снимков	до 24×24 см
Наклоны экрана	$\varphi_{ex} = \varphi_{ey} = 14^\circ$
Объектив «Топо-V»	$F = 180$ мм 1 : 6,3
Коэффициент трансформирования	от 0,5 до 6,5
Размер экрана	100×100 см
Поворот снимка	0°
Продольная и поперечная децентрации	± 45 мм
Размеры прибора	$1,0 \times 1,4 \times 2,8$ м
Масса прибора	580 кг

Для работ в полевых условиях фирма Opton выпускает походный фототрансформатор Seg-Vв (рис. 118, б).

§ 38. ФОТОТРАНСФОРМАТОР «РЕКТИМАТ»

«Ректимат» (Rectimat) — фототрансформатор второго рода, разработан фирмой Цейсс (Иена) для трансформирования плановых снимков (рис. 119).

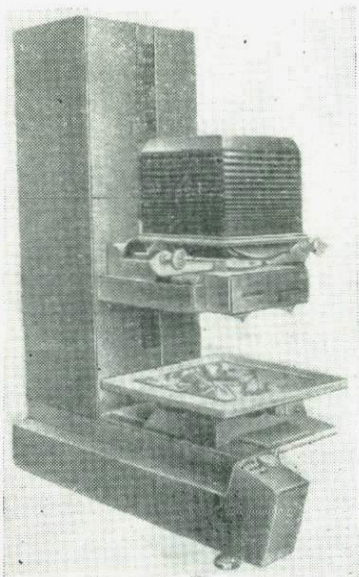


Рис. 119

Конструктивной осью в «Ректимате» служит оптическая ось объектива. Поэтому объектив имеет только поступательное движение вдоль вертикальных направляющих, главная плоскость его горизонтальна.

Экран и кассета наклоняются в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Каретка снимка перемещается по вертикальным направляющим. Кроме поступательного движения вдоль конструктивной оси и двух наклонов снимок имеет смещения в своей плоскости для введения продольной и поперечной децентраций.

Следовательно, в приборе применена первая система элементов трансформирования

$$\varphi_{ex}, \varphi_{ey}, \varphi_{rx}, \varphi_{ry}, d, d', \delta_x, \delta_y.$$

Элементы d' , φ_{rx} и φ_{ry} устанавливаются автоматически масштабным и перспективным инверсорами. Децентрации вводятся при помощи штурвалов или автоматическим устройством.

Существенной особенностью «Ректимата» является отсутствие плоскопараллельной стеклянной пластины между негативом и объективом, а также стеклянной пластины для выравнивания фотоматериала на экране. Выравнивание негатива обеспечивается

путем присасывания его к плоскопараллельной пластине, расположенной между негативом и осветительным устройством. Фотоматериал на экране выравнивается тоже вакуумным способом.

Эта особенность прибора позволяет повысить точность трансформирования снимков по установочным элементам по сравнению с другими фототрансформаторами, в которых для выравнивания негатива используется стеклянная пластина, расположенная в связке лучей, идущих от негатива к объективу. В таких фототрансформаторах стеклянная пластина вызывает ошибки на трансформированном снимке, зависящие от угла наклона экрана. Вследствие этого влияние пластины нельзя учесть при расчете объектива.

Осветительное устройство состоит из конденсора Френеля и лампы.

Экран имеет вертикальное перемещение в небольших пределах, что позволяет учесть толщину фотоматериала.

В кассету можно заложить как разрезанные или неразрезанные фильмы, так и снимки на стеклянных пластинках.

Основные характеристики фототрансформатора «Ректимат»:

Формат снимков	до 24 × 24 см
Объектив «Трансформар»	$F = 125 \text{ мм } 1 : 8$
Коэффициент трансформирования	от 0,7 до 7,0
Размер экрана	106 × 106 см
Наклоны экрана	до 9°
Поворот снимка	0°
Продольная и поперечная децентрации снимка	± 20 мм
Вертикальное перемещение экрана	20 мм
Размеры прибора	1,2 × 2,4 × 2,8 м
Масса прибора	1300 кг

Максимальный угол наклона снимка, трансформируемого на приборе, подсчитывается по формуле

$$\varepsilon_{\max}^g = f, \quad (4.42)$$

где f — фокусное расстояние снимка, выраженное в сантиметрах.

Равенство (4.42) можно получить из выражения (4.16), приняв $F = 12 \text{ см}$ и $\varphi_{e_{\max}} = 12^g$.

§ 39. ФОТОТРАНСФОРМАТОР Е-4

Фототрансформатор Е-4 изготовлен фирмой Вильда для трансформирования плановых снимков (рис. 120).

Оптическая ось объектива находится в вертикальном положении и служит конструктивной осью прибора. Объектив имеет только поступательное движение вдоль вертикальных направляющих. Экран наклоняется вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. Снимок перемещается по вертикальным направляющим, наклоняется вокруг двух взаимно перпендикулярных осей и смещается в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Таким образом, в фототрансформаторе Е-4 применена первая система элементов трансформирования

$$\varphi_{ex}, \varphi_{ey}, \varphi_{rx}, \varphi_{ry}, d, d', \delta_x, \delta_y.$$

Расстояние d' устанавливается масштабным лекальным инверсором, а углы φ_{rx} и φ_{ry} — перспективным инверсором, состоящим

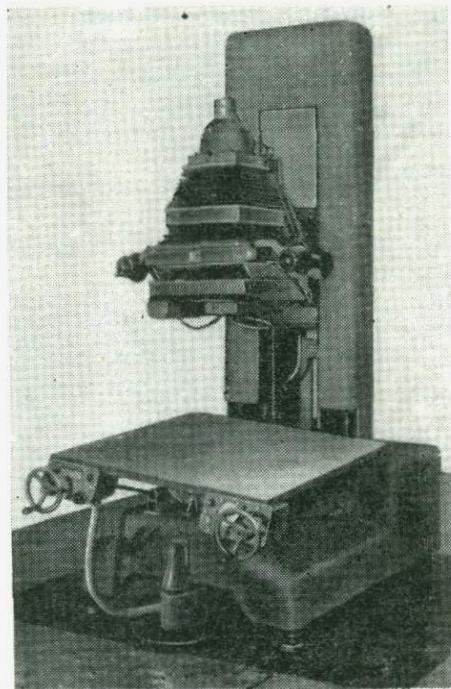


Рис. 120

из счетно-решающего устройства, потенциометров и сервомоторов. Счетно-решающее устройство вычисляет углы наклона негатива как функции углов наклона экрана и коэффициента трансформирования. Результаты вычисления снимаются потенциометрами и используются для наклона негатива сервомоторами. Децентрации вводятся с помощью ручных штурвалов и сервомоторов.

Осветительное устройство состоит из лампы и конденсора, в который входят четыре линзы Френеля.

Прибор позволяет трансформировать разрезанные и неразрезанные фильмы, а также снимки на стеклянных пластинках.

Выравнивание фотоматериала на экране производится вакуумным устройством.

Объектив снабжен затвором и фотоэлементом для установки выдержки в зависимости от плотности негатива.

Основные характеристики фототрансформатора Е-4:

Формат снимков	до 24×24 см
Объектив «Репрогон»	$F = 15$ см 1 : 5,6
Коэффициент трансформирования	от 0,8 до 7,0
Размер экрана	106×106 см
Наклоны экрана	$\pm 15^g$
Поворот снимка	0^g
Продольная и поперечная децентрации	± 40 мм
Смещение лекала масштабного инверсора для учета толщины фотоматериала	до 30 мм
Размеры прибора	$1,2 \times 1,9 \times 2,8$ м
Масса прибора	1000 кг

§ 40. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ФОТОТРАНСФОРМАТОР

Аналитический фототрансформатор разработан А. Н. Лобановым и И. Г. Журкиным. Прибор позволяет получить по наклонному снимку равнинного района фотографическое изображение местности в заданной проекции. Если, кроме снимка, дана информация о рельефе местности, то изображение местности в заданной проекции можно построить для любого района.

Для преобразования снимка в аналитическом фототрансформаторе служит электронная цифровая вычислительная машина. Исходная информация в виде координат точек наклонного снимка и их оптической плотности поступает в машину автоматически.

Кроме того, в машину вводятся элементы ориентирования снимка или координаты опорных точек и данные, необходимые для определения поправок за влияние систематических ошибок снимка, а также программа обработки информации.

Аналитический фототрансформатор содержит передающий фотоэлектрический узел I, узел электронной цифровой вычислительной машины II, приемный фотоэлектрический узел III и узел управления IV (рис. 121).

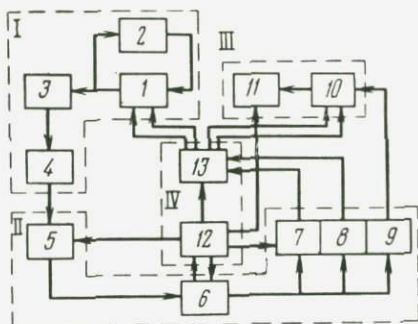


Рис. 121

Передающий фотоэлектрический узел предназначен для преобразования оптической плотности снимка в электрические сигналы. Он состоит из блока электроннолучевой трубки 1, блока автоматической регулировки яркости 2, оптической системы 3 и приемника лучистой энергии 4.

Узел электронной цифровой вычислительной машины, включающий блок электронного преобразователя 5 вида «напряжение — код», блок цифровой вычислительной машины 6, блок электронных преобразователей 7, 8 и 9 вида «код — напряжение», служит для обработки информации снимка по заданному алгоритму.

Блок преобразователя «напряжение — код» преобразует электрические сигналы, пропорциональные оптической плотности, в код электронной цифровой вычислительной машины.

Электронная цифровая вычислительная машина выполняет следующие функции: программное считывание информации со снимка, преобразование координат точек снимка, коррекцию оптической плотности для каждой точки снимка.

Блок электронных преобразователей типа «код — напряжение» служит для преобразования информации, поступающей из вычислительной машины, в электрические сигналы. В состав этого блока входят три преобразователя: преобразователь 7 горизонтального

отклонения, преобразователь 8 вертикального отклонения и преобразователь 9 видеосигнала. Первые два преобразуют код вычислительной машины в напряжения, определяющие положение считывающего луча электроннолучевой трубки 1 и луча, проектирующего изображение на экран электроннолучевой трубки 10, а третий — соответствующий код вычислительной машины в сигналы, пропорциональные оптической плотности снимка.

Приемный фотоэлектрический узел предназначен для построения по электрическим сигналам оптического изображения на экране трубки 10 с последующей фиксацией его на фотоматериале. Этот узел состоит из двух блоков: блока электроннолучевой трубки 10 и фоторегистрирующего устройства 11.

Узел управления, служащий для временного согласования работы всех устройств аналитического фототрансформатора, содержит два основных блока: блок 12 местного устройства управления и блок 13 коммутации разверток. В местном устройстве управления вырабатываются импульсы управления, которые распределяются между устройствами аналитического фототрансформатора. Кроме того, синхронизация работы вычислительной машины с другими устройствами прибора осуществляется блоком 12, причем временные соотношения между управляющими импульсами выбираются из условия минимального времени простоя машины. Назначение блока коммутации разверток состоит в подключении отклоняющих напряжений или на блок трубки 1, или на блок трубки 10.

Аналитический фототрансформатор значительно расширяет возможности преобразования снимков по сравнению с рассмотренными выше аналоговыми фототрансформаторами.

§ 41. ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ СНИМКОВ ПО УСТАНОВОЧНЫМ ЭЛЕМЕНТАМ И ПО ОПОРНЫМ ТОЧКАМ

Снимки можно трансформировать по установочным элементам или по опорным точкам.

Т р а н с ф о р м и р о в а н и е с н и м к о в п о у с т а н о в о ч н ы м э л е м е н т а м

Трансформирование снимков по установочным элементам заключается в следующем. По элементам внутреннего и внешнего ориентирования снимков вычисляют установочные элементы. При этом учитывают принятую в данном фототрансформаторе систему элементов трансформирования и применяют формулы, выведенные в § 32. Затем закладывают негатив в кассету прибора и устанавливают по шкалам вычисленные элементы, учитывая места нулей шкал. В результате такой установки и освещения негатива на экране получается трансформированное изображение, которое фиксируется фотографически.

Точность трансформирования снимков по установочным элементам зависит главным образом от точности определения элементов внешнего ориентирования снимков. Во время аэрофото съемки эти элементы определяются пока с недостаточной точностью. С большей точностью они могут быть получены в результате аналитической пространственной фототриангуляции (см. гл. 13).

Трансформирование снимков по установочным элементам требует более тщательной юстировки прибора, чем трансформирование по опорным точкам. Погрешности автоматической установки элементов инверсорами могут не нарушить резкости изображения на экране, но вызвать значительные искажения трансформированного изображения.

Для трансформирования снимков по установочным элементам наиболее приспособлены фототрансформаторы «Ректимат» Цейсса, Е-4 Вильда и ФТБ.

На практике в настоящее время широко применяется трансформирование снимков по опорным точкам.

Т р а н с ф о р м и р о в а н и е с н и м к о в п о о п о р н ы м т о ч к а м

Трансформирование снимка можно выполнять, не зная его элементов внешнего ориентирования, если известны координаты не менее четырех контурных точек местности, изобразившихся на данном снимке. Такие точки, называемые *опорными* или *трансформационными*, определяют в поле в результате геодезических работ или в камеральных условиях путем фотограмметрического сгущения геодезической сети. В отдельных случаях координаты опорных точек находят по карте.

Пусть имеем опорные точки и снимок, подлежащий трансформированию на фототрансформаторе первого рода. Нанесем на планшет опорные точки a_0, b_0, c_0, d_0 по их координатам в масштабе трансформирования $1 : t$ (рис. 122). Затем установим в этих точках экранчики с марками в виде точек a', b', c', d' так, чтобы разности высот экранчиков были равны соответствующим разностям высот опорных точек в масштабе $1 : t$. Построим в фототрансформаторе связку проектирующих лучей по снимку и установим ее и планшет в такое положение, в котором через марки проходят соответственные лучи. В результате будет восстановлено взаимное положение снимка и горизонтальной плоскости, существовавшее в момент фотографирования. При этом горизонтальной плоскостью служит плоскость планшета. Следовательно, изображение снимка, построенное объективом фототрансформатора на планшете, представляет собой горизонтальный или трансформированный снимок.

На практике экранчики для трансформирования не применяют и установку основных частей прибора выполняют не по маркам,

а по ориентирующим точкам a, b, c, d , которые лежат в плоскости планшета на соответственных лучах.

Чтобы получить ориентирующую точку, например точку a , нужно в положение опорной точки a_0 ввести поправку за рельеф

$$\delta r = r \frac{h}{H}, \quad (4.43)$$

где H — высота фотографирования над горизонтальной плоскостью, от которой отсчитываются превышения опорных точек, т. е. над плоскостью трансформирования,

r — расстояние на планшете от точки надира N до опорной точки.

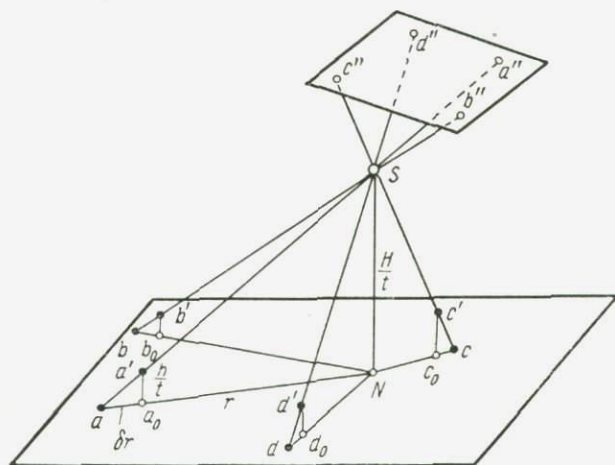


Рис. 122

Поправку за рельеф следует откладывать по направлению от точки надира, если $h > 0$, или к точке надира, если $h < 0$.

При трансформировании плановых снимков точку надира на планшете можно найти с достаточной точностью способом Болотова. Для этого со снимка переносят на восковку направления из главной точки на опорные. Затем устанавливают восковку на планшете так, чтобы прочерченные на ней направления прошли через соответствующие опорные точки, после чего перекалывают на планшет главную точку и принимают ее за точку надира.

Высота фотографирования над плоскостью трансформирования определяется по формуле

$$H = H_{абс} - Z, \quad (4.44)$$

где $H_{абс}$ — высота фотографирования над уречной поверхностью,

Z — высота плоскости трансформирования.

Величину Z выбирают так, чтобы поправки за рельеф были возможно малыми. Обычно ее вычисляют как среднее из известных высот точек местности, изобразившихся на данном снимке или на группе снимков.

Если поправки за рельеф меньше 0,3 мм, то их не учитывают и опорные точки на планшете принимают за ориентирующие.

Процесс трансформирования плановых снимков по опорным точкам заключается в следующем.

Опорные точки на негативе прокалывают иглой, а ориентирующие точки на планшете зачерняют острием карандаша и обводят кружками. Негатив закладывают в кассету и центрируют его по координатным меткам. Кассету устанавливают на каретку снимка, а планшет на экран. Экран приводят приблизительно в горизонтальное положение и устанавливают отсчеты по шкалам децентраций, равные нульпунктам этих шкал. Затем совмещают изображения опорных точек на планшете с соответствующими ориентирующими точками.

Если экран поворачивается вокруг двух осей, то совмещение точек выполняют в такой последовательности:

1. Совмещают изображения опорных точек 1 и 3 с ориентирующими точками $1'$ и $3'$, действуя масштабным инверсором и перемещая планшет на экране (рис. 123, *a*).

2. Наклоняют экран вокруг линии $1-3$ до тех пор, пока несоответствие Δ не исчезнет. При этом одновременно вращают экран вокруг двух взаимно перпендикулярных осей так, чтобы совмещение на точках 1 и 3 не нарушилось. В результате этого проекции опорных точек $2'$ и $4'$ займут положения $2''$ и $4''$.

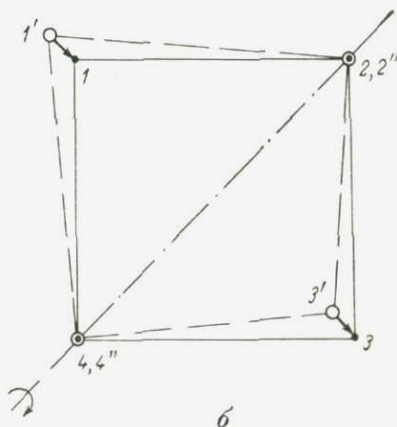
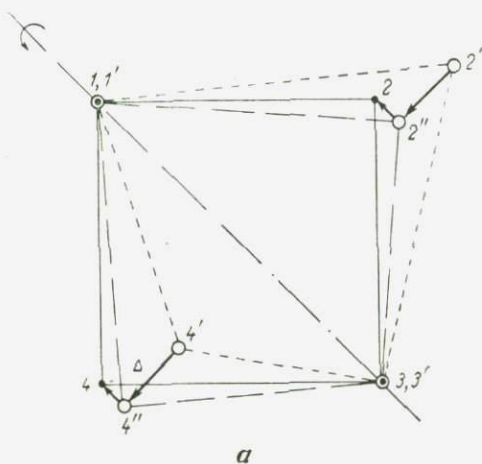


Рис. 123

3. Совмещают ориентирующие точки 2 и 4 с проекциями опорных точек 2'' и 4'' смещением планшета на экране и, если необходимо, небольшим изменением масштаба изображения (рис. 123, б). Тогда совмещение, достигнутое на точках 1 и 3, будет нарушено.

4. Совмещают проекции опорных точек 1' и 3' с ориентирующими точками 1 и 3, наклоня экран вокруг линии 2—4.

Если эти действия не приводят к достаточно точному совмещению точек, то вводят децентрацию снимка. Для этого отсчитывают

углы наклона экрана, вычисляют продольную и поперечную децентрации и устанавливают их по соответствующим шкалам, сменяя кассету.

Затем вновь совмещают ориентирующие точки с проекциями опорных, перемещая планшет на экране. Если и в этом случае точность совмещения точек недостаточна, то повторяют приемы 1—4.

Децентрацию снимка можно найти по номограмме. Опытный оператор определяет децентрацию на глаз.

Изложенная выше методика совмещения изображений опорных точек с ориентирующими точками относится к фототрансформаторам, в которых нет устройств для автоматического введения децентраций. Если такое

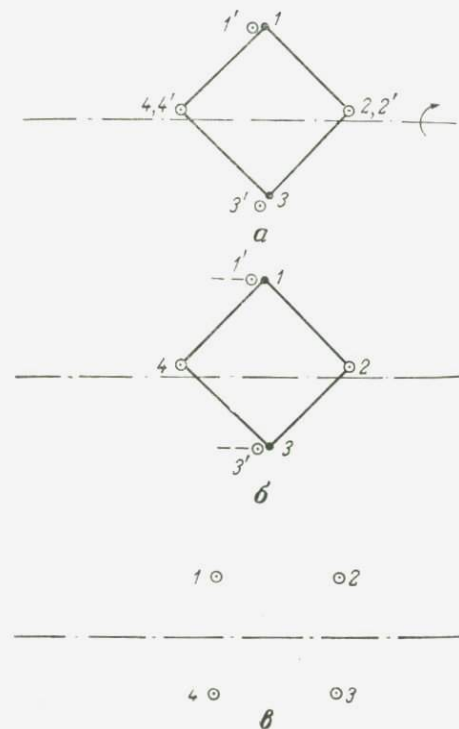


Рис. 124

устройство в приборе имеется (фототрансформатор Seg-V), то совмещение точек облегчается и выполняется в результате указанных четырех действий.

В фототрансформаторе, имеющем одну ось наклона экрана (ФТВ), совмещение изображений опорных точек с ориентирующими точками выполняют в такой последовательности:

1. Поворотом кассеты устанавливают изображения опорных точек 2' и 4' на линию, параллельную оси вращения экрана (рис. 124, а). Затем, действуя масштабным инверсором и перемещая планшет на экране, совмещают ориентирующие точки 2 и 4 с проекциями опорных точек 2' и 4'.

2. Наклоняя экран, пытаются совместить проекции опорных

точек I' и Z' с соответствующими ориентирующими точками (рис. 124, б). Если это не получается, то, наклоня экран, добиваются, чтобы соответственные точки I и I' , Z и Z' лежали на прямых, параллельных оси наклона экрана.

3. Поворачивая кассету и перемещая планшет на экране, вновь совмещают проекции опорных точек с ориентирующими точками (рис. 124, в).

Если после выполнения этих действий совмещение точек не будет достаточно точным, то отсчитывают угол наклона экрана, по которому определяют продольную децентрацию снимка. Затем вводят децентрацию и совмещают точки, перемещая планшет на экране. Если и в этом случае будут недопустимые отклонения, то повторяют действия 1—3.

Кроме четырех опорных точек при трансформировании используют обычно пятую, расположенную в середине снимка и предназначенную для контроля.

На фототрансформаторе ФТБ можно трансформировать не только плановые, но и перспективные снимки. Особенность обработки перспективного снимка на этом приборе состоит в том, что предварительно по приближенным значениям элементов внешнего ориентирования снимка находят элементы трансформирования (§ 32) и устанавливают их в фототрансформаторе. Затем, изменяя эти установки в небольших пределах, добиваются совмещения проекций опорных точек с ориентирующими точками.

При трансформировании длиннофокусных перспективных снимков углы наклона экрана и децентрации превышают предельные значения, которые можно устанавливать в фототрансформаторе. В этом случае применяют способ двойного трансформирования, разработанный С. В. Агаповым.

§ 42. ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ФОТОБУМАГИ

Трансформированные снимки получают обычно на фотобумаге. В результате фотографической обработки фотобумага деформируется. При этом происходит усадка трансформированного снимка.

Коэффициент систематической деформации фотобумаги

$$k_{\partial} = \frac{l}{l_0}, \quad (4.45)$$

где l_0 и l — соответственные отрезки на фотобумаге до фотографической обработки (в момент выдержки) и после.

Так как $k_{\partial} < 1$, масштаб трансформированного снимка после фотографической обработки меньше масштаба, установленного в приборе.

Чтобы масштаб трансформированного снимка после фотографической обработки был равен заданному $1 : t$, необходимо трансформированное изображение на экране фототрансформатора получить в масштабе $1 : k_{\partial}t$.

Поэтому при трансформировании снимков по установочным элементам следует заменить t на $k_{\partial}t$ в формулах, по которым вычисляются эти элементы.

Если снимки трансформируются по опорным точкам, то перед совмещением точек между экраном и планшетом устанавливают подложку соответствующей толщины. После совмещения точек планшет и подложку снимают и фотобумагу кладут на экран, что приводит к увеличению масштаба трансформированного изображения.

Толщина подложки

$$a = \Delta d \cos \psi = d' \left(\frac{1}{k_{\partial}} - 1 \right) \cos \psi,$$

где d' и $d' : k_{\partial}$ — расстояния от точки S объектива по конструктивной оси до планшета и экрана, соответствующие двум значениям масштаба трансформирования — $1 : t$ и $1 : k_{\partial}t$, а ψ — угол наклона экрана (рис. 125).

Учитывая, что величина k_{∂} близка к единице, напишем

$$a = d' (1 - k_{\partial}) \cos \psi. \quad (4.46)$$

Эта формула используется при трансформировании снимков с большими углами наклона. Если снимки плановые, то можно считать

$$\cos \psi = 1 \text{ и } d' = F(1 + n),$$

где n — коэффициент трансформирования, равный отношению

масштабов трансформированного снимка и негатива, а F — фокусное расстояние объектива фототрансформатора. Тогда

$$a = F(1 + n)(1 - k_{\partial}). \quad (4.47)$$

Для определения коэффициента деформации фотобумаги изготовляют несколько контактных отпечатков контрольной сетки. На контактных отпечатках измеряют стороны и диагонали изображения наибольшего квадрата контрольной сетки. Затем определяют среднее значение коэффициента систематической деформации фотобумаги

$$k_{\partial} = \frac{\sum l}{\sum l_0}, \quad (4.48)$$

где $\sum l$ — сумма отрезков, измеренных на контактных отпечатках, $\sum l_0$ — сумма соответственных отрезков на контрольной сетке

Если экран кроме наклона имеет движение по высоте, то можно обойтись без подложки. В этом случае совмещение точек производят при начальном положении экрана по высоте, а затем экран опускают на величину a , подсчитанную по формуле (4.46) или (4.47).

§ 43. ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ СНИМКОВ ПО ЗОНАМ

С геометрической точки зрения трансформированный снимок не отличается от плана, если местность представляет собой горизонтальную плоскость. В случае когда местность холмистая или горная, на трансформированном снимке возникают смещения точек, обусловленные влиянием рельефа (см. рис. 122).

Если превышения точек местности малы, то смещения за рельеф не выходят за пределы ошибок графических построений. В горной местности эти смещения достигают значительных величин.

Влияние рельефа местности можно уменьшить, если трансформировать снимки по зонам.

Зоной называется часть трансформированного снимка, в пределах которой смещения за рельеф не превышают заданной величины.

Пусть кроме негатива дан контактный отпечаток с горизонталями, полученными, например, со старой карты (рис. 126)

Рассчитаем по формуле (4.43) предельное значение превышения $h_{пр}$, при котором смещения точек на трансформированном снимке

не превысят допустимой величины δr . Для расчета в качестве величины H используем высоту съемки над средней горизонтальной плоскостью участка местности, изобразившегося на данном снимке, а в качестве величины r — радиус-вектор на трансформированном снимке, равный радиусу-вектору на контактном отпечатке, умноженному на коэффициент трансформирования.

Затем разделим снимок на зоны и произведем трансформирование его по каждой зоне.

Высота плоскости трансформирования первой зоны

$$Z_1 = Z_{min} + h_{пр}, \quad (4.49)$$

второй

$$Z_2 = Z_1 + 2h_{пр}, \quad (4.50)$$

и т. д.

Здесь Z_{min} — наименьшая высота точки местности, изобразившейся на данном снимке.

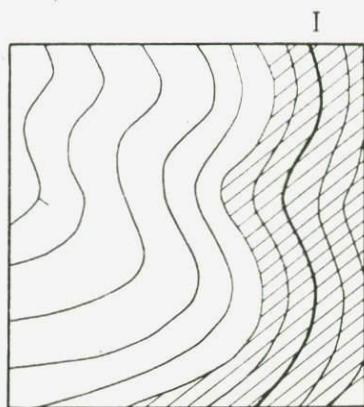


Рис. 126

Обычно величину $h_{\text{пр}}$ округляют так, чтобы плоскость трансформирования и границы зоны совместить с горизонталями.

На рис. 126 первая зона заштрихована, а горизонталь, через которую проходит первая плоскость трансформирования, утолщена.

Зная высоту плоскости трансформирования первой зоны, найдем по формуле (4.44) высоту съемки H относительно этой плоскости и по формуле (4.43) — поправки за рельеф. Затем, введя эти поправки в положение опорных точек на планшете, получим ориентирующие точки и выполним трансформирование снимка по первой зоне.

Аналогично произведем трансформирование снимка по второй, третьей и другим зонам.

При монтаже фотоплана используется только та зона, по которой он трансформировался.

Часто ориентирующие точки определяются не для каждой зоны, а для одной, например для средней, которая принимается за начальную. В этом случае другие зоны снимка трансформируются с помощью какого-либо его отрезка, например соединяющего координатные метки снимка.

Пусть при трансформировании начальной зоны проекция отрезка негатива равна l , а при трансформировании смежной зоны $l + \Delta l$. При этом величина Δl положительна, если высота плоскости трансформирования смежной зоны меньше, и отрицательна, если эта высота больше высоты плоскости трансформирования начальной зоны.

Очевидно, что

$$\frac{l + \Delta l}{l} = \frac{H_2}{H_1},$$

где H_1 и H_2 — высоты фотографирования относительно плоскостей трансформирования начальной и смежной зон,

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{H_2 - H_1}{H_1}.$$

Но

$$H_2 - H_1 = 2h_{\text{пр}}.$$

Поэтому

$$\Delta l = 2l \frac{h_{\text{пр}}}{H_1}. \quad (4.51)$$

Величина l изменяется с помощью масштабного инверсора после совмещения проекций опорных точек негатива с ориентирующими точками планшета.

Этот способ не является строгим, так как при изменении масштаба изображения перспективный инверсор изменяет наклон негатива, вследствие чего возникает искажение изображения. Однако при небольшом количестве зон эти искажения неощутимы.

Трансформирование по зонам применяется, когда число зон не превышает трех, так как этот способ весьма осложняет монтаж

фотоплана. При большем числе зон используют оптический способ трансформирования (см. гл. 12) или фототрансформирование с применением макета обратного рельефа местности. Но более производительным и точным является щелевое трансформирование (см. гл. 9). Оно успешно применяется при составлении фотопланов холмистых и горных районов.

§ 44. ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ СНИМКОВ НА НАКЛОННУЮ ПЛОСКОСТЬ

Снимок P (рис. 127) плоской наклонной местности M целесообразно трансформировать не на горизонтальную плоскость E_0 , а на наклонную E .

В этом случае на трансформированном снимке возникают искажения $\delta r'$, обусловленные наклоном i плоскости трансформиро-

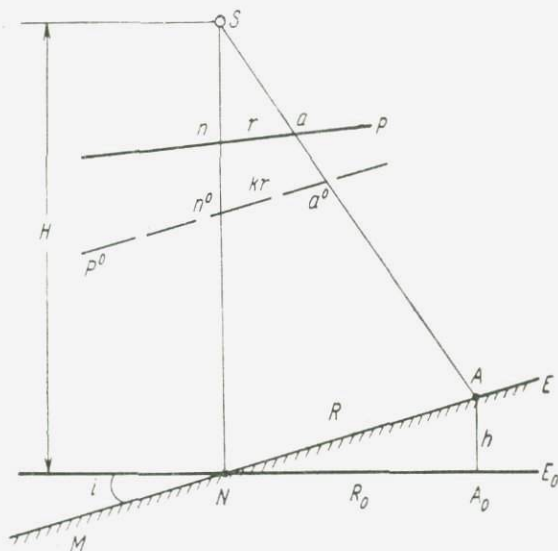


Рис. 127

вания.¹ Однако эти искажения значительно меньше смещений δr , которые образуются при трансформировании снимка на горизонтальную плоскость.

Пусть R — расстояние на местности, измеренное по снимку, который трансформирован на наклонную плоскость, а R_0 — проекция этого расстояния на горизонтальную плоскость. Искажение $\delta r'$ можно представить как разность этих расстояний, выраженную в масштабе трансформированного снимка,

$$\delta r' = (R - R_0) \frac{1}{t} = R (1 - \cos i) \frac{1}{t}$$

или, так как $R = nrt$ и полагая, что угол i мал,

$$\delta r' = \frac{1}{2} nri^2, \quad (4.52)$$

где r — радиус-вектор данной точки, например a , на нетрансформированном снимке,

n — коэффициент трансформирования.

Если снимок трансформировать на горизонтальную плоскость, то смещение за рельеф

$$\delta r = nr \frac{h}{H} = nr \frac{Ri}{H},$$

или, полагая $R = rH : f$,

$$\delta r = \frac{nr^2}{f} i. \quad (4.53)$$

Пусть $i = 3^\circ$, $r = f = 100$ мм, $n = 1$. Тогда $\delta r' = 0,1$ мм, а $\delta r = 5$ мм.

В качестве ориентирующих точек для трансформирования на наклонную плоскость можно использовать опорные точки без введения в них поправок за рельеф, так как наклон этой плоскости мал, а превышения опорных точек над плоскостью трансформирования равны нулю.

Трансформированию снимков на наклонную плоскость посвящены исследования Г. В. Романовского и Н. Я. Бобира.

Если искажения $\delta r'$, вызванные наклоном плоскости трансформирования, значительны, то их можно устранить путем аффинного трансформирования.

§ 45. ВЛИЯНИЕ ОШИБОК ЭЛЕМЕНТОВ ОРИЕНТИРОВАНИЯ СНИМКА И УСТАНОВОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Точность трансформирования снимков по установочным элементам зависит от точности определения элементов ориентирования снимков, а также от точности установки основных частей фототрансформатора в положение, соответствующее этим элементам.

Рассмотрим влияние ошибок элементов ориентирования снимка. Для этого используем приближенные формулы (1.36) и (1.37), определяющие зависимость между координатами соответственных точек горизонтального и планового снимков. Учитывая коэффициент трансформирования снимка n , представим эти формулы в таком виде:

$$x^0 = \left[x + \left(f + \frac{x^2}{f} \right) \alpha + \frac{xy}{f} \omega - y\kappa \right] n,$$

$$y^0 = \left[y + \frac{xy}{f} \alpha + \left(f + \frac{y^2}{f} \right) \omega + x\kappa \right] n.$$

После дифференцирования и перехода к конечным ошибкам получим

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{n} \Delta x^0 &= \Delta x + \left(f + \frac{x^2}{f} \right) \Delta \alpha + \frac{xy}{f} \Delta \omega - y \Delta \kappa + \alpha \Delta f - \\ &- \frac{x^2}{f^2} \alpha \Delta f - \frac{xy}{f^2} \omega \Delta f + \frac{2x}{f} \alpha \Delta x + \frac{y \Delta x - x \Delta y}{f} \omega - \kappa \Delta y \\ \frac{1}{n} \Delta y^0 &= \Delta y + \frac{xy}{f} \Delta \alpha + \left(f + \frac{y^2}{f} \right) \Delta \omega + x \Delta \kappa - \frac{xy}{f^2} \alpha \Delta f - \\ &- \frac{y^2}{f^2} \omega \Delta f + \omega \Delta f + \frac{y \Delta x + x \Delta y}{f} \alpha + \frac{2y \Delta y}{f} \omega + \kappa \Delta x \end{aligned} \right\}, \quad (4.54)$$

где Δx , Δy , Δf — ошибки элементов внутреннего ориентирования снимка,

$\Delta \alpha$, $\Delta \omega$, $\Delta \kappa$ — ошибки угловых элементов внешнего ориентирования снимка.

Из выражений (4.54) следует, что ошибки трансформированного изображения, вызванные ошибками элементов ориентирования снимка, можно разделить на две группы. К первой группе отнесем ошибки, вызывающие поворот и смещение изображения,

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{n} \Delta x_1^0 &= -y \Delta \kappa + f \Delta \alpha + \Delta x + \alpha \Delta f - \kappa \Delta y \\ \frac{1}{n} \Delta y_1^0 &= -x \Delta \kappa + f \Delta \omega + \Delta y + \omega \Delta f + \kappa \Delta x \end{aligned} \right\}, \quad (4.55)$$

а ко второй — ошибки, приводящие к искажению изображения,

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{n} \Delta x_2^0 &= \frac{x^2}{f} \Delta \alpha + \frac{xy}{f} \Delta \omega - \frac{x^2}{f^2} \alpha \Delta f - \frac{xy}{f^2} \omega \Delta f + \\ &+ \frac{2x}{f} \alpha \Delta x + \frac{y \Delta x + x \Delta y}{f} \omega \\ \frac{1}{n} \Delta y_2^0 &= \frac{xy}{f} \Delta \alpha + \frac{y^2}{f} \Delta \omega - \frac{xy}{f^2} \alpha \Delta f - \\ &- \frac{y^2}{f^2} \omega \Delta f + \frac{y \Delta x + x \Delta y}{f} \alpha + \frac{2y \Delta y}{f} \omega \end{aligned} \right\}. \quad (4.56)$$

Во второй группе не оказалось искажения, вызванного ошибкой $\Delta \kappa$, так как ее влияние выражается членами более высокого порядка. Согласно формулам (1.36) и (1.37)

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{n} \Delta x_{\kappa}^0 &= \frac{1}{2} x \Delta \kappa^2 - 2 \frac{xy}{f} \alpha \Delta \kappa + \frac{x^2 - y^2}{f} \omega \Delta \kappa \\ \frac{1}{n} \Delta y_{\kappa}^0 &= -\frac{1}{2} y \Delta \kappa^2 + \frac{x^2 - y^2}{f} \alpha \Delta \kappa + 2 \frac{xy}{f} \omega \Delta \kappa \end{aligned} \right\}. \quad (4.57)$$

Кроме того, следует учесть искажение, вызванное ошибкой определения высоты фотографирования,

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{n} \Delta x_H^0 &= x \frac{\Delta H}{H} \\ \frac{1}{n} \Delta y_H^0 &= y \frac{\Delta H}{H} \end{aligned} \right\}. \quad (4.58)$$

Пусть $x = y = a$, $\Delta\alpha = \Delta\omega$, $\alpha = \omega$. Тогда искажения трансформированного изображения

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{n} \Delta x_2^0 &= 2 \frac{a^2}{f} \Delta\alpha - 2 \frac{a^2}{f^2} \alpha \Delta f + 4 \frac{a}{f} \alpha \Delta x - 2 \frac{a^2}{f} \alpha \Delta\kappa + a \frac{\Delta H}{H} \\ \frac{1}{n} \Delta y_2^0 &= 2 \frac{a^2}{f} \Delta\alpha - 2 \frac{a^2}{f^2} \alpha \Delta f + 4 \frac{a}{f} \alpha \Delta x + 2 \frac{a^2}{f} \alpha \Delta\kappa + a \frac{\Delta H}{H} \end{aligned} \right\}. \quad (4.59)$$

Для примера возьмем $n = 1$, $\alpha = 1^\circ$, $a = f = 70$ мм. Потребуем, чтобы влияние каждого члена правой части равенства (4.59) не превышало 0,1 мм. Исходя из этого условия, найдем допустимые ошибки определения элементов ориентирования

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &\leq 2,5', \\ \Delta f &\leq 2,8 \text{ мм}, \\ \Delta x &\leq 1,4 \text{ мм}, \\ \Delta\kappa &\leq 2,3^\circ, \\ \Delta H &\leq \frac{H}{700} \bullet \end{aligned}$$

Для определения влияния ошибок установки элементов в фототрансформаторе на точность трансформированного изображения используем формулы (4.59), учитывая при этом, что согласно (4.31)

$$\alpha = \frac{f}{d} \varphi \approx \frac{f}{d} \varphi,$$

где f — фокусное расстояние снимка,

d — расстояние по конструктивной оси от узловой точки объектива до негатива,

φ — угол наклона экрана фототрансформатора.

Кроме того,

$$\Delta x = \Delta\delta, \quad \Delta f = 0, \quad a \frac{\Delta H}{H} = a \frac{\Delta d}{d},$$

где $\Delta\delta$ — ошибка введения децентрации снимка,

Δd — ошибка установки расстояния d .

Тогда получим

$$\frac{1}{n} \Delta x_3^0 = 2 \frac{a^2}{d} \Delta\varphi + 4 \frac{a}{d} \varphi \Delta\delta - 2 \frac{a^2}{d} \varphi \Delta\kappa + a \frac{\Delta d}{d} \quad (4.60)$$

Пусть $n = 1$, $d = 360$ мм, $a = 70$ мм, $\varphi = 5^\circ$. Потребуем, чтобы влияние каждого члена, входящего в правую часть формулы (4.60), не превышало 0,1 мм. Это условие будет выполнено, если

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &\leq 13', \\ \Delta\delta &\leq 1,5 \text{ мм}, \\ \Delta\kappa &\leq 2,4^\circ, \\ \Delta d &\leq 0,5 \text{ мм}. \end{aligned}$$

§ 46. ВЛИЯНИЕ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ
СТЕКЛЯННЫХ ПЛАСТИН

Для выравнивания негатива P в кассете и фотобумаги на экране E фототрансформатора обычно применяют плоскопараллельные стеклянные пластины C и C' (рис. 128, a).

Вследствие этого луч, идущий от негатива к экрану, например луч $deSe'd'_1$, испытывает преломления. Сначала он преломляется в точке e при выходе из пластины, прикрепленной к кассете, а затем в точке e' при входе в покрывную пластину.

Если бы пластин не было, то изображение точки d негатива получилось в точке d' . При наличии пластин изображение получается в точке d'_1 .

Найдем смещение

$$\Delta = d'd'_1 = d'b' - d'_1b', \quad (a)$$

вызванное преломлениями луча в пластинах.

Отрезок $d'b'$ найдем из треугольников $d'b'S$ и $o'_0d'S$

$$d'b' = a'_1 \frac{\sin \sigma}{\cos(\varphi + i + \sigma)} = a' \frac{\sin \sigma \cos \varphi}{\cos(\varphi + i) \cos(\varphi + i + \sigma)},$$

где $d'_1 = Sd'$, $a' = So'_0$, φ — угол наклона экрана, $\sigma = \angle dSb$, i — угол между конструктивной осью фототрансформатора и лучом dS . При этом

$$\operatorname{tg} i = \frac{r}{a}. \quad (4.61)$$

Угол σ найдем из треугольников bSd и $do'S$

$$\sin \sigma = \frac{bd}{a_1} \cos(i + \sigma) = \frac{bd}{a} \cos(i + \sigma) \cos i,$$

где $a_1 = Sd$, а

$$bd = t [\operatorname{tg}(i + \sigma) - \operatorname{tg}(i + \sigma)'].$$

При этом

$$\sin(i + \sigma)' = \frac{1}{n_c} \sin(i + \sigma),$$

t — толщина пластины C , n_c — коэффициент преломления стекла.

Отрезок

$$d'_1b' = t' [\operatorname{tg}(\varphi + i + \sigma) - \operatorname{tg}(\varphi + i + \sigma)'],$$

где t' — толщина стекла C' ,

$$\sin(\varphi + i + \sigma)' = \frac{1}{n_c} \sin(\varphi + i + \sigma).$$

Подставим значения величин $d'b'$ и d'_1b' в выражение (а). Учитывая при этом, что угол σ мал, получим

$$\Delta = nt \frac{\cos^2 i \cos \varphi}{\cos^2(i + \varphi)} [\operatorname{tg} i - \operatorname{tg} i'] - t' [\operatorname{tg}(i + \varphi) - \operatorname{tg}(i + \varphi)'], \quad (4.62)$$

где $n = a' : a$ — коэффициент трансформирования.

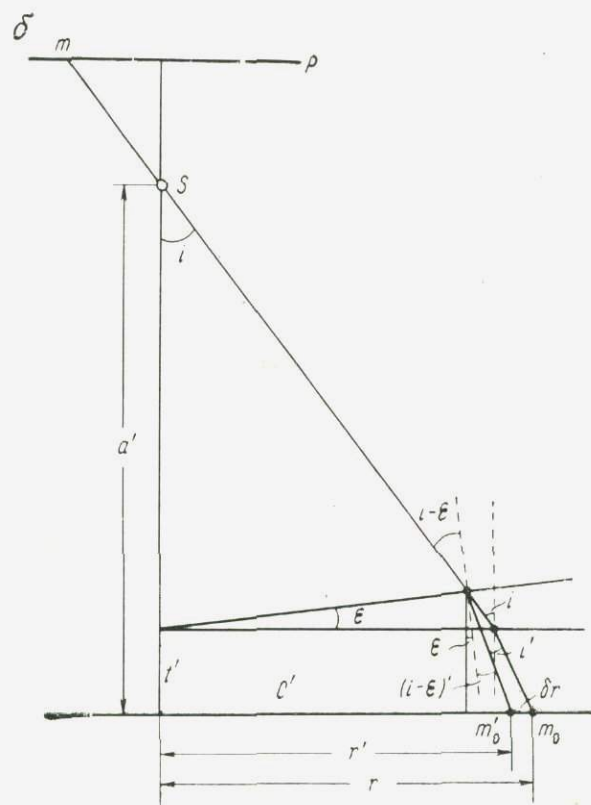
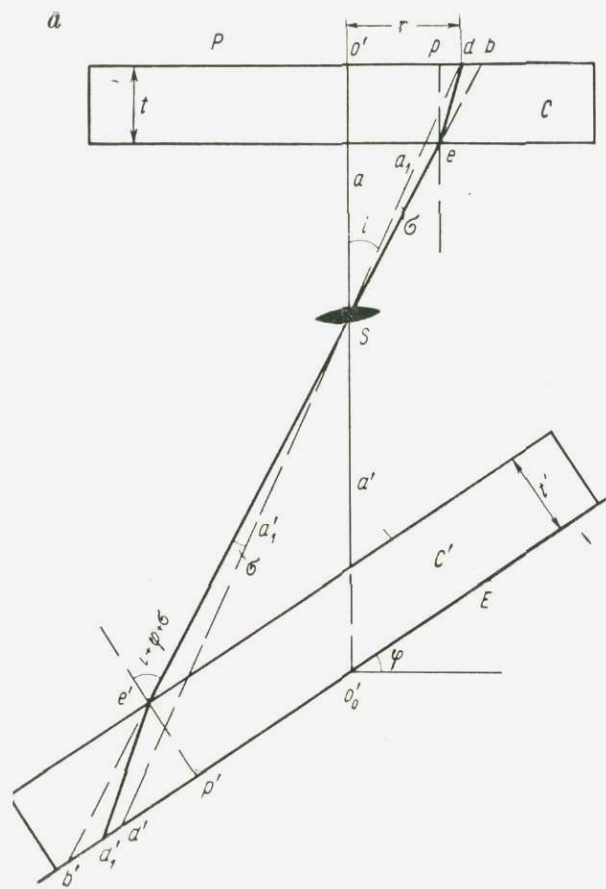


Рис. 128

Таким образом, искажение изображения, вызванное стеклянными пластинами, сложное. Полностью его можно устранить лишь при горизонтальном положении экрана. В этом случае

$$\Delta = (nt - t') (\operatorname{tg} i - \operatorname{tg} i'). \quad (4.63)$$

Отсюда следует, что при горизонтальном положении экрана смещение $\Delta = 0$, если толщина покровной пластины в n раз больше толщины прижимной пластины.

При наклоне экрана влияние пластин можно несколько уменьшить путем изменения масштабного коэффициента.

Изображение, полученное на экране, искажается еще вследствие дисторсии объектива фототрансформатора. Однако это искажение мало по сравнению с рассмотренными выше и, как правило, им можно пренебречь.

Клиновидность пластины тоже искажает трансформированное изображение (рис. 128, б). Пусть угол между нижней и верхней плоскостями пластины C' равен ε . Если $\varepsilon = 0$, то пластина плоскопараллельная и точка m негатива изображается в точке m_0 . Если $\varepsilon \neq 0$, то пластина имеет вид клина и точка m изображается в точке m'_0 . Искажение $m_0 m'_0$ обозначим через δr .

Очевидно,

$$\delta r = r' - r,$$

где

$$r = (a' - t') \operatorname{tg} i + t' \operatorname{tg} i',$$

$$r' = (a' - t' - \Delta t') \operatorname{tg} i + (t' + \Delta t') \operatorname{tg} [(i - \varepsilon)' + \varepsilon].$$

При этом

$$\sin i = n_c \sin i',$$

$$\sin (i - \varepsilon) = n_c \sin (i - \varepsilon)',$$

$$\Delta t' = (a' - t') \operatorname{tg} i \operatorname{tg} \varepsilon.$$

После преобразований и упрощений найдем

$$\varepsilon = \frac{n_c \delta r}{(1 - n_c) a' \sin^2 i} \quad (4.64)$$

Пусть $n_c = 1,5$, $\delta r = 0,05$ мм, $a' = 360$ мм, $i = 30^\circ$. Тогда $\varepsilon = 6'$.

ФОТОПЛАНЫ И ФОТОСХЕМЫ

§ 47. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Фотоплан — фотографическое изображение местности, удовлетворяющее по точности требованиям, предъявляемым к плану.

Существенным преимуществом фотоплана по сравнению с планом является более высокая информационная емкость. На фотоплане более подробно и наглядно изображаются контуры и элементы рельефа — овраги, промоины, обрывы и др.

Однако фотографическое изображение контуров отличается от условного изображения их на карте, а отсутствие горизонталей на фотоплане не позволяет определять высоты точек местности. Поэтому часто на фотоплане вычерчивают по условным знакам населенные пункты, дороги и другие основные элементы местности и проводят горизонталы. Такой документ, сочетающий фотоплан с картой, называется *фотокартой*.

Фотоплан составляют по трансформированным снимкам путем монтажа их на основу по опорным точкам, полученным в поле или в результате построения фотограмметрической сети. При отсутствии полевых опорных точек изготовляют неориентированные фотопланы, используя свободную фотограмметрическую сеть.

В зависимости от рельефа местности трансформирование снимков выполняют на фототрансформаторе или на щелевом фототрансформаторе.

Если местность равнинная или холмистая, то применяют фототрансформатор. При этом снимки трансформируются по одной или двум-трем зонам. В горной местности трансформирование по зонам малопродуктивно и не обеспечивает необходимую точность фотоплана. В этом случае применяют щелевое трансформирование, в результате которого получают фотографическое изображение местности, практически не отличающееся от ортогональной проекции, — ортофотоснимок (см. гл. 11).

Снимки холмистой местности с крупными формами рельефа можно трансформировать и на горном трансформаторе, основанном на построении обратной модели местности¹.

Плановые снимки равнинного района можно не трансформировать, а только привести к масштабу, если при аэросъемке применялась гидростабилизация аэрофотоаппарата и углы наклона снимков не превышают допустимой величины. Подсчитаем, при каких углах наклона это возможно.

¹ См. Кошпип М. Д. Аэрофотограмметрия. М., изд-во «Недра», 1967, с. 62.

Смещение точки планового снимка, обусловленное его наклоном, определяется формулой (1.70)

$$\delta r = \frac{r^2}{f} \varepsilon.$$

На трансформированном снимке это смещение изменится в n раз. При этом n — коэффициент трансформирования, равный отношению масштабов фотоплана и планового снимка (негатива). Учитывая это, можно написать

$$\varepsilon \leq \frac{f}{nr^2} \delta r', \quad (5.1)$$

где $\delta r' = n \delta r$.

Пусть масштаб планового снимка равен 1 : 50 000, масштаб фотоплана 1 : 25 000, $f = 100$ мм, $r = 70$ мм, $\delta r' = 0,3$ мм. Тогда $\varepsilon \leq 40'$.

Фотопланы часто используются в качестве основы при составлении топографических карт. В отдельных случаях они могут заменить карту.

Фотосхемой называется фотографическое изображение местности, составленное из плановых снимков. Точность ее значительно ниже точности фотоплана. Поэтому она используется для рекогносцировочных и других работ, не требующих высокой точности измерений. Например, в землеустройстве фотосхемы служат для дешифрирования сельскохозяйственных угодий, приближенного определения расстояний и площадей и других обследований территории землепользования.

§ 48. СОСТАВЛЕНИЕ ФОТОПЛАНОВ

Фотопланы составляют обычно в рамках трапеций государственной картографической разграфки или на определенный объект (колхоз, совхоз и др.).

Основными процессами составления фотоплана являются подготовка основы, подготовка трансформированных снимков, монтаж фотоплана, контроль и оформление фотоплана.

Подготовка основы. При помощи координатографа на планшет наносят координатную сетку, рамку трапеции, тригонометрические пункты и другие опорные точки, полученные в результате полевой подготовки снимков и фотограмметрического сгущения геодезической сети.

Стороны и диагонали рамки не должны отличаться от их теоретических размеров более чем на 0,2 мм.

Подготовка трансформированных снимков. Подбирают трансформированные снимки для данной трапеции по маршрутам. Проверяют фотографическое качество и однотонность снимков. На каждом снимке пробивают пунсоном отверстия на опорных точках. Контролируют точность

трансформирования снимков, совмещая центры отверстий с соответствующими точками на планшете. Расхождения в положении точек не должны при этом превышать 0,4 мм. При больших расхождениях трансформированный снимок изготавливается заново.

Монтаж фотоплана начинают с северного маршрута в направлении слева направо.

На основу кладут первый снимок. Ориентируют его, совмещая центры пробитых отверстий с соответствующими точками основы, и устанавливают на него грузики. Аналогично укладывают на основу второй снимок и проверяют сходимость контуров в середине перекрытия обоих снимков. Для этого тонкой иглой делают наколы на четких контурах верхнего снимка так, чтобы они оставили следы на нижнем снимке. Уклонения этих следов от соответствующих контуров на нижнем снимке не должны превышать 0,6 мм. Затем острым скальпелем разрезают оба снимка посередине перекрытия. Линия пореза должна проходить по контурам, не имеющим важного значения, по возможности минуя населенные пункты и малые объекты — мосты, отдельные постройки и т. д. Желательно также, чтобы линия пореза не пересекала под острыми углами дороги, реки и другие вытянутые контуры. Обрезки от каждого снимка сохраняют для контроля фотоплана. После пореза первого и второго снимков соответствующие части приклеивают к основе.

Далее укладывают на основу третий снимок, ориентируют его по точкам и закрепляют грузиками. Разрезают второй и третий снимки и, удалив обрезки, наклеивают соответствующую часть третьего снимка на основу.

Аналогично монтируют другие снимки первого маршрута.

Затем кладут на основу первый и второй снимки второго маршрута, ориентируют их по опорным точкам и по снимкам первого маршрута. Разрезают снимки сначала посередине поперечного перекрытия, а затем посередине продольного перекрытия и, удалив обрезки, приклеивают снимки к основе.

В таком же порядке монтируют остальные снимки второго маршрута и снимки других маршрутов.

Окончив монтаж, снимки обрезают параллельно сторонам трапеции, отступив от них на 1 см за пределы трапеции.

Если снимок трансформирован по зонам то отпечатки, полученные для различных зон, ориентируют на основе по одним и тем же точкам.

Предварительно на каждом отпечатке в положение опорных точек вводят поправки за рельеф

$$\delta h = \frac{h}{H} r,$$

где h — превышение опорной точки над плоскостью трансформирования данного отпечатка,

H — высота фотографирования над той же плоскостью,

r — расстояние на отпечатке от главной точки до опорной точки.

Поправка вводится по направлению к главной точке, если превышение h положительное, и наоборот.

Исправленное положение опорных точек пробивают пуансоном.

Смонтированные отпечатки разрезают по границам зон и наклеивают на основу части, относящиеся к зоне данного отпечатка.

Контроль и оформление фотоплана. Точность фотоплана проверяют по опорным точкам, порезам и сводкам.

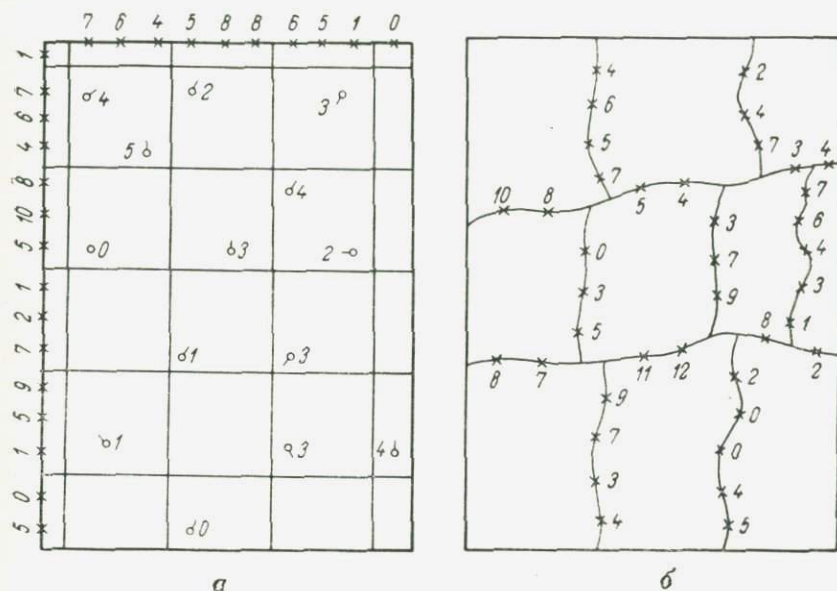


Рис. 129

Результаты проверки фотоплана отмечаются в контрольных (корректирных) листах (рис. 129), на которые предварительно наносят рамку трапеции, километровую сетку, опорные точки и линии порезов.

Контроль фотоплана по опорным точкам заключается в определении несовмещений центров отверстий, пробитых на отпечатках, с опорными точками на основе. Эти несовмещения не должны превышать 0,5 мм в равнинных районах и 0,7 мм в холмистых. На корректирном листе около опорных точек указывают направления несовмещений и их величину в десятых долях миллиметра (рис. 129, а).

Контроль фотоплана по порезам выполняют с помощью обрезков трансформированных снимков. Обрезки прикладывают к соответствующим порезам на фотоплане и закрепляют грузиками. На обрезке возможно ближе к порезу накалывают иглой ряд

четких контуров так, чтобы следы были видны на фотоплане. Несовмещения наколов с соответствующими контурами на фотоплане измеряют. Наколы вдоль линии пореза делают примерно через 2 см. Несовмещения контуров по порезам не должны превышать 0,7 мм, а при коэффициенте трансформирования больше 1,5 и в горных районах — 1,0 мм. На корректурном листе отмечают наколы на порезах и величины несовмещений контуров в десятых долях миллиметра (рис. 129, б).

Для контроля фотоплана по сводкам со смежными трапециями пользуются зарамочными обрезками трансформированных снимков. Их накладывают на соседний фотоплан, ориентируют по выходам километровой сетки и на четких контурах, расположенных вблизи рамки, делают наколы приблизительно через 3 см. Допустимые несовмещения по сводкам 1 мм в равнинных и холмистых районах и 1,5 мм — в горных. На корректурном листе показывают наколы вдоль рамки и величины несовмещений в десятых долях миллиметра (см. рис. 129, а).

Фотографическое качество фотоплана контролируется путем визуального сравнения с эталоном.

На фотоплан наносят и вычерчивают условными знаками все геодезические пункты. Кроме того, вычерчивают рамку и выполняют зарамочное оформление.

Фотопланы изготовляют и в условной разграфке, используя для этого координаты опорных точек от условного начала координат.

В сельском хозяйстве фотопланы часто составляют в границах землепользований колхозов и совхозов. В качестве опорных точек в этом случае служат межевые знаки.

Размножают фотоплан фотографическим или типографским способами. Фотографический способ применяют, когда требуется небольшое количество экземпляров фотоплана. В этом случае при помощи репродукционной камеры изготовляют негатив фотоплана, сохраняя возможно точно теоретические размеры трапеции. Затем получают копии фотоплана путем контактной печати с негатива.

В процессе изготовления копии можно впечатать в фотоплан горизонталы. Для этого переносят горизонталы с карты на прозрачную основу и прикрепляют эту основу к негативу фотоплана, а потом производят контактную печать. В результате на копии фотоплана получаются горизонталы в виде белых линий.

Если тираж фотоплана большой, то применяют типографский способ размножения фотодокументов.

§ 49. СОСТАВЛЕНИЕ ФОТОСХЕМЫ

Фотосхему можно изготовить значительно быстрее, чем фотоплан, так как для монтажа ее не требуются ни трансформированные снимки, ни опорные точки. Фотосхему составляют из плановых снимков.

Фотосхемы делятся на маршрутные и многомаршрутные. Маршрутную фотосхему изготовляют из снимков одного маршрута. Для составления многомаршрутной фотосхемы используют снимки нескольких маршрутов.

Точность фотосхемы ниже точности фотоплана и существенно зависит от углов наклона снимков, рельефа местности, колебаний высоты полета и погрешностей монтажа снимков.

Различают два способа монтажа снимков: по начальным направлениям и по контурам. Наиболее точный из них первый, а более быстрый — второй.

Если фотосхема предназначается для измерительных работ, то снимки монтируют по начальным направлениям. Фотосхемы

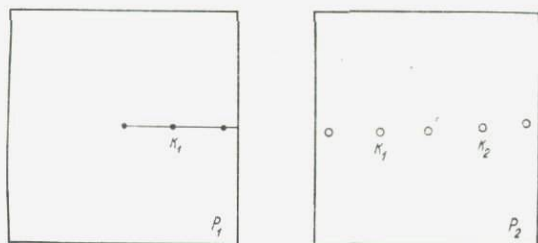


Рис. 130

для рекогносцировки, дешифрирования и других работ, не связанных с измерениями, изготовляют путем монтажа снимков по контурам.

Рассмотрим технологию составления маршрутной фотосхемы по начальным направлениям.

На всех снимках данного маршрута выбирают и накальвают центральные точки и переносят их на соседние снимки. На нечетных снимках карандашом проводят начальные направления, соединяя центральные точки их с точками, соответствующими центральным точкам соседних снимков (рис. 130). Посередине продольных перекрытий вблизи начальных направлений накальвают по одной контрольной точке — k_1 , k_2 и т. д. На четных снимках пуансоном пробивают отверстия на всех накалотых точках.

Затем приступают к монтажу снимков. Первые два снимка кладут на основу так, чтобы верхним был снимок с пробитыми отверстиями. Центр отверстия k_1 совмещают с соответствующим накалом на нижнем снимке и, поворачивая верхний снимок, добиваются, чтобы начальное направление прошло через центры соответствующих отверстий, пробитых на верхнем снимке.

Прижав снимки грузиками, разрезают их посередине продольного перекрытия. Убирают обрезки и приклеивают снимки к основе.

Аналогично монтируют остальные снимки данного маршрута.

Фотосхему контролируют по порезам. Эту проверку выполняют так же, как при корректуре фотоплана. Результаты контроля отмечаются в корректурном листе.

Края фотосхемы обрезают по прямым и делают зарамочное оформление.

Масштаб фотосхемы определяется как отношение расстояния, измеренного между максимально удаленными друг от друга точками на фотосхеме, к соответствующему расстоянию на местности. При этом расстояние на местности вычисляется по координатам опорных точек или определяется по карте.

Теперь рассмотрим *точность определения расстояний и площадей по маршрутной фотосхеме*, смонтированной по начальным направлениям.

Расстояние между центральными точками крайних снимков фотосхемы обозначим через L_n , а число стереопар, из которых составлена фотосхема, — через n . Тогда

$$L_n = b_1 + b_2 + \dots + b_n,$$

где b_i — отрезок на фотосхеме между соседними центральными точками. Очевидно, что средняя квадратическая ошибка расстояния

$$m_{L_n} = m_b \sqrt{n}, \quad (a)$$

где m_b — средняя квадратическая ошибка отрезка b_i .

Масштаб фотосхемы определяется по опорным точкам, расположенным на ее краях. Поэтому максимальная ошибка в положении точки на фотосхеме будет в середине. Для определения ее достаточно в выражение (а) подставить $0,5 n$ вместо n . Получим

$$m_{L_c} = 0,71 m_b \sqrt{n}. \quad (5.2)$$

Отрезок b состоит из двух частей, каждая из которых содержит искажения, вызванные углом наклона снимка ε , рельефом местности h , колебанием ΔH высоты полета H и погрешностью монтажа фотосхемы. Полагая, что эти ошибки случайные, напишем

$$m_b = \sqrt{2(m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2)}. \quad (5.3)$$

Применив формулы (1.70) и (1.76) и учитывая, что влияния ΔH и h аналогичны, найдем

$$m_1 = \frac{r^2}{f} \varepsilon, \quad m_2 = \frac{h}{H} r, \quad m_3 = \frac{\Delta H}{H} r. \quad (5.4)$$

В данном случае $r = 0,5b$.

Пусть $H = 2500$ м, $f = 100$ мм, $n = 6$, $b = 70$ мм, $\varepsilon = 2^\circ$, $h = 30$ м, $\Delta H = 10$ м, $m_4 = \pm 0,2$ мм. Тогда $m_1 = \pm 0,37$ мм, $m_2 = \pm 0,42$ мм, $m_3 = \pm 0,14$ мм; $m_b = \pm 0,86$ мм, $m_{L_c} = \pm 1,5$ мм в масштабе фотосхемы.

Относительная ошибка определения расстояния по фотосхеме

$$\frac{m_L}{L} = 0,71 \frac{m_b}{b \sqrt{n}}. \quad (5.5)$$

В нашем примере $m_L : L$ равно 1 : 160.

Площадь участка местности, изобразившегося на левой или правой половине фотосхемы, можно представить так:

$$P = L_c U.$$

Здесь L_c — половина длины фотосхемы, U — ширина фотосхемы.

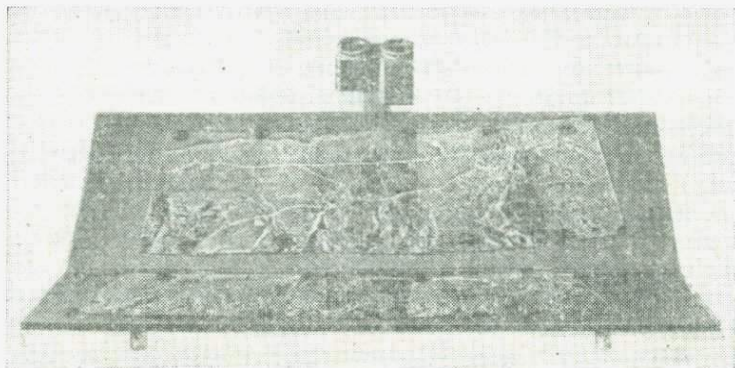


Рис. 131

После дифференцирования и перехода к средним квадратическим ошибкам получим

$$m_p = \sqrt{(Um_{L_c})^2 + (L_c m_u)^2}. \quad (5.6)$$

Величина U состоит из двух отрезков, каждый из которых будем считать равным b . Тогда ошибку m_u найдем по формулам (5.3) и (5.4), полагая $r = b$.

Относительная ошибка определения площади участка по маршрутной фотосхеме

$$\frac{m_p}{P} = \sqrt{\left(\frac{m_{L_c}}{L_c}\right)^2 + \left(\frac{m_u}{U}\right)^2}. \quad (5.7)$$

В приведенном выше примере $m_u = \pm 2,5$ мм, а $m_p : P = 1 : 50$.

В отдельных случаях, например для рекогносцировки местности и проектирования железных и шоссейных дорог, составляют стереоскопические фотосхемы.

На рис. 131 представлен маршрутный стереоскоп S T10 Вильда, позволяющий одновременно наблюдать левую фотосхему левым

глазом и правую — правым глазом. Левая фотосхема монтируется из нечетных снимков на наклонном экране, а правая — из четных снимков на горизонтальном экране. Экраны находятся на общей каретке, которую можно перемещать влево и вправо относительно неподвижной наблюдательной системы.

Многомаршрутную фотосхему изготавливают следующим образом.

Монтируют сначала снимки среднего маршрута, а затем снимки смежных маршрутов так, чтобы соответственные контуры совместились друг с другом возможно точно. Чтобы монтаж не нарушить, на снимки устанавливают грузики.

Снимки разрезают посередине продольных перекрытий в каждом маршруте и посередине поперечных перекрытий, наблюдая за тем, чтобы положение снимков не нарушалось. Обрезки удаляют и снимки приклеивают к основе, начиная со среднего снимка среднего маршрута.

Фотосхему контролируют по порезам. Результаты контроля отмечают в корректурном листе. Затем фотосхему обрезают по краям, наносят рамку трапеции по общим с картой контурам и оформляют. Масштаб многомаршрутной фотосхемы определяют по опорным точкам или с помощью карты.

Фотосхемы, как и фотопланы, размножают фотографическим или типографским способами.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ СНИМКА

§ 50. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для трансформирования снимков по установочным элементам и определения координат точек местности методом прямой засечки необходимо знать элементы внешнего ориентирования снимков.

Способы определения элементов внешнего ориентирования снимков разделим на две группы:

- 1) способы, позволяющие измерять элементы в полете,
- 2) способы, предназначенные для определения элементов в камеральных условиях.

Для определения элементов внешнего ориентирования снимков в полете разработаны различные способы, основанные на достижениях физики, электроники, астрономии и других областей науки и техники. Например, координаты точек фотографирования находят с помощью радиогодезических систем. Высота полета измеряется анероидом, радиовысотомером и лазерным высотомером. Разности высот фотографирования получают по показаниям статоскопа. Угловые элементы внешнего ориентирования определяются с помощью гироскопа, а также по снимкам горизонта, Солнца и звезд.

Способы первой группы рассматриваются в курсах аэрофото съемки.

Ко второй группе относятся способы, позволяющие получать элементы внешнего ориентирования снимков по опорным точкам. Они основаны на решении обратной фотограмметрической засечки.

В настоящей главе рассмотрим два способа определения элементов внешнего ориентирования снимков: по опорным точкам и по снимкам звезд. Оба этих способа являются аналитическими и разработаны для решения задачи при помощи электронной вычислительной машины.

§ 51. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ СНИМКА ПО ОПОРНЫМ ТОЧКАМ

Задача определения элементов внешнего ориентирования снимка по опорным точкам часто называется *обратной пространственной фотограмметрической засечкой*. Оригинальные решения этой задачи предложили Н. Г. Келль, Н. А. Урмаев, Г. В. Романовский и др.

Способы определения элементов внешнего ориентирования снимка по опорным точкам, составляющие вторую группу, можно разделить на две подгруппы. К первой подгруппе принадлежат способы, позволяющие в результате решения уравнений получить непосредственно неизвестные элементы. Во вторую подгруппу входят способы, в которых предполагается, что приближенные значения элементов внешнего ориентирования известны, а в результате решения уравнений находят поправки к этим значениям.

Способы второй подгруппы легко допускают применение метода наименьших квадратов, что имеет существенное значение, особенно для оценки точности определения элементов.

Ниже излагается способ, относящийся ко второй подгруппе и позволяющий найти не только элементы внешнего ориентирования, но и элементы внутреннего ориентирования снимка.

Для теоретического обоснования способа используем формулы (1.20), выражающие зависимость между координатами x , y точки снимка и координатами X , Y и Z соответственной точки местности,

$$x - x_0 = -f \frac{a_1(X - X_0) + b_1(Y - Y_0) + c_1(Z - Z_0)}{a_3(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + c_3(Z - Z_0)} = -f \frac{X^*}{Z^*},$$

$$y - y_0 = -f \frac{a_2(X - X_0) + b_2(Y - Y_0) + c_2(Z - Z_0)}{a_3(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + c_3(Z - Z_0)} = -f \frac{Y^*}{Z^*},$$

где x_0, y_0 — координаты главной точки снимка,

f — фокусное расстояние,

X_0, Y_0, Z_0 — координаты точки фотографирования,

a_i, b_i, c_i — направляющие косинусы, зависящие от угловых элементов внешнего ориентирования снимка α, ω и κ и вычисляемые по формулам (1.15).

Через X^*, Y^* и Z^* обозначены числители и знаменатель, входящие в правые части выражений (1.20).

Пусть известны приближенные значения элементов ориентирования снимка. Тогда по формулам (1.20) можно вычислить координаты x и y изображений опорных точек на снимке. Обозначим вычисленные значения этих величин через (x) и (y) . Очевидно, вычисленные координаты (x) и (y) будут отличаться от измеренных x и y . Обозначим поправки к приближенным значениям элементов ориентирования через $\delta X_0, \delta Y_0, \delta Z_0, \delta \alpha, \delta \omega, \delta \kappa, \delta f, \delta x_0$ и δy_0 .

Полагая, что имеем избыточные измерения, составим уравнения поправок

$$\begin{aligned} (x) + \frac{\partial x}{\partial X_0} \delta X_0 + \frac{\partial x}{\partial Y_0} \delta Y_0 + \frac{\partial x}{\partial Z_0} \delta Z_0 + \frac{\partial x}{\partial \alpha} \delta \alpha + \frac{\partial x}{\partial \omega} \delta \omega + \\ + \frac{\partial x}{\partial \kappa} \delta \kappa + \frac{\partial x}{\partial f} \delta f + \frac{\partial x}{\partial x_0} \delta x_0 + \frac{\partial x}{\partial y_0} \delta y_0 - x = v, \end{aligned}$$

$$(y) + \frac{\partial y}{\partial X_0} \delta X_0 + \frac{\partial y}{\partial Y_0} \delta Y_0 + \frac{\partial y}{\partial Z_0} \delta Z_0 + \frac{\partial y}{\partial \alpha} \delta \alpha + \frac{\partial y}{\partial \omega} \delta \omega + \\ + \frac{\partial y}{\partial \kappa} \delta \kappa + \frac{\partial y}{\partial f} \delta f + \frac{\partial y}{\partial x_0} \delta x_0 + \frac{\partial y}{\partial y_0} \delta y_0 - y = v'.$$

Обозначим частную производную от x по X_0 через a и вычислим ее

$$a = \frac{\partial x}{\partial X_0} = -f \frac{-a_1 Z^* + a_3 X^*}{Z^{*2}} = \frac{1}{Z^*} [a_1 f + a_3 (x - x_0)].$$

Производную от x по α обозначим через d . Из (1.20) следует

$$d = \frac{\partial x}{\partial \alpha} = -f \frac{X^{*2} Z^* - Z^{*2} X^*}{Z^{*2}}.$$

Учитывая (1.15), найдем

$$X^{*2} = (X - X_0) (-\sin \alpha \cos \kappa - \cos \alpha \sin \omega \sin \kappa) + (Y - Y_0) \cdot 0 + \\ + (Z - Z_0) (\cos \alpha \cos \omega - \sin \alpha \sin \omega \sin \kappa) = -c_1 (X - X_0) + a_1 (Z - Z_0); \\ Z^{*2} = (X - X_0) (-\cos \alpha \cos \omega) + (Y - Y_0) \cdot 0 + (Z - Z_0) (-\sin \alpha \cos \omega) = \\ = c_3 (X - X_0) + a_3 (Z - Z_0).$$

Следовательно,

$$d = \frac{f}{Z^*} [c_1 (X - X_0) - a_1 (Z - Z_0)] + \frac{x - x_0}{Z^*} [c_3 (X - X_0) - a_3 (Z - Z_0)].$$

Аналогично получим остальные частные производные. В результате будем иметь

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{\partial x}{\partial X_0} = \frac{1}{Z^*} [a_1 f + a_3 (x - x_0)] \\ b &= \frac{\partial x}{\partial Y_0} = \frac{1}{Z^*} [b_1 f + b_3 (x - x_0)] \\ c &= \frac{\partial x}{\partial Z_0} = \frac{1}{Z^*} [c_1 f + c_3 (x - x_0)] \\ d &= \frac{\partial x}{\partial \alpha} = \frac{f}{Z^*} [c_1 (X - X_0) - a_3 (Z - Z_0)] + \\ &\quad + \frac{x - x_0}{Z^*} [c_3 (X - X_0) - a_3 (Z - Z_0)] \\ e &= \frac{\partial x}{\partial \omega} = -f \sin \kappa + (x - x_0) \left[\operatorname{tg} \omega + \frac{Y - Y_0}{Z^* \cos \omega} \right] \\ f &= \frac{\partial x}{\partial \kappa} = y - y_0 \\ g &= \frac{\partial x}{\partial f} = \frac{x - x_0}{f} \\ h &= \frac{\partial x}{\partial x_0} = 1 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned}
 i &= \frac{\partial x}{\partial y_0} = 0 \\
 a' &= \frac{\partial y}{\partial X_0} = \frac{1}{Z^*} [a_2 f + a_3 (y - y_0)] \\
 b' &= \frac{\partial y}{\partial Y_0} = \frac{1}{Z^*} [b_2 f + b_3 (y - y_0)] \\
 c' &= \frac{\partial y}{\partial Z_0} = \frac{1}{Z^*} [c_2 f + c_3 (y - y_0)] \\
 d' &= \frac{\partial y}{\partial \alpha} = \frac{f}{Z^*} [c_2 (X - X_0) - a_2 (Z - Z_0)] + \\
 &\quad + \frac{y - y_0}{Z^*} [c_3 (X - X_0) - a_3 (Z - Z_0)] \\
 e' &= \frac{\partial y}{\partial \omega} = -f \cos \kappa + (y - y_0) \left[\operatorname{tg} \omega + \frac{Y - Y_0}{Z^* \cos \omega} \right] \\
 f' &= \frac{\partial y}{\partial \kappa} = -(x - x_0) \\
 g' &= \frac{\partial y}{\partial f} = \frac{1}{f} (y - y_0) \\
 h' &= \frac{\partial y}{\partial x_0} = 0 \\
 i' &= \frac{\partial y}{\partial y_0} = 1
 \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

Таким образом, уравнения поправок можно представить в таком виде:

$$\left. \begin{aligned}
 a\delta X_0 + b\delta Y_0 + c\delta Z_0 + d\delta\alpha + e\delta\omega + f\delta\kappa + g\delta f + h\delta x_0 + \\
 + i\delta y_0 + (x) - x = v \\
 a'\delta X_0 + b'\delta Y_0 + c'\delta Z_0 + d'\delta\alpha + e'\delta\omega + f'\delta\kappa + g'\delta f + \\
 + h'\delta x_0 + i'\delta y_0 + (y) - y = v'
 \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

Одна опорная точка дает два уравнения с весами p и p' и девятью неизвестными. Следовательно, для решения задачи необходимо не менее пяти опорных точек.

Уравнения (6.2) решаются под условием

$$[pv^2 + p'v'^2] = \min$$

методом последовательных приближений. Для этого сначала измеряют координаты опорных точек на снимке. Затем по приближенным значениям элементов ориентирования (начальное приближение) вычисляют координаты (x) и (y) тех же опорных точек на снимке и коэффициенты уравнений поправок. Составляют уравнения поправок и нормальные уравнения. Решают нормальные уравнения, в результате чего получают поправки к начальному приближению. Введя эти поправки, находят первое приближение неизвестных. Используя первое приближение элементов, вновь

вычисляют величины (x) и (y) и коэффициенты уравнений поправок. Составляют и решают нормальные уравнения. Таким образом получают поправки к первому приближению и второе приближение неизвестных.

Вычисления продолжают до тех пор, пока разность значений каждого неизвестного, полученных в двух последних приближениях, не будет меньше установленного допуска. При подсчете этого допуска учитываются требуемая точность определения элементов ориентирования, а также точность построения и измерения снимков.

Для оценки точности решения задачи в последнем приближении вычисляют весовые коэффициенты Q и поправки v . Находят ошибку единицы веса

$$\mu = \sqrt{\frac{pv^2 + p'v'^2}{2n - 9}}, \quad (6.3)$$

где n — число опорных точек.

Затем вычисляют средние квадратические ошибки элементов

$$\left. \begin{aligned} m_{X_0} &= \mu \sqrt{Q_{11}}, & m_{\alpha} &= \mu \sqrt{Q_{44}}, & m_{\kappa} &= \mu \sqrt{Q_{77}} \\ m_{Y_0} &= \mu \sqrt{Q_{22}}, & m_{\omega} &= \mu \sqrt{Q_{55}}, & m_{x_0} &= \mu \sqrt{Q_{88}} \\ m_{Z_0} &= \mu \sqrt{Q_{33}}, & m_{\nu} &= \mu \sqrt{Q_{66}}, & m_{y_0} &= \mu \sqrt{Q_{99}} \end{aligned} \right\}. \quad (6.4)$$

Если элементы внутреннего ориентирования снимка известны с достаточной точностью, то в уравнениях (6.2) будет только шесть неизвестных, для определения которых достаточно трех опорных точек.

Изложенный выше способ пригоден для снимков с любыми значениями элементов ориентирования. Если угловые элементы внешнего ориентирования малы, то уравнения (6.2) можно представить в таком виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{f}{Z_0 - Z} \delta X_0 + \frac{x}{Z_0 - Z} \delta Z_0 + \left(f + \frac{x^2}{f} \right) \alpha + \frac{xy}{f} \omega - y\kappa - \\ - \frac{x}{f} \delta f - x_0 + x - (x) = v \\ \frac{f}{Z_0 - Z} \delta Y_0 + \frac{y}{Z_0 - Z} \delta Z_0 + \frac{xy}{f} \alpha + \left(f + \frac{y^2}{f} \right) \omega + x\kappa - \\ - \frac{y}{f} \delta f - y_0 + y - (y) = v' \end{aligned} \right\}. \quad (6.5)$$

Задачу и в этом случае целесообразно решать путем последовательных приближений. При этом в начальном приближении считают, что элементы α , ω , κ , δf , x_0 , y_0 равны нулю.

Способ, рассмотренный в данном параграфе, позволяет при определении элементов внешнего ориентирования снимка учесть влияние элементов внутреннего ориентирования, величины

которых в полете могут отличаться от значений, полученных в лабораторных условиях.¹

Способ характеризуется достаточно быстрой сходимостью. Даже при значительных ошибках определения начальных значений элементов внешнего ориентирования снимка, достигающих 10 км для линейных величин и 35° для угловых, решение задачи с достаточной точностью достигается в результате четырех-пяти приближений (масштаб снимка около 1 : 24 000, $f = 100$ мм).

Способ используется и для решения топографических задач, например, для определения траектории, скорости и колебаний самолета и других носителей.

§ 52. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ОРИЕНТИРОВАНИЯ СНИМКА ПО ЗВЕЗДАМ

Рассмотрим способ, позволяющий определить направление главного луча, азимут оси x снимка и элементы внутреннего ориентирования по звездам, изображенным на снимке.

На рис. 132: PP' — ось мира, P — северный полюс мира, γB — небесный экватор, γ — точка весеннего равноденствия.

Совместим начало прямоугольной системы координат XYZ с центром S небесной сферы, ось Z — с осью мира, а плоскость XZ — с кругом склонения равноденственных точек.

Пусть при фотографировании звезд с точки S оптическая ось фотокамеры направлена вдоль оси мира. В этом случае плоскость снимка P^0 параллельна плоскости XY . Пусть координатные оси x^0 и y^0 снимка соответственно параллельны осям X и Y .

Обозначим через f фокусное расстояние фотокамеры, а через x^0 и y^0 — координаты изображения σ^0 звезды на снимке P^0 . Тогда можно написать следующие зависимости между экваториальными координатами звезды и координатами ее изображения:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= \frac{f}{\sqrt{x^0{}^2 + y^0{}^2}} \\ \operatorname{tg} \alpha &= -\frac{y^0}{x^0} \end{aligned} \right\} \quad (6.6)$$

¹ В случае равнинной местности системы уравнений (6.2) и (6.5) плохо обусловлены и точность определения элементов внутреннего ориентирования недостаточна.

В общем случае звездный снимок, полученный с точки S , занимает произвольное положение относительно системы координат XYZ . Обозначим изображение звезды на этом снимке P через σ , а его координаты — через x, y (снимок P на рисунке не показан).

Согласно (1.35) между координатами изображений звезды на снимках P^0 и P существует следующая связь:

$$\left. \begin{aligned} x^0 &= -f \frac{x'}{z'} \\ y^0 &= -f \frac{y'}{z'} \end{aligned} \right\}, \quad (6.7)$$

где

$$\left. \begin{aligned} x' &= a_1(x-x_0) + a_2(y-y_0) - a_3f \\ y' &= b_1(x-x_0) + b_2(y-y_0) - b_3f \\ z' &= c_1(x-x_0) + c_2(y-y_0) - c_3f \end{aligned} \right\}. \quad (6.8)$$

Здесь x_0 и y_0 — координаты главной точки снимка.

Направляющие косинусы a_i, b_i, c_i зависят от угла наклона снимка ε , азимута направления съемки t и угла поворота снимка κ . Обозначим экваториальные координаты главного луча через δ_0 и α_0 . Очевидно, что $\varepsilon = 90^\circ + \delta_0$ и $t = \alpha_0$. Подставив значения ε и t в равенства (1.13) и полагая $\kappa = \kappa_0$, получим

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= -\cos \kappa_0 \sin \delta_0 \cos \alpha_0 + \sin \kappa_0 \sin \alpha_0 \\ a_2 &= -\sin \kappa_0 \sin \delta_0 \cos \alpha_0 - \cos \kappa_0 \sin \alpha_0 \\ a_3 &= -\cos \delta_0 \cos \alpha_0 \\ b_1 &= -\cos \kappa_0 \sin \delta_0 \sin \alpha_0 - \sin \kappa_0 \cos \alpha_0 \\ b_2 &= -\sin \kappa_0 \sin \delta_0 \sin \alpha_0 + \cos \kappa_0 \cos \alpha_0 \\ b_3 &= -\cos \delta_0 \sin \alpha_0 \\ c_1 &= \cos \kappa_0 \cos \delta_0 \\ c_2 &= \sin \kappa_0 \cos \delta_0 \\ c_3 &= \sin \delta_0 \end{aligned} \right\}. \quad (6.9)$$

Выразим экваториальные координаты звезды через координаты x и y ее изображения на снимке P . Для этого подставим в формулы (6.6) значения x^0 и y^0 из (6.7). Найдем

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= \frac{z'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}} \\ \operatorname{tg} \alpha &= -\frac{y'}{x'} \end{aligned} \right\}. \quad (6.10)$$

Пусть известны приближенные значения элементов $\delta_0, \alpha_0, \kappa_0, t, x_0, y_0$. Измерим координаты x и y изображения звезды на снимке и вычислим по формулам (6.8), (6.9) и (6.10) экваториальные координаты звезды. Очевидно, вычисленные координаты δ и α не совпадут с полученными из астрономического ежегодника.

Для определения поправок к приближенным значениям элементов ориентирования напишем

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \operatorname{tg} \delta = (\operatorname{tg} \delta) + \frac{\partial \varphi}{\partial \delta_0} \delta \delta_0 + \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha_0} \delta \alpha_0 + \frac{\partial \varphi}{\partial \kappa_0} \delta \kappa_0 + \\ &+ \frac{\partial \varphi}{\partial f} \delta f + \frac{\partial \varphi}{\partial x_0} \delta x_0 + \frac{\partial \varphi}{\partial y_0} \delta y_0 \\ \varphi' &= \operatorname{tg} \alpha = (\operatorname{tg} \alpha) + \frac{\partial \varphi'}{\partial \delta_0} \delta \delta_0 + \frac{\partial \varphi'}{\partial \alpha_0} \delta \alpha_0 + \frac{\partial \varphi'}{\partial \kappa_0} \delta \kappa_0 + \\ &+ \frac{\partial \varphi'}{\partial f} \delta f + \frac{\partial \varphi'}{\partial x_0} \delta x_0 + \frac{\partial \varphi'}{\partial y_0} \delta y_0 \end{aligned} \right\}, \quad (6.11)$$

где δ и α — координаты звезды, взятые из астрономического ежегодника, а $(\operatorname{tg} \delta)$ и $(\operatorname{tg} \alpha)$ — величины, вычисленные по формулам (6.10) с использованием приближенных значений элементов ориентирования снимка.

Частная производная

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \delta_0} = a = \frac{\frac{\partial z'}{\partial \delta_0} \sqrt{x'^2 + y'^2} - \frac{1}{2} (x'^2 + y'^2)^{-1/2} \left(2x' \frac{\partial x'}{\partial \delta_0} + \right.}{x'^2 + y'^2} \left. + 2y' \frac{\partial y'}{\partial \delta_0} \right) z'}$$

или

$$a = \frac{1}{z'} \left[\frac{\partial z'}{\partial \delta_0} - \frac{\operatorname{tg}^2 \delta}{z'} \left(x' \frac{\partial x'}{\partial \delta_0} + y' \frac{\partial y'}{\partial \delta_0} \right) \right] \operatorname{tg} \delta.$$

Согласно (6.8) и (6.9), пренебрегая при этом величинами x_0 и y_0 , получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial z'}{\partial \delta_0} &= x (-\cos \kappa_0 \sin \delta_0) + y (-\sin \kappa_0 \sin \delta_0) - f (-\cos \delta_0) = \\ &= -z' \operatorname{tg} \delta_0 + \frac{f}{\cos \delta_0} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial x'}{\partial \delta_0} = -x \cos \kappa_0 \cos \delta_0 \cos \alpha_0 - y \sin \kappa_0 \cos \delta_0 \cos \alpha_0 - f \sin \delta_0 \cos \alpha_0 = z' \cos \alpha_0.$$

$$\frac{\partial y'}{\partial \delta_0} = -x \cos \kappa_0 \cos \delta_0 \sin \alpha_0 - y \sin \kappa_0 \cos \delta_0 \sin \alpha_0 -$$

$$-f \sin \delta_0 \sin \alpha_0 = -z' \sin \alpha_0.$$

Следовательно,

$$a = \left[\frac{f}{z' \cos \delta_0} - \operatorname{tg} \delta_0 + \frac{1}{z'} (x' \cos \alpha_0 + y' \sin \alpha_0) \operatorname{tg}^2 \delta \right] \operatorname{tg} \delta.$$

Аналогично вычислим остальные частные производные. Собирая их вместе, получим

$$\left. \begin{aligned}
 a &= \frac{\partial \varphi}{\partial \delta_0} + \left[\frac{f}{z' \cos \delta_0} - \operatorname{tg} \delta_0 + \frac{1}{z'} (x' \cos \alpha_0 + y' \sin \alpha_0) \operatorname{tg}^2 \delta \right] \operatorname{tg} \delta \\
 b &= \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha_0} = 0 \\
 c &= \frac{\partial \varphi}{\partial \kappa_0} = \left\{ c_1 y - c_2 x - \frac{1}{z'} [x' (a_1 y - a_2 x) + y' (b_1 y - b_2 x)] \operatorname{tg}^2 \delta \right\} \operatorname{tg} \delta \\
 d &= \frac{\partial \varphi}{\partial f} = \frac{1}{z'} \left[\frac{1}{z'} (a_3 x' + b_3 y') \operatorname{tg}^2 \delta - c_3 \right] \operatorname{tg} \delta \\
 e &= \frac{\partial \varphi}{\partial x_0} = \frac{1}{z'} \left[\frac{1}{z'} (a_1 x' + b_1 y') \operatorname{tg}^2 \delta - c_1 \right] \operatorname{tg} \delta \\
 f &= \frac{\partial \varphi}{\partial y_0} = \frac{1}{z'} \left[\frac{1}{z'} (a_2 x' + b_2 y') \operatorname{tg}^2 \delta - c_2 \right] \operatorname{tg} \delta \\
 a' &= \frac{\partial \varphi'}{\partial \delta_0} = -\frac{z'}{y'} (\sin \alpha_0 + \cos \alpha_0 \operatorname{tg} \alpha) \operatorname{tg} \alpha \\
 b' &= \frac{\partial \varphi'}{\partial \alpha_0} = -(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha) \\
 c' &= \frac{\partial \varphi'}{\partial \kappa_0} = \frac{1}{y'} [(a_1 y - a_2 x) \operatorname{tg} \alpha + b_1 y - b_2 x] \operatorname{tg} \alpha \\
 d' &= \frac{\partial \varphi'}{\partial f} = -\frac{1}{y'} (a_3 \operatorname{tg} \alpha + b_3) \operatorname{tg} \alpha \\
 e' &= \frac{\partial \varphi'}{\partial x_0} = -\frac{1}{y'} (a_1 \operatorname{tg} \alpha + b_1) \operatorname{tg} \alpha \\
 f' &= \frac{\partial \varphi'}{\partial y_0} = -\frac{1}{y'} (a_2 \operatorname{tg} \alpha + b_2) \operatorname{tg} \alpha
 \end{aligned} \right\} (6.12)$$

Пусть имеются избыточные измерения. Тогда согласно (6.11) напишем уравнения поправок

$$\left. \begin{aligned}
 a \delta \delta_0 + b \delta \alpha_0 + c \delta \kappa_0 + d \delta f + e \delta x_0 + f \delta y_0 + l &= v \\
 a' \delta \delta_0 + b' \delta \alpha_0 + c' \delta \kappa_0 + d' \delta f + e' \delta x_0 + f' \delta y_0 + l' &= v'
 \end{aligned} \right\}, \quad (6.13)$$

где

$$\left. \begin{aligned}
 l &= (\operatorname{tg} \delta) - \operatorname{tg} \delta \\
 l' &= (\operatorname{tg} \alpha) - \operatorname{tg} \alpha
 \end{aligned} \right\}. \quad (6.14)$$

Одна звезда, изобразившаяся на снимке, дает два уравнения (6.13) с шестью неизвестными. Таким образом, для решения задачи необходимо не менее трех звезд. Если элементы внутреннего ориентирования известны с достаточной точностью и требуется найти только поправки $\delta \delta_0$, $\delta \alpha_0$ и $\delta \kappa_0$ к приближенным значениям элементов внешнего ориентирования снимка, то задача решается по двум звездам.

Уравнения (6.13) решаются под условием

$$[pv^2 + p'v'^2] = \min$$

методом последовательных приближений.

Сначала измеряют координаты изображений звезд на снимке. Затем по формулам (6.10) вычисляют экваториальные координаты звезд, используя приближенные значения элементов ориентирования снимка (начальное приближение). По формулам (6.12) находят коэффициенты уравнений поправок. Составляют уравнения поправок и нормальные уравнения. В результате решения нормальных уравнений получают поправки к начальному приближению неизвестных. Введя эти поправки, находят первое приближение неизвестных. По первому приближению вновь вычисляют экваториальные координаты звезд и коэффициенты уравнений поправок. Составляют и решают нормальные уравнения. Таким образом получают поправки к первому приближению и второе приближение неизвестных.

Вычисления продолжают до тех пор, пока разность значений каждого неизвестного в двух последних приближениях не будет превышать установленного допуска.

Для оценки точности решения задачи в последнем приближении вычисляют весовые коэффициенты Q и поправки v и v' . Находят единицу веса

$$\mu = \sqrt{\frac{[pv^2 + p'v'^2]}{2n - 6}}, \quad (6.15)$$

где n — число звезд, использованных для определения элементов ориентирования снимка.

Затем вычисляют средние квадратические ошибки неизвестных

$$\left. \begin{aligned} m_{\delta_0} &= \mu \sqrt{Q_{11}}, & m_l &= \mu \sqrt{Q_{44}} \\ m_{\alpha_0} &= \mu \sqrt{Q_{22}}, & m_{x_0} &= \mu \sqrt{Q_{55}} \\ m_{x_0} &= \mu \sqrt{Q_{33}}, & m_{y_0} &= \mu \sqrt{Q_{66}} \end{aligned} \right\}. \quad (6.16)$$

Вместо уравнений (6.13) можно использовать уравнения, в которых свободными членами являются измеренные и вычисленные координаты изображений звезд (И. Д. Каргополов, Я. Л. Зиман и др.).

§ 53. ГЕОЦЕНТРИЧЕСКИЕ КООРДИНАТЫ ТОЧЕК МЕСТНОСТИ

При решении обратной фотограмметрической засечки и других фотограмметрических задач на малые расстояния в качестве геодезической системы координат используется обычно система координат Гаусса. В этом случае считают, что плоскость $X_T Y_T$ (см. рис. 8) совпадает с ровной поверхностью, от которой отсчитываются высоты.

Искажениями планового положения точек местности в проекции Гаусса также пренебрегают. Эти ошибки, как и влияние кри-

визны Земли, возрастают по мере удаления от осевого меридиана данной зоны. Например, искажения длин на краю шестиградусной зоны могут достигать величин порядка 1 : 1500—1 : 2000.

Поэтому для определения элементов внешнего ориентирования снимков и построения фотограмметрических сетей на большие расстояния, а также для решения других фотограмметрических задач по мелкомасштабным снимкам целесообразно применять единую для всей Земли геоцентрическую систему координат $O_r X_r' Y_r' Z_r'$ (рис. 133).

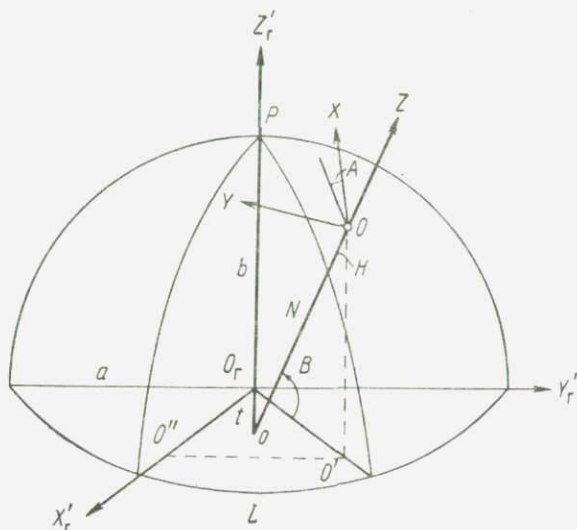


Рис. 133

На этом рисунке Земля представлена в виде эллипсоида с полуосями a и b . В отличие от системы Гаусса геоцентрическая система координат — правая. Начало ее находится в центре эллипсоида O_r , а плоскость $X_r' Y_r'$ совпадает с плоскостью экватора. Ось Z_r' проходит через северный полюс P , ось X_r' пересекает начальный меридиан.

Пусть O — произвольная точка пространства. Она может быть точкой местности, или точкой фотографирования, или началом фотограмметрической системы координат.

Положение точки O в геоцентрической системе координат определяется координатами $X_r' = O_r O''$, $Y_r' = O'' O'$ и $Z_r' = O' O$.

Геоцентрические координаты можно найти по географическим, применив известные из геодезии формулы

$$\left. \begin{aligned} X_r' &= (N + H) \cos B \cos L \\ Y_r' &= (N + H) \cos B \sin L \\ Z_r' &= [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{aligned} \right\} \quad (6.17)$$

где H — высота точки O над поверхностью эллипсоида,
 N — радиус кривизны первого вертикала на широте B ,

$$N = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 B)^{1/2}}, \quad (6.18)$$

а e — эксцентриситет меридианного эллипса,

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}. \quad (6.19)$$

Для эллипсоида Красовского

$$a = 6378245,000 \text{ м,}$$

$$b = 6356863,019 \text{ м,}$$

$$e^2 = 0,0066934216.$$

Если координаты точек местности даны в системе Гаусса, то для перехода к геоцентрическим координатам сначала вычисляют географические координаты по формулам, применяемым в геодезии.

Фотограмметрическую сеть на большие расстояния строят сначала в фотограмметрической системе координат $OXYZ$. Ось Z этой системы совпадает с отвесной линией, проходящей через начало координат O , а оси X и Y направляются так, чтобы система получилась прямоугольной и правой. Затем от фотограмметрических координат точек сети переходят к геоцентрическим

$$\begin{pmatrix} X'_r \\ Y'_r \\ Z'_r \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X'_{r0} \\ Y'_{r0} \\ Z'_{r0} \end{pmatrix}, \quad (6.20)$$

где $X'_{r0}, Y'_{r0}, Z'_{r0}$ — геоцентрические координаты начала фотограмметрической системы координат,

a_i, b_i, c_i — элементы матрицы преобразования координат, зависящие от географических координат L и B начала O и азимута A оси X ,

r — масштабный коэффициент.

Для вычисления направляющих косинусов a_i, b_i, c_i перенесем систему $OXYZ$ параллельно так, чтобы ее начало O совместились с началом O_r геоцентрической системы координат $X'_r Y'_r Z'_r$ (рис. 134, а).

Сделаем три поворота системы $O_r X'_r Y'_r Z'_r$: 1) на угол L вокруг оси Z'_r (рис. 134, б), в результате которого эта система займет положение $O_r x' y' z'$; 2) на угол $\pi/2 - B$ вокруг оси y' (рис. 134, в), в результате которого система перейдет в положение $O_r x'' y'' z''$ и 3) на угол $\pi + A$ вокруг оси z'' , после чего геоцентрическая и фотограмметрическая системы координат совместятся.

Составим матрицы поворотов

$$A = \begin{pmatrix} \cos L & -\sin L & 0 \\ \sin L & \cos L & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin B & 0 & \cos B \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos B & 0 & \sin B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\cos A & -\sin A & 0 \\ \sin A & -\cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

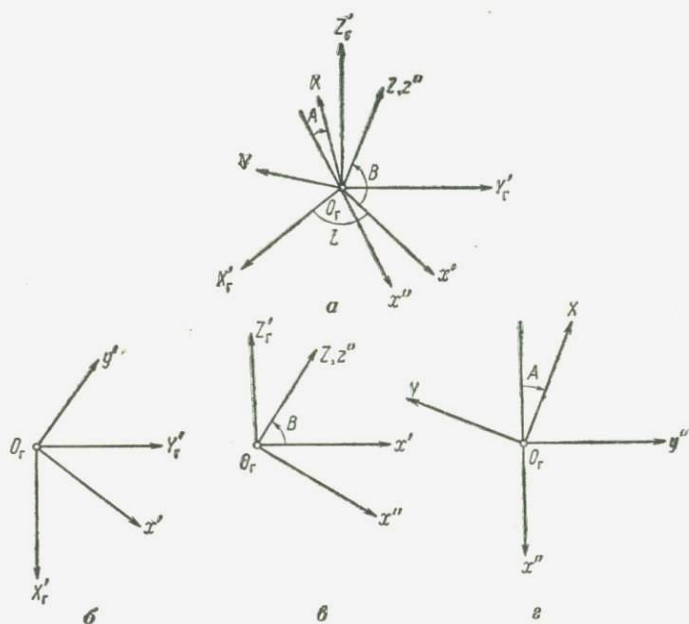


Рис. 134

Перемножив эти матрицы, получим направляющие косинусы

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= -\cos L \sin B \cos A - \sin L \sin A \\ a_2 &= -\cos L \sin B \sin A + \sin L \cos A \\ a_3 &= \cos L \cos B \\ b_1 &= -\sin L \sin B \cos A + \cos L \sin A \\ b_2 &= -\sin L \sin B \sin A - \cos L \cos A \\ b_3 &= \sin L \cos B \\ c_1 &= \cos B \cos A \\ c_2 &= \cos B \sin A \\ c_3 &= \sin B \end{aligned} \right\} \quad (6.21)$$

Эти формулы можно получить из выражений (1.13), подставив в них $t = L$, $\varepsilon = 3/2\pi + B$ и $\kappa = \pi - A$ (см. рис. 12 и 133).

Чтобы получить координаты точек в системе Гаусса, от геоцентрических координат переходят к географическим

$$L = \arctg \frac{Y'_r}{X'_r} = \arccos \frac{X'_r}{R} = \arcsin \frac{Y'_r}{R} \left. \vphantom{\frac{Y'_r}{X'_r}} \right\} \quad (6.22)$$

$$R^2 = X'^2_r + Y'^2_r$$

Величины B и H определяют путем приближений. Сначала находят первое приближение $t = O_{r0}$ (см. рис. 133)

$$t_1 = e^2 Z'_r \quad (6.23)$$

и первое приближение широты

$$B_1 = \arcsin \frac{Z_r + t_1}{[R^2 + (Z_r + t_1)^2]^{1/2}}, \quad (6.24)$$

затем — второе приближение t

$$t_2 = \frac{ae^2 \sin B_1}{(1 - e^2 \sin^2 B_1)^{1/2}} = N_1 e^2 \sin B_1 \quad (6.24')$$

и второе приближение широты, подставив в (6.24) новое значение t . Вычисления продолжают до тех пор, пока изменениями величин t и B можно пренебречь.

После этого находят H

$$H = [R^2 + (Z'_r - t)^2]^{1/2} - N, \quad (6.25)$$

От географических координат переходят к координатам Гаусса, используя для этого зависимости, полученные в геодезии.

Кроме формул (6.20), устанавливающих связь между геоцентрическими и фотограмметрическими координатами, в фотограмметрии используются и формулы обратной связи

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{r} \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X'_r - X'_{r0} \\ Y'_r - Y'_{r0} \\ Z'_r - Z'_{r0} \end{pmatrix}. \quad (6.26)$$

§ 54. ЭЛЕМЕНТЫ ПАРЫ СНИМКОВ
И МОДЕЛЬ МЕСТНОСТИ

На рис. 135 изображена пара снимков $P_1 - P_2$ в положении, которое она занимала во время фотографирования. A — точка местности, изобразившаяся на этих снимках.

На рисунке представлены элементы стереопары:

центры проекции — точки, через которые проходят проектирующие лучи (S_1 и S_2);

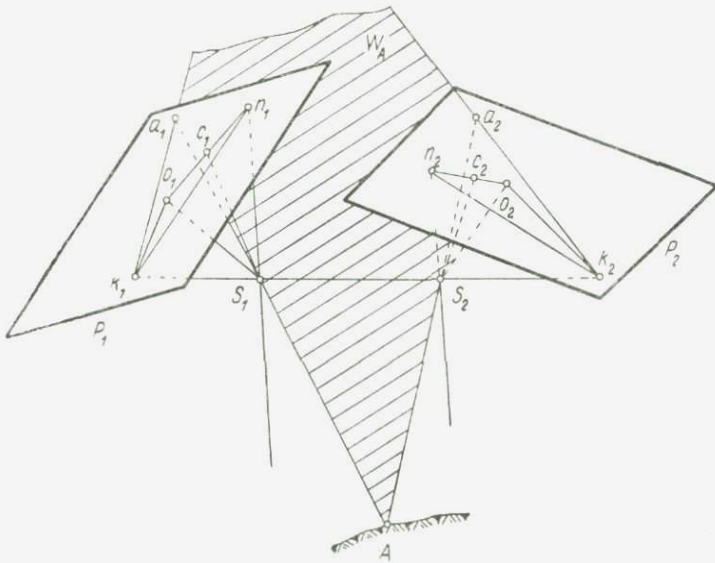


Рис. 135

точки фотографирования — точки пространства, в которых находились центры проекции S_1 и S_2 во время фотографирования (в момент съемки точка фотографирования и центр проекции совмещены друг с другом);

базис фотографирования — расстояние между точками фотографирования ($B = S_1S_2$);

связки — совокупность проектирующих лучей, принадлежащих центрам проекции ($S_1o_1a_1 \dots$ и $S_2o_2a_2 \dots$);

главные лучи — лучи связок, перпендикулярные к снимкам (S_1o_1 и S_2o_2);

надирные лучи — отвесные лучи (S_1n_1 и S_2n_2);

базисные лучи — лучи, совпадающие с базисом фотографирования (S_1S_2 и S_2S_1);

фокусное расстояние снимка — расстояние от центра проекции до снимка ($f = S_1o_1 = S_2o_2$);

главные точки — точки пересечения главных лучей со снимками (o_1 и o_2);

точки надира — следы отвесных лучей на снимках (n_1 и n_2);

углы наклона снимков — углы между надирными и главными лучами ($\epsilon_1 = \angle n_1S_1o_1$ и $\epsilon_2 = \angle n_2S_2o_2$);

точки нулевых искажений — следы на снимках, образуемые бисектрисами углов наклона снимков (c_1 и c_2);

базисные точки — следы базисных лучей на снимках (k_1 и k_2);

соответственные (одноименные) точки — изображения одной и той же точки местности на снимках (a_1 и a_2);

соответственные (одноименные) лучи — лучи, проходящие через соответственные точки (S_1a_1 и S_2a_2);

базисная плоскость — плоскость, проходящая через базис фотографирования (W_A);

главные базисные плоскости — базисные плоскости, проходящие через главные лучи ($S_1S_2o_1$ и $S_1S_2o_2$);

надирная базисная плоскость — базисная плоскость, проходящая через надирные лучи ($S_1S_2n_1n_2$);

соответственные (одноименные) базисные линии — следы базисной плоскости на снимках (k_1a_1 и k_2a_2);

главные базисные линии — следы главных базисных плоскостей на снимках (k_1o_1 и k_2o_2);

надирные базисные линии — следы надирной базисной плоскости на снимках (k_1n_1 и k_2n_2).

Каждая пара соответственных лучей, например S_1a_1 и S_2a_2 , лежит в одной и той же базисной плоскости и пересекается.

На соответственных базисных линиях изображаются точки местности, лежащие в базисной плоскости, образующей эти линии. Например, на соответственных базисных линиях k_1a_1 и k_2a_2 изображаются точки местности, лежащие в базисной плоскости W_A .

На рис. 136 представлены стереопара $P_1 - P_2$ и местность. A, B, C, D — точки местности a_1, b_1, c_1, d_1 и a_2, b_2, c_2, d_2 — их изображения на снимках.

Вообразим, что одна связка, например правая, вместе со своим снимком движется по направлению к левой связке. При этом связка перемещается параллельно самой себе и центр проекции ее не сходит с базиса.

В этом случае каждый проектирующий луч подвижной связки будет все время оставаться параллельным своему исходному положению и, следовательно, находиться в одной и той же базисной

плоскости. Таким образом, пересечение одноименных лучей связок нигде не будет нарушено. Например, луч S_2A , скользя в плоскости S_1S_2A , все время будет пересекаться с лучом S_1A .

Пусть движение связки прекратилось и точка S_2 заняла положение S'_2 . Так как пересечение соответственных лучей сохранилось, то каждой точке местности будет соответствовать новая точка. Например, точке A соответствует точка a . Очевидно, новых точек, образованных пересечениями соответственных лучей, появится столько, сколько было точек местности, изобразившихся на стереопаре.

Поверхность, образованная совокупностью точек пересечения соответственных лучей, называется *стереомоделью*, или *моделью*.

Так как в результате построения модели углы между базисными плоскостями получаются такими же, какими они были при фотографировании, а треугольники, образованные базисом и каждой парой лучей, подобны соответствующим треугольникам, имевшим место при фотосъемке, например треугольники S_1S_2A и $S_1S'_2a$, то модель подобна местности.

Расстояние между центрами проекции двух связок, по которым построена модель, называется *базисом проектирования* ($S_1S'_2 = B'$).

Масштаб модели равен отношению базиса проектирования к базису фотографирования

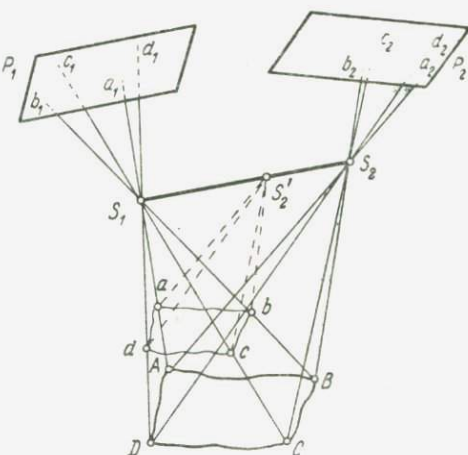


Рис. 136

$$\frac{1}{t} = \frac{B'}{B} \bullet \quad (7.4)$$

Базис проектирования можно выбрать произвольно. В этом случае и масштаб модели будет произвольным.

Итак, пара снимков позволяет восстановить связки, существовавшие во время фотографирования, и расположить их так, чтобы все соответственные лучи обеих связок попарно пересекались. В результате такой установки снимков и связок образуется модель местности, изобразившейся на стереопаре.

Связки восстанавливают с помощью проектирующих камер, фокусное расстояние которых равно фокусному расстоянию съемочной камеры. Восстановление связок проектирующих лучей называется *внутренним ориентированием снимков*.

Проектирующие камеры с восстановленными связками перемещают относительно друг друга, устанавливая их так, чтобы соответственные лучи пересекались. Если это условие выполнено, то снимки занимают такое взаимное положение, какое было во время съемки. Установка снимков относительно друг друга в положение, существовавшее во время фотографирования, называется *взаимным ориентированием снимков*.

В результате взаимного ориентирования снимков получается модель местности в произвольном масштабе, так как базис проектирования — расстояние между центрами объективов проектирующих камер — устанавливается обычно произвольно.

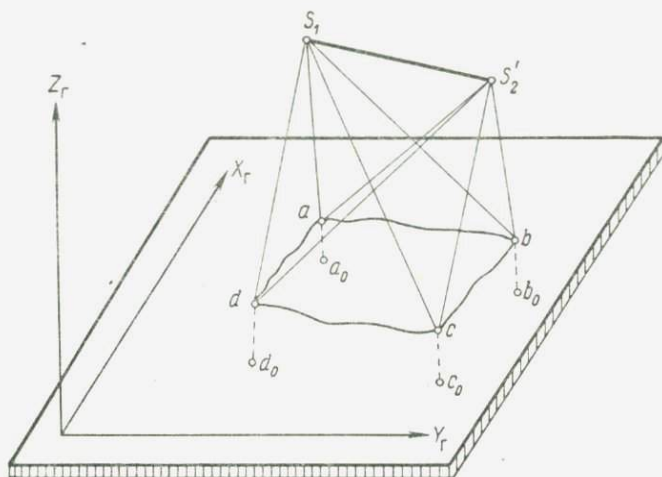


Рис. 137

Чтобы использовать модель для создания карты, надо привести ее к заданному масштабу карты и ориентировать относительно планшета. Для этого необходимо иметь не менее трех опорных точек. Эти точки наносят на планшет по их координатам в масштабе составляемой карты.

На рис. 137: $X_r Y_r Z_r$ — геодезическая система координат, a_0, b_0, c_0, d_0 — опорные точки, нанесенные на планшет. Над опорными точками устанавливают марки a, b, c, d так, чтобы разности высот их были равны разностям высот соответствующих точек местности, выраженным в масштабе карты. Затем две опорные точки, например a и d , совмещают с соответствующими точками модели. Для этого изменяют масштаб модели путем параллельного смещения одной проектирующей камеры вдоль базиса $S_1 S_2'$ и перемещают модель относительно планшета.

Если две точки модели совмещены с соответствующими опорными точками, то масштаб модели равен заданному. Для окончательного ориентирования модели относительно планшета доста-

точно повернуть модель вокруг прямой ad до совмещения опорной точки c с соответствующей точкой модели.

Приведение модели к заданному масштабу и установка ее относительно планшета (геодезической системы координат) называется *внешним ориентированием модели*.

Карту составляют путем проектирования контуров и горизонталей модели на планшет. Это осуществляется с помощью подвижной марки, с которой связан карандаш, вычерчивающий ортогональную проекцию элементов модели на планшете.

Ортогональное проектирование элементов модели на планшет называется *съемкой контуров и рельефа*.

Итак, рассмотрена схема оптического решения основной задачи стереофотограмметрии — преобразования двух центральных проекций (снимков) сфотографированного объекта (местности) в ортогональную проекцию — план или карту. Это решение отличается наибольшей наглядностью. Его можно осуществить с помощью мультиплекса или двойного проектора.

Основную задачу стереофотограмметрии решают и другими способами: аналитическим, графическим, механическим, оптико-механическим, электрическим и электронным.

§ 55. КООРДИНАТЫ И ПАРАЛЛАКСЫ ТОЧЕК СТЕРЕОПАРЫ

Положение соответственных точек на паре снимков определяют обычно в прямоугольных плоских системах координат $o_1'x_1y_1$ и $o_2'x_2y_2$ (рис. 138). Начала этих координат находятся в точке o_1

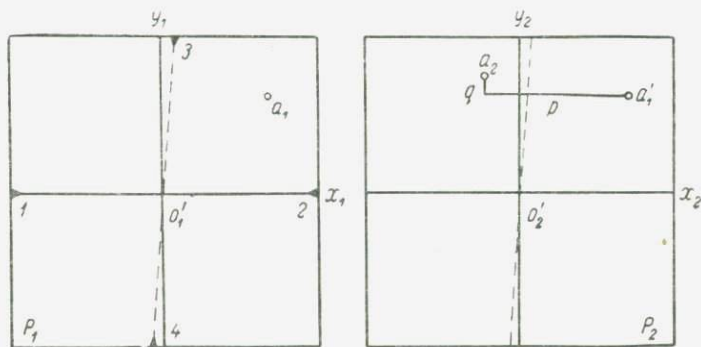


Рис. 138

и o_2' , которые получают как пересечения прямых, соединяющих противоположные координатные метки 1, 2 и 3, 4. Ось x совмещают с прямой 1—2 или направляют параллельно прямой 3—4 (см. рис. 10, б).

Часто начало координат на снимке совмещают с точкой, координаты которой равны средним значениям координат меток 1—4.

Обозначим координаты соответственных точек пары снимков a_1 и a_2 через x_1, y_1 и x_2, y_2 (см. рис. 138).

Разность абсцисс соответственных точек стереопары называется *продольным параллаксом*

$$p = x_1 - x_2, \quad (7.2)$$

а разность ординат этих точек — *поперечным параллаксом*

$$q = y_1 - y_2. \quad (7.3)$$

Пусть левый снимок стереопары наложен на правый так, что системы координат обоих снимков совпали. Тогда продольный параллакс представляет собой проекцию расстояния между соответственными точками a_1 и a_2 на ось x , а поперечный — проекцию этого расстояния на ось y .

Прямоугольные координаты и параллаксы соответственных точек стереопары измеряются на стереокомпараторе.

§ 56. ЭЛЕМЕНТЫ ОРИЕНТИРОВАНИЯ ПАРЫ СНИМКОВ

Элементами ориентирования пары снимков называются величины, определяющие положение их во время фотографирования.

Элементы ориентирования пары снимков разделяются на две группы: элементы внутреннего ориентирования и элементы внешнего ориентирования.

Элементы внутреннего ориентирования — фокусное расстояние фотокамеры f и координаты главной точки снимка x_0 и y_0 (см. рис. 11). Они позволяют найти положение центров проекции левой и правой связок относительно соответствующих снимков и восстановить эти связки. При фотографировании местности левый и правый снимки стереопары получают обычно одним фотоаппаратом. Поэтому можно считать, что элементы внутреннего ориентирования этих снимков одинаковы.

Элементы внешнего ориентирования определяют положение пары снимков и связок во время фотографирования. К ним относятся:

X_{01}, Y_{01}, Z_{01} — координаты левой точки фотографирования S_1 (рис. 139);

X_{02}, Y_{02}, Z_{02} — координаты правой точки фотографирования S_2 ;

α_1 — продольный угол наклона левого снимка, заключенный между осью Z и проекцией главного луча на плоскость XZ ;

ω_1 — поперечный угол наклона левого снимка, составлен главным лучом с плоскостью XZ ;

κ_1 — угол поворота левого снимка, находящийся в плоскости снимка и заключенный между осью y и следом плоскости, проходящей через главный луч и ось Y ;

$\alpha_2, \omega_2, \kappa_2$ — продольный и поперечный углы наклона и угол поворота правого снимка.

Таким образом, пара снимков имеет три элемента внутреннего и 12 элементов внешнего ориентирования.

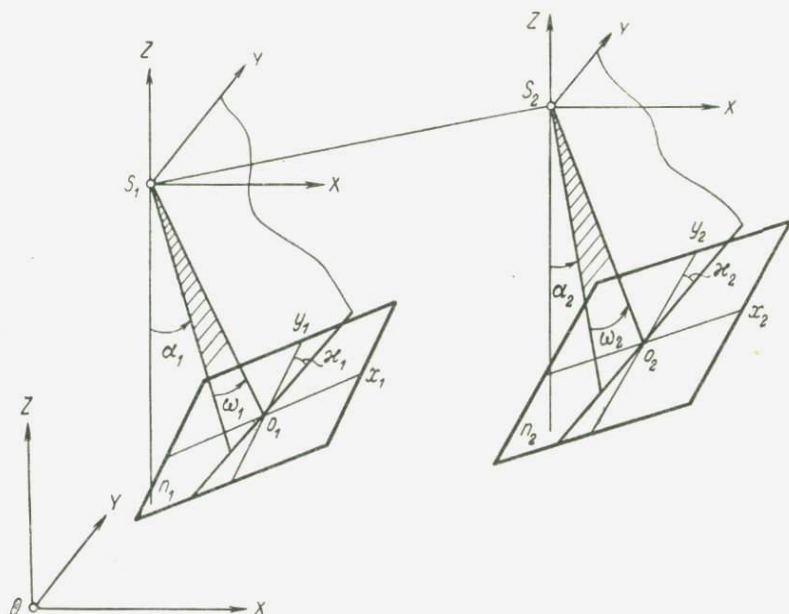


Рис. 139

В число элементов внешнего ориентирования входит 6 линейных и 6 угловых.

§ 57. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ КООРДИНАТАМИ ТОЧКИ МЕСТНОСТИ И ЕЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ПАРЕ СНИМКОВ

В гл. 1 показано, что для полного определения положения точки местности данных только одного снимка недостаточно. Три координаты точки местности можно найти, если она изобразилась на двух снимках, полученных с различных точек пространства.

Пусть с точек S_1 и S_2 получены снимки P_1 и P_2 (рис. 140). Изображения точки местности A на снимках обозначим через a_1 и a_2 .

Величина и направление базиса фотографирования определяются вектором \bar{R}_0 с началом в точке S_1 . Вектор \bar{R} с тем же началом определяет положение точки A , а векторы \bar{R}'_1 и \bar{R}'_2 — положения точек a_1 и a_2 .

Векторы \bar{R} и \bar{R}'_1 коллинеарны:

$$\bar{R} = N\bar{R}'_1, \quad (7.4)$$

где N — скаляр.

Из рис. 140 следует, что векторы $\bar{S}_2A = \bar{R} - \bar{R}_0$ и \bar{R}'_2 также коллинеарны, т. е.

$$(\bar{R} - \bar{R}_0) \times \bar{R}'_2 = 0$$

или

$$\bar{R} \times \bar{R}'_2 = \bar{R}_0 \times \bar{R}'_2.$$

Для определения скаляра N подставим в это выражение значение \bar{R} из формулы (7.4). Получим

$$N(\bar{R}'_1 \times \bar{R}'_2) = \bar{R}_0 \times \bar{R}'_2. \quad (7.5)$$

Формулы (7.4) и (7.5) выражают зависимость между координатами точки местности и ее изображений на паре снимков в векторной форме.

Чтобы получить эту зависимость в координатной форме, спроектируем векторы (7.4) и (7.5) на оси X , Y и Z :

$$X = NX'_1, \quad Y = NY'_1, \quad Z = NZ'_1; \quad (7.6)$$

$$N = \frac{Y_0Z'_2 - Z_0Y'_2}{Y'_1Z'_2 - Z'_1Y'_2} = \frac{Z_0X'_2 - X_0Z'_2}{Z'_1X'_2 - X'_1Z'_2} = \frac{X_0Y'_2 - Y_0X'_2}{X'_1Y'_2 - Y'_1X'_2}, \quad (7.7)$$

где X'_1, Y'_1, Z'_1 — координаты точки a_1 в системе S_1XYZ ;

X'_2, Y'_2, Z'_2 — координаты точки a_2 в системе S_2XYZ ;

X_0, Y_0, Z_0 — координаты точки S_2 в системе S_1XYZ .

Пусть известны элементы ориентирования пары снимков. Измерим координаты x_1, y_1 и x_2, y_2 соответственных точек a_1 и a_2 . Чтобы определить координаты точки местности A по формулам (7.6), необходимо сначала найти направляющие косинусы для левого и правого снимков по формулам (1.15) и пространственные координаты точек a_1 и a_2 по формулам (1.6).

Формулы (7.4) и (7.6) выражают зависимость между координатами точки местности и ее изображений на паре снимков в самом общем случае съемки, т. е. при любых значениях элементов ориентирования снимков.

Перейдем к частному случаю съемки, когда снимки горизонтальные.

§ 58. ОСНОВНЫЕ
ФОРМУЛЫ ДЛЯ ПАРЫ
ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ
СНИМКОВ

Пусть снимки P_1 и P_2 , составляющие стереопару, получены при отвесном положении оптической оси фотокамеры с одной и той же высоты (рис. 141). При этом оси координат x_1 и x_2 параллельны базису B (идеальный случай съемки).

Принимая левый конец базиса за начало системы координат XYZ , направим ось X вдоль базиса, а ось Z совместим с главным лучом левой связки. В этом случае

$$\alpha = \omega = \kappa = 0, \quad X_0 = B, \\ Y_0 = Z_0 = 0.$$

По формулам (1.15) и (1.6) получим

$$a_1 = b_2 = c_3 = 1; \\ a_2 = a_3 = b_1 = b_3 = c_1 = c_2 = 0; \\ X'_1 = x_1, \quad Y'_1 = y_1, \quad Z'_1 = -f; \\ X'_2 = x_2, \quad Y'_2 = y_2, \quad Z'_2 = -f.$$

Согласно (7.7)

$$N = \frac{Z_0 X'_2 - X_0 Z'_2}{Z'_1 X'_2 - X'_1 Z'_2} = \\ = \frac{B}{x_1 - x_2} = \frac{B}{P}.$$

Теперь по формулам (7.6) найдем

$$\left. \begin{aligned} X &= B \frac{x_1}{P} = -Z \frac{x_1}{f} \\ Y &= B \frac{y_1}{P} = -Z \frac{y_1}{f} \\ Z &= -B \frac{f}{P} \end{aligned} \right\} (7.8)$$

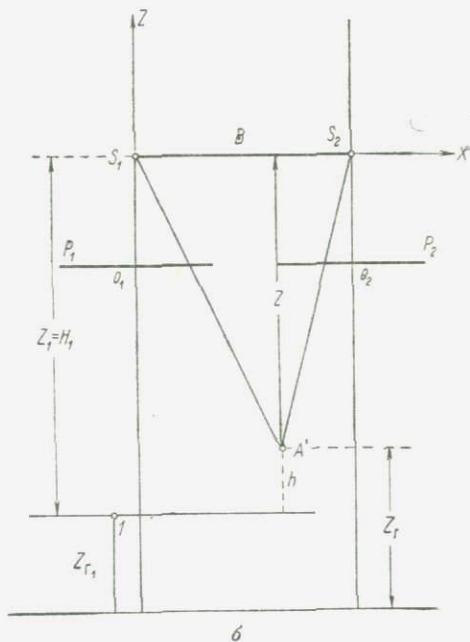
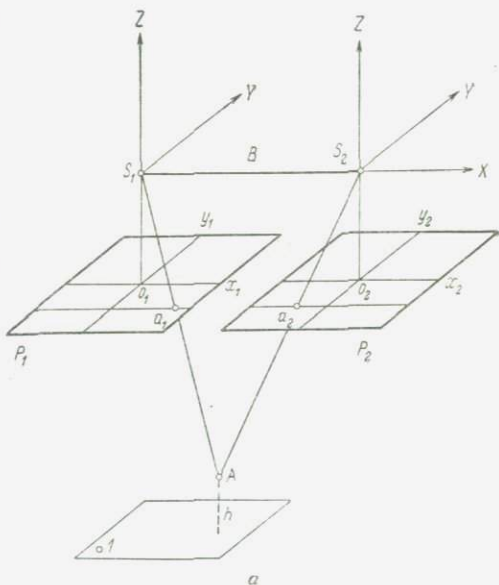


Рис. 141

Отсюда следует, что в частном случае, когда местность представляет собой горизонтальную плоскость ($Z = \text{const}$), продольный параллакс на данной паре горизонтальных снимков — величина постоянная. Она равна базису фотографирования, выраженному в масштабе снимка,

$$p = -\frac{f}{Z} B = \frac{f}{H} B. \quad (7.9)$$

Пусть Z_{01} — геодезическая высота точки фотографирования S_1 . Тогда геодезическая высота точки местности

$$Z_r = Z_{01} + Z, \quad (7.10)$$

где Z — координата точки A , вычисленная по формуле (7.8).

Если известна геодезическая высота Z_{r1} опорной точки I , изобразившейся на стереопаре, то геодезическая высота точки A

$$Z_r = Z_{r1} + h,$$

где h — превышение точки A над опорной точкой I .

Из рисунка следует

$$h = Z - Z_1$$

или согласно (7.8)

$$h = -Bf \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{p_1} \right) = B \frac{f}{p_1} \frac{\Delta p}{p}.$$

Здесь

$$\Delta p = p - p_1 \quad (7.11)$$

— разность продольных параллаксов определяемой и опорной точек.

Величина

$$B \frac{f}{p_1} = -Z_1 = H_1,$$

где H_1 — высота фотографирования над опорной точкой I .

Следовательно,

$$h = H_1 \frac{\Delta p}{p} = H_1 \frac{\Delta p_1}{p_1 + \Delta p} \quad (7.12)$$

и

$$Z_r = Z_{r1} + H_1 \frac{\Delta p}{p_1 + \Delta p}. \quad (7.13)$$

Основные формулы для горизонтальных снимков очень простые. Поэтому решение фотограмметрических задач по горизонтальным снимкам значительно облегчается по сравнению с обработкой наклонных снимков.

На практике часто результаты измерений наклонных снимков приводят к горизонтальным снимкам, а затем определяют координаты точек местности по формулам, полученным в этом параграфе.

При определении превышения двух точек, расположенных близко друг к другу, например при определении высоты дерева, дома, обрыва и т. д., измеренная на плановых снимках разность продольных параллаксов практически не отличается от соответствующей величины на горизонтальных снимках. В этом случае формулу (7.12) применяют и для определения превышений по плановым снимкам.

В 1946 г. А. Н. Лобанов и И. И. Шелягин предложили и разработали *фотовысотомер* для измерения превышений и высот по горизонтальным и плановым снимкам (рис. 142). Он состоит

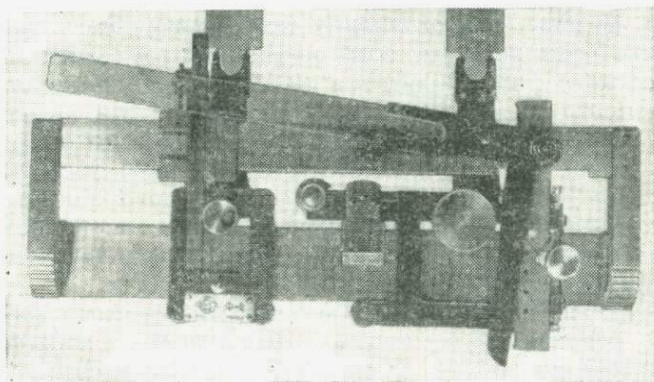


Рис. 142

из двух измерительных марок, нанесенных на стеклянных пластинках, связанных с механизмом, решающим уравнение (7.13). Фотовысотомер устанавливается на снимки, наблюдаемые в стереоскоп. Высоты точек местности находятся без вычислений в результате наведения стереоскопической марки на соответствующие точки модели и отсчитываются по шкале.

С геометрической точки зрения горизонтальный снимок отличается от плана местности только смещениями за рельеф. Эти смещения точек снимка направлены к точке надира или от нее и определяются формулой (1.76)

$$\delta r = \frac{h}{H_1} r,$$

где h — превышение точки местности над горизонтальной плоскостью, принятой за начальную, например над горизонтальной плоскостью, проходящей через опорную точку I (см. рис. 141, б);

H_1 — высота фотографирования над начальной плоскостью;

r — радиус-вектор на снимке, соединяющий точку надира с определяемой точкой.

Подставим в формулу (1.76) значение h из (7.12). Получим

$$\delta r = \frac{\Delta p}{p} r. \quad (7.14)$$

Если $h > 0$, то смещение δr направлено от точки надира.

Составляющие этого смещения по координатным осям x и y найдем по формулам

$$\left. \begin{aligned} \delta x &= \frac{\Delta p}{p} x \\ \delta y &= \frac{\Delta p}{p} y \end{aligned} \right\}. \quad (7.15)$$

Итак, по паре горизонтальных снимков можно составить план местности, если известна геодезическая высота хотя бы одной точки сфотографированного на стереопаре участка и высота фотографирования относительно этой точки. Для решения этой задачи достаточно внести поправки за рельеф в положения точек на левом (или правом) снимке в соответствии с формулой (7.14) или (7.15). Для ориентирования полученного таким образом плана относительно геодезической системы координат потребуются геодезические координаты X и Y двух точек местности или точек фотографирования.

Отметим еще одну важную особенность пары горизонтальных снимков, полученных с одной высоты: она не имеет поперечных параллаксов. Из рис. 141, а следует, что ординаты y_1 и y_2 пары соответственных точек a_1 и a_2 одинаковы. Поэтому согласно (7.3)

$$q = y_1 - y_2 = 0. \quad (7.16)$$

§ 59. СВЯЗЬ МЕЖДУ ПРОДОЛЬНЫМИ ПАРАЛЛАКСАМИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ И ПЛАНОВЫХ СНИМКАХ

На рис. 143 представлена пара плановых снимков, полученных с точек S_1 и S_2 . Обозначим через p продольный параллакс какой-либо точки, изобразившейся на этих снимках.

Найдем продольный параллакс p^0 той же точки на горизонтальных снимках, показанных на рисунке пунктирными линиями.

Центр проекции левого горизонтального снимка совпадает с центром проекции S_1 левого планового снимка. Центр проекции S_2^0 правого горизонтального снимка совмещен с ортогональной проекцией точки S_2 на горизонтальную плоскость, проходящую через S_1 .

Продольный параллакс, как известно, равен разности абсцисс соответственных точек:

$$p = x_1^0 - x_2^0.$$

Согласно (1.36)

$$x^0 = x + \left(f + \frac{x^2}{f} \right) \alpha + \frac{xy}{f} \omega - y\kappa,$$

где x и y — координаты соответствующей точки на плановом снимке, а α , ω и κ — угловые элементы внешнего ориентирования планового снимка (в радианах).

В правую часть этого выражения нужно ввести еще поправку за изменение высоты фотографирования. Из выражений (7.8) следует

$$x = -\frac{f}{Z} X = \frac{f}{H} X.$$

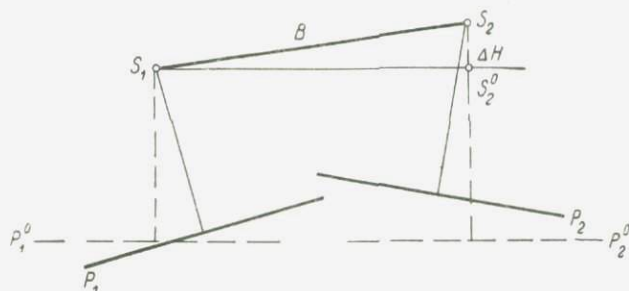


Рис. 143

Продифференцируем это равенство по переменному H и перейдем к конечным величинам

$$\Delta x = -\frac{f}{H^2} X \Delta H = -x \frac{\Delta H}{H}.$$

Итак,

$$x^0 = x + \left(f + \frac{x^2}{f}\right) \alpha + \frac{xy}{f} \omega - y\kappa + x \frac{\Delta H}{H}.$$

По этой формуле получим

$$\left. \begin{aligned} x_1^0 &= x_1 + \left(f + \frac{x_1^2}{f}\right) \alpha_1 + \frac{x_1 y_1}{f} \omega_1 - y_1 \kappa_1 \\ x_2^0 &= x_2 + \left(f + \frac{x_2^2}{f}\right) \alpha_2 + \frac{x_2 y_2}{f} \omega_2 - y_2 \kappa_2 + x_2 \frac{\Delta H}{H} \end{aligned} \right\} \quad (7.17)$$

На плановых снимках ординаты соответственных точек мало отличаются друг от друга. Поэтому при вычислении поправочных членов будем считать, что $y_1 = y_2$. Кроме того, вместо координаты x_1 подставим $x_2 + p_2$ в соответствии с (7.2). Тогда

$$x_1^0 = x_1 + \left(f + \frac{x_2^2}{f}\right) \alpha_1 + \frac{x_2 y_2}{f} \omega_1 - y_2 \kappa_1 + 2x_2 \frac{p}{f} \alpha_1 + \frac{p^2}{f} \alpha_1 + y_2 \frac{p}{f} \omega_1,$$

$$x_2^0 = x_2 + \left(f + \frac{x_2^2}{f}\right) \alpha_2 + \frac{x_2 y_2}{f} \omega_2 - y_2 \kappa_2 + x_2 \frac{\Delta H}{H}.$$

Вычтя из первого равенства второе, найдем

$$p^0 = p - \left(f + \frac{x_2^2}{f} \right) (\alpha_2 - \alpha_1) - \frac{x_2 y_2}{f} (\omega_2 - \omega_1) - y_2 (\kappa_1 - \kappa_2) - \\ - x_2 \frac{\Delta H}{H} + 2x_2 \frac{p}{f} \alpha_1 + \frac{p^2}{f} \alpha_1 + y_2 \frac{p}{f} \omega_1.$$

Разности $\alpha_2 - \alpha_1$, $\omega_2 - \omega_1$ и $\kappa_1 - \kappa_2$ обозначим через $\Delta\alpha$, $\Delta\omega$ и $\Delta\kappa$. Тогда

$$p^0 = p - f \Delta\alpha + \frac{p^2}{f} \alpha_1 - \frac{x_2^2}{f} \Delta\alpha - \frac{x_2 y_2}{f} \Delta\omega - \\ - y_2 \left(\Delta\kappa - \frac{p}{f} \omega_1 \right) - x_2 \left(\frac{\Delta H}{H} - 2 \frac{p}{f} \alpha_1 \right). \quad (7.18)$$

Это выражение можно назвать формулой трансформирования продольного параллакса. Из нее следует, что для определения продольного параллакса, соответствующего горизонтальным снимкам, необходимо внести поправки в продольный параллакс, измеренный на плановых снимках. Эти поправки зависят от элементов ориентирования плановых снимков, а также от положения соответственных точек на стереопаре.

Первая поправка — величина постоянная для всех точек данной пары. Вторую поправку можно считать практически постоянной для данной пары, если рельеф небольшой. Остальные поправки — переменные, величина их зависит от положения точек на снимках.

На практике пользуются и другой формулой трансформирования продольного параллакса, в которой поправки выражены через координаты точки левого снимка. Эту формулу, как и равенство (7.18), можно получить из выражений (7.17), если в них подставить значение x_2 , равное $x_1 - p$. В результате найдем

$$p^0 = p - f \Delta\alpha - \frac{p^2}{f} \alpha_2 + p \frac{\Delta H}{H} - \frac{x_1^2}{f} \Delta\alpha - \frac{x_1 y_1}{f} \Delta\omega - \\ - y_1 \left(\Delta\kappa - \frac{p}{f} \omega_2 \right) - x_1 \left(\frac{\Delta H}{H} - 2 \frac{p}{f} \alpha_2 \right). \quad (7.19)$$

Формулы (7.18) и (7.19) приближенные и пригодны только для снимков с малыми углами наклона и поворота. Если эти углы значительны, то нужно сначала трансформировать абсциссы соответственных точек по формуле (1.35), а затем вычислить параллакс p^0 как разность трансформированных абсцисс x_1^0 и x_2^0 .

§ 60. ПОПЕРЕЧНЫЙ ПАРАЛЛАКС

В § 55 поперечный параллакс определен как разность ординат соответственных точек

$$q = y_1 - y_2.$$

Как следует из выражений (1.20), ординаты y являются функциями элементов ориентирования снимков и координат точки местности.

Если снимки плановые, то величины y можно найти по формуле (1.37). Ограничиваясь членами первого порядка, напишем

$$y^0 = y + \frac{xy}{f} \alpha + \left(f + \frac{y^2}{f} \right) \omega + x\kappa;$$

здесь y^0 — ордината на горизонтальном снимке, а α , ω и κ — углы наклона и угол поворота планового снимка.

В правую часть этого равенства необходимо ввести еще две поправки — за смещения ΔY_0 и $\Delta Z_0 = \Delta H$ (рис. 144). Из выражения (1.20), приняв $\alpha = \omega = \kappa = 0$ и $y_0 = 0$, получим

$$y = -f \frac{Y - Y_0}{Z - Z_0}.$$

Отсюда, полагая, что смещения ΔY и ΔH малы, найдем

$$\begin{aligned} \Delta y &= f \frac{\Delta Y_0}{Z - Z_0} + y \frac{\Delta Z_0}{Z - Z_0} = \\ &= -f \frac{\Delta Y_0}{H} - y \frac{\Delta H}{H} \end{aligned}$$

Следовательно,

$$y^0 = y + \frac{xy}{f} \alpha + \left(f + \frac{y^2}{f} \right) \omega + x\kappa + f \frac{\Delta Y_0}{H} + y \frac{\Delta H}{H} \quad (7.20)$$

По этой формуле вычислим y_1^0 и y_2^0 :

$$\begin{aligned} y_1^0 &= y_1 + \frac{x_1 y_1}{f} \alpha_1 + \left(f + \frac{y_1^2}{f} \right) \omega_1 + x_1 \kappa_1, \\ y_2^0 &= y_2 + \frac{x_2 y_2}{f} \alpha_2 + \left(f + \frac{y_2^2}{f} \right) \omega_2 + x_2 \kappa_2 + f \frac{\Delta Y_0}{H} + y_2 \frac{\Delta H}{H}. \end{aligned}$$

Получим разность этих выражений, подставив в первое значение $x_1 = x_2 + p$ из формулы (7.2) и полагая при вычислении поправок $y_1 = y_2$,

$$\begin{aligned} q &= \frac{x_2 y_2}{f} (\alpha_1 - \alpha_2) + \left(f + \frac{y_2^2}{f} \right) (\omega_1 - \omega_2) + x_2 (\kappa_1 - \kappa_2) + \\ &+ y_2 \frac{p}{f} \alpha_1 + p \kappa_1 - f \frac{\Delta Y_0}{H} - y_2 \frac{\Delta H}{H}. \end{aligned}$$

Из рис. 144 следует

$$\Delta H \approx Bv = \frac{H}{f} bv, \quad \Delta Y_0 \approx B\tau = \frac{H}{f} b\tau,$$

где b — базис фотографирования в масштабе снимка, а τ и v — углы, определяющие направление базиса.

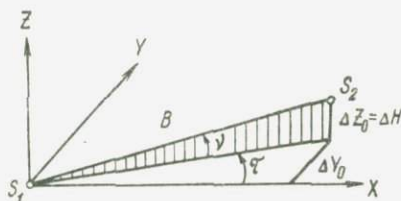


Рис. 144

Теперь представим поперечный параллакс в таком виде:

$$q = b\tau + \frac{b}{f} y_2 v + \frac{x_2 y_2}{f} \Delta\alpha + \left(f + \frac{y_2^2}{f} \right) \Delta\omega + x_2 \Delta\kappa - y_2 \frac{p}{f} \alpha_1 - p\kappa_1; \quad (7.21)$$

здесь $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$, $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ и $\Delta\kappa = \kappa_2 - \kappa_1$.

Итак, поперечный параллакс на плановых снимках вызван углами наклона и поворота снимков, а также углами поворота и наклона базиса.

На горизонтальных снимках поперечных параллаксов нет, так как эти углы равны нулю.

Если на плановых снимках выбрать ряд точек и измерить поперечные параллаксы, то по формуле (7.21) можно составить систему уравнений с семью неизвестными. Однако из них можно найти только пять — $\Delta\alpha$, $\Delta\omega$, $\Delta\kappa$, $(\tau - \kappa_1)$, $(v - \alpha_1)$, так как величины b и p для каждой точки мало отличаются друг от друга.

Далее показано, что поперечный параллакс является функцией пяти независимых элементов взаимного ориентирования пары снимков.

§ 61. ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ПАРЫ ПАНОРАМНЫХ СНИМКОВ

В качестве основных формул для пары панорамных снимков можно использовать выражения (7.6) и (7.7), если при вычислении пространственных координат по формулам (1.6) учесть зависимости (1.97) между координатами соответственных точек на обычном и панорамном снимках.

Подставив в (1.6) значения x и y из (1.97) и полагая $x_0 = y_0 = 0$, найдем

$$\left. \begin{aligned} X' &= a_1 y' \sec \frac{x'}{f} + a_2 f \operatorname{tg} \frac{x'}{f} - a_3 f \\ Y' &= b_1 y' \sec \frac{x'}{f} + b_2 f \operatorname{tg} \frac{x'}{f} - b_3 f \\ Z' &= c_1 y' \sec \frac{x'}{f} + c_2 f \operatorname{tg} \frac{x'}{f} - c_3 f \end{aligned} \right\} \cdot \quad (7.22)$$

В частном случае, когда $\alpha = \omega = \kappa = 0$ и $X_0 = B$, $Y_0 = Z_0 = 0$, формулы (7.6) принимают вид

$$\left. \begin{aligned} X &= Z \operatorname{tg} \frac{x'_1}{f} \\ Y &= Z \frac{y'_1}{f} \sec \frac{x'_1}{f} \\ Z &= \frac{B}{\operatorname{tg} \frac{x'_1}{f} - \operatorname{tg} \frac{x'_2}{f}} \end{aligned} \right\} \cdot \quad (7.23)$$

ВЗАИМНОЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ ПАРЫ СНИМКОВ

§ 62. ВЗАИМНОЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ КАК ЭТАП
ДВОЙНОЙ ОБРАТНОЙ ЗАСЕЧКИ

Координаты точки местности, изобразившейся на стереопаре, можно получить прямой засечкой по формулам, выведенным в гл. 7. Для этого необходимо знать элементы ориентирования снимков.

Прямую засечку применяют в наземной фотограмметрии, где элементы внешнего ориентирования снимков известны с достаточной точностью. Точность определения этих элементов в процессе аэрофотосъемки пока не отвечает современным требованиям. Поэтому положение точек местности по аэроснимкам находят *двойной обратной засечкой*, сущность которой состоит в следующем.

По левому и правому снимкам стереопары восстанавливают связки лучей, существовавшие во время фотографирования. Затем при произвольном расстоянии между вершинами связок снимки устанавливают относительно друг друга в то положение, в каком они были в момент аэрофотосъемки, т. е. производят взаимное ориентирование снимков. После такой установки снимков образуется модель местности как геометрическое место точек пересечения соответственных лучей левой и правой связок. Масштаб этой модели произвольный, так как расстояние между вершинами связок выбрано произвольно. По опорным точкам модель приводят к заданному масштабу и ориентируют относительно геодезической системы координат. В результате внешнего ориентирования модели определяются и элементы внешнего ориентирования снимков. Затем находят координаты отдельных точек местности или составляют карту.

Таким образом, обратная двойная засечка включает следующие этапы:

- построение связок проектирующих лучей или внутреннее ориентирование снимков,
- взаимное ориентирование снимков,
- внешнее ориентирование модели,
- определение координат отдельных точек местности или составление карты.

Задачей настоящей главы является изучение только одного этапа — взаимного ориентирования пары снимков.

До внедрения в практику двойной обратной засечки положение точек местности находили путем длительной обработки аэроснимков, требующей определения в поле четырех опорных точек

для каждого снимка. Шесть элементов внешнего ориентирования снимка получали способом одиночной обратной засечки по опорным точкам. Затем прямой засечкой определяли координаты точек местности, изобразившихся на стереопаре.

Взаимное ориентирование пары снимков позволяет построить модель местности без использования опорных точек. При этом из 12 элементов ориентирования пары снимков находят пять. Остальные семь элементов получают в процессе внешнего ориентирования модели, для чего достаточно трех опорных точек.

Еще более значительный эффект двойная обратная засечка дает в пространственной фототриангуляции, когда создают общую модель местности для всего маршрута путем ориентирования последующего снимка относительно предыдущего. Общую модель получают из отдельных моделей, количество которых равно числу стереопар. При этом каждую последующую модель приводят к масштабу предыдущей, используя общие точки. Затем общую модель ориентируют внешне по опорным точкам.

Пусть в маршруте пять снимков и продольное перекрытие их около 60%. В этом случае необходимо найти 30 элементов внешнего ориентирования снимков. Для решения этой задачи способом одиночной обратной засечки необходимо иметь 14 опорных точек. Применяв двойную обратную засечку и построив путем взаимного ориентирования модель местности по пяти снимкам, получают 23 элемента, характеризующих относительное положение снимков: 20 элементов взаимного ориентирования и три масштабных коэффициента. Для определения остальных семи элементов, которые служат элементами внешнего ориентирования модели, необходимы только три опорные точки.

Двойную обратную засечку используют и для фототриангуляции в пределах блока, состоящего из нескольких или многих маршрутов. Это позволяет свести к минимуму полевую подготовку снимков, так как отпадает необходимость иметь опорные точки для каждого маршрута.

Раньше в двойной обратной засечке применялись только конгруэнтные связки проектирующих лучей, т. е. подобные существовавшим во время съемки. В 40-х годах текущего столетия советские ученые впервые разработали общую теорию построения модели, позволяющую взаимно ориентировать снимки не только с подобными, но и с преобразованными связками.

§ 63. ЭЛЕМЕНТЫ ВЗАИМНОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ

Величины, определяющие взаимное положение пары снимков во время фотографирования, называются *элементами взаимного ориентирования*.

Взаимное ориентирование пары снимков, т. е. установка их в то положение, в котором они находились относительно друг

друга при фотографировании, может быть достигнуто двумя способами:

- 1) угловыми движениями обеих проектирующих камер,
- 2) движениями только одной проектирующей камеры, например правой при неподвижном положении левой камеры.

В соответствии с этим различают две системы элементов взаимного ориентирования. В первой системе неподвижным считают базис фотографирования, во второй — левый снимок.

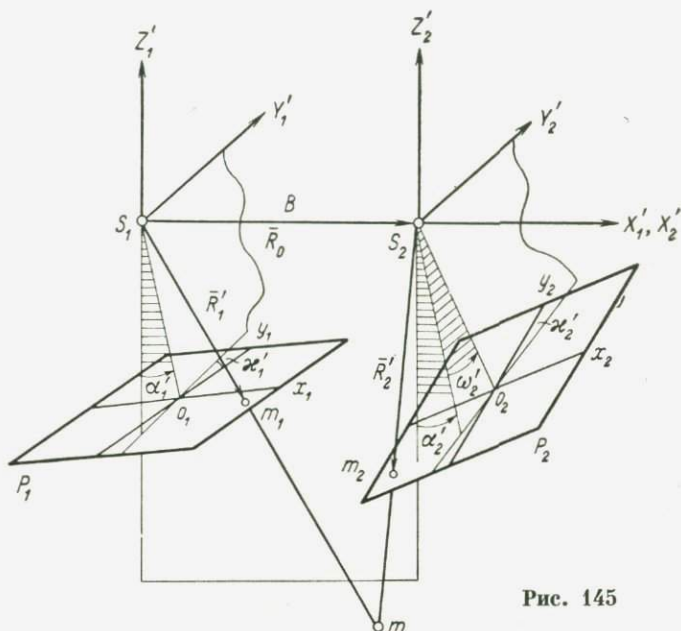


Рис. 145

Первая система. Элементами взаимного ориентирования в этой системе служат:

- α'_1 — угол в главной базисной плоскости левого снимка между перпендикуляром к базису фотографирования и главным лучом левой связки (рис. 145);
- κ'_1 — угол на левом снимке между осью y_1 и следом плоскости $S_1 o_1 Y'_1$;
- α'_2 — угол в главной базисной плоскости левого снимка между перпендикуляром к базису и проекцией главного луча правой связки;
- ω'_2 — угол между проекцией главного луча правой связки на базисную плоскость левого снимка и главным лучом;
- κ'_2 — угол на правом снимке между осью y_2 и следом плоскости $S_2 o_2 Y'_2$.

Углы α'_1 и α'_2 называются *продольными углами* наклона снимков относительно базиса фотографирования, угол ω'_2 —

взаимным поперечным углом наклона, а углы κ'_1 и κ'_2 — углами поворота.

Зная элементы взаимного ориентирования снимков, можно найти фотограмметрические координаты любой точки модели.

При использовании первой системы за начало координат принимают центр проекции левого снимка, ось X'_1 совмещают с базисом, а ось Z'_1 направляют вверх в главной базисной плоскости левого снимка.

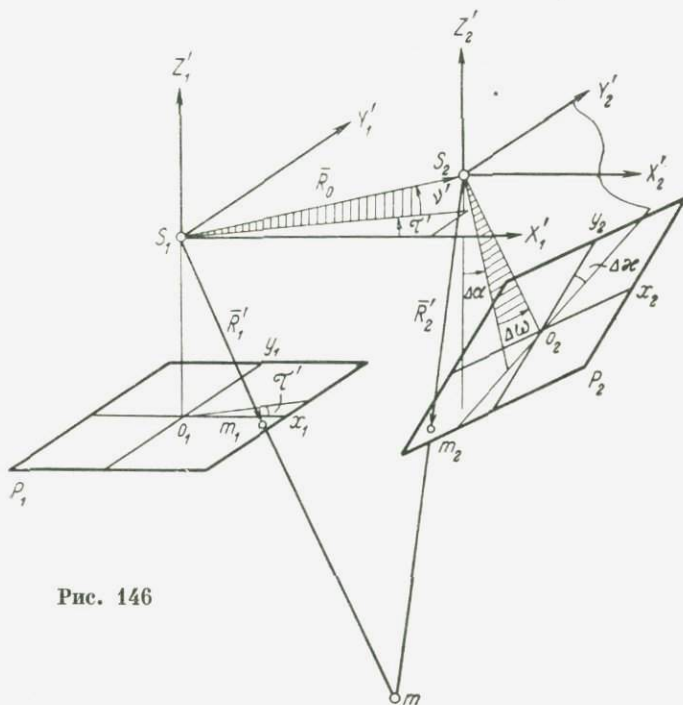


Рис. 146

Вторая система. За начало фотограмметрических координат выберем тоже центр проекции левого снимка, но координатные оси X'_1 и Y'_1 (рис. 146) направим параллельно соответствующим координатным осям левого снимка. Очевидно, что ось Z'_1 совпадает с главным лучом левой связки. Введем еще систему координат $S_2X_2Y_2Z_2$, параллельную $S_1X_1Y_1Z_1$. В качестве элементов взаимного ориентирования используем следующие величины:

- τ' — угол на левом снимке между осью x_1 и следом главной базисной плоскости;
- ν' — угол наклона базиса относительно плоскости левого снимка;

- $\Delta\alpha$ — взаимный продольный угол наклона снимков: угол, составленный осью Z'_2 с проекцией главного луча правой связки на плоскость $X'_2Z'_2$;
- $\Delta\omega$ — взаимный поперечный угол наклона снимков: угол между плоскостью $X'_2Z'_2$ и главным лучом правой связки;
- $\Delta\chi$ — взаимный угол поворота снимков: угол на правом снимке между осью y_2 и следом плоскости $S_2o_2Y'_2$.

§ 64. УСЛОВИЕ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ПАРЫ СООТВЕТСТВЕННЫХ ЛУЧЕЙ

На рис. 145 и 146 представлены пара снимков и связки лучей в том положении, которое они занимали относительно друг друга во время фотографирования. Здесь S_1S_2 — базис фотографирования, m — точка модели. Любая пара соответственных лучей, например S_1m_1 и S_2m_2 , пересекается и находится в одной плоскости, проходящей через базис фотографирования.

Изменим положение одной связки лучей относительно другой путем, например, поворота правого снимка вокруг главного луча S_2o_2 . Тогда пара соответственных лучей S_1m_1 и S_2m_2 будет находиться в различных плоскостях и не пересечется.

Итак, пара соответственных лучей пересекается, если она лежит в одной базисной плоскости. В векторной форме это условие можно выразить как условие компланарности трех векторов

$$\bar{R}_0 \times (\bar{R}'_1 \times \bar{R}'_2) = 0, \quad (8.1)$$

где \bar{R}_0 , \bar{R}'_1 и \bar{R}'_2 — векторы, определяющие положение центра проекции правого снимка S_2 и пары соответственных точек m_1 и m_2 относительно центра проекции левого снимка S_1 .

Не всякие изменения взаимного положения снимков нарушают пересечение соответственных лучей. Например, если правый или левый снимок взаимно ориентированной пары совершает только поступательное движение и при этом центр проекции его не смещается с линии базиса S_1S_2 , то пересечение соответственных лучей сохраняется.

Это следует и из условия (8.1). Любой из векторов, входящих в это условие, например \bar{R}_0 , можно разделить на его модуль. Поэтому уравнение (8.1) связывает между собой только направления векторов или направления соответственных лучей с направлением базиса. Длина базиса в этом случае не играет роли и может иметь произвольное значение.

§ 65. УРАВНЕНИЯ ВЗАИМНОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ

Составим уравнения, связывающие элементы взаимного ориентирования с координатами соответственных точек стереопары. Для этого используем условие пересечения пары соответственных лучей (8.1).

Напишем это условие применительно к первой системе элементов взаимного ориентирования (см. рис. 145):

$$\begin{vmatrix} B & 0 & 0 \\ X'_1 & Y'_1 & Z'_1 \\ X'_2 & Y'_2 & Z'_2 \end{vmatrix} = 0$$

или

$$Y'_1 Z'_2 - Z'_1 Y'_2 = 0, \quad (8.2)$$

где X'_1, Y'_1, Z'_1 — координаты точки m_1 в системе $S_1 X'_1 Y'_1 Z'_1$;
 X'_2, Y'_2, Z'_2 — координаты точки m_2 в системе $S_2 X'_2 Y'_2 Z'_2$,
 параллельной $S_1 X'_1 Y'_1 Z'_1$.

Эти координаты зависят от элементов взаимного ориентирования снимков. Следовательно, уравнение (8.2) можно представить в таком виде:

$$\varphi(\alpha'_1, \kappa'_1, \alpha'_2, \omega'_2, \kappa'_2) = Y'_1 Z'_2 - Z'_1 Y'_2 = 0. \quad (8.3)$$

Пусть известны приближенные значения элементов взаимного ориентирования. Обозначим их $\alpha'_{10}, \kappa'_{10}, \alpha'_{20}, \omega'_{20}$ и κ'_{20} . Найдем поправки к этим значениям $\delta\alpha'_1, \delta\kappa'_1, \delta\alpha'_2, \delta\omega'_2$ и $\delta\kappa'_2$. Для этого вместо уравнения (8.3) напомним

$$\begin{aligned} \varphi(\alpha'_1, \kappa'_1, \alpha'_2, \omega'_2, \kappa'_2) &= \varphi_0(\alpha'_{10}, \kappa'_{10}, \alpha'_{20}, \omega'_{20}, \kappa'_{20}) + \\ &+ \frac{\partial\varphi}{\partial\alpha'_1} \delta\alpha'_1 + \frac{\partial\varphi}{\partial\kappa'_1} \delta\kappa'_1 + \frac{\partial\varphi}{\partial\alpha'_2} \delta\alpha'_2 + \frac{\partial\varphi}{\partial\omega'_2} \delta\omega'_2 + \frac{\partial\varphi}{\partial\kappa'_2} \delta\kappa'_2. \end{aligned}$$

Введем обозначения

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{\partial\varphi}{\partial\alpha'_1}, \quad b = \frac{\partial\varphi}{\partial\kappa'_1}, \quad c = \frac{\partial\varphi}{\partial\omega'_2}, \quad d = \frac{\partial\varphi}{\partial\alpha'_2}, \quad e = \frac{\partial\varphi}{\partial\kappa'_2} \\ l &= \varphi_0(\alpha'_{10}, \kappa'_{10}, \alpha'_{20}, \omega'_{20}, \kappa'_{20}) = Y'_{10} Z'_{20} - Z'_{10} Y'_{20} \end{aligned} \right\} \quad (8.4)$$

и составим уравнение поправок

$$a\delta\alpha'_1 + b\delta\kappa'_1 + c\delta\omega'_2 + d\delta\alpha'_2 + e\delta\kappa'_2 + l = v. \quad (8.5)$$

Теперь вычислим частные производные. Пусть $x_0 = y_0 = 0$. Согласно (8.3) и (1.6)

$$\begin{aligned} \varphi(\alpha'_1, \kappa'_1, \alpha'_2, \omega'_2, \kappa'_2) &= Y'_1 Z'_2 - Z'_1 Y'_2 = (b_1 x_1 + b_2 y_1 - b_3 f) \times \\ &\times (c'_1 x_2 + c'_2 y_2 - c'_3 f) - (c_1 x_1 + c_2 y_1 - c_3 f) (b'_1 x_2 + b'_2 y_2 - b'_3 f). \end{aligned}$$

Учитывая (1.15), получаем

$$\begin{aligned} \frac{\partial\varphi}{\partial\alpha'_1} &= -[(\cos\alpha'_1 \cos\kappa'_1 - \sin\alpha'_1 \sin\omega'_1 \sin\kappa'_1) x_1 + (-\cos\alpha'_1 \sin\kappa'_1 - \\ &- \sin\alpha'_1 \sin\omega'_1 \cos\kappa'_1) y_1 + f \sin\alpha'_1 \cos\omega'_1] Y'_2 = \\ &= -(a_1 x_1 + a_2 y_1 - a_3 f) Y'_2 = -X'_1 Y'_2. \end{aligned}$$

Аналогично найдем и другие частные производные. В результате будем иметь

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha'_1} = -X'_1 Y'_2, \quad b = \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha'_2} = Y'_1 X'_2, \\ c &= \frac{\partial \Phi}{\partial \omega'_2} = Y'_1 E' - Z'_1 F', \quad d = \frac{\partial \Phi}{\partial \kappa'_1} = Z'_2 B - Y'_2 C, \\ e &= \frac{\partial \Phi}{\partial \kappa'_2} = Y'_1 C' - Z'_1 B' \end{aligned} \right\}, \quad (8.6)$$

где

$$\left. \begin{aligned} E' &= Y'_2 \cos \alpha'_2 \\ F' &= x_2 b'_3 \sin \kappa'_2 - y_2 b'_3 \cos \kappa'_2 + f \cos \omega'_2 \\ B &= b_2 x_1 - b_1 y_1 \\ C &= c_2 x_1 - c_1 y_1 \\ B' &= b'_2 x_2 - b'_1 y_2 \\ C' &= c'_2 x_2 - c'_1 y_2 \end{aligned} \right\}. \quad (8.7)$$

Уравнение (8.5) можно использовать для определения элементов взаимного ориентирования снимков. Одна точка позволяет составить одно уравнение (8.5) с пятью неизвестными. Следовательно, для определения этих неизвестных необходимо выбрать не менее пяти точек, измерить их координаты на левом и правом снимках, составить и решить систему уравнений (8.5).

При выводе уравнения (8.5) не накладывались условия на значения элементов взаимного ориентирования. Поэтому оно пригодно для снимков, имеющих любые углы наклона. В случае плановой аэросъемки, когда углы наклона снимков малы, это уравнение можно упростить. Для этого используем приближенные значения косинусов a_i , b_i и c_i и найдем коэффициенты (8.6) для плановых снимков.

Согласно (8.6) и (1.15)

$$\begin{aligned} a &= -X'_1 Y'_2 = -(a_1 x_1 + a_2 y_1 - a_3 f) (b'_1 x_2 + b'_2 y_2 - b'_3 f) = \\ &= -(x_1 - y_1 \kappa'_1 + f \alpha'_1) (x_2 \kappa'_2 + y_2 + f \omega'_2) = -x_1 y_2. \end{aligned}$$

Аналогично получим остальные коэффициенты и свободный член b . После подстановки их в равенство (8.5) и замены неизвестных $\delta \alpha'_1$, $\delta \alpha'_2$, $\delta \omega'_2$, $\delta \kappa'_1$, $\delta \kappa'_2$ на α'_1 , α'_2 , ω'_2 , κ'_1 , κ'_2 будем иметь уравнение взаимного ориентирования пары плановых снимков

$$\frac{x_1 y_2}{f} \alpha'_1 - \frac{x_2 y_1}{f} \alpha'_2 - \left(f + \frac{y_1 y_2}{f} \right) \omega'_2 + x_1 \kappa'_1 - x_2 \kappa'_2 + q = 0, \quad (8.8)$$

где $q = y_1 - y_2$ — поперечный параллакс.

Поперечный параллакс на плановых снимках — величина малая. Поэтому при вычислении коэффициентов, стоящих перед неизвестными в уравнении (8.8), можно считать, что $y_1 = y_2$.

Из уравнения (8.8) следует, что на стереопаре нет поперечных параллаксов, если каждый элемент взаимного ориентирования равен нулю. Такой случай съемки называется *нормальным* и характеризуется тем, что снимки находятся в одной плоскости, параллельной базису фотографирования.

Нормальный случай съемки называют идеальным, если снимки и базис фотографирования горизонтальны (см. рис. 141, а).

Уравнение (8.8) можно получить и другим способом, используя зависимость между координатами соответственных точек горизонтального и планового снимков. Если снимки горизонтальные ($\alpha = \omega = \kappa = 0$), то согласно уравнению (1.15) $a_1 = b_2 = c_3 = 1$, а остальные направляющие косинусы равны нулю. В этом случае, как следует из (1.6), $Y'_1 = y_1^0$, $Y'_2 = y_2^0$, $Z'_1 = Z'_2 = -f$, и условие (8.2) принимает вид

$$y_1^0 - y_2^0 = 0. \quad (8.9)$$

Это означает, что на горизонтальных снимках, полученных с одной высоты, поперечных параллаксов нет.

Используя равенство (1.37) и учитывая, что $\omega'_1 = 0$, напомним

$$y_1^0 = y_1 + \frac{x_1 y_1}{f} \alpha'_1 + x_1 \kappa'_1,$$

$$y_2^0 = y_2 + \frac{x_2 y_2}{f} \alpha'_2 + \left(f + \frac{y_2^2}{f} \right) \omega'_2 + x_2 \kappa'_2.$$

Подставим эти значения y_1^0 и y_2^0 в равенство (8.9), полагая, что в коэффициентах перед неизвестными $y_1 = y_2$. В результате получим уравнение (8.8).

В уравнения (8.5) и (8.8) в качестве неизвестных входят элементы взаимного ориентирования, относящиеся к первой системе (см. рис. 145).

Теперь получим уравнение применительно ко второй системе элементов взаимного ориентирования (см. рис. 146). В этом случае условие пересечения пары соответственных лучей можно представить в таком виде:

$$\begin{vmatrix} X_0 & Y_0 & Z_0 \\ X'_1 & Y'_1 & Z'_1 \\ X'_2 & Y'_2 & Z'_2 \end{vmatrix} = 0,$$

где X_0, Y_0, Z_0 — координаты точки S_2 в системе $S_1 X'_1 Y'_1 Z'_1$,
 X'_1, Y'_1, Z'_1 — координаты точки m_1 в системе $S_1 X'_1 Y'_1 Z'_1$,
 X'_2, Y'_2, Z'_2 — координаты точки m_2 в системе $S_2 X'_2 Y'_2 Z'_2$,
 параллельной $S_1 X'_1 Y'_1 Z'_1$.

Разделим первую строку определителя на X_0 :

$$\begin{vmatrix} 1 & \operatorname{tg} \tau' & \frac{\operatorname{tg} \nu'}{\cos \tau'} \\ X'_1 & Y'_1 & Z'_1 \\ X'_2 & Y'_2 & Z'_2 \end{vmatrix} = 0.$$

Координатные оси x и y левого снимка параллельны осям X'_1 и Y'_1 . Поэтому $\alpha'_1 = \omega'_1 = \kappa'_1 = 0$ и согласно (1.6) $X'_1 = x_1$, $Y'_1 = y_1$, $Z'_1 = -f$. Учитывая это, представим определитель так:

$$\begin{vmatrix} 1 & \operatorname{tg} \tau' & \frac{\operatorname{tg} \nu'}{\cos \tau'} \\ x_1 & y_1 & -f \\ X'_2 & Y'_2 & Z'_2 \end{vmatrix} = 0. \quad (8.10)$$

Координаты X'_2 , Y'_2 и Z'_2 зависят от элементов взаимного ориентирования $\Delta\alpha$, $\Delta\omega$, $\Delta\kappa$. Поэтому можно написать

$$\varphi(\tau', \nu', \Delta\alpha, \Delta\omega, \Delta\kappa) = \begin{vmatrix} 1 & \operatorname{tg} \tau' & \frac{\operatorname{tg} \nu'}{\cos \tau'} \\ x_1 & y_1 & -f \\ X'_2 & Y'_2 & Z'_2 \end{vmatrix} = 0.$$

Пусть известны приближенные значения элементов взаимного ориентирования. Обозначим их τ'_0 , ν'_0 , $\Delta\alpha_0$, $\Delta\omega_0$, $\Delta\kappa_0$. Найдём поправки к этим значениям $\delta\tau'$, $\delta\nu'$, $\delta\Delta\alpha$, $\delta\Delta\omega$, $\delta\Delta\kappa$. Для этого уравнение взаимного ориентирования представим так:

$$\begin{aligned} \varphi(\tau', \nu', \Delta\alpha, \Delta\omega, \Delta\kappa) &= \varphi_0(\tau'_0, \nu'_0, \Delta\alpha_0, \Delta\omega_0, \Delta\kappa_0) + \\ &+ \frac{\partial\varphi}{\partial\tau'} \delta\tau' + \frac{\partial\varphi}{\partial\nu'} \delta\nu' + \frac{\partial\varphi}{\partial\Delta\alpha} \delta\Delta\alpha + \frac{\partial\varphi}{\partial\Delta\omega} \delta\Delta\omega + \frac{\partial\varphi}{\partial\Delta\kappa} \delta\Delta\kappa. \end{aligned}$$

Обозначим

$$a = \frac{\partial\varphi}{\partial\tau'}, \quad b = \frac{\partial\varphi}{\partial\nu'}, \quad c = \frac{\partial\varphi}{\partial\Delta\alpha}, \quad d = \frac{\partial\varphi}{\partial\Delta\omega}, \quad e = \frac{\partial\varphi}{\partial\Delta\kappa} \quad (8.11)$$

и составим уравнение поправок

$$a\delta\tau' + b\delta\nu' + c\delta\Delta\alpha + d\delta\Delta\omega + e\delta\Delta\kappa + l = v, \quad (8.12)$$

где свободный член l представляет собой определитель (8.10), вычисленный по приближенным значениям элементов взаимного ориентирования,

$$l = \begin{vmatrix} 1 & \operatorname{tg} \tau'_0 & \frac{\operatorname{tg} \nu'_0}{\cos \tau'_0} \\ x_1 & y_1 & -f \\ X'_{20} & Y'_{20} & Z'_{20} \end{vmatrix}. \quad (8.13)$$

Найдем частные производные (8.11)

$$a = \frac{\partial \varphi}{\partial \tau'} = - \begin{vmatrix} x_1 & -f \\ X'_2 & Z'_2 \end{vmatrix} \sec^2 \tau' - \begin{vmatrix} x_1 & y_1 \\ X'_2 & Y'_2 \end{vmatrix} \frac{\operatorname{tg} \nu'}{\cos^2 \tau'} \sin \tau';$$

$$b = \frac{\partial \varphi}{\partial \nu'} = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 \\ X'_2 & Y'_2 \end{vmatrix} \frac{\sec^2 \nu'}{\cos \tau'}.$$

Теперь вычислим

$$c = \frac{\partial \varphi}{\partial \Delta \alpha} = \begin{vmatrix} \operatorname{tg} \tau & \frac{\operatorname{tg} \nu'}{\cos \tau'} \\ y_1 & -f \end{vmatrix} \frac{\partial X'_2}{\partial \Delta \alpha} - \begin{vmatrix} 1 & \frac{\operatorname{tg} \nu'}{\cos \tau'} \\ x_1 & -f \end{vmatrix} \frac{\partial Y'_2}{\partial \Delta \alpha} + \begin{vmatrix} 1 & \operatorname{tg} \tau \\ x_1 & y_1 \end{vmatrix} \frac{\partial Z'_2}{\partial \Delta \alpha}.$$

Согласно (1.16) и (1.15)

$$\left. \begin{aligned} X'_2 &= a_1 x_2 + a_2 y_2 - a_3 f \\ Y'_2 &= b_1 x_2 + b_2 y_2 - b_3 f \\ Z'_2 &= c_1 x_2 + c_2 y_2 - c_3 f \end{aligned} \right\} \begin{aligned} a_1 &= \cos \Delta \alpha \cos \Delta \kappa - \sin \Delta \alpha \sin \Delta \omega \sin \Delta \kappa \\ a_2 &= -\cos \Delta \alpha \sin \Delta \kappa - \sin \Delta \alpha \sin \Delta \omega \cos \Delta \kappa \\ a_3 &= -\sin \Delta \alpha \cos \Delta \omega \\ b_1 &= \cos \Delta \omega \sin \Delta \kappa \\ b_2 &= \cos \Delta \omega \cos \Delta \kappa \\ b_3 &= -\sin \Delta \omega \\ c_1 &= \sin \Delta \alpha \cos \Delta \kappa + \cos \Delta \alpha \sin \Delta \omega \sin \Delta \kappa \\ c_2 &= -\sin \Delta \alpha \sin \Delta \kappa + \cos \Delta \alpha \sin \Delta \omega \cos \Delta \kappa \\ c_3 &= \cos \Delta \alpha \cos \Delta \omega \end{aligned} \quad (8.14)$$

Отсюда

$$\frac{\partial X'_2}{\partial \Delta \alpha} = x_2 \frac{\partial a_1}{\partial \Delta \alpha} + y_2 \frac{\partial a_2}{\partial \Delta \alpha} - f \frac{\partial a_3}{\partial \Delta \alpha},$$

$$\frac{\partial a_1}{\partial \Delta \alpha} = -\sin \Delta \alpha \cos \Delta \kappa - \cos \Delta \alpha \sin \Delta \omega \sin \Delta \kappa = -c_1,$$

$$\frac{\partial a_2}{\partial \Delta \alpha} = \sin \Delta \alpha \sin \Delta \kappa - \cos \Delta \alpha \sin \Delta \omega \cos \Delta \kappa = -c_2,$$

$$\frac{\partial a_3}{\partial \Delta \alpha} = -\cos \Delta \alpha \cos \Delta \omega = -c_3.$$

Итак,

$$\frac{\partial X'_2}{\partial \Delta \alpha} = -(c_1 x + c_2 y - c_3 f) = -Z'_2.$$

Далее

$$\frac{\partial Y'_2}{\partial \Delta\alpha} = 0,$$

$$\frac{\partial Z'_2}{\partial \Delta\alpha} = x_2 \frac{\partial c_1}{\partial \Delta\alpha} + y_2 \frac{\partial c_2}{\partial \Delta\alpha} - f \frac{\partial c_3}{\partial \Delta\alpha};$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial \Delta\alpha} = \cos \Delta\alpha \cos \Delta\kappa - \sin \Delta\alpha \sin \Delta\omega \sin \Delta\kappa = a_1,$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial \Delta\alpha} = -\cos \Delta\alpha \sin \Delta\kappa - \sin \Delta\alpha \sin \Delta\omega \cos \Delta\kappa = a_2,$$

$$\frac{\partial c_3}{\partial \Delta\alpha} = -\sin \Delta\alpha \cos \Delta\omega = a_3,$$

$$\frac{\partial Z'_2}{\partial \Delta\alpha} = a_1 x_2 + a_2 y_2 - a_3 f = X'_2.$$

Таким образом,

$$c = - \begin{vmatrix} \operatorname{tg} \tau & \operatorname{tg} v' \\ y_1 & -f \end{vmatrix} Z'_2 + \begin{vmatrix} 1 & \operatorname{tg} \tau \\ x_1 & y_1 \end{vmatrix} X'_2.$$

Аналогично вычислим остальные две производные. В результате будем иметь

$$\left. \begin{aligned} a &= -(x_1 Z'_2 + f X'_2) \sec^2 \tau' - (x_1 Y'_2 - y_1 X'_2) \frac{\operatorname{tg} v'}{\cos^2 \tau'} \sin \tau' \\ b &= (x_1 Y'_2 - y_1 X'_2) \frac{\sec^2 v'}{\cos \tau'} \\ c &= (y_1 - x_1 \operatorname{tg} \tau) X'_2 + \left(f \operatorname{tg} \tau + y_1 \frac{\operatorname{tg} v'}{\cos \tau'} \right) Z'_2 \\ d &= - \left(f \operatorname{tg} \tau + y_1 \frac{\operatorname{tg} v'}{\cos \tau'} \right) [a_3 (x_2 \sin \Delta\kappa + y_2 \cos \Delta\kappa) - \\ &\quad - f \sin \Delta\alpha \sin \Delta\omega] + \left(f + x_1 \frac{\operatorname{tg} v'}{\cos \tau'} \right) [b_3 (x_2 \sin \Delta\kappa + \\ &\quad + y_2 \cos \Delta\kappa) + f \cos \Delta\omega] + (y_1 - x_1 \operatorname{tg} \tau') [c_3 (x_2 \sin \Delta\kappa + \\ &\quad + y_2 \cos \Delta\kappa) + f \cos \Delta\alpha \sin \Delta\omega] \\ e &= \left(f \operatorname{tg} \tau' + y_1 \frac{\operatorname{tg} v'}{\cos \tau'} \right) (a_1 y_2 - a_2 x_2) - \\ &\quad - \left(f + x_1 \frac{\operatorname{tg} v'}{\cos \tau'} \right) (b_1 y_2 - b_2 x_2) - (y_1 - x_1 \operatorname{tg} \tau') \times \\ &\quad \times (c_1 y_2 - c_2 x_2) \end{aligned} \right\} \quad (8.15)$$

Эти коэффициенты, как и свободный член l уравнения поправок, вычисляются по приближенным значениям элементов взаимного ориентирования.

Если снимки плановые, то в первом приближении можно считать, что элементы взаимного ориентирования равны нулю, т. е.

при вычислении коэффициентов (8.15) полагать $X'_2 = x_2$, $Y'_2 = y_2$, $Z'_2 = -f$, $\tau' = \nu' = 0$. Тогда

$$a = f(x_1 - x_2) = fp,$$

$$b = y_1 p,$$

$$c = y_1 x_2,$$

$$d = f^2 + y_1^2,$$

$$e = fx_2,$$

а свободный член согласно (8.13)

$$l = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ x_1 & y_1 & -f \\ x_2 & y_2 & -f \end{vmatrix} = -f(y_1 - y_2) = -fq.$$

Подставим эти значения коэффициентов и свободного члена в уравнение (8.12) и заменим неизвестные $\delta\tau'$, $\delta\nu'$, $\delta\Delta\alpha$, $\delta\Delta\omega$, $\delta\Delta\kappa$ на τ' , ν' , $\Delta\alpha$, $\Delta\omega$, $\Delta\kappa$. В результате получим уравнение взаимного ориентирования пары плановых снимков

$$p\tau' + \frac{y_1}{f} p\nu' + \frac{y_1}{f} x_2 \Delta\alpha + \left(f + \frac{y_1^2}{f}\right) \Delta\omega + x_2 \Delta\kappa - q = v. \quad (8.16)$$

Это уравнение можно составить и другим путем, используя зависимость между координатами соответственных точек на горизонтальном и плановом снимках. Известно, что поперечный параллакс на горизонтальных снимках, полученных с одной высоты, равен нулю (см. равенство (8.9)). Согласно выражению (1.37) и учитывая, что для левого снимка $\alpha = \omega = \kappa = 0$, напишем

$$y_1^0 = y_1,$$

$$y_2^0 = y_2 + \frac{x_2 y_2}{f} \Delta\alpha + \left(f + \frac{y_2^2}{f}\right) \Delta\omega + x_2 \Delta\kappa + \delta y,$$

где δy — поправка за смещение Y_0 и Z_0 центра проекции S_2 (см. рис. 146). Из формул (7.8) следует

$$y_1 = Y \frac{p}{B} = -Y \frac{f}{Z},$$

отсюда

$$\delta y = \frac{Y_0}{B} p + Yf \frac{Z_0}{Z^2} \approx p\tau + \frac{y_1}{f} p\nu'.$$

Подставив значения y_1^0 и y_2^0 в выражение (8.9), получим уравнение (8.16).

В результате решения нормальных уравнений получим поправки к начальному приближению неизвестных i , введя их, найдем первое приближение элементов взаимного ориентирования.

Затем, используя уточненные значения определяемых величин, вновь составим уравнения поправок, нормальные уравнения, решим их и получим поправки к первому приближению. После введения этих поправок найдем второе приближение неизвестных. Так следует действовать до тех пор, пока поправки не будут настолько малы, что ими можно пренебречь.

В качестве критерия точности определения элементов взаимного ориентирования можно использовать поправки v или остаточные поперечные параллаксы

$$\delta q = y_1^0 - y_2^0, \quad (8.23)$$

вычисляемые в конце каждого приближения для всех точек, по которым находятся неизвестные. В формуле (8.23) y_1^0 и y_2^0 — трансформированные ординаты соответственных точек левого и правого снимков. Они вычисляются по формуле (1.35). При этом в качестве направляющих косинусов берутся значения их, полученные по формуле (1.15) в процессе составления уравнений поправок: для левого снимка по углам α'_1 , $\omega'_1 = 0$ и κ'_1 , а для правого — по углам α'_2 , ω'_2 и κ'_2 .

Если поправка v или остаточный поперечный параллакс δq на любой точке не выходит за пределы допустимой ошибки измерения координат точек стереопары, то нет необходимости переходить к следующему приближению.

Испытания изложенного выше способа, выполненные по макетным снимкам и аэроснимкам, показали, что он позволяет определять элементы взаимного ориентирования перспективных и плановых снимков с высокой точностью в результате двух-трех приближений.

В табл. 11 приведены значения элементов взаимного ориентирования пары макетных перспективных снимков холмистой местности, полученные этим способом при помощи электронной вычислительной машины. Элементы найдены по девяти точкам, равномерно расположенным в пределах стереопары. Начальные значения неизвестных отличались от действительных на величины, не превышающие 3° .

Величины элементов взаимного ориентирования, полученные в третьем приближении, точно совпали с действительными их значениями, выбранными при расчете макетных снимков. Остаточные поперечные параллаксы δq после первого приближения достигали 29,5 мкм, после второго не превышали 7,6 мкм, а после третьего — 0,1 мкм.

В результате испытаний также установлено, что отклонения начальных величин элементов взаимного ориентирования, дости-

Приближение	Элементы взаимного ориентирования					δq_{\max} , МММ
	α'_1	κ'_1	α'_2	ω'_2	κ'_2	
1-е	0° 52' 25"	-1° 55' 42"	-3° 07' 38"	22° 01' 46"	1° 03' 03"	29,5
2-е	0 59 56	-1 59 57	-2 59 59	22 00 21	0 59 52	7,6
3-е	1 00 00	-2 00 00	-3 00 00	22 00 00	1 00 00	0,1

гающие 10° , вызывают увеличение числа приближений до пяти. Если же эти уклонения доходят до 20° , то количество приближений возрастает до восьми. При этом точность способа не снижается.

Избыточное количество точек позволяет повысить точность определения элементов взаимного ориентирования. Если число точек увеличивается с 6 до 12, то точность определения элементов возрастает приблизительно на 50%. Дальнейшее увеличение числа точек дает небольшое повышение точности определения элементов, но значительно увеличивает объем работ по измерению снимков. Поэтому можно считать, что оптимальное количество точек для решения задачи взаимного ориентирования снимков не должно превышать 12.

Рассмотренный выше способ является строгим и пригоден для определения элементов взаимного ориентирования любых снимков. В случае плановой аэрофотосъемки, когда углы α , ω и κ малы, для определения элементов взаимного ориентирования снимков можно использовать приближенное уравнение (8.8).

Для этого на паре плановых снимков выберем шесть точек так, чтобы обеспечить возможно высокую точность определения элементов и наиболее простой вид уравнений.

Пусть все элементы взаимного ориентирования, за исключением одного, например κ'_2 , равны нулю. Тогда уравнение (8.8) примет вид

$$\varepsilon_2 \kappa'_2 - q = 0.$$

Отсюда

$$\kappa'_2 = \frac{q}{\varepsilon_2}$$

Ошибка определения элементов взаимного ориентирования снимков зависит главным образом от ошибки измерения поперечных параллаксов. Погрешности величин f , x и y практически не влияют на точность определения этих элементов. Поэтому

$$m_{\kappa'_2} = \frac{m_q}{\varepsilon_2},$$

т. е. ошибка определения элемента κ'_2 тем меньше, чем больше абсолютное значение коэффициента при данном неизвестном в уравнении взаимного ориентирования.

Т а б л и ц а 12

Элемент	Первое условие выполняется, если	Второе условие выполняется, если	№ точки
κ'_2	$ x_2 = \max$	$x_1 = 0, y_1 = 0$	1
κ'_1	$ x_1 = \max$	$x_2 = 0, y_2 = 0$	2
α'_2	$ x_2 y_1 = \max$	$x_1 = 0$	3
α'_1	$ x_1 y_1 = \max$	$x_2 = 0$	4
ω'_2	$ y_1 = \max$	$x_1 = 0$ или $x_2 = 0$	5

Аналогично можно найти, что ошибки других элементов обратно пропорциональны абсолютным значениям коэффициентов, стоящих перед этими элементами в уравнении (8.8). Результаты

этих исследований представлены в табл. 12. В третьей графе этой таблицы указаны значения координат точек, при которых выполняются изложенные выше два условия, т. е. обеспечиваются наиболее высокая точность определения неизвестных и простой вид уравнений. В последней графе и на рис. 147 отмечены точки, удовлетворяющие этим условиям.

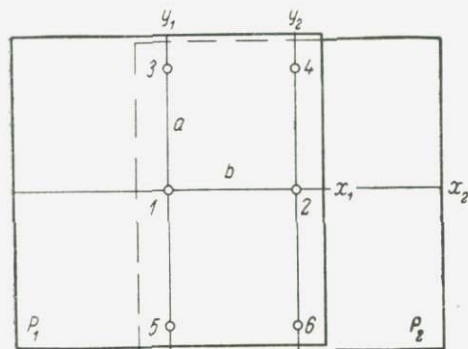


Рис. 147

Для дальнейшего упрощения уравнений и облегчения их решения потребуем, чтобы фигуры 1243 и 1265 на левом снимке представляли собой равные прямоугольники со сторонами a и b .

Выищем координаты и параллаксы выбранных точек (табл. 13). Продольный параллакс точки 2, как видно на рис. 147, равен b . Приняв при измерении продольных параллаксов точку 2 за начальную, напишем, что продольный параллакс любой другой точки

$$p = b + \Delta p, \quad (8.24)$$

а абсцисса точки правого снимка

$$x_2 = x_1 - p = x_1 - (b + \Delta p). \quad (8.25)$$

№ точки	x_1	x_2	y_1	q
1	0	$-(b + \Delta p_1)$	0	q_1
2	b	0	0	q_2
3	0	$-(b + \Delta p_3)$	a	q_3
4	b	$-\Delta p_4$	a	q_4
5	0	$-(b + \Delta p_5)$	$-a$	q_5
6	b	$-\Delta p_6$	$-a$	q_6

Теперь, используя табл. 13, составим уравнение (8.8) для каждой из шести точек, полагая $\Delta p = 0$ (местность равнинная):

$$\left. \begin{aligned} 1. & \quad -f\omega'_2 + b\kappa'_2 + q_1 = v_1 \\ 2. & \quad -f\omega'_2 + b\kappa'_1 + q_2 = v_2 \\ 3. & \quad \frac{ab}{f} \alpha'_2 - \left(f + \frac{a^2}{f}\right) \omega'_2 + b\kappa'_2 + q_3 = v_3 \\ 4. & \quad \frac{ab}{f} \alpha'_1 - \left(f + \frac{a^2}{f}\right) \omega'_2 + b\kappa'_1 + q_4 = v_4 \\ 5. & \quad -\frac{ab}{f} \alpha'_2 - \left(f + \frac{a^2}{f}\right) \omega'_2 + b\kappa'_2 + q_5 = v_5 \\ 6. & \quad -\frac{ab}{f} \alpha'_1 - \left(f + \frac{a^2}{f}\right) \omega'_2 + b\kappa'_1 + q_6 = v_6 \end{aligned} \right\} \quad (8.26)$$

Так как одно уравнение здесь избыточное, то должно существовать условие, связывающее между собой шесть измеренных параллаксов. Чтобы найти это условие, будем считать равными нулю правые части уравнений поправок, т. е. величины v .

Сложим уравнения 3 и 5 (см. формулу (8.26))

$$-2 \left(f + \frac{a^2}{f}\right) \omega'_2 + 2b\kappa'_2 + q_3 + q_5 = 0.$$

Вычтем удвоенное уравнение 1

$$-2 \frac{a^2}{f} \omega'_2 + q_3 + q_5 - 2q_1 = 0.$$

Следовательно,

$$\omega'_2 = \frac{f}{2a^2} (q_3 + q_5 - 2q_1).$$

Сложим уравнения 4 и 6 и из полученной суммы вычтем удвоенное уравнение 2. Будем иметь

$$-2 \frac{a^2}{f} \omega'_2 + q_4 + q_6 - 2q_2 = 0.$$

Отсюда

$$\omega'_2 = \frac{f}{2a^2} (q_4 + q_6 - 2q_2).$$

Сопоставляя два выражения, найденные для определения элемента ω'_2 , напишем

$$q_3 + q_5 - 2q_1 = q_4 + q_6 - 2q_2$$

или

$$2q_1 - 2q_2 - q_3 + q_4 - q_5 + q_6 = 0. \quad (8.27)$$

Уравнение (8.27) выражает условие, связывающее поперечные параллаксы на стандартно расположенных точках плановых снимков равнинной местности.

Если бы измерения поперечных параллаксов были безошибочны, то правая часть этого уравнения действительно была бы равна нулю. Но вследствие ошибок измерений в правой части будет не нуль, а невязка w . Таким образом, при невязке

$$2q_1 - 2q_2 - q_3 + q_4 - q_5 + q_6 = w \quad (8.28)$$

условное уравнение поперечных параллаксов будет

$$2v_1 - 2v_2 - v_3 + v_4 - v_5 + v_6 + w = 0.$$

Уравненные поперечные параллаксы найдем методом коррелат, известным из способа наименьших квадратов. В данном случае коррелата

$$k = -\frac{w}{12},$$

а поправки к измеренным параллаксам

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= -\frac{w}{6}, & v_3 &= \frac{w}{12}, & v_5 &= \frac{w}{12} \\ v_2 &= \frac{w}{6}, & v_4 &= -\frac{w}{12}, & v_6 &= -\frac{w}{12} \end{aligned} \right\}. \quad (8.29)$$

Придав эти поправки к измеренным параллаксам, получим уравненные параллаксы.

Учитывая, что найден элемент ω'_2 , определим и остальные четыре элемента, используя уравнения поправок (8.26).

Вычтем из уравнения 4 (см. формулу (8.26)) уравнение 6

$$2\frac{ab}{f}\alpha'_1 + q_4 - q_6 = 0.$$

отсюда

$$\alpha'_1 = \frac{f}{2ab}(q_6 - q_4)$$

Из уравнения 3 вычтем уравнение 5

$$2\frac{ab}{f}\alpha'_2 + q_3 - q_5 = 0$$

отсюда

$$\alpha'_2 = \frac{f}{2ab}(q_5 - q_3).$$

Из уравнений 1 и 2 (см. формулу (8.26)) следует

$$\alpha'_1 = \frac{f}{b} \omega'_2 - \frac{q_2}{b},$$

$$\alpha'_2 = \frac{f}{b} \omega'_2 - \frac{q_1}{b}.$$

При вычислении неизвестных по полученным выше формулам необходимо в измеренные параллаксы ввести поправки (8.29). Учитывая это, окончательно найдем

$$\left. \begin{aligned} \alpha'_1 &= \frac{f}{2ab} (q_6 - q_4) \\ \alpha'_2 &= \frac{f}{2ab} (q_5 - q_3) \\ \omega'_2 &= \frac{f}{2a^2} (q_3 + q_5 - 2q_1) = \frac{f}{2a^2} (q_4 + q_6 - 2q_2) \\ \alpha'_1 &= \frac{f}{b} \omega'_2 - \frac{q_2}{b} - \frac{w}{6b} \\ \alpha'_2 &= \frac{f}{b} \omega'_2 - \frac{q_1}{b} + \frac{w}{6b} \end{aligned} \right\} \cdot \quad (8.30)$$

Для оценки точности определения элементов взаимного ориентирования вычислим $[v^2]$. Как следует из равенств (8.29),

$$[v^2] = \frac{w^2}{12},$$

отсюда ошибка единицы веса

$$\mu = \sqrt{[v^2]} = \frac{w}{2\sqrt{3}}. \quad (8.31)$$

Имеется только одно избыточное измерение, поэтому ошибка единицы веса получается неуверенно. Для нее следует взять некоторое среднее значение из полученных при определении элементов взаимного ориентирования нескольких пар, представляющих собой более или менее однородный материал.

Теперь подсчитаем средние квадратические погрешности определения элементов взаимного ориентирования, используя для этого формулы (8.30). Получим

$$\left. \begin{aligned} m_{\alpha'_1} &= m_{\alpha'_2} = \frac{f}{ab\sqrt{2}} m_q \\ m_{\omega'_2} &= \frac{f}{2a^2} m_q \sqrt{3} \\ m_{\alpha'_1} &= m_{\alpha'_2} = \frac{m_q}{b} \sqrt{1 + \frac{3}{4} \frac{f^2}{a^4}} \end{aligned} \right\} \cdot \quad (8.32)$$

Отсюда следует, что при одинаковой погрешности m_q элементы взаимного ориентирования снимков, полученных короткофокус-

ными фотокамерами, находятся с большей точностью, чем элементы снимков, полученных длиннофокусными фотоаппаратами. При данном значении фокусного расстояния фотоаппарата ошибки элементов будут тем меньше, чем величины a и b будут больше (см. рис. 147). Поэтому точки 3, 4, 5, 6 надо выбирать по возможности дальше от начального направления. Однако расстояние от этих точек до краев снимка должно быть не меньше 2 см, так как при меньшем расстоянии не всегда можно выдержать стандартное расположение точек вследствие углов поворота снимков. Кроме того, по мере приближения к краям снимков снижается точность измерения, поскольку качество изображения в этих местах хуже, чем в центральной части.

В табл. 14 представлены погрешности определения элементов взаимного ориентирования, вычисленные по формулам (8.32) для различных значений фокусного расстояния фотокамеры ($m_q = \pm 0,01$ мм, $a = b = 70$ мм).

Т а б л и ц а 14

Обозначения	Фокусное расстояние f , мм			
	200	100	70	50
$m_{\alpha_1} = m_{\alpha_2}$	$\pm 1,0'$	$\pm 0,5'$	$\pm 0,4'$	$\pm 0,3'$
m_{ω_2}	1,8	0,9	0,6	0,4
$m_{\kappa_1} = m_{\kappa_2}$	3,5	1,0	0,7	0,5

Найдем допустимое значение невязки w . Пусть m_q — средняя квадратическая погрешность измерения поперечного параллакса. Тогда среднее квадратическое значение невязки согласно выражению (8.28) будет

$$m_w = m_q \sqrt{12} = 3,4m_q,$$

а предельное

$$w_e = 3m_w = 10m_q. \quad (8.33)$$

Например, если поперечные параллаксы измеряются с точностью $m_q = \pm 0,01$ мм, то абсолютное значение невязки не должно превышать 0,10 мм.

Рассмотрим вопрос о допустимых отклонениях от стандартного положения точек, полагая, что применяются формулы (8.30).

После дифференцирования выражений (8.30) по переменным a и b и простых преобразований получим

$$\left. \begin{aligned} d\alpha'_1 &= -\alpha'_1 \left(\frac{da}{a} + \frac{db}{b} \right) \\ d\alpha'_2 &= -\alpha'_2 \left(\frac{da}{a} + \frac{db}{b} \right) \\ d\omega'_2 &= 2\omega'_2 \frac{da}{a} \\ d\kappa'_1 &= -\kappa'_1 \frac{db}{b} \\ d\kappa'_2 &= -\kappa'_2 \frac{db}{b} \end{aligned} \right\} \quad (8.34)$$

Пусть $\alpha'_1 = \alpha'_2 = \omega'_2 = 1^\circ$, $\kappa'_1 = \kappa'_2 = 3^\circ$, $a = b = 70$ мм. Потребуем, чтобы влияние каждого из уклонов da и db не превышало погрешностей определения элементов взаимного ориентирования, вызванных погрешностями измерения поперечных параллаксов (см. табл. 14). Тогда по формулам (8.34) найдем, что уклоны da и db можно считать допустимыми, если они не превышают 1,0, 0,5, 0,4 и 0,3 мм для значений фокусных расстояний фотокамеры соответственно 200, 100, 70 и 50 мм.

При выводе уравнения взаимного ориентирования (8.8) для плановых снимков учитывались члены только первого порядка малости. Кроме того, при составлении уравнений поправок (8.26) предполагалось, что разности продольных параллаксов настолько малы, что их можно не принимать во внимание. Вследствие этого формулы (8.30) можно использовать для определения элементов взаимного ориентирования только в случае, когда углы α , ω и κ действительно малы, а местность равнинная.

§ 67. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВЗАИМНОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ (τ' , ν' , $\Delta\alpha$, $\Delta\omega$, $\Delta\kappa$)

Измерим координаты n точек стереопары и найдем элементы взаимного ориентирования τ' , ν' , $\Delta\alpha$, $\Delta\omega$, $\Delta\kappa$.

Пусть известны приближенные значения этих элементов. Составим по формуле (8.12) уравнение взаимного ориентирования для каждой точки

$$\left. \begin{aligned} a_1\delta\tau' + b_1\delta\nu' + c_1\delta\Delta\alpha + d_1\delta\Delta\omega + e_1\delta\Delta\kappa + l_1 &= v_1 \\ a_2\delta\tau' + b_2\delta\nu' + c_2\delta\Delta\alpha + d_2\delta\Delta\omega + e_2\delta\Delta\kappa + l_2 &= v_2 \\ \dots &\dots \\ a_n\delta\tau' + b_n\delta\nu' + c_n\delta\Delta\alpha + d_n\delta\Delta\omega + e_n\delta\Delta\kappa + l_n &= v_n \end{aligned} \right\} \quad (8.35)$$

Коэффициенты a_i , b_i , c_i , d_i , e_i вычислим по формулам (8.15), а свободные члены — по формулам (8.13).

Решим уравнения (8.35) по способу наименьших квадратов, приняв $[pv^2] = \min$. Здесь p — веса измеренных величин.

Для этого от уравнений поправок (8.35) перейдем к нормальным уравнениям. Решив систему нормальных уравнений, получим поправки к начальному приближению неизвестных. Введя эти поправки, будем иметь первое приближение определяемых элементов.

Затем, используя уточненные значения неизвестных, вновь составим уравнения поправок, нормальные уравнения, решим их и получим поправки к первому приближению. После введения этих поправок найдем второе приближение. Так будем поступать до тех пор, пока поправки не будут так малы, что ими можно пренебречь.

Этот способ строгий, он пригоден для определения элементов взаимного ориентирования любых снимков. В случае плановой аэрофотосъемки, когда углы α , ω и κ малы, для решения этой задачи можно использовать приближенное уравнение (8.16).

Пусть измерены продольные и поперечные параллаксы шести стандартно расположенных точек (см. рис. 147, табл. 13). Составим уравнение (8.16) для каждой из шести точек, полагая, что местность равнинная ($\Delta p = 0$):

$$\left. \begin{array}{l} 1. \quad b\tau' \qquad \qquad \qquad + f \Delta\omega - b \Delta\kappa \quad -q_1 = v_1 \\ 2. \quad b\tau' \qquad \qquad \qquad + f \Delta\omega \qquad \qquad \quad -q_2 = v_2 \\ 3. \quad b\tau' + \frac{ab}{f} v' - \frac{ab}{f} \Delta\alpha + \left(f + \frac{a^2}{f}\right) \Delta\omega - b \Delta\kappa - q_3 = v_3 \\ 4. \quad b\tau' + \frac{ab}{f} v' \qquad \qquad + \left(f + \frac{a^2}{f}\right) \Delta\omega \qquad \quad -q_4 = v_4 \\ 5. \quad b\tau' - \frac{ab}{f} v' + \frac{ab}{f} \Delta\alpha + \left(f + \frac{a^2}{f}\right) \Delta\omega - b \Delta\kappa - q_5 = v_5 \\ 6. \quad b\tau' - \frac{ab}{f} v' \qquad \qquad + \left(f + \frac{a^2}{f}\right) \Delta\omega \qquad \quad -q_6 = v_6 \end{array} \right\} \cdot \quad (8.36)$$

Решим эти уравнения, полагая, что поправки v равны нулю. Вычтем из уравнения 4 уравнение 6

$$2 \frac{ab}{f} v' - q_4 + q_6 = 0,$$

отсюда

$$v' = \frac{f}{2ab} (q_4 - q_6).$$

Из уравнения 5 вычтем уравнение 3 (см. формулу (8.36))

$$2 \frac{ab}{f} \Delta\alpha - 2 \frac{ab}{f} v' - q_5 + q_3 = 0.$$

Подставим сюда значение v'

$$2 \frac{ab}{f} \Delta\alpha - q_4 + q_6 - q_5 + q_3 = 0,$$

отсюда

$$\Delta\alpha = \frac{f}{2ab} (-q_3 + q_4 + q_5 - q_6).$$

Сложим уравнения 3 и 5

$$2b\tau' + 2\left(f + \frac{a^2}{f}\right)\Delta\omega - 2b\Delta\kappa - q_3 - q_5 = 0.$$

Вычтем из этой суммы удвоенное уравнение 1

$$2\frac{a^2}{f}\Delta\omega - q_3 - q_5 + 2q_1 = 0,$$

отсюда

$$\Delta\omega = \frac{f}{2a^2}(q_3 + q_5 - 2q_1).$$

Найдем элемент $\Delta\omega$ еще раз. Сложив уравнения 4 и 6 (см. (8.36)) и вычтя из полученной суммы удвоенное уравнение 2, будем иметь

$$2\frac{a^2}{f}\Delta\omega - q_4 + q_6 + 2q_2 = 0,$$

отсюда

$$\Delta\omega = \frac{f}{2a^2}(q_6 + q_4 - 2q_2).$$

Наконец, из уравнений 2 и 1 (см. (8.36)) получим

$$\tau' = -\frac{f}{b}\Delta\omega + \frac{q_2}{b},$$

$$\Delta\kappa = \frac{1}{b}(q_2 - q_1).$$

Сравнив два значения элемента $\Delta\omega$, получим уравнение (8.27), связывающее измеренные поперечные параллаксы. Поправки к измеренным параллаксам найдем по формулам (8.29). Учитывая это, окончательно напомним

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha &= \frac{f}{2ab}(-q_3 + q_4 + q_5 - q_6) \\ \Delta\omega &= \frac{f}{4a^2}(q_3 + q_4 + q_5 + q_6 - 2q_1 - 2q_2) \\ \Delta\kappa &= \frac{1}{b}\left(q_2 - q_1 + \frac{w}{3}\right) \\ \tau' &= -\frac{f}{b}\Delta\omega + \frac{q_2}{b} + \frac{w}{6b} \\ \nu' &= \frac{f}{2ab}(q_4 - q_6) \end{aligned} \right\} \quad (8.37).$$

Подсчитаем погрешности определения элементов взаимного ориентирования, обусловленные погрешностями измерения поперечных параллаксов. Из выражений (8.37) следует

$$\left. \begin{aligned} m_{\Delta\alpha} &= \frac{f}{ab} m_q \\ m_{\Delta\omega} &= \frac{f}{2a^2} m_q \sqrt{3} \\ m_{\Delta\kappa} &= \frac{1}{b} m_q \sqrt{2} \\ m_{\tau'} &= \frac{1}{b} m_q \sqrt{1 + \frac{3}{4} \frac{f^4}{a^4}} \\ m_{\nu'} &= \frac{f}{ab \sqrt{2}} m_q \end{aligned} \right\} \quad (8.38)$$

Пусть $m_q = \pm 0,01$ мм, $a = b = 70$ мм. Тогда погрешности определения элементов взаимного ориентирования для различных значений фокусного расстояния фотокамеры будут иметь значения, приведенные в табл. 15.

Т а б л и ц а 15

Обозначения	Фокусное расстояние f , мм			
	200	100	70	50
$m_{\Delta\alpha}$	$\pm 1,4'$	$\pm 0,7'$	$\pm 0,5'$	$\pm 0,4'$
$m_{\Delta\omega}$	1,2	0,6	0,4	0,3
$m_{\Delta\kappa}$	0,7	0,7	0,7	0,7
$m_{\tau'}$	3,5	1,0	0,7	0,5
$m_{\nu'}$	1,0	0,5	0,4	0,3

В заключение найдем зависимость между двумя системами элементов взаимного ориентирования. Сопоставляя выражения (8.37) и (8.30), получим

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha &= \alpha'_2 - \alpha'_1 \\ \Delta\omega &= \omega'_2 \\ \Delta\kappa &= \kappa'_2 - \kappa'_1 \\ \tau' &= -\kappa'_1 \\ \nu' &= -\alpha'_1 \end{aligned} \right\} \quad (8.39)$$

В следующем параграфе будет показано, что первые три из формул (8.39) — приближенные, так как они учитывают только члены первого порядка малости, а остальные две — строгие.

§ 68. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ДВУМЯ СИСТЕМАМИ ЭЛЕМЕНТОВ
ВЗАИМНОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ

На рис. 148 представлена пара взаимно ориентированных снимков $P_1 - P_2$ и две системы элементов взаимного ориентирования: первая — $\alpha'_1, \kappa'_1, \alpha'_2, \omega'_2, \kappa'_2$ и вторая — $\tau', \nu', \Delta\alpha, \Delta\omega, \Delta\kappa$.

В предыдущем параграфе были получены приближенные формулы, выражающие зависимость между элементами этих систем.

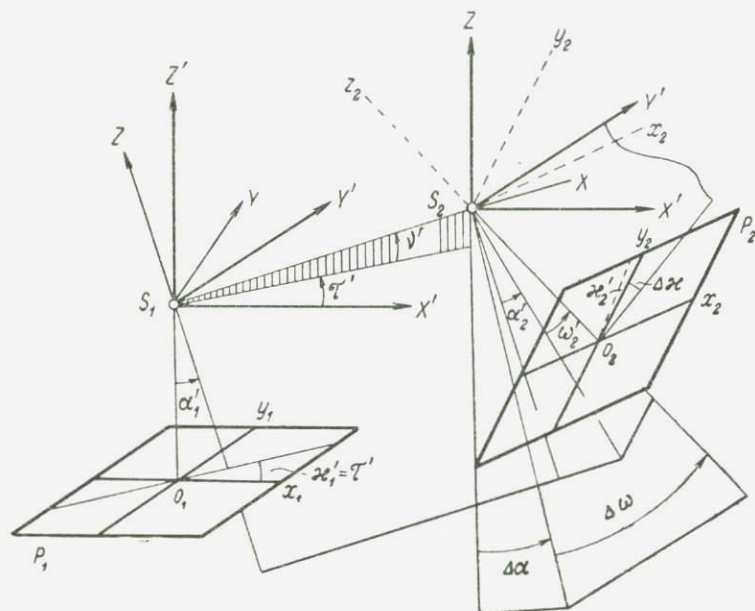


Рис. 148

Выведем строгие формулы, позволяющие точно перейти от элементов одной системы к элементам другой.

Системы элементов взаимного ориентирования отличаются друг от друга расположением координатных осей X, Y и Z . В первой системе ось X совмещена с базисом фотографирования, а ось Z находится в главной базисной плоскости первого снимка. Во второй системе оси X' и Y' параллельны осям x_1 и y_1 левого снимка.

Из рис. 148 следует

$$\tau' = -\kappa'_1, \quad \nu' = -\alpha'_1. \quad (8.40)$$

Чтобы выразить остальные три элемента второй системы — $\Delta\alpha, \Delta\omega$ и $\Delta\kappa$ через элементы первой системы, повернем подвижную систему координат правого снимка $S_2x_2y_2z_2$ так, чтобы она была

параллельна системе $S_1X'Y'Z'$. Для этого достаточно систему $S_2x_2y_2z_2$ последовательно повернуть на углы κ'_2 , ω'_2 , α'_2 , ν' и τ' .

Поворот на первые три угла определяет матрица

$$A_{\alpha'_2\omega'_2\kappa'_2} = \begin{pmatrix} a'_1 & a'_2 & a'_3 \\ b'_1 & b'_2 & b'_3 \\ c'_1 & c'_2 & c'_3 \end{pmatrix},$$

элементы которой можно найти по формулам (1.15) как функции углов α'_2 , ω'_2 и κ'_2 . После этого поворота ось z_2 подвижной системы будет в главной базисной плоскости левого снимка, а ось x_2 совпадет с базисом фотографирования.

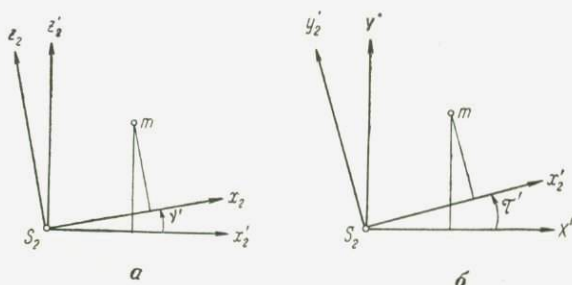


Рис. 149

Следующий поворот подвижной системы на угол ν' позволяет установить плоскость x_2y_2 параллельно плоскости $X'Y'$. Этот поворот (рис. 149, а) определяет матрица

$$A_{\nu'} = \begin{pmatrix} \cos \nu' & 0 & -\sin \nu' \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \nu' & 0 & \cos \nu' \end{pmatrix}.$$

Наконец, поворот τ' приводит подвижную систему в положение, параллельное системе $S_1X'Y'Z'$. Этому повороту (рис. 149, б) соответствует матрица

$$A_{\tau'} = \begin{pmatrix} \cos \tau' & -\sin \tau' & 0 \\ \sin \tau' & \cos \tau' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Теперь перемножим матрицы

$$A = A_{\tau'} A_{\nu'} A_{\alpha'_2\omega'_2\kappa'_2} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix}.$$

Сначала вычислим произведение первых двух матриц

$$A_{\tau'} A_{\nu'} = \begin{pmatrix} \cos \tau' \cos \nu' & -\sin \tau' & -\cos \tau' \sin \nu' \\ \sin \tau' \cos \nu' & \cos \tau' & -\sin \tau' \sin \nu' \\ \sin \nu' & 0 & \cos \nu' \end{pmatrix}.$$

Умножив эту матрицу на матрицу $A_{\alpha'_2 \omega'_2 \kappa'_2}$, найдем компоненты матрицы A

$$\begin{aligned} a_1 &= (a'_1 \cos v' - c'_1 \sin v') \cos \tau' - b'_1 \sin \tau', \\ a_2 &= (a'_2 \cos v' - c'_2 \sin v') \cos \tau' - b'_2 \sin \tau', \\ a_3 &= (a'_3 \cos v' - c'_3 \sin v') \cos \tau' - b'_3 \sin \tau', \\ b_1 &= (a'_1 \cos v' - c'_1 \sin v') \sin \tau' + b'_1 \cos \tau', \\ b_2 &= (a'_2 \cos v' - c'_2 \sin v') \sin \tau' + b'_2 \cos \tau', \\ b_3 &= (a'_3 \cos v' - c'_3 \sin v') \sin \tau' + b'_3 \cos \tau', \\ c_1 &= a'_1 \sin v' + c'_1 \cos v', \\ c_2 &= a'_2 \sin v' + c'_2 \cos v', \\ c_3 &= a'_3 \sin v' + c'_3 \cos v'. \end{aligned}$$

Эти направляющие косинусы определяют положение подвижной системы координат $S_2 x_2 y_2 z_2$ относительно неподвижной $S_2 X' Y' Z'$.

Применив формулы (1.16), получим углы $\Delta\alpha$, $\Delta\omega$ и $\Delta\kappa$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \Delta\alpha &= -\frac{a_3}{c_3}, \\ \sin \Delta\omega &= -b_3, \\ \operatorname{tg} \Delta\kappa &= \frac{b_1}{b_2}, \end{aligned}$$

ИЛИ

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \Delta\alpha &= -\frac{(a'_3 \cos v' - c'_3 \sin v') \cos \tau' - b'_3 \sin \tau'}{a'_3 \sin v' + c'_3 \cos v'}, \\ \sin \Delta\omega &= -(a'_3 \cos v' - c'_3 \sin v') \sin \tau' - b'_3 \cos \tau', \\ \operatorname{tg} \Delta\kappa &= \frac{(a'_1 \cos v' - c'_1 \sin v') \sin \tau' + b'_1 \cos \tau'}{(a'_2 \cos v' - c'_2 \sin v') \sin \tau' + b'_2 \cos \tau'}. \end{aligned}$$

Подставим сюда значения косинусов a'_i , b'_i и c'_i , которые находятся по формулам (1.15) как функции углов α'_2 , ω'_2 и κ'_2 . После преобразований будем иметь

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \Delta\alpha &= \operatorname{tg} (\alpha'_2 - \alpha'_1) \cos \kappa'_1 + \frac{\sin \kappa'_1}{\cos (\alpha'_2 - \alpha'_1)} \operatorname{tg} \omega'_2 \\ \sin \Delta\omega &= \sin \omega'_2 \cos \kappa'_1 - \sin (\alpha'_2 - \alpha'_1) \sin \kappa'_1 \cos \omega'_2 \\ \operatorname{tg} \Delta\kappa &= \frac{\operatorname{tg} \kappa'_2 - \operatorname{tg} \kappa'_1 \left[\frac{\cos (\alpha'_2 - \alpha'_1)}{\cos \omega'_2} - \operatorname{tg} \omega'_2 \operatorname{tg} \kappa'_2 \sin (\alpha'_2 - \alpha'_1) \right]}{1 + \left[\frac{\operatorname{tg} \kappa'_2}{\cos \omega'_2} \cos (\alpha'_2 - \alpha'_1) + \operatorname{tg} \omega'_2 \sin (\alpha'_2 - \alpha'_1) \right] \operatorname{tg} \kappa'_1} \end{aligned} \right\} \quad (8.41)$$

Формулы (8.40) и (8.41), выражающие зависимость между двумя системами элементов взаимного ориентирования, строгие, они пригодны для любых значений элементов.

Если снимки плановые, то формулы (8.41) можно упростить и привести их к виду

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha &= \alpha'_2 - \alpha'_1 + \omega'_2 \kappa'_1 \\ \Delta\omega &= \omega'_2 - (\alpha'_2 - \alpha'_1) \kappa'_1 \\ \Delta\kappa &= \kappa'_2 - \kappa'_1 \end{aligned} \right\}. \quad (8.42)$$

§ 69. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ВЗАИМНОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ¹

Задача взаимного ориентирования снимков плоской местности имеет всегда однозначное решение. В горной местности может быть случай, когда решение этой задачи становится неоднозначным. Эта неоднозначность зависит от формы рельефа местности и заключается в том, что условие пересечения соответственных лучей перестает быть достаточным для определения взаимного положения снимков, существовавшего во время съемки. В этом случае форма геометрической модели местности искажается, и результаты измерения этой модели нельзя использовать для составления карты.

Форма местности, при которой возникает неоднозначность решения задачи взаимного ориентирования снимков, называется *опасным местом*.

Рассмотрим опасное место, имеющее большое практическое значение, — цилиндр. Для этого воспользуемся уравнением взаимного ориентирования (8.8).

Определяя элементы взаимного ориентирования, составляем систему уравнений (8.8) и решаем ее. Известно, что неопределенность возникает, когда общий определитель, составленный из коэффициентов при неизвестных, обращается в нуль. Это возможно, если элементы двух строк (столбцов) равны или пропорциональны.

Пусть элементы третьего столбца общего определителя пропорциональны элементам пятого столбца

$$\left(f + \frac{y_{1i}^2}{f} \right) : x_{21} = \left(f + \frac{y_{1i}^2}{f} \right) : x_{2i}.$$

Перейдем от величин f , x , y , относящихся к снимку, к соответствующим величинам H , X , Y на местности

$$\left(H_1 + \frac{Y_{1i}^2}{H_1} \right) : X_{21} = \left(H_i + \frac{Y_{1i}^2}{H_i} \right) : X_{2i}. \quad (8.43)$$

¹ По результатам исследований А. С. Скиридова и С. Финстервальдера.

Пусть $X_{2i} = X_{21}$, а точка I выбрана так, что $Y_{11} = 0$ (рис. 150). Тогда условие (8.43) примет вид

$$Y_{1i}^2 = H_1 H_i - H_1^2. \quad (8.44)$$

Это уравнение окружности. Координаты ее центра и радиус имеют следующие значения:

$$H = -\frac{1}{2} H_1, \quad Y = 0, \quad R = \frac{1}{2} H_1. \quad (8.45)$$

Уравнение (8.44) не содержит третьей координаты Z . Следовательно, окружность (8.44) представляет собой поперечное сечение

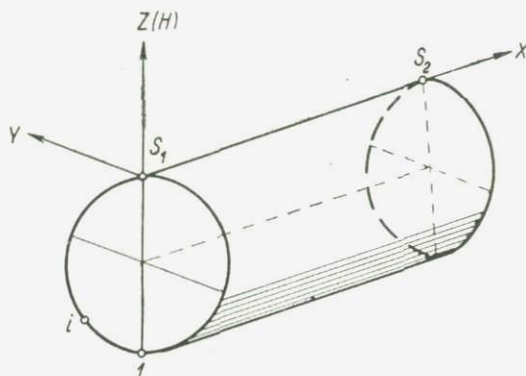


Рис. 150

кругового цилиндра, для которого базис фотографирования служит образующей.

Таким образом, если поверхность местности, изобразившейся на стереопаре, представляет собой цилиндр, а базис фотографирования совпадает с образующей этого цилиндра, то возникает неоднозначность *взаимного ориентирования* снимков.

На практике опасное место может быть при съемке долины, если ее фланги приподняты относительно середины на величину

$$h = H \sin^2 \varphi = H \frac{a^2}{f^2 + a^2}, \quad (8.46)$$

где a — координата y крайних точек, выбранных для взаимного ориентирования снимков (рис. 151).

Если местность сфотографирована камерой с нормальным углом зрения ($f = 200$ мм, $a = 70$ мм), то опасное место может возникнуть при $h = 0,1H$. При съемке широкоугольным аэрофотоаппаратом ($f = 100$ мм, $a = 70$ мм) опасному месту соответствует величина $h = 0,3H$.

Для сверхширокоугольной камеры ($f = 70$ мм, $a = 70$ мм) превышение h , вызывающее неопределенность, равно $0,5H$. Такие

превышения редко бывают в пределах стереопары. Значит, применение в фотограмметрии сверхширокоугольной оптики почти полностью исключает неопределенность взаимного ориентирования.

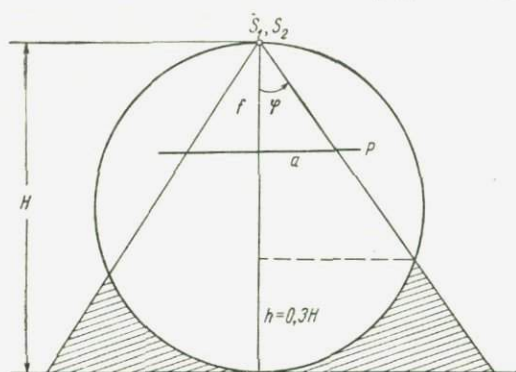


Рис. 151

Неопределенность взаимного ориентирования снимков исследовали Н. Г. Келль, А. С. Скиридов, Г. П. Жуков и Н. И. Соколов.

Н. И. Соколов показал, что точность определения элементов взаимного ориентирования уменьшается по мере приближения к опасному месту. В связи с этим он рекомендует при аналитическом

решении задачи вычислять величину общего определителя системы уравнений взаимного ориентирования. Если эта величина близка к единице, то результат решения уравнений вполне достоверный. Если же общий определитель меньше 0,2, то это означает, что точки стереомодели, выбранные для взаимного ориентирования, находятся на опасном месте или близко к нему.

§ 70. ВЗАИМНОЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ СНИМКОВ НА ПРИБОРЕ

На рис. 152 S_1 и S_2 — центры проектирования камер, в которые установлена пара снимков $P_1 - P_2$; изображения снимков получаются на экране E ; a_1 и a_2 — пара соответственных точек; $a_1 S_1$ и $a_2 S_2$ — соответственные лучи; a'_1 и a'_2 — изображения точек a_1 и a_2 .

Пусть выбранная пара соответственных лучей пересекается. Тогда, изменяя высоту экрана, можно установить его в такое положение, при котором точки a'_1 и a'_2 сольются в одну (рис. 152, а). Очевидно, это будет тогда, когда плоскость экрана пройдет через точку пересечения соответственных лучей.

Если соответственные лучи не пересекаются, то нет такого положения экрана, при котором точки a'_1 и a'_2 совпадут. В этом случае при любой установке экрана будем наблюдать две точки. Однако можно установить экран по высоте так, чтобы расстояние между точками a'_1 и a'_2 оказалось наименьшим из всех возможных расстояний между этими точками при различных положениях экрана (рис. 152, б).

Наименьшее расстояние между соответственными точками на экране называется *поперечным параллаксом* в пространстве модели.

Условимся обозначать эту величину через Q . Поперечные параллаксы Q направлены перпендикулярно к базису.

Итак, критерием пересечения соответственных лучей служит поперечный параллакс Q : лучи пересекаются, если параллакса нет, и наоборот.

Чтобы ориентировать снимки взаимно, достаточно движениями одной или обеих проектирующих камер устранить поперечные параллаксы Q на пяти точках, расположенных по возможности стандартно (см. рис. 147).

Поперечный параллакс нельзя устранить любым движением камеры. Так, в случае, представленном на рис. 152, б, невозможно

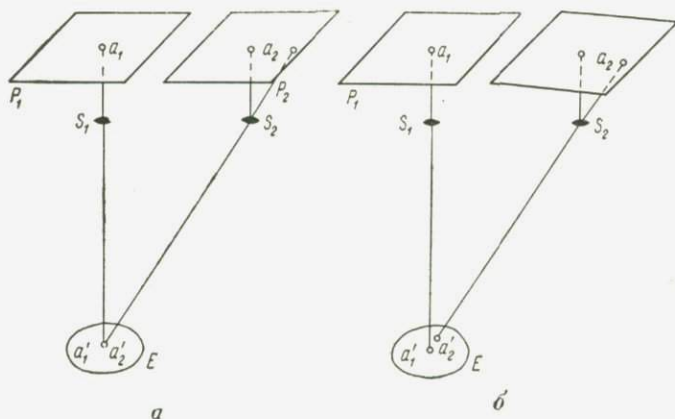


Рис. 152

ликвидировать параллакс поворотом κ левого снимка, так как этот поворот производится вокруг главного луча, на котором лежит выбранная точка. В этом случае параллакс можно устранить, например, поворотом правого снимка.

Оптимальная последовательность использования точек 1—5 и выбор движения камеры, которым следует устранять поперечный параллакс на каждой из этих точек, определяются в результате анализа уравнения взаимного ориентирования снимков.

Решим эти вопросы применительно к двум способам взаимного ориентирования: поворотами обеих проектирующих камер и движениями одной камеры.

Первый способ. Поперечные параллаксы уничтожаются поворотами α и κ левой проектирующей камеры и поворотами α , ω и κ правой камеры.

Пусть проектирующие камеры установлены так, что снимки горизонтальны и оси x находятся на одной прямой. Тогда при удалении центров проекции S_1 и S_2 от экрана E , равном фокусному расстоянию f , можно считать, что поперечный параллакс Q , наблюдаемый на какой-либо точке модели, равен соответствующему поперечному параллаксу q на стереопаре.

Используя уравнение взаимного ориентирования (8.8), напишем

$$q = -\frac{x_1 y_2}{f} \alpha'_1 + \frac{x_2 y_1}{f} \alpha'_2 + \left(f + \frac{y_1^2}{f}\right) \omega'_2 - x_1 \kappa'_1 + x_2 \kappa'_2. \quad (8.47)$$

Подсчитаем по этой формуле поперечные параллаксы, наблюдаемые на точках 1—5 в начале взаимного ориентирования (рис. 153). Учитывая координаты этих точек, получим

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= f\omega'_2 - b\kappa'_2 \\ q_2 &= f\omega'_2 - b\kappa'_1 \\ q_3 &= -\frac{ab}{f} \alpha'_2 + \left(f + \frac{a^2}{f}\right) \omega'_2 - b\kappa'_2 \\ q_4 &= -\frac{ab}{f} \alpha'_1 + \left(f + \frac{a^2}{f}\right) \omega'_2 - b\kappa'_1 \\ q_5 &= \frac{ab}{f} \alpha'_2 + \left(f + \frac{a^2}{f}\right) \omega'_2 - b\kappa'_2 \end{aligned} \right\} \quad (8.48)$$

Прежде чем устранять эти параллаксы, рассмотрим влияние поворотов α_1 , α_2 , ω_2 , κ_1 и κ_2 проектирующих камер на поперечные параллаксы точек 1—6. Пусть на всех точках $Q = 0$.

Повернем левый снимок вокруг главного луча на угол κ . Тогда каждая точка левого изображения, за исключением точки 1, сместится по дуге, радиус которой равен удалению точки от оси вращения снимка (рис. 154, а). В результате этого возникнут одинаковые поперечные параллаксы на точках 2, 4 и 6 (рис. 154, б). Поперечные параллаксы на точках 1, 3 и 5 останутся равными нулю. Поворот κ правого снимка вызывает поперечные параллаксы на точках 1, 3 и 5 и не изменяет их на точках 2, 4 и 6 (рис. 154, в).

Поворот α_1 преобразует квадрат в трапецию и, как следует из уравнений (8.5) и рис. 155, а, б, вызывает равные по абсолютной величине и противоположные по знаку поперечные параллаксы на точках 4 и 6. Аналогично действует и поворот α_2 в точках 3 и 5 (рис. 155, в).

Наконец, поворот ω_2 приводит к изменению поперечных параллаксков на всех точках модели¹ (рис. 156). В точках 1 и 2 действие этого поворота меньше, чем в других.

Теперь перейдем к уничтожению поперечных параллаксков (8.48). На точках 1 и 2 они зависят от двух элементов взаимного ориентирования, а на любой другой — от трех. Поэтому устранение параллаксков целесообразно начинать с точки 1 или 2. Опыт показывает, что параллаксы на этих точках вызваны в основном поворотами κ .

¹ В стереопроекторе и стереографу поворот ω_2 не вызывает поперечных параллаксков в точках 1 и 2.

Рис. 153

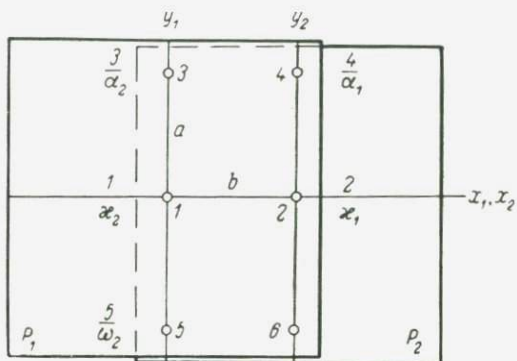


Рис. 154

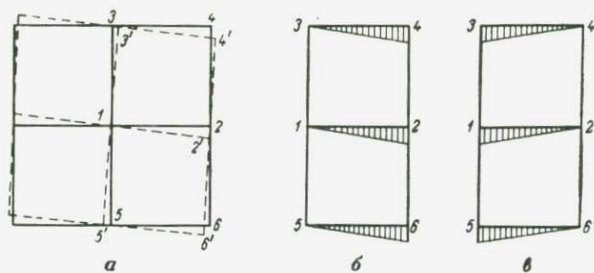


Рис. 155

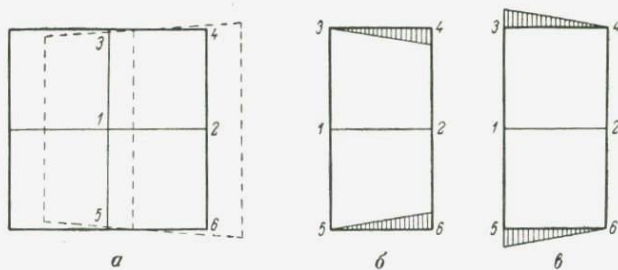
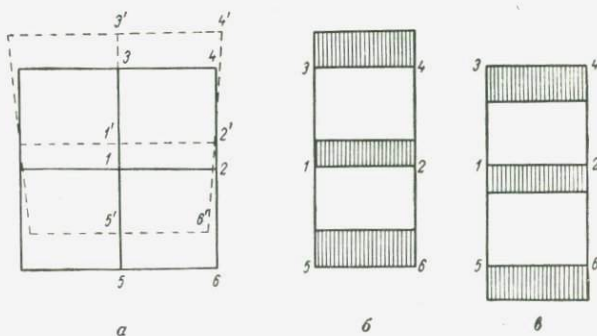


Рис. 156



Итак, в точках 1 и 2 параллаксы следует устранять поворотами снимков κ . Для устранения поперечного параллакса в каждой последующей точке выберем такой поворот, который по возможности не вызывает параллаксов на предыдущих точках.

Учитывая это, устраним поперечные параллаксы в такой последовательности:

1. На точке 1 — поворотом κ_2 . Тогда параллаксы на точках 3 и 5 изменятся на величину q_1 и вместо равенств (8.48) получим

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= 0 \\ q_2 &= f\omega'_2 - b\kappa'_1 \\ q_3 &= -\frac{ab}{f}\alpha'_2 + \frac{a^2}{f}\omega'_2 \\ q_4 &= -\frac{ab}{f}\alpha'_1 + \left(f + \frac{a^2}{f}\right)\omega'_2 - b\kappa'_1 \\ q_5 &= \frac{ab}{f}\alpha'_2 + \frac{a^2}{f}\omega'_2 \end{aligned} \right\} \quad (8.49)$$

2. На точке 2 — поворотом κ_1 . Это вызовет изменение параллакса на точке 4 на величину q_2 . Будем иметь

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= q_2 = 0 \\ q_3 &= -\frac{ab}{f}\alpha'_2 + \frac{a^2}{f}\omega'_2 \\ q_4 &= -\frac{ab}{f}\alpha'_1 + \frac{a^2}{f}\omega'_2 \\ q_5 &= \frac{ab}{f}\alpha'_2 + \frac{a^2}{f}\omega'_2 \end{aligned} \right\} \quad (8.50)$$

3. На точке 3 — поворотом α_2 . Тогда

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= q_2 = q_3 = 0 \\ q_4 &= -\frac{ab}{f}\alpha'_1 + \frac{a^2}{f}\omega'_2 \\ q_5 &= 2\frac{a^2}{f}\omega'_2 \end{aligned} \right\} \quad (8.51)$$

4. На точке 4 — поворотом α_1 . После этого останется параллакс только на точке 5

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= q_2 = q_3 = q_4 = 0 \\ q_5 &= 2\frac{a^2}{f}\omega'_2 \end{aligned} \right\} \quad (8.52)$$

5. На точке 5 — поворотом ω_2 .

Сравнивая выражения (8.52) и (8.48), видим, что после устранения параллаксов на точках 1—4 на точке 5 осталась только

часть поперечного параллакса, обусловленного влиянием элемента ω'_2 . Полное значение его согласно выражениям (8.48) равно

$$q'_5 = \left(f + \frac{a^2}{f} \right) \omega'_2.$$

Отношение поперечного параллакса точки 5, вызванного элементом ω_2 , к поперечному параллаксу, наблюдаемому в точке 5 после устранения параллаксов на точках 1—4, называется коэффициентом взаимного ориентирования,

$$c = \frac{f^2 + a}{2a^2}, \quad (8.53)$$

где f — фокусное расстояние съемочной камеры, a — ордината стандартно расположенных точек 3—6 на снимке (см. рис. 153).

Пусть $a = 70$ мм. Тогда для значений фокусного расстояния снимка, равных 200, 100 и 70 мм, коэффициент c соответственно равен 4,5; 1,5 и 1,0.

Поэтому наблюдая точку 5, будем действовать так: поворотом ω_2 уничтожим наблюдаемый параллакс, затем, продолжая поворачивать камеру в том же направлении, введем новый поперечный параллакс, равный устраненному, умноженному на коэффициент c .

В результате поворота ω_2 возникнут поперечные параллаксы на точках 1—5. Чтобы устранить их, необходимо повторить действия 1—5.

Изложенная выше последовательность взаимного ориентирования снимков первым способом указана на рис. 153. Заметим, что действия 3 и 4 можно выполнять на точках 5 и 6, если это более удобно для наблюдателя. В этом случае действие 5 производится на точках 3 и 4.

На практике поперечные параллаксы устраняют путем последовательных приближений, так как не всегда можно выбрать подходящие для наблюдений точки в полном соответствии со схемой, приведенной на рис. 153. Кроме того, углы наклона снимков и рельеф местности могут превышать те пределы, при которых приближенное уравнение (8.8) дает удовлетворительные результаты.

Точку 6 и другие точки стереопары используют как контрольные.

Для взаимного ориентирования снимков следует выбирать точки на резко очерченных контурах, например на пересечении дорог, границах пашни и т. д.

Формула (8.47), определяющая поперечный параллакс $q = Q$, получена для случая, когда удаление центров проекции S_1 и S_2 от экрана равно фокусному расстоянию f (см. рис. 152). Если это удаление будет $Z \neq f$, то поперечный параллакс

$$Q = Z \frac{q}{f}. \quad (8.54)$$

Второй способ. Поперечные параллаксы уничтожаются движениями b_Y , κ , b_Z , α и ω правой проектирующей камеры.

Установим камеры так, чтобы снимки были горизонтальными, а оси x их находились на одной прямой. Пусть расстояние от экрана до центров проекции S_1 и S_2 (см. рис. 152) равно фокусному расстоянию.

В этом случае можно считать, что поперечный параллакс, наблюдаемый в какой-либо точке модели, равен соответствующему поперечному параллаксу на стереопаре.

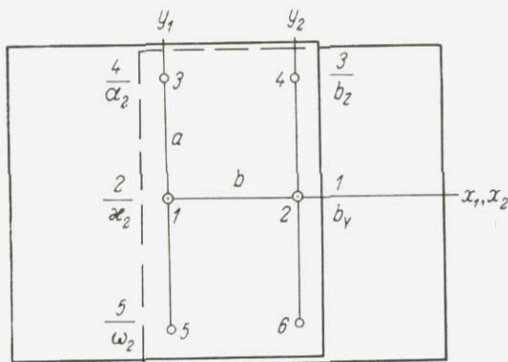


Рис. 157

Согласно уравнению (8.16)

$$q = p\tau' + \frac{y_1}{f} p\nu' + \frac{y_1}{f} x_2 \Delta\alpha + \left(f + \frac{y_1^2}{f}\right) \Delta\omega + x_2 \Delta\kappa. \quad (8.55)$$

По этой формуле найдем поперечные параллаксы на точках 1—5 (рис. 157), учитывая, что $\tau' \approx \frac{B_Y}{B} = \frac{b_Y}{b}$ и $\nu' \approx \frac{B_Y}{B} = \frac{b_Z}{b}$ (см. рис. 146):

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= b_Y + f \Delta\omega - b \Delta\kappa \\ q_2 &= b_Y + f \Delta\omega \\ q_3 &= b_Y + \frac{a}{f} b_Z - \frac{a}{f} b \Delta\alpha + \left(f + \frac{a^2}{f}\right) \Delta\omega - b \Delta\kappa \\ q_4 &= b_Y + \frac{a}{f} b_Z + \left(f + \frac{a^2}{f}\right) \Delta\omega \\ q_5 &= b_Y - \frac{a}{f} b_Z + \frac{a}{f} b \Delta\alpha + \left(f + \frac{a^2}{f}\right) \Delta\omega - b \Delta\kappa \end{aligned} \right\} \quad (8.56)$$

Элементам взаимного ориентирования τ' , ν' , $\Delta\alpha$, $\Delta\omega$ и $\Delta\kappa$ соответствуют движения b_Y , b_Z , α , ω и κ второй проектирующей камеры.

Влияние поворотов κ_2 , α_2 и ω_2 правого снимка на поперечные параллаксы Q показано на рис. 154, 155 и 156. Рассмотрим влияние движений b_Y и b_Z .

Согласно уравнению (8.55) смещение b_Y вызывает одинаковые параллаксы на всех точках модели, равные величине этого смещения (рис. 158). Из того же уравнения следует, что движение b_Z приводит к параллаксам, пропорциональным координате y (рис. 159).

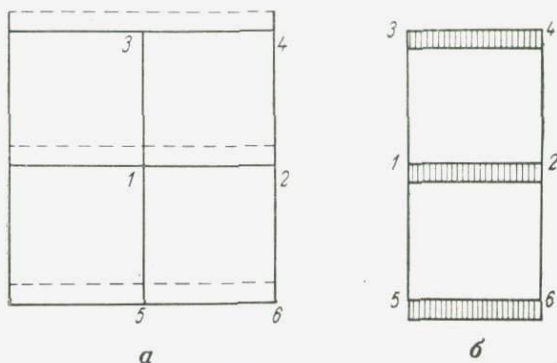


Рис. 158

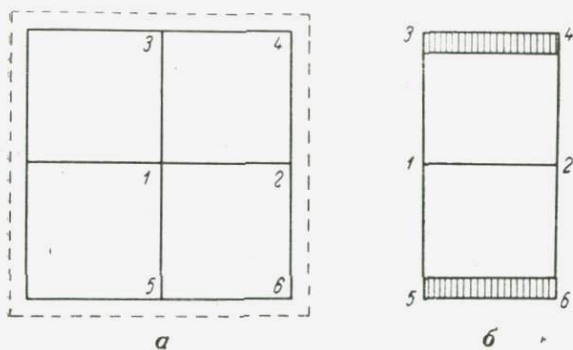


Рис. 159

Теперь перейдем к устранению поперечных параллакс на точках 1—5, выполняя при этом условия, предъявленные выше к определению последовательности взаимного ориентирования снимков первым способом.

1. На точке 2 — движением b_Y . В результате этого вместо параллакс (8.56) получим

$$\left. \begin{aligned}
 q_1 &= -b \Delta z \\
 q_2 &= 0 \\
 q_3 &= \frac{a}{f} b_Z - \frac{a}{f} b \Delta \alpha + \frac{a^2}{f} \Delta \omega - b \Delta z \\
 q_4 &= \frac{a}{f} b_Z + \frac{a^2}{f} \Delta \omega \\
 q_5 &= -\frac{a}{f} b_Z + \frac{a}{f} b \Delta \alpha + \frac{a^2}{f} \Delta \omega - b \Delta z
 \end{aligned} \right\} (8.57)$$

2. На точке 1 — поворотом α_2 . Тогда

$$\left. \begin{aligned} q_1 = q_2 = 0 \\ q_3 = \frac{a}{f} b_Z - \frac{a}{f} b \Delta\alpha + \frac{a^2}{f} \Delta\omega \\ q_4 = \frac{a}{f} b_Z + \frac{a^2}{f} \Delta\omega \\ q_5 = -\frac{a}{f} b_Z + \frac{a}{f} b \Delta\alpha + \frac{a^2}{f} \Delta\omega \end{aligned} \right\} \quad (8.58)$$

3. На точке 4 — движением b_Z

$$\left. \begin{aligned} q_1 = q_2 = q_4 = 0 \\ q_3 = -\frac{a}{f} b \Delta\alpha \\ q_5 = \frac{a}{f} b \Delta\alpha + 2 \frac{a^2}{f} \Delta\omega \end{aligned} \right\} \quad (8.59)$$

4. На точке 3 — поворотом α_2

$$\left. \begin{aligned} q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = 0 \\ q_5 = 2 \frac{a^2}{f} \Delta\omega \end{aligned} \right\} \quad (8.60)$$

Сравнивая коэффициенты при $\Delta\omega$ в выражениях (8.60) и (8.56) для q_5 , найдем, что коэффициент взаимного ориентирования c для второго способа имеет то же значение, что и для первого, и определяется формулой (8.53).

5. На точке 5 — поворотом ω_2 устраняем поперечный параллакс и, продолжая вращение снимка в том же направлении, вводим новый параллакс, равный уничтоженному, увеличенному в c раз. В результате этого возникнут поперечные параллаксы и на точках 1—4. Чтобы устранить эти параллаксы, нужно повторить действия 1—5 (см. рис. 157).

Взаимное ориентирование снимков вторым способом выполняют путем последовательных приближений. Точку 6 и другие используют для контроля.

Остаточный поперечный параллакс на точке 6 не должен превышать установленного допуска.

Найдем среднее квадратическое значение поперечного параллакса на точке 6. Для этого используем формулу (8.55). В соответствии с теорией ошибок напишем

$$m_{q_6}^2 = b^2 m_{\tau'}^2 + \left(f + \frac{a^2}{f} \right)^2 m_{\Delta\omega}^2.$$

Подставим сюда значения $m_{\tau'}$ и $m_{\Delta\omega}$ из (8.38). Получим

$$m_{q_6} = m_q \sqrt{1.5k^4 + 1.5k^2 + 1.75}, \quad (8.61)$$

где $k = \frac{f}{a}$, а m_q — средняя квадратическая погрешность измерения (устранения) поперечного параллакса q .

Пусть $a = 70$ мм, а величина f равна 200, 100 и 70 мм. Тогда по формуле (8.61) найдем такие значения m_{q_s} : $11 m_q$, $3,3 m_q$ и $2,2 m_q$.

Параллакс (8.61) относится к снимкам. Согласно (8.54) в пространстве модели этому соответствует

$$m_{Q_s} = Z \frac{m_{q_s}}{f}. \quad (8.62)$$

Предельное значение остаточного поперечного параллакса на точке b не должно превышать утроенного среднего квадратического.

Остаточный поперечный параллакс, наблюдаемый на точке b , обычно распределяют на остальные точки.

Г. П. Жуков рекомендует распределять этот параллакс на точки $3-6$ так, чтобы точки 1 и 2 были свободны от поперечных параллаксов.

М. Н. Ютанов разработал инструментально-аналитическое решение задачи взаимного ориентирования снимков. Сущность его состоит в следующем. Пару снимков ориентируют взаимно изложенным выше первым или вторым способом, не добиваясь точного устранения поперечных параллаксов. Выполняют только первое приближение. Затем измеряют поперечные параллаксы Q на точках $1-6$ модели и по формуле (8.54) приводят их к параллаксам q на снимках. Приведенные параллаксы используют для вычисления по формулам (8.30) или (8.37) поправок к первому приближению элементов взаимного ориентирования. Эти поправки устанавливают по соответствующим шкалам прибора, изменяя положение проектирующих камер.

Такое решение обеспечивает уравнивание поперечных параллаксов в соответствии со способом наименьших квадратов и поэтому повышает точность ориентирования снимков.

§ 71. ЭЛЕМЕНТЫ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ МОДЕЛИ

Модель, полученная в результате взаимного ориентирования снимков, имеет произвольный масштаб и произвольно расположена в пространстве. Дальнейшей задачей является внешнее ориентирование модели, которое состоит в приведении ее к заданному масштабу и в установке относительно геодезической системы координат.

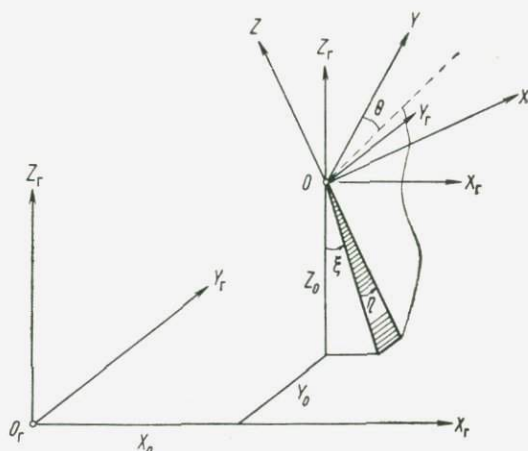


Рис. 160

В данной главе рассмотрим два способа внешнего ориентирования модели: *аналитический* и *инструментальный* на универсальном стереопроборе.

При аналитическом решении задачи сначала определяют элементы внешнего ориентирования модели, а затем от фотограмметрических координат точек модели переходят к геодезическим. На приборе сначала тоже определяют элементы внешнего ориентирования модели, а затем по этим элементам устанавливают модель относительно планшета.

На рис. 160 представлены фотограмметрическая система координат $OXYZ$, в которой определено положение точек модели, и геодезическая $O_r X_r Y_r Z_r$. Проведем из начала фотограмметрических координат линии, параллельные осям X_r , Y_r и Z_r .

Элементами внешнего ориентирования модели называются величины, определяющие масштаб модели и положение ее отно-

сительно геодезической системы координат. К ним относятся:

- t — знаменатель масштаба модели,
- X_0, Y_0, Z_0 — геодезические координаты начала фотограмметрической системы координат,
- ξ — продольный угол наклона модели, составленный проекцией оси Z на плоскость $X_r Z_r$ и осью Z_r ,
- η — поперечный угол наклона модели, заключенный между осью Z и ее проекцией на плоскость $X_r Z_r$,
- θ — угол поворота модели, находящийся в плоскости XU между осью Y и следом плоскости ZY_r .

Итак, внешнее ориентирование модели определяется семью элементами. Чтобы найти эти элементы, нужно иметь не менее трех опорных точек.

§ 72. АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ МОДЕЛИ

Если известны элементы внешнего ориентирования модели, то геодезические координаты какой-либо точки местности, изобразившейся на этой модели, можно найти по формулам

$$\left. \begin{aligned} X_r &= X_0 + \Delta X_r = X_0 + (a_1 X + a_2 Y + a_3 Z) t \\ Y_r &= Y_0 + \Delta Y_r = Y_0 + (b_1 X + b_2 Y + b_3 Z) t \\ Z_r &= Z_0 + \Delta Z_r = Z_0 + (c_1 X + c_2 Y + c_3 Z) t \end{aligned} \right\}, \quad (9.1)$$

где X_0, Y_0, Z_0 — геодезические координаты начала O системы фотограмметрических координат (см. рис. 160), $\Delta X_r, \Delta Y_r, \Delta Z_r$ — приращения геодезических координат определяемой точки относительно точки O ,

X, Y, Z — фотограмметрические координаты точки модели,

t — знаменатель масштаба модели,

a_i, b_i, c_i — направляющие косинусы.

Направляющие косинусы зависят от угловых элементов внешнего ориентирования модели ξ, η и θ . Так как эти углы аналогичны элементам внешнего ориентирования снимка α, ω и χ , то согласно формулам (1.15) напишем

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \cos \xi \cos \theta - \sin \xi \sin \eta \sin \theta \\ a_2 &= -\cos \xi \sin \theta - \sin \xi \sin \eta \cos \theta \\ a_3 &= -\sin \xi \cos \eta \\ b_1 &= \cos \eta \sin \theta \\ b_2 &= \cos \eta \cos \theta \\ b_3 &= -\sin \eta \\ c_1 &= \sin \xi \cos \theta + \cos \xi \sin \eta \sin \theta \\ c_2 &= -\sin \xi \sin \theta + \cos \xi \sin \eta \cos \theta \\ c_3 &= \cos \xi \cos \eta \end{aligned} \right\}. \quad (9.2)$$

Теперь допустим, что известны приближенные значения элементов внешнего ориентирования модели. Обозначим их так:

$$X'_0, Y'_0, Z'_0, \xi', \eta', \theta', t'.$$

Найдем поправки к этим величинам

$$\delta X_0, \delta Y_0, \delta Z_0, \delta \xi, \delta \eta, \delta \theta, \delta t.$$

В этом случае вместо (9.1) можно написать

$$\left. \begin{aligned} X_\Gamma &= X'_0 + \Delta X'_\Gamma + \frac{\partial X_\Gamma}{\partial X_0} \delta X_0 + \frac{\partial X_\Gamma}{\partial \xi} \delta \xi + \frac{\partial X_\Gamma}{\partial \eta} \delta \eta + \frac{\partial X_\Gamma}{\partial \theta} \delta \theta + \frac{\partial X_\Gamma}{\partial t} \delta t \\ Y_\Gamma &= Y'_0 + \Delta Y'_\Gamma + \frac{\partial Y_\Gamma}{\partial Y_0} \delta Y_0 + \frac{\partial Y_\Gamma}{\partial \xi} \delta \xi + \frac{\partial Y_\Gamma}{\partial \eta} \delta \eta + \frac{\partial Y_\Gamma}{\partial \theta} \delta \theta + \frac{\partial Y_\Gamma}{\partial t} \delta t \\ Z_\Gamma &= Z'_0 + \Delta Z'_\Gamma + \frac{\partial Z_\Gamma}{\partial Z_0} \delta Z_0 + \frac{\partial Z_\Gamma}{\partial \xi} \delta \xi + \frac{\partial Z_\Gamma}{\partial \eta} \delta \eta + \frac{\partial Z_\Gamma}{\partial \theta} \delta \theta + \frac{\partial Z_\Gamma}{\partial t} \delta t \end{aligned} \right\}, \quad (9.3)$$

здесь $\Delta X'_\Gamma$, $\Delta Y'_\Gamma$ и $\Delta Z'_\Gamma$ — приращения геодезических координат, вычисленные по приближенным значениям элементов внешнего ориентирования модели.

Найдем частные производные. Согласно (9.1) и (9.2)

$$a_X = \frac{\partial X_\Gamma}{\partial X_0} = 1, \quad b_Y = \frac{\partial Y_\Gamma}{\partial Y_0} = 1, \quad c_Z = \frac{\partial Z_\Gamma}{\partial Z_0} = 1,$$

$$d_X = \frac{\partial X_\Gamma}{\partial \xi} = (-\sin \xi \cos \theta - \cos \xi \sin \eta \sin \theta) X t +$$

$$+ (\sin \xi \sin \theta - \cos \xi \sin \eta \cos \theta) Y t + (-\cos \xi \cos \eta) Z t = -\Delta Z'_\Gamma.$$

Аналогично вычислим остальные частные производные. В результате получим

$$a_X = \frac{\partial X_\Gamma}{\partial X_0} = 1$$

$$b_Y = \frac{\partial Y_\Gamma}{\partial Y_0} = 1$$

$$c_Z = \frac{\partial Z_\Gamma}{\partial Z_0} = 1$$

$$d_X = \frac{\partial X_\Gamma}{\partial \xi} = -\Delta Z'_\Gamma$$

$$e_X = \frac{\partial X_\Gamma}{\partial \eta} = -\Delta Y'_\Gamma \sin \xi$$

$$f_X = \frac{\partial X_\Gamma}{\partial \theta} = (a_2 X - a_1 Y) t$$

$$g_X = \frac{\partial X_\Gamma}{\partial t} = \Delta X'_\Gamma$$

$$d_Y = \frac{\partial Y_\Gamma}{\partial \xi} = 0$$

(9.4)

$$\left. \begin{aligned}
 e_Y &= \frac{\partial Y_\Gamma}{\partial \eta} = -\Delta Y'_\Gamma \operatorname{tg} \eta - \frac{1}{\cos \eta} Z t \\
 f_Y &= \frac{\partial Y_\Gamma}{\partial \theta} = (b_2 X - b_1 Y) t \\
 g_Y &= \frac{\partial Y_\Gamma}{\partial t} = \Delta Y'_\Gamma \\
 d_Z &= \frac{\partial Z_\Gamma}{\partial \xi} = \Delta X'_\Gamma \\
 e_Z &= \frac{\partial Z_\Gamma}{\partial \eta} = \Delta Y'_\Gamma \cos \xi \\
 f_Z &= \frac{\partial Z_\Gamma}{\partial \theta} = (c_2 X - c_1 Y) t \\
 g_Z &= \frac{\partial Z_\Gamma}{\partial t} = \Delta Z'_\Gamma
 \end{aligned} \right\}$$

Теперь напомним уравнения поправок

$$\left. \begin{aligned}
 a_X \delta X_0 + d_X \delta \xi + e_X \delta \eta + f_X \delta \theta + g_X \delta t + l_X &= v_X \\
 b_Y \delta Y_0 + d_Y \delta \xi + e_Y \delta \eta + f_Y \delta \theta + g_Y \delta t + l_Y &= v_Y \\
 c_Z \delta Z_0 + d_Z \delta \xi + e_Z \delta \eta + f_Z \delta \theta + g_Z \delta t + l_Z &= v_Z
 \end{aligned} \right\}, \quad (9.5)$$

где

$$\left. \begin{aligned}
 l_X &= X'_0 + \Delta X'_\Gamma - X_\Gamma \\
 l_Y &= Y'_0 + \Delta Y'_\Gamma - Y_\Gamma \\
 l_Z &= Z'_0 + \Delta Z'_\Gamma - Z_\Gamma
 \end{aligned} \right\}. \quad (9.6)$$

Одна опорная точка позволяет составить три уравнения (9.5) с семью неизвестными. Следовательно, для внешнего ориентирования модели необходимо иметь не менее трех опорных точек. Две из них должны быть определены в плане и по высоте, а для третьей достаточно найти только высоту. Тогда по формулам (9.5) можно составить семь уравнений, в результате решения которых найдем неизвестные.

Пусть число точек больше необходимого. Тогда уравнений (9.5) будет больше количества неизвестных. В этом случае задачу можно решить по способу наименьших квадратов с оценкой точности определения неизвестных.

Составим уравнения (9.5) для каждой опорной точки. Для этого по приближенным значениям угловых элементов внешнего ориентирования модели ξ , η и θ (начальное приближение) вычислим направляющие косинусы, применив формулы (9.2). Затем в соответствии с (9.1) получим приращения геодезических координат $\Delta X'_\Gamma$, $\Delta Y'_\Gamma$ и $\Delta Z'_\Gamma$ для опорных точек и найдем коэффициенты по формулам (9.4), а также свободные члены (9.6). Наконец, напомним уравнения поправок (9.5).

Уравнения решим путем последовательных приближений под условием $[pv^2] = \min$. От уравнений поправок перейдем к нор-

мальным уравнениям, после решения которых получим поправки к начальному приближению неизвестных. Введя эти поправки, найдем первое приближение неизвестных. Используя это приближение, вновь вычислим направляющие косинусы, приращения геодезических координат, коэффициенты и свободные члены, составим уравнения поправок и нормальные уравнения и т. д. до тех пор, пока поправками к неизвестным можно будет пренебречь.

После определения элементов внешнего ориентирования модели перейдем по формулам (9.1) от фотограмметрических координат точек модели к геодезическим координатам соответствующих точек местности.

Если положение опорных точек определено в системе координат Гаусса, то в полученные выше формулы вместо X_r и Y_r подставляются Y_r и X_r соответственно. Такая замена необходима потому, что фотограмметрическая система координат правая, а система координат Гаусса левая.

Изложенный выше способ можно применять при любых значениях элементов внешнего ориентирования модели.

Рассмотрим частный случай, когда элементы ξ , η и θ малы, а t близко к единице. В этом случае за начальное приближение можно принять: $\xi = \eta = \theta = 0$, $t = 1$. Тогда согласно (9.2) направляющие косинусы $a_1 = b_2 = c_3 = 1$, а остальные равны нулю. Учитывая это, подсчитаем по формулам (9.4) и (9.6) значения коэффициентов и свободных членов, а затем составим уравнения поправок

$$\left. \begin{aligned} \delta X_0 - Z\xi - Y\theta + X\delta t + l_X &= v_X \\ \delta Y_0 - Z\eta + X\theta + Y\delta t + l_Y &= v_Y \\ \delta Z_0 + X\xi + Y\eta + Z\delta t + l_Z &= v_Z \end{aligned} \right\}, \quad (9.7)$$

где

$$\left. \begin{aligned} l_X &= X'_0 + X - X_r \\ l_Y &= Y'_0 + Y - Y_r \\ l_Z &= Z'_0 + Z - Z_r \end{aligned} \right\}. \quad (9.8)$$

Формулы (9.5) и (9.7) можно использовать и для подсчета ошибок, найденных по снимкам геодезических координат точек местности, вызванных погрешностями определения элементов внешнего ориентирования модели. Для этого вместо элементов или поправок к ним в данные уравнения следует подставить погрешности их и считать, что $v_X = v_Y = v_Z = 0$, а l_X , l_Y и l_Z — искомые ошибки.

§ 73. ВНЕШНЕЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ НА ПРИБОРЕ

Внешнее ориентирование модели на приборе выполняют обычно по четырем опорным точкам, причем четвертая используется для контроля.

Выбирая опорные точки, необходимо учитывать, что точность ориентирования модели выше, если точки расположены ближе к углам стереопары (рис. 161).

Внешнее ориентирование модели на приборе, например на мультитуплексе, выполняют в таком порядке:

- 1) наносят опорные точки на планшет,
- 2) определяют масштаб модели,
- 3) приводят модель к заданному масштабу,
- 4) устанавливают модель в горизонтальное положение и ориентируют ее относительно планшета.

1. Опорные точки наносят на планшет по их геодезическим координатам в масштабе $1 : t_n$.

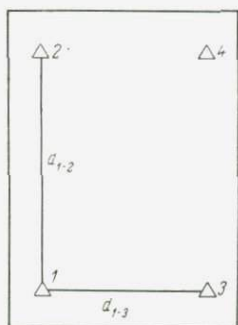


Рис. 161

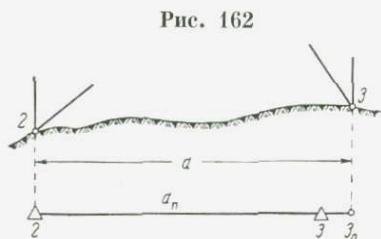


Рис. 162

2. Для определения масштаба модели находят масштабный коэффициент:

$$\lambda = \frac{d}{a_n}, \quad (9.9)$$

где d_n — расстояние между опорными точками на планшете, d — проекция на планшете расстояния между соответствующими опорными точками на модели (рис. 162).

Масштабный коэффициент показывает, во сколько раз масштаб модели крупнее масштаба $1 : t_n$, в котором нанесены опорные точки на планшет. Его определяют не менее двух раз по наиболее удаленным друг от друга точкам, например по точкам 1—4 и 2—3 (см. рис. 161). Из двух значений коэффициента берут среднее, по которому находят масштаб модели

$$\frac{1}{t} = \frac{\lambda}{t_n}. \quad (9.10)$$

3. Масштаб модели зависит, как известно, от базиса проектирования, т. е. от расстояния между центрами проекции левой и правой связок в приборе. Поэтому для установки заданного масштаба модели $1 : t_n$ нужно изменить базис или его составля-

ющие b_X , b_Y и b_Z . Новые составляющие базиса вычисляют по формулам

$$b'_X = \frac{b_X}{\lambda}, \quad b'_Y = \frac{b_Y}{\lambda}, \quad b'_Z = \frac{b_Z}{\lambda} \quad (9.11)$$

и устанавливают их по шкалам.

Обычно изменяют только составляющую b_X , так как b_Y и b_Z малы.

Для контроля приведения модели к заданному масштабу вновь определяют масштабный коэффициент и масштаб модели.

4. Одну из опорных точек, например точку I , принимают за начальную и находят превышения остальных опорных точек над начальной в масштабе модели

$$h = \frac{1}{l} (Z_T - Z_{T1}). \quad (9.12)$$

Затем устанавливают модель в горизонтальное положение и ориентируют ее относительно планшета одним из следующих трех приемов:

а. С помощью ориентирных столиков. Столики центрируют над опорными точками, нанесенными на планшет. Марку столика, установленного над точкой I , размещают произвольно по высоте, а марки остальных столиков — в соответствии с вычисленными превышениями h . После этого изменяют положение штанги, несущей проекторы, а также планшета на экране и, действуя подъемными винтами, совмещают опорные точки модели с соответствующими марками ориентирных столиков.

б. С помощью измерительного столика. Марку измерительного столика последовательно наводят на опорные точки $I-4$ модели и отсчитывают по шкале высот. По отсчетам h' вычисляют превышения опорных точек $2-4$ модели над точкой I :

$$h_n = h' - h'_1. \quad (9.13)$$

Сравнивая эти превышения с вычисленными, находят высотные невязки

$$\delta h = h_n - h, \quad (9.14)$$

а по ним — углы наклона модели

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{\delta h_3}{d_{1-3}} = \frac{\delta h_4 - \delta h_2}{d_{2-4}} \\ \eta &= \frac{\delta h_2}{d_{1-3}} = \frac{\delta h_4 - \delta h_3}{d_{3-4}} \end{aligned} \right\}, \quad (9.15)$$

где d — расстояния между опорными точками на планшете. Зная эти углы, приводят модель в горизонтальное положение с помощью уровня и подъемных винтов. Затем устанавливают планшет на экране так, чтобы проекции опорных точек модели совпали с соответствующими опорными точками на планшете.

в. Третий прием используется обычно при обучении, когда на многопроекторном мультиплексе одновременно работают несколько наблюдателей. В этом случае углы наклона модели находят по формулам (9.15), а приведение модели в горизонтальное положение выполняют движениями обеих проектирующих камер относительно неподвижной общей штанги.

Наводят марку измерительного столика на контурную точку в середине модели и, действуя поворотами ω проектирующих камер, смещают эту точку на экране столика на величину

$$\Delta = Z\eta, \quad (9.16)$$

где Z — расстояние от центра проекции до экрана измерительного столика. При этом смещение должно быть направлено к наблюдателю, если угол η положительный.

Подсчитывают смещение правой камеры по высоте

$$\delta b_z = b\xi \quad (9.17)$$

и изменяют на эту величину отсчет по шкале b_z правого проектора. Если угол ξ положительный, то правую камеру опускают.

Затем устраняют поперечные параллаксы на точках 3 и 4 или 5 и 6 поворотами α_2 и α_1 (см. рис. 153). Контролируют взаимное ориентирование снимков, а также приведение модели к масштабу и в горизонтальное положение. Наконец, устанавливают планшет на экране так, чтобы проекции опорных точек модели совпали с соответствующими опорными точками на планшете.

Внешнее ориентирование модели на мультиплексе отличается наибольшей наглядностью. Аналогично ориентируют модель и на других универсальных стереоприборах. Некоторые особенности внешнего ориентирования модели в стереопроекторе рассмотрены в гл. II.

**ОРИЕНТИРОВАНИЕ СНИМКОВ
С ПРЕОБРАЗОВАННЫМИ СВЯЗКАМИ****§ 74. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Выше были изложены теория и основные вопросы практики ориентирования снимков на мультиплексе, двойном проекторе, стереопланиграфе и других универсальных стереоприборах, в основу которых положен принцип восстановления связей проектирующих лучей, существовавших во время фотографирования.

Согласно этому принципу фокусное расстояние проектирующей камеры должно быть равно фокусному расстоянию снимка. Отсюда следует, что для обработки снимков с различными фокусными расстояниями стереоприбор должен иметь несколько комплектов проектирующих камер. Например, стереопланиграф снабжен двумя комплектами проектирующих камер для обработки снимков с фокусными расстояниями 100 и 200 мм. Снимки с фокусными расстояниями, значительно отличающимися от 100 и 200 мм нельзя обрабатывать на этом приборе с подобными связками.

Недостатки принципа восстановления связей стали более заметны, когда появилась сверхширокоугольная аэросъемочная оптика — объективы с фокусными расстояниями 70 и 55 мм и полем зрения больше 100° , созданные М. М. Русиновым. Возникли значительные трудности при разработке основанных на принципе восстановления связей стереоприборов для составления карт по сверхширокоугольным снимкам.

Необходимо было создать новые методы стереофотограмметрической обработки снимков, позволяющие нарушать связи проектирующих лучей, существовавшие во время фотографирования. Эта проблема успешно решена советскими учеными, разработавшими теорию ориентирования снимков с преобразованными связками, из которой принцип восстановления связей проектирующих лучей вытекает как частный случай.

Первые капитальные исследования по стереофотограмметрической обработке снимков с преобразованными связками выполнены М. Д. Коншиным. Теоретические и экспериментальные работы в этой области были продолжены Ф. В. Дробышевым, А. Н. Лобановым, Г. В. Романовским, Г. П. Жуковым, Н. П. Лавровым, В. Я. Финковским и др.

На основе общей теории стереофотограмметрии созданы оригинальные методы и новые универсальные приборы, позволяющие обрабатывать снимки с преобразованными связками при любых значениях фокусного расстояния. К таким приборам относятся

стереоскопический рисовальный прибор М. Д. Коншина, фотокартограф Ф. В. Дробышева, полевой стереопланиграф А. Н. Лобанова, стереопроектор Г. В. Романовского, стереограф Ф. В. Дробышева и стереопреобразователь В. Я. Финковского. Широкое применение на практике получили стереограф и стереопроектор.

Кроме того, общая теория стереофотограмметрии позволила расширить область применения стереопланиграфа, мультиштекса, автографа и других универсальных приборов, изготовленных для обработки снимков с подобными связками. В результате исследований предложены методы пространственной фототриангуляции и составления карты на этих приборах, основанные на преобразовании связок.

Из зарубежных работ, посвященных данной проблеме, можно отметить статьи Б. Богоноса, О. Гофмана и Р. Финстервальдера.

§ 75. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ПО ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ СНИМКАМ

Построить модель по преобразованным связкам можно очень просто, если снимки горизонтальные.

Пусть P_1 и P_2 — пара горизонтальных снимков, полученных с одной и той же высоты (рис. 163), S_1 и S_2 — центры проекции, f — фокусное расстояние снимков.

Допустим, что снимки взаимно ориентированы и фокусное расстояние проектирующих камер равно f . Тогда любая пара соответственных лучей будет пересекаться и получим модель, подобную местности. Точки a и d принадлежат этой модели.

Теперь изменим фокусное расстояние проектирующих камер, переместив снимки вдоль главных лучей в положения \bar{P}_1 и \bar{P}_2 ($\bar{f} \neq f$). В результате этого связки будут преобразованы. Однако каждая пара соответственных лучей преобразованных связок будет пересекаться, так как находится в одной базисной плоскости.

Геометрическое место пересечений соответственных лучей преобразованных связок называется *преобразованной моделью*. Точки \bar{a} и \bar{d} принадлежат этой модели.

Рассмотрим свойства преобразованной модели.

Координаты точки подобной модели найдем по формулам (7.8)

$$X = B \frac{x_1}{p}, \quad Y = B \frac{y_1}{p}, \quad Z = -B \frac{f}{p}.$$

Координаты соответствующей точки преобразованной модели получим тоже по этим формулам, подставив в них вместо f преобразованное значение фокусного расстояния камеры \bar{f} ,

$$\bar{X} = B \frac{x_1}{p}, \quad \bar{Y} = B \frac{y_1}{p}, \quad \bar{Z} = -B \frac{\bar{f}}{p}. \quad (10.1)$$

Сравнивая эти выражения с формулами (7.8), видим, что преобразованная модель деформируется по направлению оси Z : если $\frac{\bar{f}}{f} > 1$, то она вытягивается, если $\frac{\bar{f}}{f} < 1$, то модель сжимается.

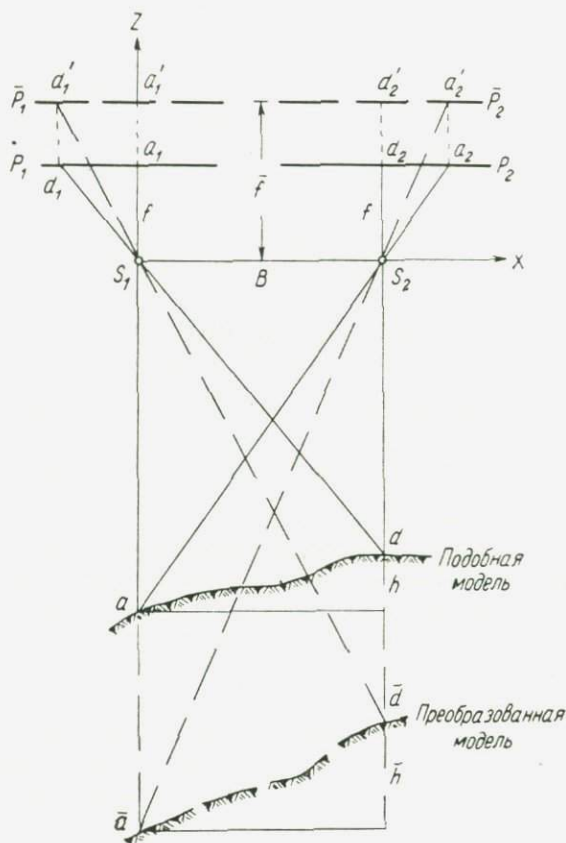


Рис. 163

Отношение фокусного расстояния проектирующей камеры к фокусному расстоянию снимка называется *коэффициентом преобразования связи*:

$$k = \frac{\bar{f}}{f}. \quad (10.2)$$

Если горизонтальный масштаб преобразованной модели обозначить через $1 : t_r$, то вертикальный масштаб ее

$$\frac{1}{t_B} = k \frac{1}{t_r}. \quad (10.3)$$

Пусть h — разность высот двух точек подобной модели. Соответствующая разность высот на преобразованной модели

$$\bar{h} = kh. \quad (10.4)$$

Если снимки P_1 и P_2 получены с разных высот, то координаты точки подобной модели можно найти по формулам (7.6) и (7.7)

$$N = \frac{Z_0 X'_2 - X_0 Z'_2}{Z'_1 X'_2 - X'_1 Z'_2} = \frac{B_Z x_2 + B_X f}{-f x_2 + f x_1},$$

$$\left. \begin{aligned} X &= N X'_1 = B_X \frac{x_1}{p} + \frac{x_1 x_2}{f p} B_Z \\ Y &= N Y'_1 = B_X \frac{y_1}{p} + \frac{x_1 y_1}{f p} B_Z \\ Z &= N Z'_1 = -B_X \frac{f}{p} - \frac{x_2}{p} B_Z \end{aligned} \right\} \quad (10.5)$$

Заменив в этих выражениях f на \bar{f} и B_Z на \bar{B}_Z , получим координаты соответствующей точки преобразованной модели

$$\left. \begin{aligned} \bar{X} &= B_X \frac{x_1}{p} + \frac{x_1 x_2}{f p} \bar{B}_Z \\ \bar{Y} &= B_X \frac{y_1}{p} + \frac{x_1 y_1}{f p} \bar{B}_Z \\ \bar{Z} &= -B_X \frac{\bar{f}}{p} - \frac{x_2}{p} \bar{B}_Z \end{aligned} \right\} \quad (10.6)$$

Сравнивая выражения (10.6) и (10.5), видим, что соотношения (10.1) между координатами соответственных точек преобразованной и подобной моделей остаются в силе и для данного случая при условии, если

$$\bar{B}_Z = \frac{\bar{f}}{f} B_Z = k B_Z. \quad (10.7)$$

§ 76. ТЕОРИЯ ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ ПАРЫ СНИМКОВ

Наклонные снимки можно привести к горизонтальным путем трансформирования, а затем по горизонтальным снимкам построить модель местности способом, изложенным в предыдущем параграфе.

Для составления фотопланов трансформируют, как известно, отдельно каждый снимок с помощью фототрансформатора. Для стереофотограмметрической съемки такой способ трансформирования снимков непригоден, так как точность его невысокая.

В универсальном стереоприборе можно достаточно точно одновременно трансформировать пару снимков, т. е. получить

пару трансформированных изображений и использовать их для составления карты или для пространственной фототриангуляции.

Пусть пара наклонных снимков установлена в проектирующие камеры, фокусное расстояние которых не равно фокусному расстоянию снимков (рис. 164).

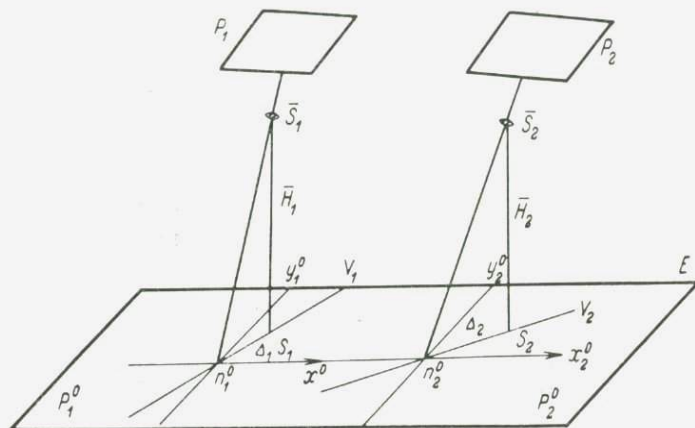


Рис. 164

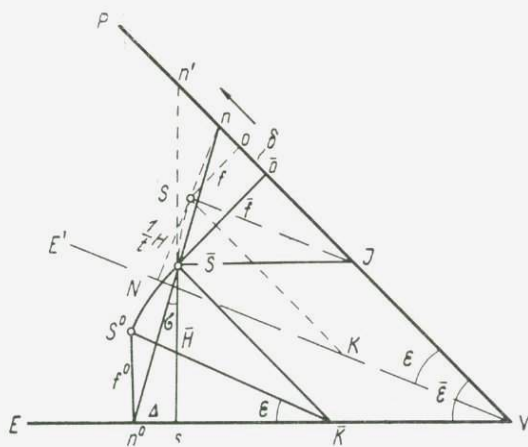


Рис. 165

Получим в плоскости экрана E изображения стереопары, соответствующие горизонтальным снимкам. Таким образом, требуется решить задачу трансформирования пары снимков с преобразованными связками.

Как известно из теории трансформирования одиночного снимка, в этом случае должны быть выполнены следующие геометрические условия (рис. 165):

1) центр проекции \bar{S} преобразованной связки должен находиться на дуге, описанной в плоскости главного вертикала SoJ из главной точки схода J радиусом

$$JS = \frac{f}{\sin \varepsilon},$$

где S — центр проекции подобной связки, а ε — угол наклона снимка в момент фотографирования;

2) плоскость экрана E должна быть перпендикулярна к плоскости главного вертикала и параллельна прямой $\bar{S}J$, соединяющей главную точку схода с центром проекции преобразованной связки; при этом

$$SK = \frac{1}{t} \frac{H}{\sin \varepsilon},$$

где H — высота фотографирования, $1 : t$ масштаб трансформированного изображения.

Величины $JS = \bar{J}\bar{S}$ и $SK = \bar{S}\bar{K}$ — инварианты трансформирования.

Из рисунка следует, что в общем случае надирный луч nS преобразованной связки неперпендикулярен к плоскости экрана E , а главная точка o снимка не совпадает с главной точкой \bar{o} плоскости прикладной рамки. Проекция s точки \bar{S} на экран не совмещается с точкой n^0 , в которой надирный луч $n\bar{S}$ преобразованной связки встречает экран.

Смещение $\delta = \bar{o}o$ главной точки снимка относительно главной точки прикладной рамки проектирующей камеры называется *децентрацией снимка*, а смещение $\Delta = n^0s$ точки надира трансформированного изображения относительно точки \bar{S} на экран — *децентрацией трансформированного изображения*.

Величины, определяющие положение двух снимков, при котором в плоскости экрана получают трансформированные изображения, соответствующие горизонтальным снимкам и ориентированные относительно геодезической системы координат, называются *элементами внешнего ориентирования пары снимков с преобразованными связками*.

В качестве этих величин выберем следующие:

X_0, Y_0 — геодезические координаты левой точки фотографирования;

T_B — дирекционный угол базиса фотографирования,

B_0 — проекция базиса фотографирования на горизонтальную плоскость,

T_1, T_2 — дирекционные углы линий направления съемки,

\bar{H}_1, \bar{H}_2 — высоты центров проекции \bar{S}_1 и \bar{S}_2 преобразованных связок над экраном E ,

$\bar{\varepsilon}_1, \bar{\varepsilon}_2$ — углы наклона проектирующих камер относительно экрана,

κ_1, κ_2 — углы поворота снимков,

δ_1, δ_2 — децентрации снимков,

Δ_1, Δ_2 — децентрации трансформированных изображений.

Если эти элементы известны, то пару трансформированных изображений можно получить так: нанесем на экран (планшет) левую точку фотографирования n_1^0 по ее геодезическим координатам X_0 и Y_0 и проведем из этой точки направление съемки и направление базиса фотографирования по элементам T_1 и T_B . Отложим на направлении базиса его проекцию B_0 , получим правую точку фотографирования n_2^0 на планшете. Из нее проведем направление съемки по элементу T_2 . От точек n_1^0 и n_2^0 отложим децентрации трансформированных изображений Δ_1 и Δ_2 . В результате найдем точки s_1 и s_2 , над которыми должны быть центры проекции \bar{S}_1 и \bar{S}_2 . Установим проектирующие камеры по элементам $\bar{H}_1, \bar{H}_2, \bar{\varepsilon}_1$ и $\bar{\varepsilon}_2$. Наконец, повернем и сместим каждый снимок в плоскости прикладной рамки камеры так, чтобы углы между главными вертикалями и осями y были равны κ_1 и κ_2 , а смещения главных точек снимков относительно главных точек прикладных рамок — децентрациям δ_1 и δ_2 .

Из приведенных выше элементов внешнего ориентирования пары снимков с преобразованными связками только элементы $\bar{H}, \bar{\varepsilon}, \delta$ и Δ отличаются от соответствующих элементов внешнего ориентирования снимков с подобными связками.

Найдем $\bar{H}, \bar{\varepsilon}, \delta$ и Δ , полагая, что элементы внешнего ориентирования снимков с подобными связками известны.

Из треугольников $\bar{S}s\bar{K}$ и $\bar{S}o\bar{J}$ (см. рис. 165) следует

$$\bar{H} = \bar{S}\bar{K} \sin \bar{\varepsilon}, \quad \sin \bar{\varepsilon} = \frac{\bar{f}}{J\bar{S}}.$$

Учитывая значения $\bar{S}\bar{K}$ и $J\bar{S}$, напишем

$$\bar{H} = \frac{1}{t} \frac{\bar{f}}{f} H, \quad (10.8)$$

$$\sin \bar{\varepsilon} = \frac{\bar{f}}{f} \sin \varepsilon. \quad (10.9)$$

Пользуясь тем же рисунком, получим

$$\delta = Jo - J\bar{o} = JS (\cos \varepsilon - \cos \bar{\varepsilon}).$$

Так как $\cos^2 \varepsilon = 1 - \sin^2 \varepsilon$, то, учитывая равенство (10.9), децентрацию снимка представим так:

$$\delta = \frac{\bar{f}}{\sin \bar{\varepsilon}} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{\bar{f}}{f} \sin \bar{\varepsilon}\right)^2} - \cos \bar{\varepsilon} \right). \quad (10.10)$$

Аналогично найдем децентрацию трансформированного изображения

$$\Delta = \frac{\bar{H}}{\sin \bar{\epsilon}} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{f}{\bar{f}} \sin \bar{\epsilon}\right)^2} - \cos \bar{\epsilon} \right). \quad (10.11)$$

Сопоставляя выражения для децентраций Δ и δ , видим, что

$$\Delta = \frac{\bar{H}}{\bar{f}} \delta. \quad (10.12)$$

Восстановим перпендикуляр к экрану в точке n^0 и опишем дугу из точки \bar{K} радиусом $\bar{K}\bar{S}$. Пересечение дуги с перпендикуляром определяет положение центра проекции S^0 трансформированного изображения. Треугольники $S^0 n^0 \bar{K}$ и SNK равны, поэтому фокусное расстояние трансформированного изображения

$$f^0 = \frac{1}{t} H = \frac{f}{\bar{f}} \bar{H}. \quad (10.13)$$

Из изложенного выше следует, что при внешнем ориентировании пары снимков с преобразованными связками количество элементов, определяющих положение снимков и связок, возрастает по сравнению с ориентированием подобных связок: появляются новые элементы — децентрации. Однако децентрации являются зависимыми величинами, т. е. функциями независимых элементов $\bar{\epsilon}$ и \bar{H} . Поэтому общее число независимых элементов внешнего ориентирования пары снимков при обработке как с подобными связками, так и с преобразованными одинаково и равно 12.

В частном случае, когда фокусные расстояния проектирующих камер равны фокусному расстоянию снимка ($\bar{f} = f$), децентрации δ и Δ равны нулю, а элементы \bar{H} и $\bar{\epsilon}$ не отличаются от соответствующих элементов внешнего ориентирования снимков с подобными связками.

Таким образом, ориентирование снимков с подобными связками представляет собой частный случай ориентирования их с преобразованными связками.

Если углы наклона снимков малы, то полученные выше формулы для угла $\bar{\epsilon}$ и децентраций можно представить в таком виде:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\epsilon} &= \frac{\bar{f}}{f} \epsilon \\ \delta &= \frac{1}{2} \bar{f} \left(1 - \frac{f^2}{\bar{f}^2} \right) \bar{\epsilon} \\ \Delta &= \frac{1}{2} \bar{H} \left(1 - \frac{f^2}{\bar{f}^2} \right) \bar{\epsilon} = \frac{\bar{H}}{\bar{f}} \delta \end{aligned} \right\}. \quad (10.14)$$

Для плановых снимков в качестве угловых элементов используют обычно продольный и поперечный углы наклона α и ω и угол поворота κ снимка.

Следовательно, элементами внешнего ориентирования пары плановых снимков с преобразованными связками будут:

$$X_0, Y_0, T_B, B_0, \bar{H}_1, \bar{H}_2, \bar{\alpha}_1, \bar{\omega}_1, \bar{\kappa}_1, \bar{\alpha}_2, \bar{\omega}_2, \bar{\kappa}_2;$$

$$\delta_{x1}, \delta_{y1}, \delta_{x2}, \delta_{y2}, \Delta_{x1}, \Delta_{y1}, \Delta_{x2}, \Delta_{y2}.$$

Здесь δ_x и δ_y — продольные и поперечные децентрации снимков, а Δ_x и Δ_y — продольные и поперечные децентрации трансформированных изображений.

По аналогии с (10.14)

$$\left. \begin{aligned} \bar{\alpha} &= \frac{\bar{f}}{f} \alpha, & \bar{\omega} &= \frac{\bar{f}}{f} \omega \\ \delta_x &= \frac{1}{2} \bar{f} \left(1 - \frac{f^2}{\bar{f}^2}\right) \bar{\alpha}, & \delta_y &= \frac{1}{2} \bar{f} \left(1 - \frac{f^2}{\bar{f}^2}\right) \bar{\omega} \\ \Delta_x &= \frac{\bar{H}}{\bar{f}} \delta_x, & \Delta_y &= \frac{\bar{H}}{\bar{f}} \delta_y \end{aligned} \right\} \quad (10.15)$$

Угол отклонения σ (см. рис. 165) надирного луча $n\bar{S}$ преобразованной связки от перпендикуляра к экрану найдем по формуле

$$\operatorname{tg} \sigma = \frac{\Lambda}{H}. \quad (10.16)$$

Для планового снимка получим составляющие угла σ

$$\sigma_\alpha = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{f^2}{\bar{f}^2}\right) \bar{\alpha}, \quad \sigma_\omega = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{f^2}{\bar{f}^2}\right) \bar{\omega}. \quad (10.17)$$

Теперь перейдем к анализу пары трансформированных изображений.

В результате трансформирования пары снимков на горизонтальную (или произвольно расположенную) плоскость E имеем два изображения P_1^0 и P_2^0 (рис. 166). Центры проекции этих изображений относятся к точкам фотографирования S_1 и S_2 , с которых были получены наклонные снимки.

Из выражения (10.13) следует, что фокусные расстояния пары трансформированных изображений не равны друг другу, так как высоты точек фотографирования различные:

$$f_1^0 = \frac{1}{t} H_1, \quad f_2^0 = \frac{1}{t} (H_1 + \Delta H) = f_1^0 \left(1 + \frac{\Delta H}{H_1}\right). \quad (10.18)$$

Разность фокусных расстояний $f_2^0 - f_1^0$ обеспечивает равенство масштабов изображения плоскости трансформирования E на снимках P_1^0 и P_2^0 , но масштабы изображения любой другой плоскости на трансформированных снимках различные. Возьмем,

например, плоскость E_1 , превышение которой относительно плоскости трансформирования E обозначим через h . На снимке P_1^0 эта плоскость изобразится в масштабе

$$\frac{1}{i_1} = \frac{f_1^0}{H_1 - h}, \quad (10.19)$$

а на снимке P_2^0 — в масштабе

$$\frac{1}{i'_1} = \frac{f_2^0}{H_1 - h + \Delta H} = \frac{f_1^0}{H_1 - \frac{H_1}{H_1 + \Delta H} h}. \quad (10.20)$$

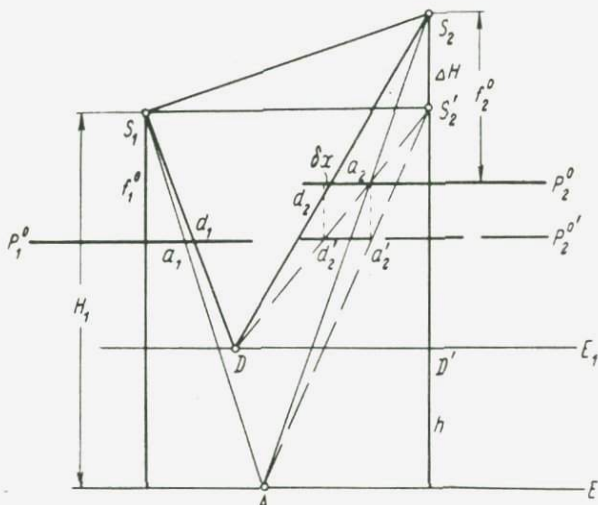


Рис. 166

Вследствие этого координаты точки на снимке P_2^0 отличаются от координат соответственной точки на снимке $P_2^{0'}$, плоскость которого совпадает с плоскостью первого снимка P_1^0 , а фокусное расстояние его равно f_1^0 (идеальный случай съемки).

На снимке P_2^0 координата точки d_2

$$x^0 = X \frac{f_2^0}{H_1 - h + \Delta H},$$

где $X = DD'$. На снимке $P_2^{0'}$ координата соответственной точки d_2'

$$x^{0'} = X \frac{f_1^0}{H_1 - h}.$$

Вычислим разность $x^0 - x^{0'} = \delta x$,

$$\delta x = -\frac{f_1^0}{H_1} X \frac{h \Delta H}{(H_1 - h + \Delta H)(H_1 - h)}. \quad (10.21)$$

Аналогично найдем δy

$$\delta y = -\frac{f_1^0}{H_1} Y \frac{h \Delta H}{(H_1 - h + \Delta H)(H_1 - h)}. \quad (10.22)$$

Разности δx и δy определяют поперечный параллакс и искажение продольного параллакса на трансформированных снимках

$$\delta p = -\delta x, \quad q = -\delta y. \quad (10.23)$$

Пусть $H_1 = 2000$ м, $\frac{f_1^0}{H_1} X = \frac{f_2^0}{H_1} Y = 70$ мм, $\Delta H = 20$ м, $h = 500$ м. Тогда $\delta p = q = 0,31$ мм.

Следовательно, снимки, трансформированные на произвольно расположенную или горизонтальную плоскость, нельзя рассматривать как приведенные к идеальному случаю съемки, так как они имеют поперечные параллаксы и искажения продольных параллаксов.

В частном случае, когда плоскость трансформирования параллельна базису фотографирования ($\Delta H = 0$), поперечных параллаксов на трансформированных снимках нет.

§ 77. ВЗАИМНОЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ СНИМКОВ С ПРЕОБРАЗОВАННЫМИ СВЯЗКАМИ

Пусть плоскость трансформирования параллельна базису фотографирования. В этом случае трансформированные изображения можно получить путем взаимного ориентирования снимков с преобразованными связками, не зная элементов внешнего ориентирования стереопары. Для этого достаточно установить снимки так, чтобы в плоскости экрана (см. рис. 164) не было поперечных параллаксов.

Величины, определяющие взаимное положение снимков с преобразованными связками, при котором в плоскости экрана получаются два изображения, не имеющие поперечных параллаксов, называются *преобразованными элементами взаимного ориентирования снимков*.

В качестве таких величин возьмем $\bar{\alpha}'_1, \bar{\kappa}'_1, \bar{\alpha}'_2, \bar{\omega}'_2$ и $\bar{\kappa}'_2$, аналогичные элементам взаимного ориентирования пары снимков с подобными связками (см. рис. 145). При этом будем считать, что плоскость трансформирования перпендикулярна к главной базисной плоскости первого снимка ($\bar{\omega}'_1 = 0$). К названным элементам необходимо добавить децентрации $\delta_{x1}, \Delta_{x1}, \delta_{x2}, \delta_{y2}, \Delta_{x2}$ и Δ_{y2} (см. рис. 165).

Итак, взаимное ориентирование пары снимков с преобразованными связками определяется пятью независимыми элементами и шестью зависимыми. К зависимым элементам относятся децентрации снимков и трансформированных изображений.

Теперь составим уравнение взаимного ориентирования пары снимков с преобразованными связками.

Для этого воспользуемся выражениями (8.9) и (1.37)

$$y_1^0 - y_2^0 = 0;$$

$$y^0 = y + \frac{xy}{f} \alpha + \left(f + \frac{y^2}{f} \right) \omega + x\kappa + R,$$

где R — сумма поправочных членов второго порядка малости.

Применяя формулу (1.37) для преобразованных связок, необходимо подставить в нее $y^0 - \Delta_y$ вместо y^0 , $x - \delta_x$ вместо x , $y - \delta_y$ вместо y и \bar{f} , $\bar{\alpha}'$, $\bar{\omega}'$, $\bar{\kappa}'$ вместо f , α , ω , κ . Кроме того, будем считать, что $\bar{H} = \bar{f}$, а в этом случае согласно (10.12) $\Delta_y = \delta_y$. После подстановки получим

$$y^0 = y + \frac{xy}{f} \bar{\alpha}' + \left(\bar{f} + \frac{y^2}{f} \right) \bar{\omega}' + x\bar{\kappa}' + R + R', \quad (10.24)$$

где R' — сумма членов второго порядка, зависящих от децентраций,

$$R' = - \frac{x\delta_y + y\delta_x}{f} \bar{\alpha}' - 2 \frac{y\delta_y}{f} \bar{\omega}' - \delta_x \bar{\kappa}'. \quad (10.25)$$

Следовательно,

$$y_1^0 = y_1 + \frac{x_1 y_1}{f} \bar{\alpha}'_1 + x_1 \bar{\kappa}'_1 + R_1 + R'_1,$$

$$y_2^0 = y_2 + \frac{x_2 y_2}{f} \bar{\alpha}'_2 - \left(\bar{f} + \frac{y_2^2}{f} \right) \bar{\omega}'_2 + x_2 \bar{\kappa}'_2 + R_2 + R'_2.$$

Подставив эти значения y_1^0 и y_2^0 в выражение (8.9), получим уравнение взаимного ориентирования

$$\frac{x_1 y_1}{f} \bar{\alpha}'_1 - \frac{x_2 y_2}{f} \bar{\alpha}'_2 - \left(\bar{f} + \frac{y_2^2}{f} \right) \bar{\omega}'_2 + x_1 \bar{\kappa}'_1 + x_2 \bar{\kappa}'_2 + q +$$

$$+ (R_1 - R_2) - (R'_1 - R'_2) = 0. \quad (10.26)$$

В этом уравнении пять независимых неизвестных. Одна точка стереопары дает одно уравнение. Таким образом, для определения элементов взаимного ориентирования пары снимков с преобразованными связками достаточно выбрать пять должным образом расположенных точек, измерить координаты и поперечные параллаксы этих точек, составить систему уравнений (10.26) и решить эти уравнения

Уравнения (10.26) содержат вторые степени неизвестных и децентрации, входящие в суммы R и R' . Решить такие уравнения можно путем последовательных приближений. Сначала будем считать, что децентрации и члены второго порядка малости

равны нулю. Исходя из этого составим систему уравнений (10.26) и решим ее, в результате чего получим первое приближение неизвестных. Затем подсчитаем по формулам (10.15) децентрации, найдем значения R и R' и вновь составим систему уравнений (10.26), учитывая поправки R и R' . Новое решение этой системы даст второе приближение независимых элементов, по которым найдем второе приближение децентраций. Этот процесс следует продолжать до тех пор, пока разность между двумя последними приближениями не превысит заданных значений.

Уравнение (10.26) аналогично уравнению (8.8), составленному для подобных связок. Поэтому выводы, полученные в гл. 8 для подобных связок, относятся и к преобразованным связкам. Эти выводы заключаются в следующем:

1. Для определения элементов взаимного ориентирования пары снимков целесообразно пользоваться стандартно расположенными точками 1—6, отмеченными на рис. 147.

2. Первое приближение элементов взаимного ориентирования пары снимков с преобразованными связками можно найти по формулам (8.30). Приняв $q_1 = q_2 = 0$, получим

$$\left. \begin{aligned} \bar{\alpha}'_1 &= \frac{\bar{f}}{2ab} (q_6 - q_4) \\ \bar{\alpha}'_2 &= \frac{\bar{f}}{2ab} (q_5 - q_3) \\ \bar{\omega}'_2 &= \frac{\bar{f}}{2a^2} (q_3 + q_5) \\ \bar{\kappa}'_1 &= \bar{\kappa}'_2 = \frac{\bar{f}}{b} \omega'_2 \end{aligned} \right\} \quad (10.27)$$

Сопоставляя выражения (10.27) и (8.30), находим зависимость между элементами взаимного ориентирования преобразованных и подобных связок

$$\left. \begin{aligned} \bar{\alpha}'_1 &= k\alpha'_1 \\ \bar{\alpha}'_2 &= k\alpha'_2 \\ \bar{\omega}'_2 &= k\omega'_2 \\ \bar{\kappa}'_1 &= k^2\kappa'_1 \\ \bar{\kappa}'_2 &= k^2\kappa'_2 \end{aligned} \right\}, \quad (10.28)$$

где $k = \bar{f} : f$ — коэффициент преобразования связки.

3. Для взаимного ориентирования пары снимков с преобразованными связками в универсальном стереоприборе достаточно устранить поперечные параллаксы на пяти точках в последовательности, указанной на рис. 153. При этом необходимо учитывать

децентрации снимков и трансформированных изображений, а измерительную марку перемещать в плоскости трансформирования.

Эту задачу можно решить следующим образом.

Установим снимки в проектирующие камеры так, чтобы главные точки их совпали с главными точками прикладных рамок ($\delta = 0$). Приведем камеры в горизонтальное положение и установим величины $b_X, b_Y = b_Z = 0$, а также $Z = \bar{H} = \text{const}$. Затем устраним поперечные параллаксы, наблюдаемые в плоскости трансформирования, действуя поворотами $\kappa_2, \kappa_1, \alpha_2, \alpha_1$ и ω_1 в последовательности, указанной на рис. 153. При этом визирировать на точки следует движениями X, Y и b_X , не изменяя отстояния Z . В результате этих действий получим первое приближение взаимного ориентирования снимков с преобразованными связками.

Отсчитаем по шкалам элементы $\bar{\alpha}$ и $\bar{\omega}$ преобразованных связок, вычислим по формулам (10.15) децентрации δ и Δ и введем их в прибор путем смещения снимка (δ) и изменения установок b_X и b_Y (Δ). После этого вновь устраним поперечные параллаксы на точках 1—5 теми же поворотами проектирующих камер. Если на точке 6 поперечный параллакс не исчезнет, то следует выполнить третье приближение.

В результате этих действий в приборе получим пару трансформированных изображений в плоскости, параллельной базису фотографирования и перпендикулярной к главной базисной плоскости первого снимка.

Рассмотрен первый способ взаимного ориентирования пары снимков с преобразованными связками. Аналогично можно ориентировать пару снимков с преобразованными связками и вторым способом, т. е. движениями только одной камеры, например правой. В этом случае поперечные параллаксы устраняются движениями $b_Y, \kappa_2, b_Z, \alpha_2$ и ω_2 в последовательности, указанной на рис. 157, а децентрации устанавливаются только для правого снимка и правого трансформированного изображения.

Подсчитаем допустимую погрешность установки децентрации. Ошибка децентрации вызывает искажение трансформированного изображения. Согласно выражению (10.25)

$$\Delta y^0 = \Delta y^0 = - \frac{x \Delta \delta_y + y \Delta \delta_x}{\bar{f}} \bar{\alpha}' - 2 \frac{y \Delta \delta_y}{\bar{f}} \bar{\omega}'.$$

Аналогично

$$\Delta x^0 = - \frac{y \Delta \delta_x + x \Delta \delta_y}{\bar{f}} \bar{\omega}' - 2 \frac{x \Delta \delta_x}{\bar{f}} \bar{\alpha}'.$$

Выражение $\Delta \delta_x$ здесь не учитывается потому, что оно характеризует не деформацию изображения, а сдвиг его вдоль оси y^0 .

Пусть $x = y = a$, $\Delta \delta_x = \Delta \delta_y = \Delta \delta$, $\bar{\alpha}' = \bar{\omega}' = \bar{\alpha}$. Опустив знак минус, получим

$$\Delta x^0 = \Delta y^0 = 4 \frac{a}{\bar{f}} \bar{\alpha} \Delta \delta = 4 \frac{a}{\bar{f}} \alpha \Delta \delta, \quad (10.29)$$

где Δx^0 и Δy^0 — ошибки трансформированного изображения в масштабе снимка ($\bar{H} = \bar{f}$).

Потребуем, чтобы эти погрешности не превышали погрешности устранения поперечного параллакса Δq . Тогда

$$\Delta \delta \leq \frac{f \Delta q}{4a\alpha}. \quad (10.30)$$

Если $\Delta q = 0,04$ мм, $f = 100$ мм, $a = 70$ мм и $\alpha = 1^\circ$, то $\Delta \delta \leq 0,2$ мм.

Формула (10.30) получена для снимков равнинного и холмистого районов. При обработке снимков горного района децентрация должна вводиться с большей точностью. Согласно исследованиям М. Д. Коншина в этом случае $\Delta \delta = 0,07$ мм, если разность продольных параллаксов в пределах стереопары $\Delta \bar{p} = 5$ мм, и $\Delta \delta = 0,04$ мм, если $\Delta p = 10$ мм (Труды ЦНИИГАиК, вып. 44, М., Геодезиздат, 1944, с. 44).

§ 78. ПОСТРОЕНИЕ И ВНЕШНЕЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ

Рассмотрим способы построения модели местности по трансформированным изображениям.

Первый способ заключается в проектировании трансформированных изображений.

Пусть в плоскости E получена пара трансформированных изображений P_1^0 и P_2^0 (рис. 167). Восставим в точках надира n_1^0 и n_2^0 перпендикуляры к плоскости E и отложим на них фокусные расстояния трансформированных изображений. Таким образом получим центры проекции этих изображений S_1^0 и S_2^0 .

Если проектирующие лучи, исходящие из точек трансформированных изображений P_1^0 и P_2^0 , проходят соответственно через точки S_1^0 и S_2^0 , то связки лучей подобны существовавшим во время съемки. В этом случае каждая пара соответственных лучей пересекается, в результате чего образуется модель, подобная местности.

В § 76 показано, что центры проектирования не обязательно совмещать с точками S_1^0 и S_2^0 — их можно выбирать и в других местах на прямых $n_1^0 S_1^0$ и $n_2^0 S_2^0$.

Выберем в качестве центров проектирования трансформированных изображений точки $S_1^{0'}$ и $S_2^{0'}$, равноудаленные от плоскости E и лежащие на надирных лучах $n_1^0 S_1^0$ и $n_2^0 S_2^0$. Тогда связки будут преобразованы, но каждая пара соответственных лучей, например $a_1^0 S_1^{0'}$ и $a_2^0 S_2^{0'}$, и в этом случае будет пересекаться. Таким образом получим преобразованную модель местности. Вертикальный масштаб этой модели найдем по формуле (10.3). Как известно, коэффициент преобразования связки $k = \bar{f} : f$. В данном случае $\bar{f} = n_1^0 S_1^{0'} = n_2^0 S_2^{0'}$, а $f = f^0$, т. е. фокусному расстоянию трансформированного изображения.

Внешнее ориентирование преобразованной модели выполним по опорным точкам. Для этого найдем горизонтальный и вертикальный масштабы и углы наклона модели, изменим установки проектирующих камер и получим в плоскости экрана E новые трансформированные изображения, соответствующие горизонтальным снимкам. Модель, построенную по этим изображениям, установим относительно планшета и используем ее для составления карты.

Построить преобразованную модель первым способом можно не только оптическими средствами, но и с помощью механизмов. Механизмы для решения этой задачи применяются в стереопроекторе Г. В. Романовского и в стереографе Ф. В. Дробышева.

В стереопроекторе снимки находятся в горизонтальной плоскости E и перемещаются относительно неподвижной наблюдательной системы. При движении снимков с помощью коррекционных механизмов вводятся поправки за углы наклона α и ω . Благодаря этому осуществляется трансформирование плановых снимков. Преобразованная модель строится по результатам трансформирования снимков. Для этого ис-

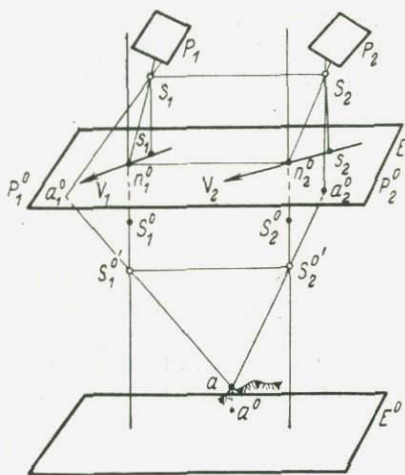


Рис. 167

пользуются рычаги, вращающиеся вокруг центров S_1^0 и S_2^0 . Верхние концы рычагов связаны со снимками (см. гл. 11).

Второй способ. Конструкция мультиплекса и некоторых других универсальных стереопроекторов не позволяет проектировать трансформированные изображения так, как показано на рис. 167 и осуществлено в стереопроекторе. Однако и в этих приборах можно построить модель по преобразованным связкам, если углы наклона снимков малы.

Соответственные лучи преобразованных связок, по которым получаются трансформированные изображения, не пересекаются, так как надирные лучи этих связок $S_1 n_1^0$ и $S_2 n_2^0$ не вертикальны. Продольный и поперечный углы σ_α и σ_ω отклонения надирного луча связки от прямой, перпендикулярной к плоскости трансформирования, можно найти по формулам (10.17).

Чтобы получить модель в мультиплексе, необходимо установить надирные лучи в отвесное положение. Эту задачу можно решить путем введения дополнительной децентрации снимков.

Согласно рис. 165 дополнительные децентрации

$$\left. \begin{aligned} \Delta\delta_x &= \bar{f}\sigma_\alpha = \frac{1}{2}\bar{f}\left(1 - \frac{f^2}{\bar{f}^2}\right)\bar{\alpha} \\ \Delta\delta_y &= \bar{f}\sigma_\omega = \frac{1}{2}\bar{f}\left(1 - \frac{f^2}{\bar{f}^2}\right)\bar{\omega} \end{aligned} \right\}. \quad (10.31)$$

При этом дополнительную децентрацию следует вводить в том же направлении, в каком вводится основная, т. е. в сторону приподнятой части прикладной рамки камеры ($k > 1$).

Сравнивая выражения (10.31) и (10.15), видим, что децентрация снимка, которую следует вводить в универсальном приборе при построении преобразованной модели, в два раза больше по сравнению с децентрацией, необходимой для трансформирования снимка,

$$\left. \begin{aligned} \bar{\delta}_x &= 2\delta_x = \bar{f}\left(1 - \frac{f^2}{\bar{f}^2}\right)\bar{\alpha} \\ \bar{\delta}_y &= 2\delta_y = \bar{f}\left(1 - \frac{f^2}{\bar{f}^2}\right)\bar{\omega} \end{aligned} \right\}. \quad (10.32)$$

Введение дополнительной децентрации вызывает искажение трансформированного изображения Δx^0 и Δy^0 , что приводит к остаточным поперечным параллаксам Δq и к искажению продольных параллаксов Δp в пространстве модели. Эти искажения можно подсчитать по формуле (10.29)

$$\Delta x^0 = \Delta y^0 = \Delta p = \Delta q = 4 \frac{a}{f} \alpha \Delta\delta.$$

Подставим сюда значение $\Delta\delta$ из равенства (10.31), учитывая при этом, что $\bar{\alpha} = k\alpha$. Получим

$$\Delta x^0 = \Delta y^0 = \Delta p = \Delta q = 2a \left(\frac{\bar{f}^2}{f^2} - 1 \right) \alpha^2, \quad (10.33)$$

где a — максимальное значение координаты x или y точки снимка.

Искажения, вычисленные по формуле (10.33), выражены в масштабе снимка.

Пусть $\bar{f} = 100$ мм, $f = 70$ мм, $\alpha = 30'$ и $a = 70$ мм, тогда максимальное значение остаточного поперечного параллакса $\Delta q = 0,01$ мм. Максимальные значения ошибок определения координат точек местности, вызванных дополнительной децентрацией, можно подсчитать по формулам

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= \Delta Y = H \frac{\Delta x^0}{f} \\ \Delta Z &= H \frac{\Delta p}{b} \end{aligned} \right\}, \quad (10.34)$$

где H — высота фотографирования над опорной точкой, а b — базис фотографирования в масштабе снимка.

Если $H = 10\ 000$ м, $f = b = 70$ мм, $\Delta x^0 = \Delta p = 0,01$ мм, то ошибки определения координат точек местности не превысят 1,4 м.

Таким образом, ошибки, вызванные введением дополнительной децентрации, незначительны, если углы наклона снимков малы. В этом случае в мультиплексе и в других универсальных приборах пару снимков можно взаимно ориентировать с преобразованными связками путем устранения поперечных параллаксов не в плоскости трансформирования, а в пространстве модели. Это означает, что при взаимном ориентировании преобразованных связок, как и при установке подобных связок, можно пользоваться движениями X , Y и Z для перехода с одной точки на другую, но при этом необходимо вводить двойную децентрацию, определяя ее по формуле (10.32). В остальном взаимное ориентирование пары снимков с преобразованными связками не отличается от изложенного в предыдущем параграфе.

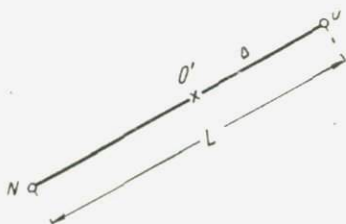


Рис. 168

Децентрацию снимков на мультиплексе можно вводить с помощью палетки или надирскопа.

Палетка представляет собой систему взаимно перпендикулярных линий, нанесенных на бумаге или на прозрачной основе с частотой в 1 или 2 мм. Выполнив первое приближение взаимного ориентирования снимков, измеряют с помощью уровня углы наклона проектирующей камеры и вычисляют децентрации Δ_x и Δ_y по формулам (10.15)

$$\left. \begin{aligned} \Delta_x &= \frac{Z}{f} \bar{\delta}_x = Z \left(1 - \frac{f^2}{f^2} \right) \bar{\alpha} \\ \Delta_y &= \frac{Z}{f} \bar{\delta}_y = Z \left(1 - \frac{f^2}{f^2} \right) \bar{\omega} \end{aligned} \right\} \quad (10.35)$$

где Z — расстояние от передней узловой точки объектива камеры до экрана.

Затем на экран устанавливают палетку так, чтобы центр ее совпал с проекцией главной точки прикладной рамки камеры, а ось x была направлена вдоль маршрута. Смещают снимок в плоскости прикладной рамки так, чтобы проекция главной точки снимка отошла от центра палетки на величины Δ_x и Δ_y .

Применение надирскопа освобождает от измерения углов наклона проектирующих камер. *Надирскоп* позволяет ортогонально спроектировать переднюю узловую точку объектива камеры на экран, т. е. найти на экране точку надира. Пусть N — точка надира на экране, полученная после выполнения первого приближения взаимного ориентирования пары снимков (рис. 168).

Расстояние от точки N до проекции главной точки O равно $Z\bar{\epsilon}$, где $\bar{\epsilon}$ — угол наклона камеры. Обозначим этот отрезок через L и в соответствии с выражениями (10.35) напомним

$$\Delta = L \left(1 - \frac{f^2}{f_0^2} \right). \quad (10.36)$$

Таким образом, измерив отрезок L , можно вычислить децентрацию Δ . Далее следует сместить снимок в плоскости прикладной рамки камеры так, чтобы проекция главной точки отошла по направлению ON на величину $OO' = \Delta$ ($k > 1$).

Внешнее ориентирование преобразованной модели выполняют способом, изложенным в § 73, учитывая неравенство горизонтального и вертикального масштабов.

Третий способ позволяет найти высоты точек местности по формуле (7.13) и составить план путем исключения на левом трансформированном изображении смещений точек за рельеф, определяемых формулами (7.15),

$$\left. \begin{aligned} x' &= x_1 - \delta x_1 = x_1 - \frac{\Delta p}{p} x_1 \\ y' &= y_1 - \delta y_1 = y_1 - \frac{\Delta p}{p} y_1 \\ Z_r &= Z_{r1} + H_1 \frac{\Delta p}{p_1 + \Delta p} \end{aligned} \right\}. \quad (10.37)$$

В 1947 г. этот способ осуществлен в полевом стереопланиграфе А. Н. Лобанова, а в 1956 г. — в стереотопе Цейсса при помощи решающих устройств механического типа.

Внешнее ориентирование модели в полевом стереопланиграфе выполняется по опорным точкам. Для этого изменяется положение плоскости трансформирования.

Четвертый способ. При взаимном ориентировании пары снимков с преобразованными связками вводят децентрации, соответствующие условиям трансформирования снимков, т. е. определяемые по формулам (10.15). В результате этого получается пара трансформированных изображений. Надирные лучи преобразованных связок будут отклонены от отвесных линий на углы σ_α и σ_ω , которые можно подсчитать по формулам (10.17).

Чтобы исключить поперечные параллаксы, наблюдаемые в пространстве модели и обусловленные отклонением надирных лучей от отвеса, измерительные марки при визировании перемещают не вдоль оси Z , а параллельно соответствующим надирным лучам.

Данный способ применен в фотокартографе Ф. В. Дробышева. Измерительные марки в этом приборе смещаются с помощью корректоров, которые устанавливаются по углам σ_α и σ_ω .

Внешнее ориентирование модели в фотокартографе производят по опорным точкам, изменяя положение плоскости трансформирования, т. е. элементы ориентирования преобразованных связок.

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ СТЕРЕОПРИБОРЫ

§ 79. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ
УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТЕРЕОПРИБОРОВ

Универсальные стереоприборы служат для сгущения опорной сети и составления топографических карт по снимкам.

На универсальном стереоприборе можно выполнить все процессы преобразования снимков в план, а именно:

- 1) внутреннее ориентирование снимков, т. е. построение связок проектирующих лучей;
- 2) взаимное ориентирование снимков, т. е. построение модели;
- 3) внешнее ориентирование модели;
- 4) определение координат отдельных точек местности и съемку контуров и рельефа.

Следовательно, на универсальном стереоприборе можно решить обратную двойную фотограмметрическую засечку.

Если элементы внешнего ориентирования снимков известны с достаточной точностью, то на универсальном стереоприборе можно решить и прямую фотограмметрическую засечку. В этом случае снимки устанавливаются в приборе по элементам ориентирования. Затем путем проектирования снимков создают связки лучей. В результате пересечения соответственных лучей образуется модель местности.

Связки проектирующих лучей, получаемые в универсальном стереоприборе, могут быть или тождественными существовавшим в момент съемки, или преобразованными. В соответствии с этим и модель получается подобной местности или преобразованной.

По способам построения связок проектирующих лучей и модели универсальные стереоприборы можно разделить на четыре группы:

- 1) оптические,
- 2) механические,
- 3) оптико-механические,
- 4) аналитические.

Оптический универсальный прибор имеет две или больше проектирующих камер, с помощью которых по снимкам строятся связки лучей и модель местности.

В универсальном стереоприборе *механического* типа связки лучей и модель создаются с помощью прецизионных рычагов или линеек.

В *оптико-механическом* универсальном стереоприборе связки лучей получаются оптически, а модель строится при помощи механизмов.

В аналитическом универсальном стереоприборе в процессе измерения снимков определяются координаты точек местности на электронной цифровой вычислительной машине, которые одновременно используются для составления карты на координатном графе.

Многие современные универсальные стереоприборы позволяют получать не только графическое изображение местности в виде карты, но и фотографическое в ортогональной проекции — ортофотокарту. Для этого приборы имеют приспособления, позволяющие выполнять дифференциальную трансформацию снимков. Кроме того, отдельные приборы содержат устройства, автоматизирующие процессы обработки снимков.

Аналитические универсальные стереоприборы обеспечивают наивысшую точность измерения снимков: средняя квадратическая погрешность измерения координат точек около 5 мкм. Остальные стереоприборы по точности измерения снимков разделяются на три класса. Они позволяют измерять снимки с точностью, равной соответственно 10, 20 и 50 мкм.

§ 80. ПРИНЦИПАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ОПТИЧЕСКИХ УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТЕРЕОПРИБОРОВ

Универсальные стереоприборы, основанные на оптических способах решения фотограмметрической засечки, можно разделить на три подгруппы.

Первую подгруппу составляют двойные проекторы и мультиплексы. В этих приборах снимки с помощью камер проектируются на экран так, чтобы изображения их накладывались друг на друга (рис. 169). Связки лучей взаимно ориентируются, в результате чего получается оптическая модель местности.

Фотограмметрическая засечка образуется путем построения треугольника,

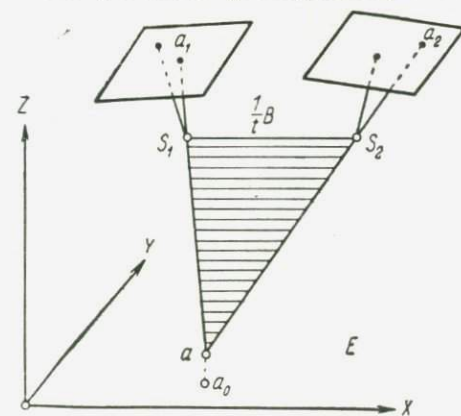


Рис. 169

вершинами которого служат передние узловые точки объективов проектирующих камер S_1 и S_2 и определяемая точка модели a (принцип треугольника).

Модель наблюдают и измеряют способами анаглифов, поляроидов и вращающихся блендов. Для измерения модели используют марку, перемещение которой в плоскости плана фиксируют на экране, а по высоте — с помощью счетчика или шкалы.

Расстояние между передними узловыми точками объективов проектирующих камер равно базису фотографирования в масштабе модели

$$B' = \frac{1}{l} B.$$

Отсюда следует, что минимальный масштаб модели, получаемой по данным снимкам, определяется наименьшим расстоянием, которое можно установить между передними узловыми точками объективов проектирующих камер.

Так как экран E находится на конечном расстоянии от объектива камеры, то для получения резкого изображения снимка лучи, исходящие из точки снимка и проходящие объектив, должны направляться к экрану сходящимся пучком. В этом случае главное фокусное расстояние объектива проектирующей камеры F должно быть меньше фокусного расстояния самой камеры f .

Чтобы получить резкое изображение на экране, необходимо выполнить два условия:

1) расстояния от объектива до снимка (f) и до экрана (D) вдоль главной оптической оси объектива должны удовлетворять основному уравнению оптики

$$\frac{1}{f} + \frac{1}{D} = \frac{1}{F}, \quad (11.1)$$

2) плоскость снимка, главная плоскость объектива и плоскость экрана должны пересекаться по одной линии.

В универсальных приборах первой подгруппы эти условия выполняются нестрого.

Пусть при горизонтальном положении проектирующей камеры изображение на экране получается резким, когда экран удален от объектива на расстояние D_0 (рис. 170). При любом другом положении экрана резкость изображения нарушается. Появляются кружки нерезкости, диаметр которых

$$\delta = \frac{d}{D_0} l, \quad (11.2)$$

где l — расстояние от экрана до плоскости резкого изображения; d — диаметр действующего отверстия объектива.

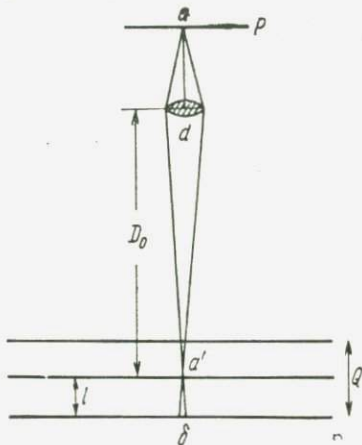


Рис. 170

Потребуем, чтобы диаметр кружка нерезкости не превышал такого значения, при котором практически не снижается точность стереоскопических измерений. Тогда глубина резкости

$$Q = 2l = 2 \frac{\delta}{d} D_0. \quad (11.3)$$

На местности величине Q соответствует превышение

$$h = \frac{H}{D_0} Q = 2 \frac{\delta}{d} H, \quad (11.4)$$

где H — высота фотографирования.

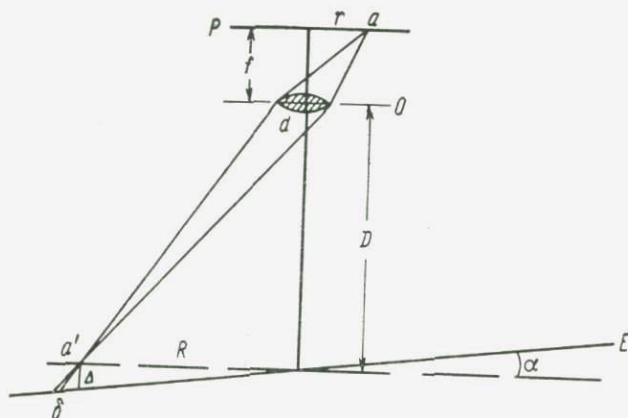


Рис. 171

Пусть $H = 2500$ м, $\delta = 0,2$ мм, $d = 2$ мм, тогда $h = 500$ м.

При наклоне проектирующей камеры резкость изображения нарушается, так как главная плоскость объектива O не проходит через линию пересечения снимка P и экрана E , а остается параллельной снимку (рис. 171). Такое явление наблюдается и в случае, когда первое оптическое условие выполнено. При этом кружок нерезкости будет максимальным на краю изображения. Как следует из рисунка,

$$\delta \approx \Delta \frac{d}{D}.$$

Но

$$\Delta = R\alpha = r \frac{D}{f} \alpha.$$

Поэтому

$$\delta = \frac{d}{f} r \alpha, \quad (11.5)$$

где $d : f$ — относительное отверстие объектива;

r — расстояние на снимке от главной точки до данной.

Пусть $d : f = 1 : 10$, $r = 20$ мм, $\alpha = 6^\circ$, тогда $\delta = 0,2$ мм.

Отдельные приборы первой подгруппы имеют приспособления для изменения главного фокусного расстояния объектива камеры, а также для поворота главной плоскости объектива. Это позволяет изменять положение плоскости резкого изображения относительно объектива и строго выполнять оптическое условие.

С целью сокращения размеров прибора мультиплекс рассчитывается на обработку не оригинальных снимков, а уменьшенных в 3—4 раза.

Пусть N_0 — разрешающая способность негатива. Чтобы получить на диапозитиве все детали местности, изобразившиеся на

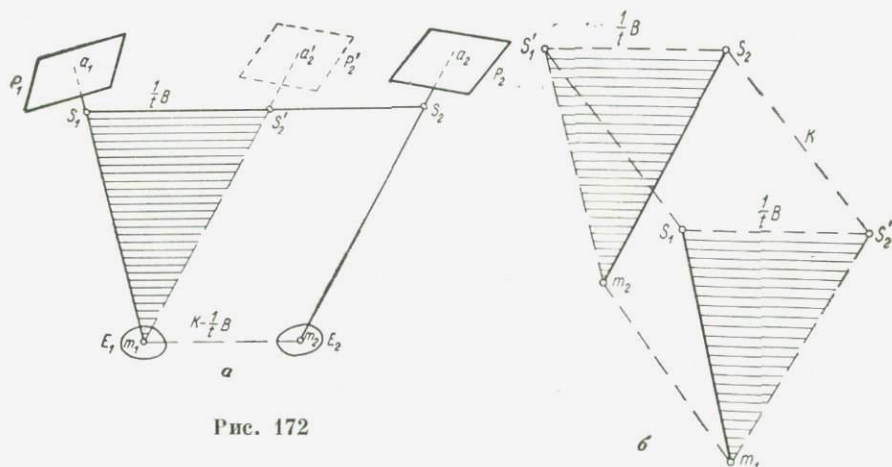


Рис. 172

негативе, необходимо использовать диапозитивные пластинки с разрешающей способностью

$$N = nN_0, \quad (11.6)$$

где n — коэффициент уменьшения негатива.

В соответствии с этим и разрешающая сила объектива уменьшителя должна быть не меньше N .

В приборах второй подгруппы (стереопланиграф Цейсса, фотокартограф Ф. В. Дробышева и др.) каждый снимок с помощью камеры проектируется на отдельный экран, снабженный измерительной маркой (рис. 172, а). Расстояние S_1S_2 между передними узловыми точками объективов проектирующих камер может быть, с точки зрения принципиальной, произвольным. Практически же оно устанавливается по конструктивным соображениям и всегда больше базиса фотографирования, выраженного в масштабе модели.

Модель местности получается в результате пересечения лучей левой связки с соответственными лучами правой связки,

перенесенной параллельно так, чтобы вершина ее совпала с точкой S'_2 . При этом расстояние между измерительными марками

$$m_1 m_2 = K - \frac{1}{t} B, \quad (11.7)$$

где $1 : t$ — масштаб модели,

B — базис фотографирования,

K — расстояние между передними узловыми точками объективов проектирующих камер (постоянная прибора).

Таким образом, фотограмметрическая засечка в данном случае осуществляется по принципу треугольник плюс параллелограмм ($S_1 S'_2 m_1$ и $m_1 m_2 S_2 S'_2$).

Этот принцип используется не только в оптических, но и в механических, а также в оптико-механических универсальных стереоприборах.

Кроме рассмотренных выше двух принципов (треугольник и треугольник плюс параллелограмм) для осуществления фотограмметрической засечки в универсальных стереоприборах применяется принцип двух треугольников — $S_1 S'_2 m_1$ и $S'_1 S_2 m_2$ (рис. 172, б). В этом случае центр проекции S_2 второго снимка смещается относительно точки S'_2 не в продольном направлении по продолжению прямой $S_1 S'_2$, а в поперечном $S'_1 S_2$ на произвольную величину K , выбираемую по конструктивным соображениям. На рисунке $S_1 m_1$ и $S_2 m_2$ — два соответственных луча. При этом точка m_1 получается в пересечении направления $S_1 m_1$ с направлением $S'_2 m_1$, проведенным из точки S'_2 , параллельно $S_2 m_2$.

Принцип двух треугольников позволяет создавать более компактные приборы по сравнению со стереопланиграфом и другими, в которых использован принцип треугольник плюс параллелограмм.

Фокусное расстояние камеры стереопланиграфа равно главному фокусному расстоянию ее объектива. Следовательно, снимок, установленный в проектирующую камеру, находится в главной фокальной плоскости объектива. Лучи, исходящие из точки снимка и проходящие объектив, направляются параллельным пучком. Резкое изображение снимка получается с помощью дополнительной проектирующей системы, которая расположена между объективом камеры и экраном и состоит из положительной и отрицательной линз. При изменении расстояния между камерой и экраном меняется и расстояние между этими линзами с помощью инверсора.

Для наблюдения и измерения модели применяется способ мнимой марки. При этом действительные марки m_1 и m_2 и изображения снимков, построенные на экранах, рассматривают стереоскопически, используя для этого наблюдательную систему.

Перемещение марки в пространстве модели отсчитывают по шкалам и счетчикам и фиксируют на планшете.

Приборы третьей подгруппы (стереоскопический рисовальный прибор М. Д. Коншина) основаны на построении по снимкам и измерении мнимой оптической модели местности (рис. 173).

Снимки рассматриваются с помощью зеркального стереоскопа, малые зеркала или диагональные грани кубов которого посеребрены на 50%. Благодаря этому наблюдатель видит не только мнимую модель, но и действительную марку, а также экран или планшет *E*. Связки образуются лучами, идущими от снимков к глазам наблюдателя. Таким образом, вершинами связок или центрами проекции служат передние узловые точки глаз наблюдателя.

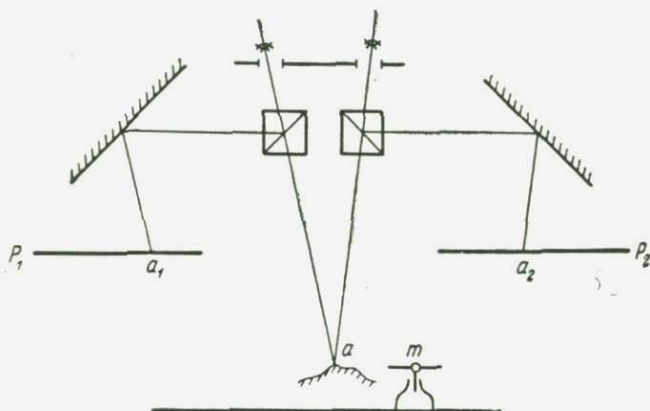


Рис. 173

Снимкодержатели имеют движения для взаимного ориентирования снимков и внешнего ориентирования модели. План получается в результате ортогонального проектирования элементов модели на планшет с помощью измерительного столика.

В отличие от других универсальных стереоприборов приборы данной подгруппы позволяют одновременно видеть модель и планшет. Благодаря этому горизонтали, проведенные на планшете, оптически накладываются на модель, чем обеспечивается контроль рисовки рельефа. Значительное поле зрения наблюдательной системы, простое устройство и небольшие размеры также отличают приборы третьей подгруппы от многих других. Однако недостаточное увеличение наблюдательной системы — около $1\times$ не позволяет эффективно использовать точность построения фотографических изображений.

По точности измерения снимков оптические приборы первой подгруппы относятся ко второму (двойные проекторы) или к третьему (мультиплексы) классу, второй подгруппы — к первому, а третьей — к третьему классу.

§ 81. ПРИНЦИПАЛЬНЫЕ СХЕМЫ МЕХАНИЧЕСКИХ
УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТЕРЕОПРИБОРОВ

Вторую группу универсальных стереоприборов, основанных на механическом способе решения фотограмметрической засечки, можно разделить на две подгруппы.

В приборах первой подгруппы (стереоавтограф Цейсса, стереоавтограф Ф. В. Дробышева, супрограф и стереотриголат Цейсса и др.) для решения фотограмметрической засечки применяются плоскостные механизмы.

Схема простейшего механизма такого типа представлена на рис. 174, а. На нем изображены проекции базиса фотографирова-

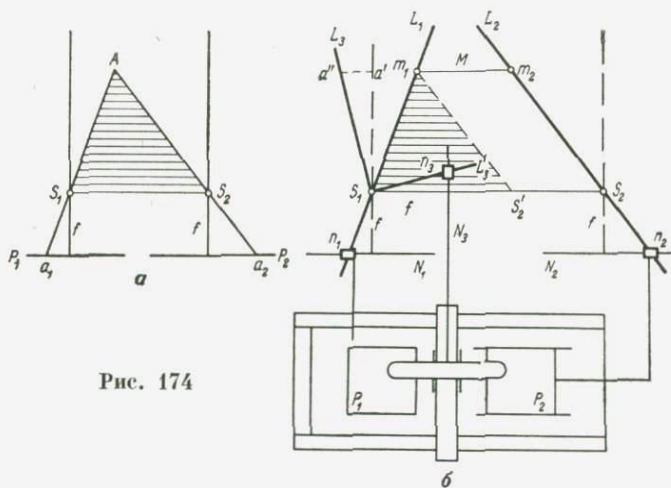


Рис. 174

ния S_1S_2 , снимков P_1P_2 и определяемой точки A на горизонтальную плоскость (план). Пусть в этой плоскости вокруг точек S_1 и S_2 вращаются линейки. Для определения планового положения точки A достаточно установить эти линейки под такими углами относительно базиса S_1S_2 , какие были во время съемки. Пересечение линеек укажет положение точки на плане.

В стереоавтографе, предназначенном для обработки наземных снимков, плоскостной механизм состоит из трех линеек L_1 , L_2 и L_3 , вращающихся вокруг точек S_1 и S_2 , соответствующих центрам проекции (рис. 174, б). Линейки L_1 и L_2 служат для определения планового положения точек местности, а линейка L_3 — для определения высот. Засечка осуществляется по принципу треугольник плюс параллелограмм. При этом расстояние между центрами вращения линеек не изменяется. Длинные плечи линеек L_1 и L_2 неизменно соприкасаются с роликами m_1 и m_2 , находящимися на мостике отстояний M . Мостик отстояний можно перемещать в двух взаимно перпендикулярных направлениях,

что вызывает повороты линеек L_1 и L_2 . Расстояние между центрами роликов устанавливается в соответствии с формулой (11.7).

Короткие плечи линеек L_1 и L_2 перемещают ползушки n_1 и n_2 по направляющим N_1 и N_2 , отстоящим от центров вращения линеек на расстоянии, равном фокусному расстоянию снимков f . Ползушки связаны с каретками стереокомпаратора. Таким образом, движение мостика отстояний вызывает перемещение снимков P_1 и P_2 относительно бинокулярного микроскопа стереокомпаратора.

Короткое плечо L'_3 линейки L_3 перпендикулярно к длинному. Поворот линейки L_3 вызывает смещение ползушки n_3 по направляющей N_3 , перпендикулярной к прямой S_1S_2 и удаленной от точки S_1 на расстояние f ; вследствие этого перемещается и бинокулярный микроскоп.

Пусть линейки находятся в начальном положении, т. е. перпендикулярны к прямой S_1S_2 , а левый и правый микроскопы наведены на главные точки соответствующих снимков. Установим расстояние между роликами m_1 и m_2 согласно формуле (11.7). Перемещая мостик отстояний, наведем бинокулярный микроскоп на точки a_1 и a_2 левого и правого снимков. В результате этого построим треугольник $S_1S'_2m_1$, подобный треугольнику S_1S_2A , существовавшему на местности во время фотографирования. При этом центр ролика m_1 будет представлять собой плановое положение определяемой точки. Превышение точки A над левым концом S_1 базиса фотографирования определяет отрезок $a'a''$.

Супрограф содержит более сложные плоскостные механизмы, позволяющие решать фотограмметрическую засечку по аэроснимкам.

В приборах второй подгруппы (автограф Вильда, стереопроектор Г. В. Романовского, стереограф Ф. В. Дробышева, универсальный стереопроектор В. С. Магницкого, стереокартограф Сантони и др.) фотограмметрическая засечка решается с помощью пространственных механизмов.

Вокруг точек S_1 и S_2 , соответствующих центрам проекции, вращаются рычаги R_1 и R_2 (рис. 175). Короткие плечи их в автографе связаны с наблюдательной системой (на рисунке показана только часть этой системы), а длинные проходят через карданы базисного устройства, расположенного на мостике M . Мостик имеет движения по трем взаимно перпендикулярным направляющим. Эти движения учитываются по счетчикам и фиксируются на планшете, что позволяет измерить координаты точек модели и составить карту. Камеры имеют все движения, необходимые для взаимного ориентирования снимков и внешнего ориентирования модели.

Стереопроектор и стереограф существенно отличаются от автографа тем, что снимки в этих приборах всегда находятся в горизонтальной плоскости, а влияние их углов наклона учитывается с помощью коррекционных механизмов. Эта особенность

позволяет применять в стереопроекторе и стереографе более простую наблюдательную систему, чем в автографе.

Фотограмметрическая засечка в приборах данной подгруппы осуществляется по принципу треугольник плюс параллелограмм. Исключением являются универсальный стереопроектор В. С. Магницкого и стереокартограф Сантони, в которых использован принцип двух треугольников.

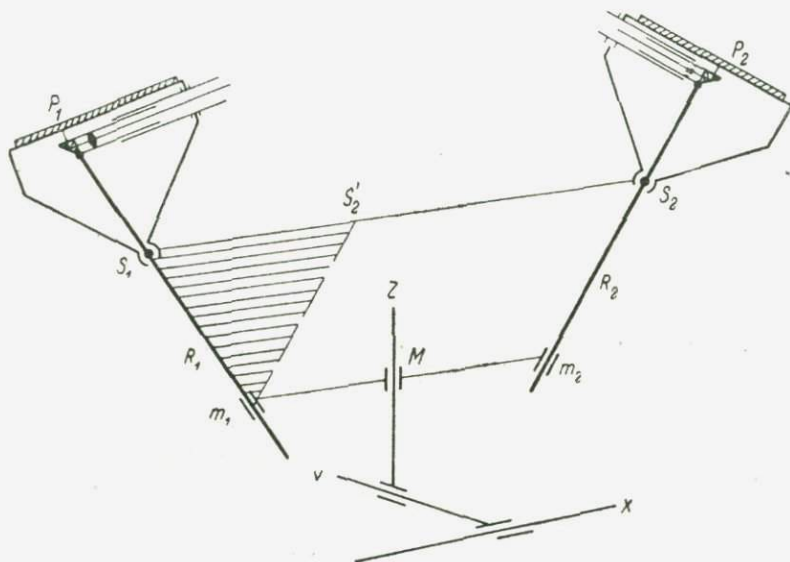


Рис. 175

К точности изготовления и юстировки плоскостных и пространственных механизмов предъявляются высокие требования.

К универсальным стереоприборам механического типа можно отнести оригинальный прибор Г. В. Лазарева, в котором счетно-решающие устройства выполнены в виде наполненных жидкостью сильфонов, кинематически связанных с коррекционными линейками и снимкодержателями (авторское свидетельство № 174378, бюлл. № 17, 1965).

§ 82. ПРИНЦИПАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТЕРЕОПРИБОРОВ

В универсальных стереоприборах третьей группы связки проектирующих лучей создаются оптически, а модель местности строится при помощи пространственных или плоскостных механизмов. В соответствии с этим приборы третьей группы можно разделить на две подгруппы.

К приборам первой подгруппы относится, например, фото-

стереограф Нистри. В нем связи образуются с помощью проектирующих камер, а модель — посредством пространственных рычагов R_1 и R_2 (рис. 176). Рычаги вращаются вокруг передних узловых точек проектирующих камер и устанавливаются по направлениям лучей. С рычагами связана наблюдательная система. При этом визирные оси микроскопов наблюдательной системы всегда проходят через точки пересечения осей рычагов со снимками. На рисунке показана только часть наблюдательной системы. Нижние концы рычагов проходят через карданы базисного устройства, находящегося на мостике M .

Мостик передвигается по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Эти движения учитываются по счетчикам и фиксируются на планшете, что позволяет измерять координаты точек модели и составлять карту. Проектирующие камеры имеют движение

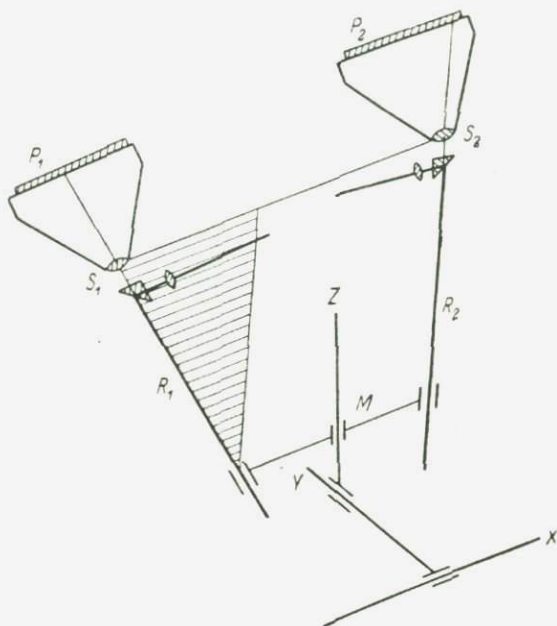


Рис. 176

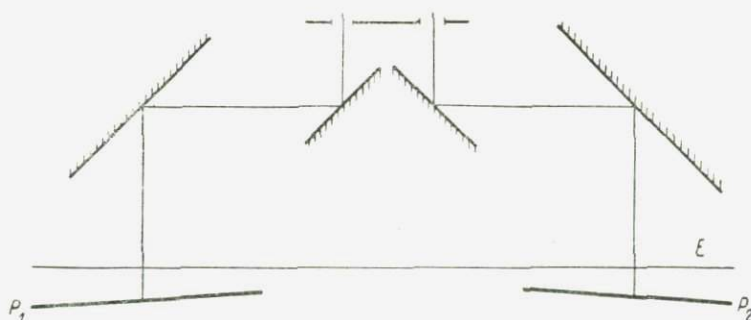


Рис. 177

ния для ориентирования снимков. Фотограмметрическая засечка осуществляется по принципу треугольник плюс параллелограмм.

К приборам второй подгруппы относится полевой стереопланиграф А. Н. Лобанова. В этом приборе связи лучей создаются

с помощью стереоскопа, служащего наблюдательной системой. Центрами проекции являются передние узловые точки глаз наблюдателя. Снимкодержатели имеют движения, необходимые для ориентирования снимков P_1 и P_2 (рис. 177). После ориентирования снимков в приборе образуются два трансформированных изображения как результат сечения связок горизонтальной плоскостью E . По этим изображениям составляется карта с помощью плоскостного механизма, который вводит поправки за рельеф в положение точек на левом трансформированном изображении и вычисляет высоты, т. е. решает уравнения (10.37).

§ 83. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА АНАЛИТИЧЕСКИХ УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТЕРЕОПРИБОРОВ

Универсальные стереоприборы аналитического типа созданы с целью расширения возможностей и повышения точности фотограмметрической обработки снимков.

Фотограмметрическая засечка в аналитических стереоприборах решается с помощью электронных цифровых вычислительных машин. Благодаря этому можно быстро и точно решать более

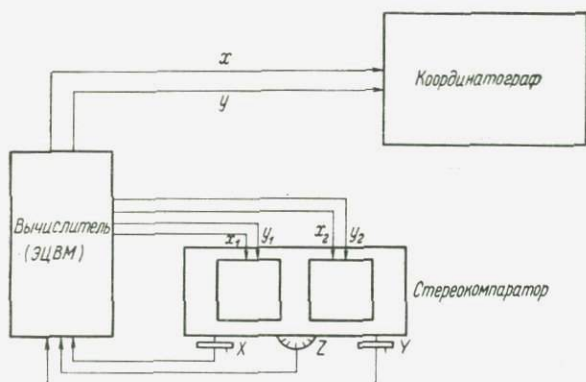


Рис. 178

сложные и более соответствующие реальным условиям уравнения зависимости между координатами точек местности и снимков по сравнению с теми уравнениями, которые приняты в идеальной центральной проекции и в обычных универсальных стереоприборах.

На аналитических стереоприборах можно обрабатывать снимки с любыми элементами ориентирования, полученные любыми фотокамерами, в том числе панорамными и щелевыми.

Аналитический стереоприбор состоит из координатного устройства, электронной цифровой вычислительной машины — вычислителя, стереоскопа и координатографа (рис. 178).

В координатное устройство входят два штурвала и ножной диск, приводимые в действие оператором. Оно вырабатывает

координаты точки модели, которые в виде импульсов поступают в вычислитель. Используя эти данные, а также элементы внешнего ориентирования снимков и другую информацию, необходимую для учета влияния систематических ошибок, вычислитель по специальной программе находит координаты соответственных точек левого и правого снимков и координаты точки карты. Результаты вычислений преобразуются из цифровой в аналоговую форму и используются для установки кареток стереокомпаратора и координатографа. После такой установки, выполняемой автоматически с помощью моторов, измерительная марка совмещается с определяемой точкой модели, а карандаш координатографа указывает положение этой точки на составляемой карте.

Пусть известны элементы внешнего ориентирования снимков. Введем в вычислитель эти величины и программу определения координат точек снимков по координатам точек модели (местности). Затем установим координатную систему и снимки в стереокомпараторе так, чтобы марка совместилась с какой-либо точкой модели, а отсчеты по шкалам X , Y и Z равнялись координатам соответствующей точки местности. Тогда для определения координат любой точки местности, изобразившейся на стереопаре, достаточно движениями X , Y и Z навести марку на соответствующую точку модели.

Если элементы внешнего ориентирования снимков неизвестны, но даны опорные точки, то можно решить обратную двойную засечку. Для этого измеряют координаты не менее пяти точек стереопары, по которым вычисляют элементы взаимного ориентирования снимков; затем строят модель и по опорным точкам находят ее элементы внешнего ориентирования. Эти величины используют для определения положения точек местности, изобразившейся на снимках.

Возможен и другой путь ориентирования снимков на аналитическом стереоприборе, например, путь, основанный на непосредственном определении элементов внешнего ориентирования по опорным точкам в результате решения обратной фотограмметрической засечки.

§ 84. СТЕРЕОПРОЕКТОР Г. В. РОМАНОВСКОГО

Стереопроектор — высокоточный универсальный стереоприбор механического типа. Он широко применяется в СССР для составления топографических карт по плановым снимкам.

Снимки в стереопроекторе находятся в горизонтальном положении. Влияние углов наклона снимков учитывается коррекционными механизмами, которые смещают объективы наблюдательной системы, т. е. трансформируют пару снимков.

Модель строится с помощью рычагов, вращающихся вокруг карданных центров, которые в общем случае не совпадают

с центрами проекции снимков. Поэтому связки в приборе не подобны существовавшим во время съемки, что вызывает неравенство горизонтального и вертикального масштабов модели.

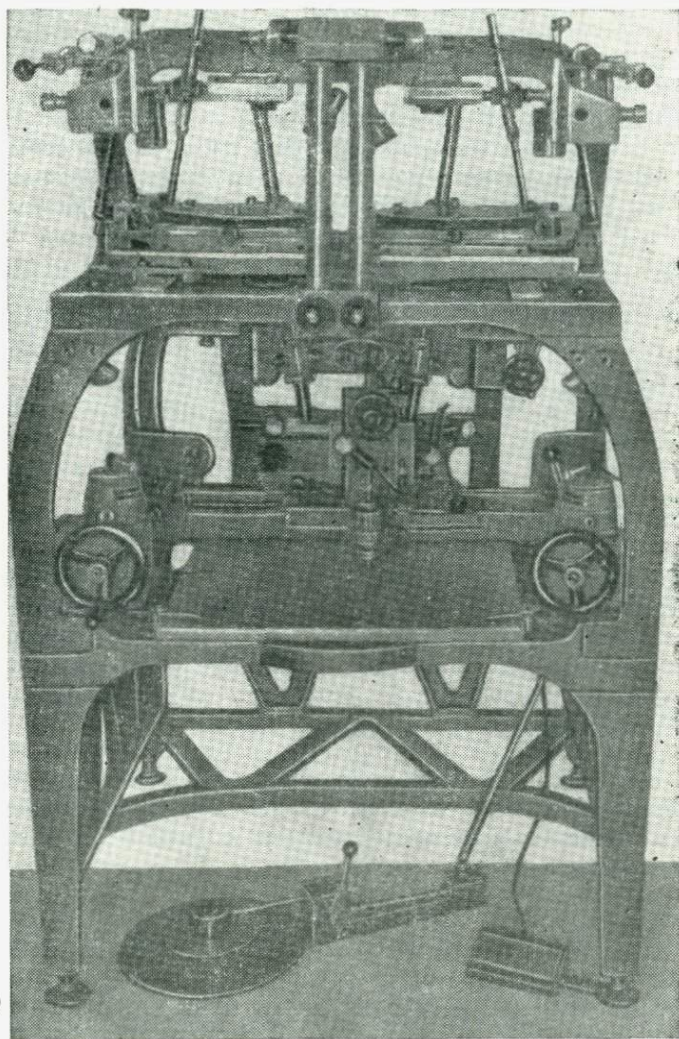


Рис. 179

Преобразование связок позволяет обрабатывать на стереопроекторе снимки с любыми фокусными расстояниями. Формат снимков — не больше 18×18 см.

Размещение снимков в горизонтальной плоскости позволило применить простую наблюдательную систему и обеспечить хорошие условия для рассматривания снимков.

Основными частями стереопроектора служат станина, каретки снимков, проектирующие рычаги, базисная каретка, каретка фокусных расстояний, наблюдательная система и коррекционный механизм (рис. 179 и 180).

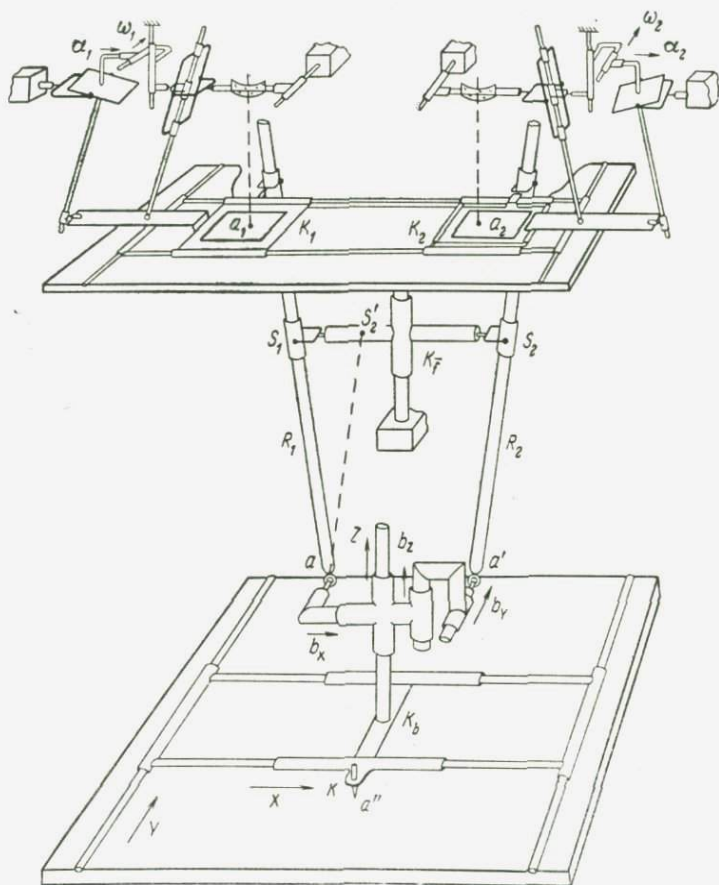


Рис. 180

Каретки снимков K_1 и K_2 расположены горизонтально на верхней части станины. При повороте проектирующих рычагов R_1 и R_2 они перемещаются по направляющим, параллельным осям X и Y прибора. На каретках снимков находятся снимкодержатели.

Проектирующие рычаги R_1 и R_2 проходят через двухосные скользящие шарниры и поворачиваются вокруг

центров этих шарниров S_1 и S_2 . Шарниры находятся на каретке фокусных расстояний K_f , которая перемещается по вертикальным направляющим. Это движение соответствует изменению фокусного расстояния проектирующей камеры \bar{f} . Нижние концы рычагов связаны с базисной кареткой, а верхние проходят через шарниры, прикрепленные к кареткам снимков.

Базисная каретка K_b с помощью штурвалов перемещается вдоль осей X и Y прибора. Эти движения отсчитываются по счетчикам и повторяются карандашом K на планшете. Верхняя

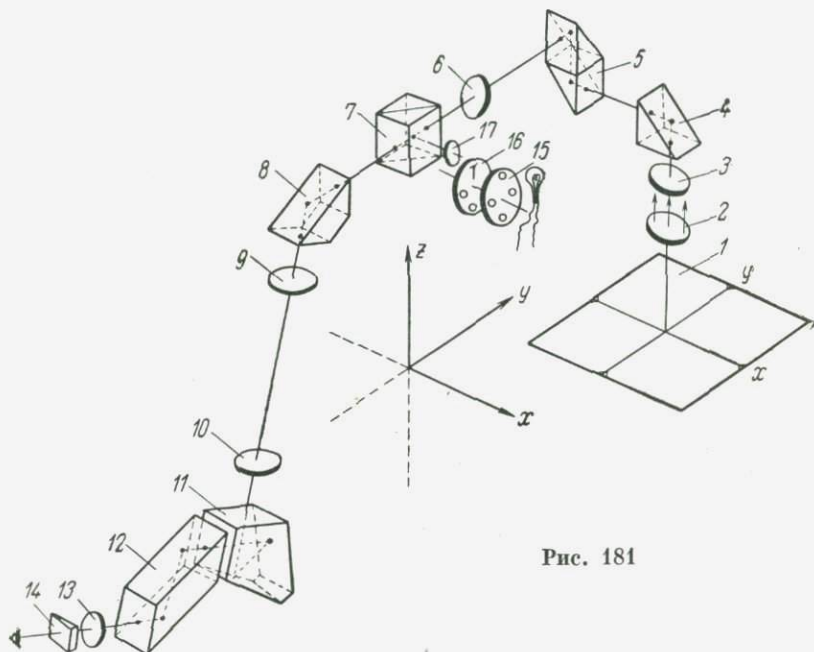


Рис. 181

часть базисной каретки перемещается с помощью ножного диска вдоль оси Z , что позволяет измерять высоты точек модели, отсчитывая их также по счетчику. Фотограмметрическая засечка в стереопроекторе осуществляется по принципу треугольник плюс параллелограмм ($S_1S_2'a$ и $aa'S_2S_2'$). Поэтому расстояние между центрами проектирования S_1 и S_2 — величина постоянная, а для установки базиса верхняя часть базисной каретки имеет движения b_x , b_y и b_z , параллельные осям X , Y и Z прибора. Эти движения позволяют изменять расстояние между нижними концами проектирующих рычагов.

Наблюдательная система состоит из левого и правого рукавов, симметричных относительно вертикальной плоскости YZ прибора. На рис. 181 представлена схема правого рукава. Снимок I находится в главной фокальной плоскости объектива 2. Этот объектив укреплен на каретке, которая переме-

щается коррекционным механизмом в продольном и поперечном направлениях. За ним следуют объектив 3 и прямоугольная призма 4. До призмы 4 визирный луч направлен параллельно оси Z прибора. Призма 4 направляет луч параллельно оси X в призму 5, состоящую из двух прямоугольных призм. Призма 5 перемещает луч несколько вверх и направляет его параллельно оси Y в коллектив 6 и кубическую призму 7, составленную из двух прямоугольных призм. Диагональная грань кубической призмы посеребрена на 10% и служит для включения в систему оптической марки.

Далее луч попадает в трапециевидную призму 8, которая направляет его вниз под углом в 15° к вертикали. За этой призмой следуют коллективы 9 и 10, а также пентапризма 11, выполняющая роль прямоугольной призмы, но имеющая две отражательные грани. Пентапризма направляет луч вверх под углом 75° к вертикали. Оптические детали, расположенные за пентапризмой, — ромбическая призма 12, окуляр 13 и оптический клин 14 — принадлежат бинокулярной головке. Ромбическая призма позволяет изменять расстояние между окулярами, а с помощью оптического клина можно перемещать в небольших пределах изображения снимка и марки в фокальной плоскости окуляра, что необходимо для устранения зрительного вертикального параллакса.

Марки имеют следующее устройство. На посеребренном диске 16 выгравированы четыре марки — три кольцеобразные и одна Т-образная. Каждая марка включается в оптическую систему поворотом диска. Марка освещается лампой, перед которой установлен диск 15 со сменными цветными фильтрами — белым, желтым и зеленым. Марка проектируется объективом 17. Диагональная грань кубической призмы направляет часть лучей, идущих от марки, в световой пучок, исходящий от снимка.

Коррекционный механизм решает уравнение

$$r^0 = r - \delta r, \quad (11.8)$$

где r — радиус-вектор на плановом снимке, соединяющий точку нулевых искажений с наблюдаемой точкой,

δr — смещение наблюдаемой точки, вызванное наклоном снимка,

r^0 — радиус-вектор на горизонтальном снимке, соответствующий величине r .

Согласно формуле (1.68)

$$\delta r = - \frac{r^2 \sin \varphi \sin \varepsilon}{f - r \sin \varphi \sin \varepsilon},$$

или

$$\delta r = - \frac{r(r - \delta r) \sin \varphi \sin \varepsilon}{f}, \quad (11.9)$$

вертикальной направляющей, что вызывает смещение шарнира по высоте на величину δl и каретки объектива на величину δr по направлению, параллельному радиусу-вектору.

Пусть рычаги 1 и 2 перпендикулярны к плоскости снимка, визирный луч проходит через точку нулевых искажений, а стержень II смещен на величину d относительно центра шарнира 10. Действуя штурвалами, переместим каретку снимка, чтобы визирный луч прошел через точку a . В результате этого рычаги R, 1, 2 и тарелка 9 повернутся, каретка 3 опустится и объектив O сместится на величину δr . Вследствие смещения объектива каретка снимка будет передвинута не на r , а на величину $r - \delta r$.

Как следует из рис. 182,

$$\delta r = \delta l \operatorname{tg} \beta' = d \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \beta',$$

где β и β' — углы отклонения рычагов 1 и 2 от вертикали. При этом

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{r - \delta r}{l}, \quad \operatorname{tg} \beta' = \frac{r - \delta r}{l - \delta l} = \frac{r}{l}.$$

Следовательно,

$$\delta r = d \frac{r(r - \delta r)}{l^2}. \quad (11.10)$$

Сравнивая это выражение с равенством (11.9), видим, что коррекционный механизм вводит поправки за наклон снимков при условии, если смещение стержня II

$$d = \frac{l^2}{f} \sin \varphi \sin \varepsilon. \quad (11.11)$$

В приборе стержень II смещается в продольном и поперечном направлениях на величины

$$\left. \begin{aligned} d_x &= \frac{l^2}{f} \sin \varphi_x \sin \varepsilon \\ d_y &= \frac{l^2}{f} \cos \varphi_x \sin \varepsilon \end{aligned} \right\}. \quad (11.12)$$

При этом вместо угла наклона снимка ε используют углы наклона его координатных осей ε_x и ε_y .

Согласно формулам (1.13) и (1.15) и учитывая, что для оси x $\varkappa = 90^\circ - \varphi_x$, напишем

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \sin \varepsilon_x = \sin \varepsilon \sin \varphi_x = \sin \alpha \cos \varkappa + \cos \alpha \sin \omega \sin \varkappa \\ c_2 &= \sin \varepsilon_y = \sin \varepsilon \cos \varphi_x = -\sin \alpha \sin \varkappa + \cos \alpha \sin \omega \cos \varkappa \end{aligned} \right\}. \quad (11.13)$$

Отсюда найдем приближенные зависимости между углами ε_x , ε_y и α , ω

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \alpha + \omega \varkappa \\ \varepsilon_y &= \omega - \alpha \varkappa \end{aligned} \right\}. \quad (11.14)$$

Таким образом, составляющие смещения стержня *II*

$$\left. \begin{aligned} d_x &= \frac{l^2}{f} \varepsilon_x \approx \frac{l^2}{f} \alpha \\ d_y &= \frac{l^2}{f} \varepsilon_y \approx \frac{l^2}{f} \omega \end{aligned} \right\}. \quad (11.15)$$

Согласно теории построения модели по трансформированным изображениям (см. § 78) при отвесном положении проектирующего рычага визирный луч должен проходить через точку надира снимка, а согласно теории коррекционного механизма при отвесном положении рычагов этого механизма на визирном луче должна быть точка нулевых искажений. Первое требование теории выполняется путем децентрации снимка

$$\Delta = f \operatorname{tg} \varepsilon \approx f \varepsilon, \quad (11.16)$$

а второе — путем децентрации коррекционного механизма

$$\delta = f \operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2} \approx \frac{1}{2} f \varepsilon. \quad (11.17)$$

Децентрация снимка вводится смещением верхней части каретки снимка относительно нижней, с которой связаны шарнир пространственного рычага и суппорт 5. Децентрация коррекционного механизма устанавливается передвижением суппорта 5. В приборе устанавливают составляющие этих децентраций по осям *x* и *y*

$$\left. \begin{aligned} \Delta_x &= f \alpha, & \delta_x &= -\frac{1}{2} f \alpha \\ \Delta_y &= f \omega, & \delta_y &= \frac{1}{2} f \omega \end{aligned} \right\}. \quad (11.18)$$

Если проектирующий рычаг и рычаги коррекционного механизма приведены в вертикальное положение, а визирный луч проходит через центр снимкодержателя, то отсчеты по шкалам децентраций равны начальным.

Стереопроектор имеет два коррекционных механизма, которые расположены симметрично относительно плоскости *YZ* прибора.

П о в е р к и п р и б о р а

После сборки стереопроектора проверяют наблюдательную систему прибора. Для каждой ветви этой системы определяют качество изображения снимка и марок, диапазоны фокусировки и коэффициент увеличения. Кроме того, после сборки и периодически в процессе эксплуатации прибора проверяют:

горизонтальность и взаимную перпендикулярность направляющих *X* и *Y*, по которым перемещается базисная каретка;

вертикальность направляющей *Z*, по которой перемещается верхняя часть базисной каретки;

параллельность базисных движений b_X , b_Y и b_Z осям X , Y и Z прибора;

вертикальность направляющей каретки фокусных расстояний;

горизонтальность направляющих, по которым перемещаются каретки снимков, а также параллельность этих направляющих осям X и Y прибора;

горизонтальность направляющих, по которым перемещается верхняя часть каретки снимка относительно нижней, а также параллельность их осям X и Y ;

горизонтальность направляющих суппорта каретки снимка и параллельность их осям X и Y ;

горизонтальность направляющих каретки объектива наблюдательной системы и параллельность их осям X и Y ;

вертикальность направляющей каретки $З$ (см. рис. 182) коррекционного механизма;

горизонтальность направляющих, по которым перемещается стержень II коррекционного механизма, и параллельность их осям X и Y прибора;

совмещенность центра вращения рычага I коррекционного механизма с центром сферы нижнего конца стержня II при начальном положении последнего;

горизонтальность тарелки 9 при вертикальном положении стержня I коррекционного механизма;

вертикальность рычага 2 при отвесном положении рычага I коррекционного механизма;

совмещение центров скользящих шарниров 6 и 7 коррекционного механизма при совпадении центра сферы нижнего конца стержня II с центром вращения рычага I ;

равенство перемещений каретки объектива и изображения снимка относительно изображения визирной марки.

Для выполнения этих проверок применяют контрольные сетки, индикаторы, уровни и другие приспособления.

Затем находят постоянную I коррекционного механизма, равную разности высот центров шарниров 10 и 8 или 6 и 4 , а также места нулей шкал прибора:

— шкалы фокусных расстояний — отсчет, соответствующий совмещению центров шарниров S_1 и S_2 (см. рис. 180) с горизонтальной плоскостью, проходящей через центры верхних шарниров;

— шкалы высот Z — отсчет, соответствующий совмещению шарнира a с горизонтальной плоскостью, проходящей через центры верхних шарниров;

— счетчиков b_X , b_Y и b_Z — отсчеты, соответствующие отвесному положению пространственных рычагов при равенстве расстояний S_1a и S_2a' ;

— шкал децентраций снимков — отсчеты, соответствующие отвесному положению проектирующих рычагов и визированию на центры снимкодержателей;

— шкал децентраций коррекционных механизмов — отсчеты, соответствующие отвесному положению проектирующих рычагов и рычагов коррекционного механизма и визированию на центры снимкодержателей;

— шкал a_x и d_y — отсчеты, соответствующие совмещению центра сферы нижнего конца стержня II с центром вращения рычага I коррекционного механизма.

Для взаимного ориентирования снимков и внешнего ориентирования модели в стереопроекторе служат следующие движения:

— повороты снимкодержателей в своих плоскостях κ_1 и κ_2 ;

— смещения стержней II коррекционных механизмов d_{x1} , d_{y1} , d_{x2} , d_{y2} ($\alpha_1, \omega_1, \alpha_2, \omega_2$);

— децентрации коррекционных механизмов $\delta_{x1}, \delta_{y1}, \delta_{x2}, \delta_{y2}$;

— децентрации снимков $\Delta_{x1}, \Delta_{y1}, \Delta_{x2}, \Delta_{y2}$;

— базисные движения b_x, b_y, b_z ;

— перемещение каретки фокусных расстояний \bar{f} ;

— движение держателя карандаша параллельно оси X ;

— перемещение планшета в направлении оси Y и поворот его.

Для измерения координат точек модели и для составления карты используются движения базисной каретки вдоль осей X , Y и Z прибора.

О р и е н т и р о в а н и е с н и м к о в и м о д е л и

Снимки устанавливают в снимкодержатели так, чтобы главные точки совпали с центрами снимкодержателей. По шкалам коррекционных механизмов устанавливают $\Delta = \delta = 0$ и $d = 0$ ($\alpha = \omega = 0$). Вводят в прибор приближенное значение b_x и $b_y = b_z = 0$.

Затем снимки ориентируют взаимно первым или вторым способом, устраняя поперечные параллаксы на точках $I-6$ (см. рис. 147). Движения, используемые при взаимном ориентировании снимков, влияют на поперечные параллаксы так, как показано в гл. 8. Исключением является движение d_y (ω), которое не вызывает поперечных параллаксов на точках I и 2 .

Взаимное ориентирование снимков первым способом выполняют движениями $\kappa_2, \kappa_1, \alpha_2$ (d_{x1}), α_1 (d_{x1}) и ω_2 (d_{y2}) в последовательности, указанной на рис. 153. Устранив поперечные параллаксы на точках $I-5$, отсчитывают величины d по шкалам коррекционных механизмов и по формулам (11.18) находят децентрации. Вводят их в прибор и вновь устраняют поперечные параллаксы. Эти действия повторяют до тех пор, пока поперечные параллаксы не исчезнут или не будут выходить за допустимые пределы.

При взаимном ориентировании снимков вторым способом поперечные параллаксы устраняются движениями $b_y, \kappa_2, b_z, \alpha_2$ (d_{x2}) и ω_2 (d_{y2}) в последовательности, отмеченной на рис. 157, а децентрации устанавливаются только для правого снимка и правого коррекционного механизма.

Внешнее ориентирование модели выполняют в такой последовательности:

- приводят модель к заданному горизонтальному масштабу,
- устанавливают вертикальный масштаб модели,
- приводят модель в горизонтальное положение и ориентируют ее относительно планшета.

В стереопроекторе СПР-2 планшет расположен на экране прибора. Поэтому горизонтальный масштаб модели должен быть равен масштабу составляемой карты. Горизонтальный масштаб модели определяют путем сравнения проекции расстояния между опорными точками на модели и соответствующего расстояния на планшете. Чтобы привести модель к заданному масштабу, изменяют установку базиса в приборе (см. § 73).

Вертикальный масштаб должен быть таким, чтобы все точки модели расположились в пределах возможного диапазона перемещений верхней части базисной каретки вдоль оси Z прибора. Для выполнения этого требования визируют на точку модели, имеющую приблизительно среднюю высоту, приводят верхнюю часть базисной каретки в среднее положение и совмещают визирную марку с выбранной точкой перемещением каретки фокусных расстояний, т. е. путем изменения фокусного расстояния прибора \bar{f} . Затем отсчитывают по шкале величину этого расстояния и находят по формуле (10.3) знаменатель вертикального масштаба модели

$$t_B = \frac{f}{\bar{f}} t_r.$$

Окончательное значение знаменателя вертикального масштаба выбирают по таблице установок шкал и шестерен на счетчике высот. По этой таблице находят значение t_B , наиболее близкое к вычисленному по формуле (10.3), а также шкалу и пару шестерен, которые следует установить на счетчике высот, чтобы отсчитывать высоты точек в метрах.

Вычисляют фокусное расстояние прибора, соответствующее выбранному вертикальному масштабу модели,

$$\bar{f} = f \frac{t}{t_B},$$

и устанавливают его в приборе.

В горизонтальное положение модель приводят сначала в поперечном направлении, по опорным точкам 1 и 2 (см. рис. 161). Визируют на точку 1 модели и устанавливают геодезическую высоту этой точки на счетчике высот. Затем визируют на точку 2 модели и отсчитывают ее высоту Z_2 . Действуя ножным штурвалом, устанавливают на счетчике высот отсчет, равный $\frac{1}{2}(Z_2 + Z_{r2})$, где Z_{r2} — геодезическая высота точки 2. Далее одновременными движениями ω_1 (d_{y1}) и ω_2 (d_{y2}) совмещают измерительную марку

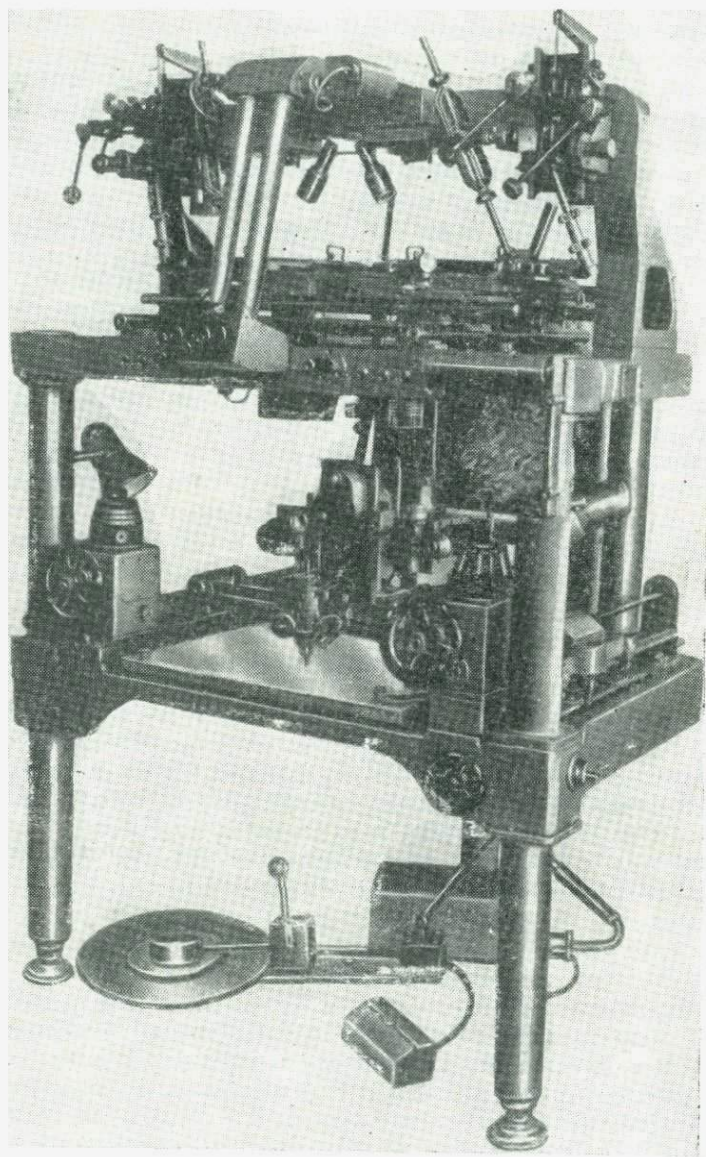


Рис. 183

с точкой 2 модели. На счетчике высот устанавливают геодезическую высоту точки 2. Проверяют высоту точки 1. Если она не равна геодезической, повторяют описанные выше действия, добиваясь, чтобы измеренные высоты точек 1 и 2 были равны геодезическим.

После этого устанавливают модель в продольном направлении, измеряют высоты точек 3 и 4 модели и вычисляют разности

$$\left. \begin{aligned} \delta Z_3 &= Z_{г3} - Z_3 \\ \delta Z_4 &= Z_{г4} - Z_4 \end{aligned} \right\} \quad (11.19)$$

На точке 3 движением Z устанавливают на счетчике высот отсчет

$$Z'_3 = Z_3 + \frac{1}{2} (\delta Z_3 + \delta Z_4). \quad (11.20)$$

Измерительную марку совмещают с точкой 3 модели движением α_1 (d_{x1}), устраняя возникающий при этом поперечный параллакс движением b_z . Затем наблюдают точку 1 и устраняют поперечный параллакс на этой точке движением α_2 (d_{x2}).

После приведения модели в горизонтальное положение вновь вводят децентрации, уточняют взаимное ориентирование и масштаб модели. В случае необходимости уточняют и горизонтирование модели. Наконец, ориентируют планшет относительно модели.

Заключив ориентирование снимков и модели, переходят к определению координат отдельных точек и рисовке контуров и рельефа.

На рис. 183 представлена третья модель стереопроектора, отличающаяся от второй следующими особенностями:

— прибор снабжен координатографом, что значительно расширило пределы изменения масштаба составляемой карты по сравнению с масштабами обрабатываемых снимков;

— децентрация коррекционных механизмов вводится автоматически при установке децентрации снимков;

— наблюдательная система снабжена двумя комплектами подвижных объективов, что позволяет обрабатывать снимки с большими углами наклона;

— точность прибора в два раза выше.

Основные характеристики третьей модели следующие:

Размер снимков	до 18 × 18 см
Фокусные расстояния снимков	35—350 мм
Фокусное расстояние прибора	150—300 мм
Увеличение наблюдательной системы	6 и 10×
Поле зрения при увеличении 6×	30 мм
Отношение масштаба снимков к масштабу карты:	
без координатографа	0,5—2,0
с координатографом	0,1—10,0
Максимальные разности высот точек местности (в долях высоты фотографирования) при n , равном 0,5	0,5

Предельные значения углов наклона снимков при фокусных расстояниях снимков, равных 100 и 35 мм	5,1 и 1,8°
Размеры стереопроектора	116 × 120 × 190 см
Масса	800 кг
Размеры координатографа	120 × 128 × 80 см
Масса	150 кг
Средняя квадратическая ошибка определения высот по макетным снимкам	1 : 8000 от высоты фотографирования

§ 85. СТЕРЕОГРАФ Ф. В. ДРОБЫШЕВА

Стереограф — широко распространенный в СССР универсальный стереоприбор механической засечки. Он основан на теории преобразования связок проектирующих лучей, что позволяет обрабатывать снимки с различными фокусными расстояниями без смены проектирующих камер.

Снимки в стереографе находятся в горизонтальной плоскости. Влияние углов наклона снимков учитывается с помощью коррекционных механизмов, которые автоматически вводят поправки в положение каждой наблюдаемой точки. Таким образом, наклонные снимки приводятся к горизонтальным. По результатам трансформирования пары снимков строится модель с помощью рычагов, вращающихся вокруг центров проектирования. Верхние концы рычагов связаны со снимками, а нижние — с базисной кареткой, перемещающейся по трем взаимно перпендикулярным направлениям. При движении базисной каретки рычаги поворачиваются и смещают снимки под неподвижной наблюдательной системой.

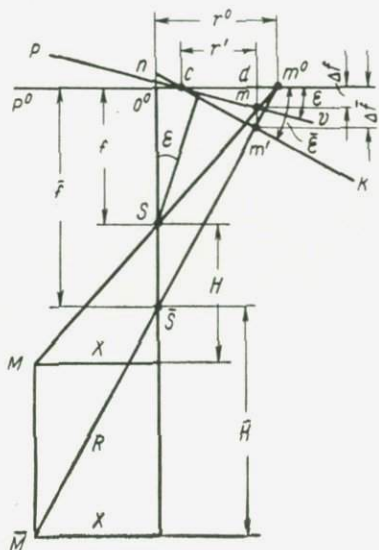


Рис. 184

При этом рычаги создают связки лучей, соответствующие горизонтальным снимкам. В отличие от стереопроектора поправки за наклон снимка вводятся не смещением объектива наблюдательной системы, а изменением фокусного расстояния проектирующей камеры.

Пусть с точки S получены два снимка: наклонный P и горизонтальный P^0 (рис. 184). Точка M местности изобразилась в точке m на наклонном снимке и в точке m^0 на горизонтальном.

Выберем новый центр проектирования \bar{S} и проведем луч $m^0\bar{S}$ из точки m^0 через этот центр до пересечения с отвесной прямой,

проходящей через точку M . Проведем еще вертикальную линию через точку m . Пересечение этой линии с лучом $m^0\bar{S}$ обозначим через m' .

Плоскость K , проходящая через линию неискаженных масштабов и точку m' , называется *коррекционной*. Она позволяет по наклонному снимку получить связку, соответствующую горизонтальному снимку. Действительно, пусть снимок P наклонен на угол ε , существовавший во время фотографирования, а коррекционная плоскость K — на угол $\bar{\varepsilon}$. Пусть вокруг \bar{S} поворачивается рычаг R . Провизуируем ортогональным лучом на точку m и установим одновременно конец рычага в точку m' коррекционной плоскости, находящуюся на продолжении визирного луча. Тогда ось рычага пройдет и через точку m^0 горизонтального снимка. При этом если точка M принадлежит подобной модели, то точка \bar{M} — преобразованной.

Учитывая, что f — фокусное расстояние снимка, а \bar{f} — фокусное расстояние прибора, напишем

$$\frac{r^0}{f} = \frac{X}{H}, \quad \frac{r^0}{\bar{f}} = \frac{X}{\bar{H}}.$$

Отсюда

$$\bar{H} = \frac{\bar{f}}{f} H. \quad (11.21)$$

Это означает, что вертикальный масштаб модели равен горизонтальному, умноженному на коэффициент преобразования связки. Плановое положение точек преобразованной модели такое же, как и на подобной модели.

Найдем угол наклона коррекционной плоскости. Из рис. 184 следует

$$\Delta f = r' \operatorname{tg} \varepsilon, \quad \Delta \bar{f} = r' \operatorname{tg} \bar{\varepsilon},$$

откуда

$$\operatorname{tg} \bar{\varepsilon} = \frac{\Delta \bar{f}}{\Delta f} \operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\bar{f}}{f} \operatorname{tg} \varepsilon. \quad (11.22)$$

Из рисунка следует также, что центр вращения с коррекционной плоскости должен находиться в плоскости главного вертикала наклонного снимка и отстоять от отвесной линии, проходящей через центр проектирования S , на величину

$$\delta = o^0c = f \operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2}. \quad (11.23)$$

Итак, чтобы при наблюдении снимка отвесным визирным лучом придать проектирующему рычагу правильное положение, необходимо установить снимок под углом ε , существовавшим во время фотографирования, а коррекционную плоскость повернуть вокруг

линии неискаженного масштаба на угол $\bar{\varepsilon}$. При этом фокусное расстояние прибора изменяется на величину

$$\bar{\Delta f} = cd \operatorname{tg} \bar{\varepsilon} = r \cos \varepsilon \operatorname{tg} \bar{\varepsilon}.$$

или

$$\bar{\Delta f} = kr \sin \varepsilon, \quad (11.24)$$

где r — радиус-вектор на наклонном снимке: соединяющий точку нулевых искажений с точкой m , а $k = \bar{f} : f$.

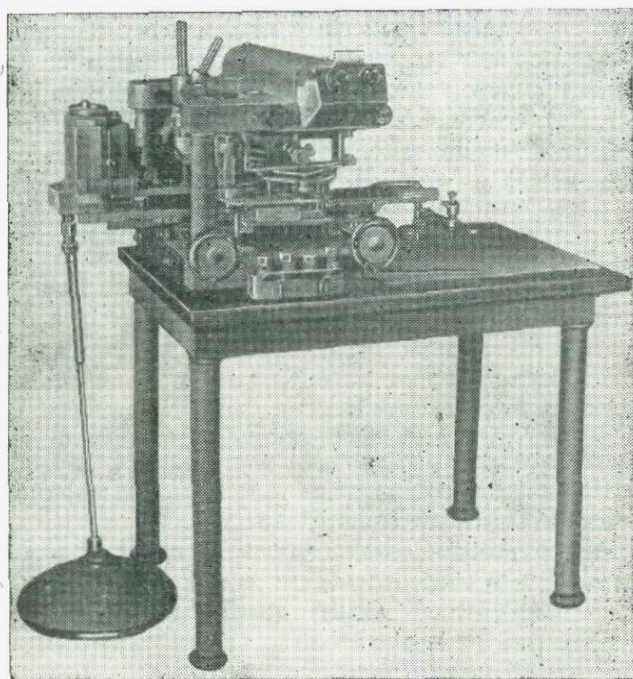


Рис. 185

На рис. 184 наблюдаемая точка находится на главной вертикали снимка sv . Для произвольно расположенной точки снимка

$$\Delta \bar{f} = kr \sin \varepsilon \sin \varphi, \quad (11.25)$$

где φ — угол между линией неискаженных масштабов и радиусом-вектором r .

Из выражения (11.25) следует, что для точек, лежащих на линии неискаженных масштабов, $\Delta \bar{f} = 0$. При данных значениях ε , k и r максимальное смещение $\Delta \bar{f}$ соответствует точке, расположенной на главной вертикали ($\varphi = 90^\circ$).

Так как снимки в стереографе занимают горизонтальное положение, а согласно теории они должны быть наклонены, то в процессе обработки возникает некоторая погрешность. Она равна разности отрезков cm и cd . Обозначив эту разность через δr , для точки главной вертикали напишем

$$\delta r = cm - cd = r - r \cos \varepsilon$$

или

$$\delta r = \frac{1}{2} r \varepsilon^2. \quad (11.26)$$

При обработке на приборе гиостабилизированных снимков, отличающихся малыми углами наклона, эта погрешность не имеет никакого практического значения.

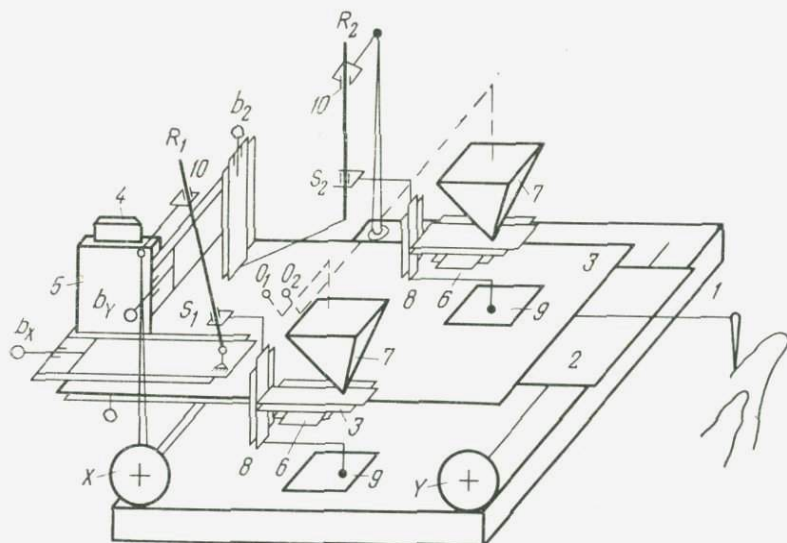


Рис. 186

На рис. 185 представлена третья модель стереографа (СД-3), а на рис. 186 — схема прибора.

Основные части стереографа: станина, снимкодержатели, проектирующие рычаги, коррекционные механизмы, базисная каретка, наблюдательная система и координатограф.

На станине 1, прикрепленной к столу, находятся направляющие, осуществляющие ось Y прибора. По этим направляющим перемещается каретка 2 с направляющими, которые осуществляют ось X прибора. По направляющим, прикрепленным к каретке 2, перемещается каретка 3. Каретки 2 и 3 приводятся в движение с помощью штурвалов X и Y.

На каретке 3 находится направляющая 4, по которой с помощью ножного диска Z перемещается базисная каретка 5. Следовательно, вращая штурвалы X и Y и ножной диск Z, можно

перемещать базисную каретку вдоль трех взаимно перпендикулярных осей прибора.

На каретке 3 находятся и направляющие дифференциальных кареток 6, а на каретках 6 — направляющие дифференциальных кареток 7, с которыми связаны снимкодержатели. С каретками 7 соединены направляющие кареток изменения фокусного расстояния 8. Каретки 8 заканчиваются шаровыми опорами, которые касаются коррекционных плоскостей 9. Последние смонтированы на станине и могут наклоняться с помощью микрометрических винтов на углы $k\alpha$ и $k\omega$.

Таким образом, при смещении кареток 2 и 3 вдоль осей X и Y прибора шаровые опоры скользят по коррекционным плоскостям 9, что вызывает смещение кареток 8 вдоль вертикальных направляющих, т. е. изменение фокусного расстояния прибора.

С каретками 8 связаны нижние карданы S_1 , S_2 и снимкодержатели. Верхние карданы 10 и наблюдательная система прикреплены к станине. Через карданы S_1 , S_2 и 10 проходят рычаги R_1 и R_2 , определяющие направление проектирующих лучей. Центры нижних карданов S_1 и S_2 представляют собой центры проектирования.

При изменении фокусных расстояний нижние карданы S_1 и S_2 скользят вдоль проектирующих рычагов, в результате чего смещаются в горизонтальной плоскости дифференциальные каретки, несущие снимкодержатели. Эти смещения соответствуют разностям абсцисс и ординат точек на наклонных и горизонтальных снимках.

На базисной каретке 5 имеются суппорты, позволяющие вводить в прибор базис фотографирования путем смещения левой камеры на величину b_X и правой на величины b_Y и b_Z .

На суппорте b_X расположены шаровые опоры рычагов R_1 и R_2 , определяющие положение точки модели.

Следовательно, с помощью коррекционных плоскостей происходит дифференциальное перемещение центров проектирования в нижних карданах, что вызывает дифференциальные смещения снимков, компенсирующие влияние углов наклона снимков. Эти смещения происходят отдельно для каждой наблюдаемой точки. Поэтому модель, как и в стереопроекторе, строится не сразу для всей стереопары, а лишь в наблюдаемой точке.

Каждый снимкодержатель имеет поворот κ в своей плоскости и движения для введения децентраций снимка вдоль осей x и y .

Наблюдательная система представляет собой бинокулярный микроскоп, обеспечивающий ортогональное визирование на точки снимков. Оптическая схема бинокулярного микроскопа показана на рис. 187: 1 и 1' — левый и правый снимки, 2 и 2' — призмы, 3 и 3' — объективы ($F = 179,3$ мм), 4 и 5 — зеркала, 4', 4'' и 5' — блок призм, 6 и 6' — объективы бинокуляра ($F = 124,7$ мм), 7 и 7' — трапецевидные призмы, 8 и 8' — защитные стекла с мар-

ками, 9 и 9' — окуляры, 10 и 10' — оптические клинья, 11 и 11' — зрачки выхода.

Призмы 4', 4'' и 5' позволяют сохранить параллельность лучей при изменении установки бинокулярного микроскопа по главному базису.

Призма 2 (2') и объектив 3 (3') находятся на одном подвижном плато, которое можно смещать вдоль оси Y прибора с помощью микрометрических винтов, расположенных с правой стороны бинокулярного микроскопа. Это смещение соответствует поперечной децентрации снимка.

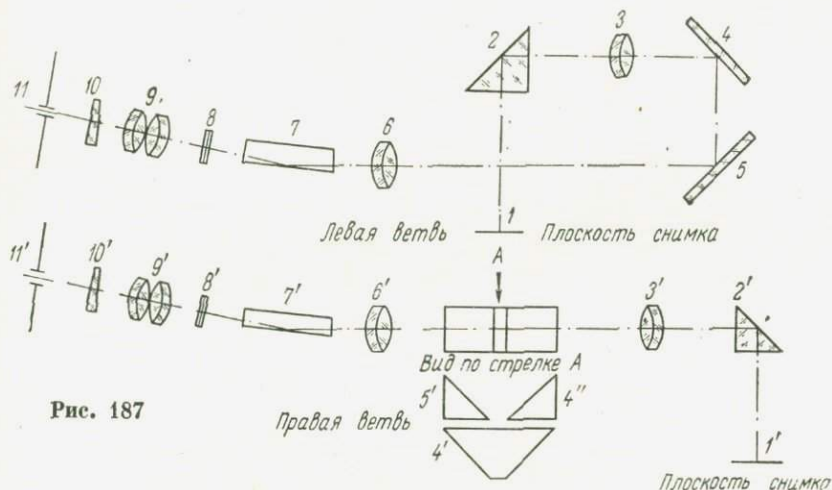


Рис. 187

Координатограф служит для получения графического положения отдельных точек и проведения горизонталей и контуров в масштабе составляемой карты. При этом переход от масштаба модели к масштабу карты осуществляют путем замены шестерен в редукторах.

Основные характеристики стереографа (СД-3):

Размер снимка	до 18 × 18 см
Фокусное расстояние снимков	55—210 мм
Фокусное расстояние прибора	127—133 мм
Увеличение наблюдательной системы	4 и 7 [×]
Поле зрения при увеличении 7 [×]	28 мм
Отношение масштаба снимков к масштабу карты	0,5—3,0
Максимальные разности высот точек местности	0,35H
Предельные значения углов наклона снимков при фокусном расстоянии камеры 55, 70, 100, 140 и 200 мм соответственно	3,2; 4,1; 5,9; 4,1; 3,0°
Размеры прибора со столом	135 × 105 × 125 см
Масса прибора	400 кг
Средняя квадратическая погрешность определе- ния высот по макетной стереопаре	1 : 8000 от высоты фотографирования

После сборки и юстировки стереографа, а также периодически в процессе эксплуатации прибора выполняют рабочие проверки, в результате чего определяют нульпункты шкал и постоянные стереографа. Затем исследуют инструментальную точность прибора по контрольным сеткам и макетным снимкам Г. А. Ошуркова.

Основными процессами обработки снимков на стереографе являются:

— установка снимков,

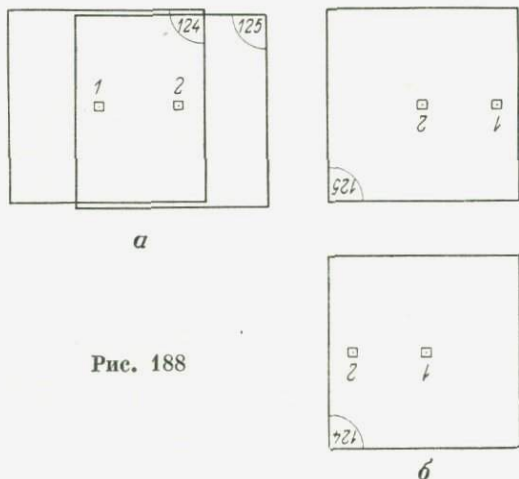


Рис. 188

— установка масштабов модели и коэффициента координатографа,

— взаимное ориентирование снимков,

— внешнее ориентирование модели,

— съемка контуров и рельефа.

Левый снимок (диапозитив) стереопары устанавливают в ближнюю к наблюдателю кассету, а правый — в дальнюю так, чтобы их эмульсионная сторона была обращена вверх (рис. 188). Координатные метки каждого снимка совмещают с награвированными на стекле кассеты индексами.

Затем вычисляют среднее значение масштаба снимков для данного района

$$\frac{1}{m_{\text{ср}}} = \frac{f}{H_{\text{ср}}}, \quad (11.27)$$

где $H_{\text{ср}}$ — среднее значение высоты фотографирования,
 f — фокусное расстояние снимков.

Находят приближенное значение знаменателя горизонтального масштаба модели и коэффициента координатографа k_u

$$t'_r = \frac{m_{\text{ср}}}{1,2}, \quad (11.28)$$

$$k'_u = \frac{t'_r}{M}, \quad (11.29)$$

где M — знаменатель масштаба создаваемой карты.

По величине k'_u с помощью таблиц выбирают шестерни, отношение зубьев которых k_u близко к вычисленному коэффициенту k'_u . Вычисляют знаменатель горизонтального масштаба модели

$$t_r = k_u \cdot M \quad (11.30)$$

и коэффициент преобразования связки, равный отношению фокусного расстояния прибора к фокусному расстоянию снимков: $f: f = k$.

Далее находят приближенное значение знаменателя вертикального масштаба модели $t'_в = t_r : k$. По таблице выбирают окончательное значение знаменателя вертикального масштаба, возможно близкое к $t'_в$, а также соответствующие ему шестерни и шкалу для счетчика высот.

Взаимное ориентирование снимков выполняют путем последовательных приближений первым или вторым способом.

Если применяют первый способ, то поперечные параллаксы на точках 1—5 устраняют движениями κ_2 , κ_1 , α_2 , α_1 и ω_2 (см. рис. 153). Определяют и вводят децентрации левого и правого снимков

$$\left. \begin{aligned} \Delta_x &= f \operatorname{tg} \alpha = \frac{f l_\alpha}{90k} \\ \Delta_y &= f \operatorname{tg} \omega = \frac{f l_\omega}{80k} \end{aligned} \right\}, \quad (11.34)$$

где l_α и l_ω — смещения толкателей коррекционной плоскости относительно начального положения,

90 и 80 — расстояния от центра вращения коррекционной пластинки до толкателей в мм,

k — коэффициент преобразования связки.

Затем вновь устраняют поперечные параллаксы на точках 1—5 и т. д. до тех пор, пока не исчезнет поперечный параллакс и на точке 6.

Применяя второй способ взаимного ориентирования снимков, поперечные параллаксы на точках 1—5 устраняют движениями b_y , κ_2 , b_z , α_2 и κ_2 , а децентрации вводят только для правого снимка (см. рис. 157). Согласно теории прибора следует вводить и децентрацию коррекционной плоскости, равную $f \operatorname{tg} \frac{1}{2} \varepsilon$. Однако при небольших углах наклона снимков в этом нет необходимости,

и центр вращения коррекционной плоскости в стереографе занимает постоянное положение.

Внешнее ориентирование модели, а также съемка контуров и рельефа на стереографе принципиально не отличаются от соответствующих процессов, выполняемых в стереопроекторе. Механизм общего наклона коррекционных плоскостей, осуществленный в стереографе, заметно облегчает приведение модели в горизонтальное положение.

В 1970 г. Ф. В. Дробышеву присуждена Ленинская премия за создание высокоточных универсальных стереоприборов.

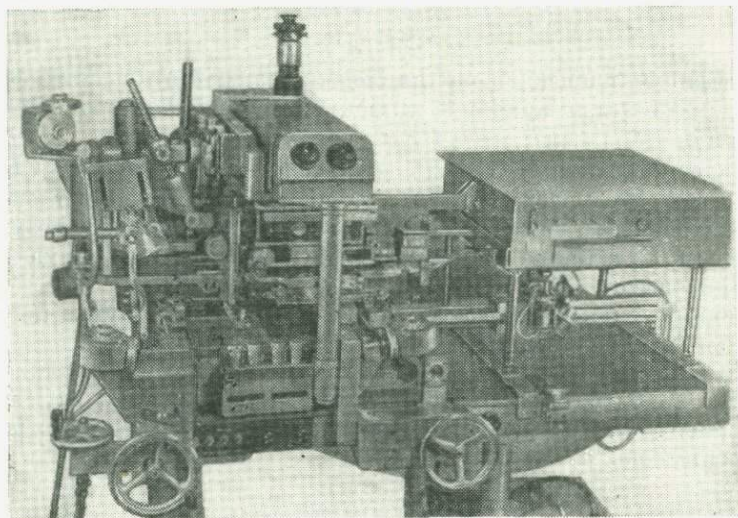


Рис. 189

Ф. В. Дробышев предложил и разработал фотоприставку к стереографу, позволяющую получать фотографическое изображение местности в ортогональной проекции — ортофотоснимок (рис. 189).

После взаимного ориентирования снимков и внешнего ориентирования модели правый снимок *P* проектируется через щель *Щ* на светочувствительный материал, заложенный в кассету *K* (рис. 190, *a*). Источник света и щель неподвижны. Когда снимки смещаются вдоль оси *У* прибора, кассета перемещается в обратном направлении и на фотоматериале фиксируется изображение в виде узкой полоски, ширина которой равна длине щели. При этом масштаб изображения непрерывно меняется в зависимости от рельефа местности, изобразившейся на данной полоске. Снимки вдоль оси *У* перемещаются мотором. Наблюдатель в это время вращает ножной штурвал и следит за тем, чтобы измерительная

марка касалась поверхности модели. Вращение ножного штурвала вызывает смещение кассеты K и объектива S вдоль оси aa' , что обеспечивает постоянство масштаба изображения местности на ортофотоснимке. Резкость изображения снимка сохраняется с помощью инверсора.

Когда проектирование данной полосы закончено, снимки автоматически смещаются вдоль оси X на величину, равную длине щели, и проектируется следующая полоска. Таким образом трансформируется вся часть правого снимка, которая перекрывается с левым.

Чтобы автоматизировать и высотное движение при щелевом трансформировании, на планшете проводят горизонталы и изготавливают восковку с отверстиями — перфокарту. На восковке прочерчивают параллельные линии с интервалом, равным ширине полос. Приложив восковку к планшету, отмечают пересечения горизонталей с параллельными линиями: пробивают отверстия справа, если отметка данной горизонтали выше отметки предыдущей, или слева, если отметка уменьшается.

Перфокарту устанавливают под двумя следящими системами с фотореле. В процессе трансформирования световые импульсы, проходящие через отверстия перфокарты, преобразуются в движение мотора, который смещает базисную каретку по высоте вверх или вниз.

Горизонталы можно нанести на прозрачную пленку и заложить ее в кассету (на фотопленку). Тогда на ортофотоснимке будут не только контуры, но и горизонталы.

В изложенном способе дифференциального трансформирования снимка щель имеет не бесконечно малые, а конечные размеры. Поэтому на ортофотоснимке вследствие влияния рельефа местности возникает ошибка в положении точек на краю полосы, например точки e (рис. 190, б).

Подсчитаем эту ошибку по формуле (1.76)

$$\delta r_c = \frac{h}{H} r,$$

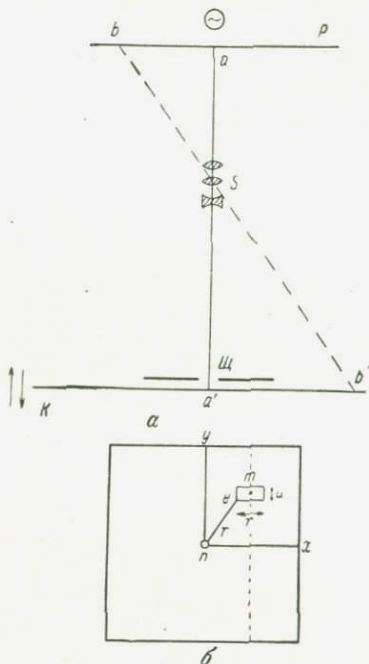


Рис. 190

где r — расстояние на снимке от точки надира n до определяемой точки e ,

H — высота фотографирования над точкой местности, соответствующей центру элементарного участка,

h — разность высот точек местности, соответствующих точке e и центру элементарного участка.

Обозначив через L отрезок на местности, соответствующий длине щели l , напишем

$$h = \frac{1}{2} L \operatorname{tg} i_X = \frac{1}{2} l \frac{H}{f} \operatorname{tg} i_X, \quad (11.32)$$

где i_X — угол наклона местности вдоль оси X .

Следовательно,

$$\delta r_x = \frac{rl}{2f} \operatorname{tg} i_X. \quad (11.33)$$

Кроме того, точки ортофотоснимка имеют «смаз», величина которого зависит от ширины щели u и может быть подсчитана по формуле, аналогичной (11.33).

$$\delta r_y = \frac{ru}{f} \operatorname{tg} i_Y, \quad (11.34)$$

где i_Y — угол наклона местности вдоль оси Y .

П. С. Александров предложил счетно-решающее устройство для уменьшения ошибки на стыках полос. Оно позволяет увеличить длину щели и повысить производительность дифференциального трансформирования. Это устройство положено в основу нового прибора для щелевого трансформирования.

§ 86. ЩЕЛЕВОЙ ФОТОТРАНСФОРМАТОР ФТЩ-2

Щелевой фототрансформатор предложен и разработан Е. И. Калантаровым и Г. П. Жуковым и представляет собой оптический универсальный стереоприбор, состоящий из тройного проектора и щелевого проектора (рис. 191).

Тройной проектор позволяет по трем уменьшенным снимкам (диапозитивам) построить модель местности, а также привести ее к заданному масштабу и в горизонтальное положение.

Щелевой проектор служит для дифференциального трансформирования оригинального (неуменьшенного) снимка с целью получения фотографического изображения местности в ортогональной проекции — ортофотоснимка.

Каждая камера тройного проектора имеет повороты α , ω и η и движения b_X , b_Y , b_Z , необходимые для ориентирования снимков. Фокусное расстояние проектирующей камеры можно изменять. Диапозитивы центрируются так, чтобы главные точки их совпадали с главными точками прикладных рамок камер. Если снимки обрабатываются с преобразованными связками, то вводится де-

центрация по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Яркость освещения снимков можно регулировать с помощью реостатов.

Для измерения модели служит измерительный столик, перемещающийся по взаимно перпендикулярным направляющим вдоль осей X и Y прибора. На столике находятся два экрана с измерительными марками, стереоскоп и счетчик высот. На экраны проектируются снимки. Изображения снимков, полученные на экра-

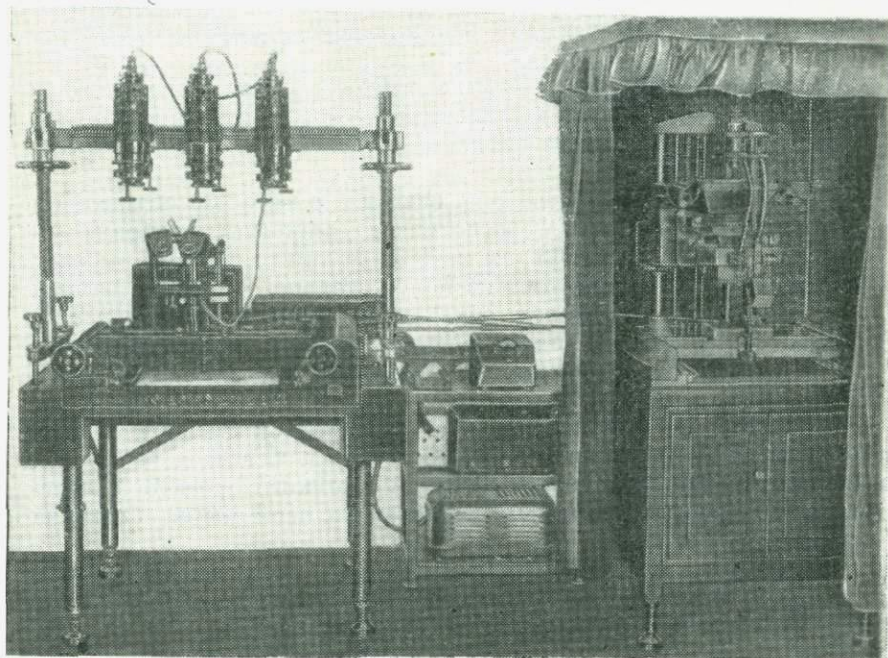


Рис. 191

нах, рассматриваются с помощью стереоскопа. Таким образом, наблюдения производятся способом мнимой марки, а фотограмметрическая засечка осуществляется по принципу треугольник плюс параллелограмм.

Экраны расположены на каретке высот, перемещающейся вдоль оси Z . Это движение учитывается по счетчику высот.

Измерительный столик перемещается с помощью штурвалов или моторов. Движения его передаются на каретку щелевого проектора.

Щелевой проектор состоит из стола и трех систем: проектирующей, шторно-щелевой и системы управления освещением снимка.

Проектирующая система проектирует на светочувствительный материал трансформируемый снимок по частям, обеспечивая резкость изображения при неизменном фокусном расстоянии камеры и переменной высоте проектирования. В эту систему входят камера, дополнительная оптическая система, осветитель и кассета.

Камеру с помощью карданной подвески можно наклонять в продольном и поперечном направлениях на углы α и ω . Верхняя часть камеры, несущая снимкодержатель, поворачивается на угол κ . Нижняя часть камеры имеет суппорты, позволяющие децентрировать снимок в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Объектив камеры находится в тубусе и может перемещаться вдоль оптической оси для установки фокусного расстояния камеры. Камера соединяется через карданную подвеску с кареткой высот тройного проектора.

Дополнительная оптическая система вместе с объективом проектирующей камеры обеспечивает резкость изображения снимка на светочувствительном материале при различных высотах проектирования. Она состоит из положительной и отрицательной линз, установленных перед объективом камеры, и инверсора, который изменяет расстояние между линзами так, чтобы плоскости снимка и заложенного в кассету фотоматериала были оптически сопряжены.

Осветитель состоит из конденсора и точечной лампы и служит для освещения проектируемой части снимка. С помощью рычага, связанного с измерительным столиком тройного проектора, осветитель поворачивается вокруг передней узловой точки объектива камеры.

Шторно-щелевая система имеет щелевую диафрагму, которая находится над кассетой и повторяет движения X и Y измерительного столика тройного проектора.

Система управления освещением снимка автоматически выравнивает оптическую плотность снимка. Для этого она изменяет яркость свечения лампы, увеличивая ее при увеличении интегральной оптической плотности проектируемой части снимка, и наоборот. Эта система обеспечивает оптимальную экспозицию для каждой трансформируемой части снимка. Она представляет собой следящую систему, входом которой является фотоэлемент, дающий электрический ток, пропорциональный интегральной яркости изображения проектируемой части снимка, а выходом — нить накаливания лампы.

Основными процессами создания ортофотоснимка на щелевом фототрансформаторе являются:

- подготовительные работы,
- построение модели местности,
- установка камеры щелевого проектора,
- щелевое проектирование.

В подготовительные работы входят изготовление диапозитивов, выбор направления движения щели, выбор щелевой диафрагмы, регулировка освещения и системы управления им, изготовление основ для трансформирования, установка фокусных расстояний камер и высот проектирования.

Диапозитивы готовят на фотоуменьшителе.

Направление движения щели выбирают вдоль оси X или Y прибора в зависимости от того, в какую сторону направлено подавляющее большинство склонов местности, изобразившейся на трансформируемом снимке.

Размеры щели находят по формулам (11.33) и (11.34).

Регулировка освещения заключается в установке освещенности по шкале люксметра и коэффициента контраста в электронно-выравнивающем устройстве.

Построение модели по трем диапозитивам.

На основы для трансформирования наносят опорные точки и другие данные, необходимые для обработки снимков на приборе.

Для определения высоты проектирования Z и фокусного расстояния \bar{f} камеры тройного проектора воспользуемся основным уравнением оптики

$$\frac{1}{Z} + \frac{1}{\bar{f}} = \frac{1}{F},$$

где F — фокусное расстояние объектива камеры.

Пусть $1 : t_r$ — горизонтальный масштаб модели, равный масштабу ортофотоснимка, а k — коэффициент преобразования связи. Тогда

$$Z = \frac{k}{t_r} H = \frac{\bar{f}}{nft_r} H_{cp} \quad (11.35)$$

где f — фокусное расстояние снимка,

n — коэффициент увеличения диапозитива,

nf — фокусное расстояние диапозитива,

H_{cp} — высота фотографирования над средней плоскостью.

Подставив значение Z в основное уравнение оптики и решив его относительно \bar{f} , получим

$$\bar{f} = \left(1 + \frac{nt_r}{H_{cp}}\right) F. \quad (11.36)$$

Это значение \bar{f} обеспечивает наилучшую резкость изображения диапозитивов на экранах.

Фокусное расстояние камеры щелевого проектора

$$\bar{f}_{щ} = \frac{1}{n} \bar{f}. \quad (11.37)$$

Если эту величину установить нельзя, то трансформирование снимка выполняется с преобразованной связкой.

Построение модели по трем снимкам обеспечивает возможность трансформирования всего второго снимка. Для создания модели снимки ориентируют взаимно и внешне по углам наклона их и опорным точкам, полученным в результате пространственной фототриангуляции.

Установка камеры щелевого проектора в соответствии с элементами ориентирования второй камеры тройного проектора. При этом децентрацию трансформируемого снимка находят по формуле (10.14). Учитывая, что коэффициент преобразования связки $k = \bar{f}_{щ} : f$, эту формулу представим в виде

$$\delta = \frac{1}{2} f (k^2 - 1) \varepsilon, \quad (11.38)$$

где f — фокусное расстояние трансформируемого снимка, а $\bar{f}_{щ}$ — фокусное расстояние камеры щелевого проектора.

Надирный луч в этом случае составляет угол σ с перпендикуляром к экрану. Согласно (10.17)

$$\sigma = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{f^2}{\bar{f}_{щ}^2} \right) \bar{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left(\frac{k^2 - 1}{k} \right) \varepsilon. \quad (11.39)$$

Однако щелевой проектор перемещается перпендикулярно к экрану. Поэтому при смещении проектора на величину h' возникает смещение точки надира на экране на величину

$$g = \sigma h' = \frac{k^2 - 1}{2t} h \varepsilon, \quad (11.40)$$

где h — превышение на местности, соответствующее h' , а t — знаменатель масштаба ортофотоснимка.

Пусть $\bar{f} = 210$ мм, $f = 70$ мм, $\varepsilon = 3^\circ$. Тогда $g = 0,2 \frac{h}{t}$. При $t = 10\,000$ и $g = 0,8$ мм получим $h = 40$ м.

Смещение можно исключить, если надирный луч преобразованной связки установить вертикально путем введения двойной децентрации. Однако и в этом случае возникают искажения ортофотоснимка, которые можно подсчитать, применив формулу (10.33).

Щелевое проектирование заключается в последовательном сканировании модели по параллельным маршрутам с одновременным проектированием второго снимка через щель на светочувствительный материал.

После фотографической обработки результатов щелевого проектирования получается ортофотоснимок.

Основные характеристики щелевого фототрансформатора:

Формат трансформируемых снимков	18 × 18 см
Максимальные углы наклона снимков при фокусных расстояниях 200, 100, 70 и 50 мм соответственно	10, 5, 3,5 и 2,5°
Формат диапозитивов	60 × 60 мм

Фокусное расстояние камеры тройного проектора	60—80 мм
Фокусное расстояние объектива этой камеры . . .	54 мм
Углы наклона и угол поворота камеры	$\alpha = \omega = \pm 7^\circ$, $\kappa = 360^\circ$
Увеличение стереоскопа	$1,3^\times$
Скорость сканирования модели с помощью моторов	2, 5, 4, 6 и 8 мм/с
Фокусное расстояние камеры щелевого проектора	202—214 мм
Фокусное расстояние объектива этой камеры	208 мм
Углы наклона и угол поворота камеры	$\alpha = \omega = \pm 10^\circ$, $\kappa = 360^\circ$
Децентрация снимка	20 мм
Длина щелей (вдоль линии сканирования) . . .	0,5 и 1,0 мм
Ширина	2,5 и 5,0 мм
Формат ортофотоснимка	до 30×30 см
Размеры прибора	$2,5 \times 1,0 \times 1,8$ м

§ 87. АВТОГРАФЫ ВИЛЬДА

За рубежом широко распространены автографы Вильда — приборы механической засечки, изготовленные в Швейцарии и предназначенные для обработки снимков с подобными связками.

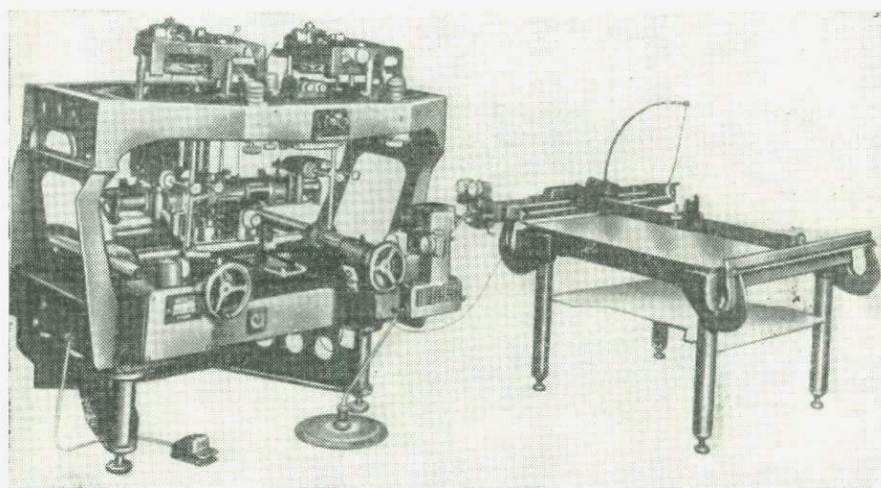


Рис. 192

Автограф А-7 состоит из двух камер с проектирующими рычагами, базисной каретки, направляющих X, Y, Z, наблюдательной системы и координатографа (рис. 192 и 193).

Каждую камеру можно наклонять на углы ω (первичный) и α , а снимкодержатель поворачивать в его плоскости на угол κ . Оси вращения камеры и снимкодержателя взаимно перпендикулярны и пересекаются в центре кардана, через который проходит проектирующий рычаг. Рычаг вращается вокруг этого центра

и осуществляет проектирующие лучи. Таким образом, центры карданов S_1 и S_2 служат центрами проекции.

Нижние концы рычагов проходят через карданы базисной каретки, которая с помощью двух штурвалов и ножного диска перемещается по трем взаимно перпендикулярным направляющим. Эти направляющие соответствуют осям X , Y и Z прибора.

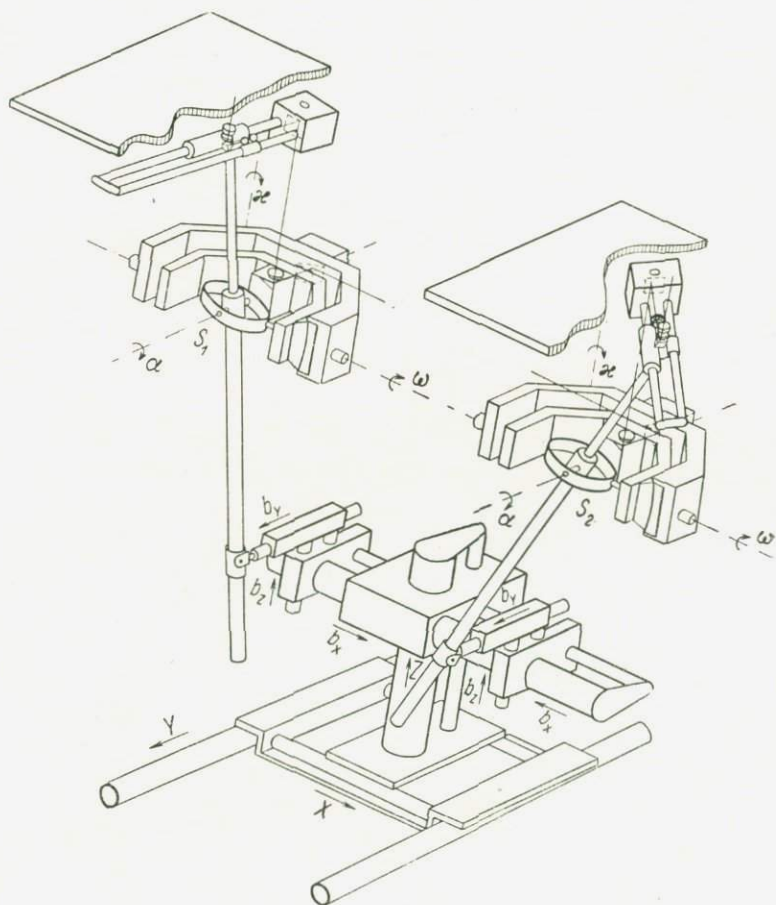


Рис. 193

Для решения фотограмметрической засечки использован принцип треугольник плюс параллелограмм. При этом расстояние между центрами проекции постоянно, а базис фотографирования устанавливают путем изменения расстояния между центрами нижних карданов движениями b_x , b_y и b_z . Центр левого нижнего кардана отображает точку модели.

Верхний конец рычага находится в камере и связан шаровым соединением с кареткой, несущей объектив I , измерительную

марку m и призму 1 (рис. 194). Каретка находится на направляющей n . Поворот рычага вызывает смещение каретки на направляющей и вращение последней вокруг оси ii .

Объектив I строит изображение снимка P в плоскости измерительной марки m . Лучи, идущие от этого изображения и от марки, отражаются в призме I и, пройдя объектив II, направляются параллельно, так как главная фокальная плоскость этого объектива совмещена с плоскостью марки. Призма 2 направляет параллельный пучок вниз на объектив III (рис. 195). Далее лучи проходят призмы 3 и 4. Ось пучка между этими призмами совпадает с осью вращения α проектирующей камеры.

Пройдя призмы 5 и 6, лучи попадают в призму 7, в которой они отражаются дважды, и направляются сначала вверх вдоль оси Z , а затем вдоль оси Y и, выйдя из призмы, падают на объектив IV. Лучи, идущие из правой проектирующей камеры, тоже попадают в призму 7, но после первого отражения идут вниз, а затем вдоль оси Y . Из

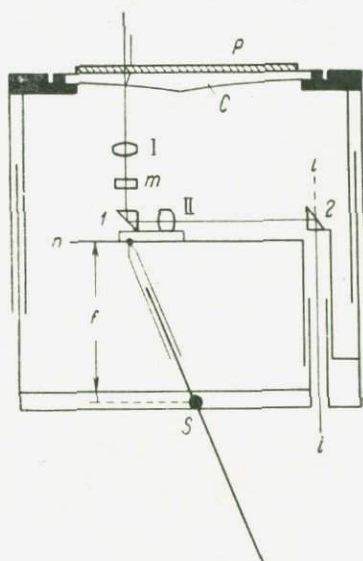


Рис. 194

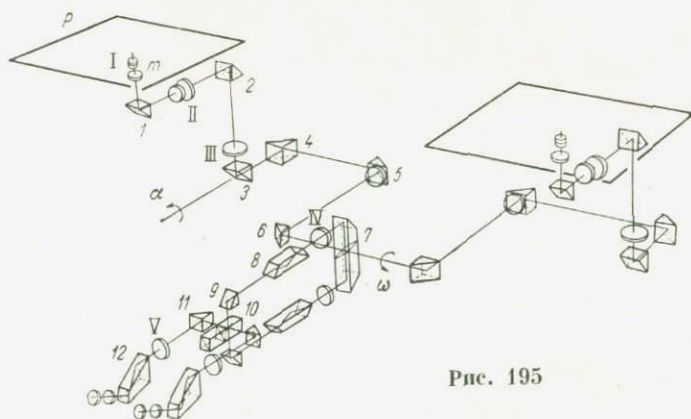


Рис. 195

объектива IV выходит параллельный пучок. Он следует через призму Дове 8, призмы 9, 10 и 11 на объектив V, который посылает лучи в призму 12, а затем строит изображения снимка и марки в фокальной плоскости окуляра.

В призме 10 лучи отражаются так, что оси левого и правого пучков из вертикальной плоскости переходят в горизонтальную.

Для обработки диапозитивов призму 9 заменяют другой, имеющей две отражательные грани. Эта замена осуществляется поворотом рычага, расположенного под окуляром.

Параллельный ход лучей между объективами II и III обеспечивает возможность изменения фокусного расстояния камеры без нарушения резкости изображения снимка.

Призмы Дове служат для компенсации вращения изображений снимков, вызванного поворотами камер. Кроме того, они используются для поворота изображений снимков при фототриангуляции и для преобразования поперечных параллаксов в продольные с целью повышения точности их измерения или устранения.

Таким образом, в автографе, так же как в стереографе и стереопроекторе, визирная ось наблюдательной системы пересекает снимок всегда под прямым углом.

Если снимки ориентированы и пространственная марка движениями базисной каретки наведена на точку модели, то рычаги восстанавливают направления из центров проекции на определяемую точку, а визирные оси наблюдательной системы проходят через соответственные точки.

С базисной кареткой связан координатограф, карандаш которого вычерчивает карту в заданном масштабе.

Автограф А-7 позволяет обрабатывать аэроснимки и наземные снимки с высокой точностью. Он применяется для фототриангулирования и составления топографических карт и планов.

Прибор снабжен электрическим приспособлением ЕК-3 для автоматической регистрации координат точек модели в журнале или на перфокартах. Перфокарты используются для вычисления геодезических координат точек местности при помощи электронной счетной машины.

Влияние дисторсии объектива съёмочной камеры можно исключить с помощью стеклянной коррекционной пластинки С, которая укрепляется в снимкодержателе (см. рис. 194). Нижняя поверхность пластинки имеет форму, соответствующую дисторсии.

Основные характеристики автографа А-7:

Размер снимков	до 23 × 23 см
Фокусное расстояние проектирующих камер	от 98 до 215 мм
Увеличение наблюдательной системы	8,5 и 10×
Диаметр измерительной марки в плоскости снимка	0,04 мм
Отношение масштаба модели к масштабу карты	0,3—8
Углы наклона и углы поворота проектирующих камер:	

$$\omega_1 \text{ и } \omega_2 \text{ от } 70 \text{ до } 109^g, \alpha_1 \text{ от } 70 \text{ до } 106^g$$

$$\kappa_1 \text{ и } \kappa_2 \text{ от } 0 \text{ до } 400^g, \alpha_2 \text{ от } 94 \text{ до } 130^g \text{ (от-}$$

счеты $\omega = \alpha = 100^g$ соответствуют гори-

зонтальному снимку)

Диапазоны движений:

$$X = \pm 280 \text{ мм}, b_X = \pm 280 \text{ мм}$$

$$Y \text{ от } 350 \text{ до } -420 \text{ мм}, b_{Y_1} = b_{Y_2} = \pm 50 \text{ мм}$$

$$Z \text{ от } 140 \text{ до } 490 \text{ мм}, b_{Z_1} = b_{Z_2} = \pm 27 \text{ мм}$$

Точность отсчета величин:

угловых $0,01^\circ$

линейных $0,01 \text{ мм}$

Размеры прибора $360 \times 195 \times 260 \text{ см}$

Масса прибора 1700 кг

Средняя квадратическая погрешность определения высот по макетной стереопаре $1 : 10\,000$ от высоты фотографирования

Автограф А-8 предназначен для составления карт по плановым снимкам (рис. 196). В этом приборе в отличие от автографа А-7 нижние концы проектирующих рычагов R_1 и R_2 соеди-

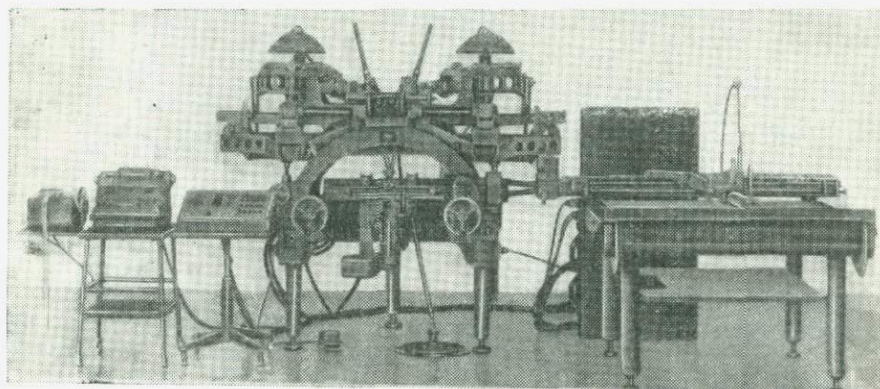


Рис. 196

нены шарнирно и фотограмметрическая засечка осуществляется путем построения треугольника (рис. 197). Для установки базиса фотографирования изменяется расстояние между центрами карданов S_1 и S_2 , которые служат центрами проектирования.

Шарнир a можно перемещать двумя ручными штурвалами и ножным диском вдоль осей X , Y и Z прибора. Движения X и Y передаются на координатограф для составления карты.

При смещении шарнира a рычаги поворачиваются вокруг соответствующих центров проектирования. Верхние концы рычагов проходят через шарниры a'_1 и a'_2 , связанные с концами пантографов. При повороте рычага R_1 (R_2) центр шарнира a'_1 (a'_2) перемещается в плоскости, параллельной снимку P_1 (P_2). Расстояние от этой плоскости до центра кардана S_1 (S_2) устанавливается равным фокусному расстоянию снимка.

Для ориентирования снимки имеют отдельные наклоны ω и α и повороты κ , а также совместный наклон ξ . Оси поворотов α , ω и κ проходят через центры карданов S_1 и S_2 .

Пантограф представляет собой двойной параллелограмм с постоянным коэффициентом увеличения 1:1. На конце его, расположенном под снимком, вмонтирована телескопическая система, состоящая из объективов I и II, измерительной марки m

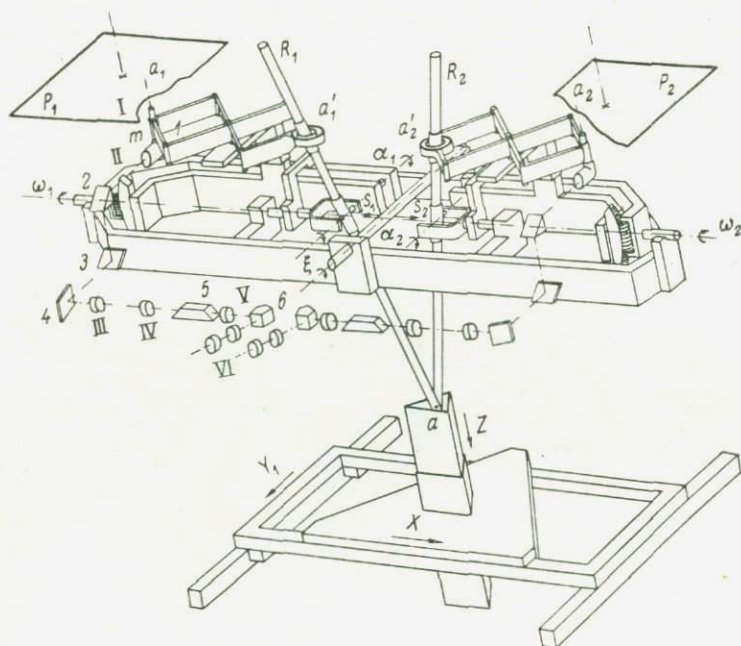


Рис. 197

и призмы 1. Визирные оси телескопических систем всегда перпендикулярны к снимкам.

Объектив I строит изображение снимка в плоскости измерительной марки m . Призма 1 и объектив II направляют лучи на призму 2, расположенную на первичной оси наклона снимка ω_1 . Расстояние между призмами 1 и 2 изменяется. Поэтому главная фокальная плоскость объектива II совмещена с плоскостью измерительной марки и на призму 2 падает параллельный пучок. Призма 2 и зеркала 3 и 4 посылают этот пучок из подвижной проектирующей камеры в неподвижный бинокляр. Объектив III преобразует параллельный пучок в сходящийся, а объектив IV вновь создает параллельный пучок лучей, который проходит через призму Дове 5. Эта призма необходима для компенсации

вращения изображения снимка, вызванного поворотом проектирующей камеры. Объектив V направляет лучи в призму 6 и образует изображение снимка и марки в фокальной плоскости окуляра VI.

Для автоматической регистрации координат точек модели к прибору присоединяется электрическое приспособление ЕК-3. Влияние дисторсии объектива съёмочной камеры учитывается с помощью коррекционных пластинок.

Основные характеристики автографа А-8:

Размер снимков	до 23 × 23 см
Фокусное расстояние проектирующих камер	от 98 до 215 мм
Увеличение наблюдательной системы	6 и 8,5 ^x
Диаметр измерительной марки в плоскости снимка	0,06 мм
Отношение масштаба модели к масштабу карты	1 : 4—4 : 1
Углы наклона и поворота проектирующих камер	$\omega = \pm 6^g$, $\alpha = \pm 5^g$, $\varkappa = \pm 20^g$

Диапазоны движений:

$X = 345$ мм, $Y = 440$ мм, Z от 175 до 350 мм, b от 65 до 220 мм

Размеры прибора без координатографа	190 × 130 × 185 см
Масса прибора	680 кг
Размеры координатографа с большим столом	180 × 133 × 76 см
Масса	200 кг
Размеры координатографа с малым столом	130 × 98 × 76 см
Масса	100 кг

Для фототриангуляции автограф А-8 не приспособлен, так как не позволяет устанавливать отрицательные базы и не имеет устройства для переклочения осей визирования.

Автограф А-9 (рис. 198) служит для обработки снимков, полученных широкоугольными и сверхширокоугольными фотокамерами Вильда (угол поля зрения до 120°).

Разрабатывая эту модель автографа, фирма сохранила принцип восстановления связок проектирующих лучей, положенный в основу предыдущих моделей. Вследствие этого конструкторы были вынуждены ввести дополнительный процесс — уменьшение оригинальных снимков в два раза, чтобы обеспечить приемлемые размеры и массу прибора.

Уменьшенные снимки (диапозитивы) изготавливают на специальном уменьшителе, который входит в комплект прибора и позволяет учитывать с помощью компенсационных пластин влияние дисторсии объектива съёмочной камеры, кривизны Земли и атмосферной рефракции.

Устройство автографа А-9 принципиально не отличается от автографа А-7. Верхняя и нижняя каретки X и Y перемещаются с помощью штурвалов по горизонтальным взаимно перпендикулярным направляющим. На верхней каретке укреплена вертикальная направляющая, по которой с помощью ножного диска

перемещается базисная каретка. На базисной каретке находятся шарниры, через которые проходят проектирующие рычаги. Шарниры имеют смещения для установки составляющих базиса фотографирования b_Y и b_Z . Составляющая b_X устанавливается путем смещения проектирующих камер.

Наблюдательная система приспособлена для рассматривания диапозитивов. Она позволяет каждым окуляром наблюдать левый и правый снимки и поворачивать призмой Дове их изображения.

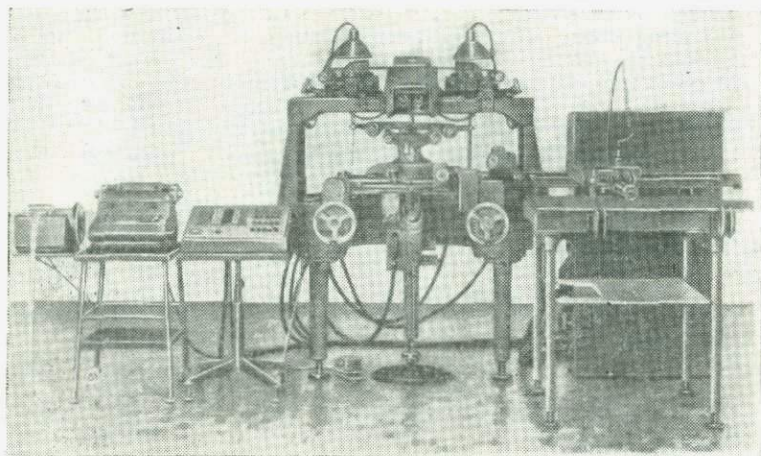


Рис. 198

Каретки X и Y можно отключить от винтов и быстро перемещать рукой, что сокращает время ориентирования снимков.

К прибору присоединяется автоматический регистратор координат ЕК-3.

Основные характеристики автографа А-9:

Размеры снимков	до $11,5 \times 11,5$ см
Фокусное расстояние проектирующих камер	от 40 до 77 мм
Увеличение наблюдательной системы	$10\times$
Диаметр поля зрения	20 мм
Диаметр измерительной марки (в плоскости снимка)	0,04 мм
Углы наклона и поворота проектирующих камер	$\omega = \alpha = \pm 5^g$, $\varkappa = \pm 30^g$

Диапазоны движений:

$$X = \pm 130 \text{ мм}, b_X = \pm 145 \text{ мм}$$

$$Y = \pm 150 \text{ мм}, b_Y = \pm 10 \text{ мм}$$

$$Z = 50-100 \text{ мм}, b_Z = \pm 10 \text{ мм}$$

Размеры автографа $125 \times 130 \times 160$ см

Масса 450 кг

В 1968 г. на XI Международном фотограмметрическом конгрессе в Лозанне фирма Вильда показала новую модель автографа — А-10 (рис. 199).

В отличие от предыдущей эта модель позволяет обрабатывать снимки, полученные различными фотокамерами, включая и широкоугольные, без предварительного уменьшения их.

Кроме составления карт по воздушным и наземным снимкам, на автографе А-10 можно развивать фототриангуляцию способом независимых моделей, строить профили и получать цифровую модель местности для проектирования инженерных сооружений и решения других специальных задач.

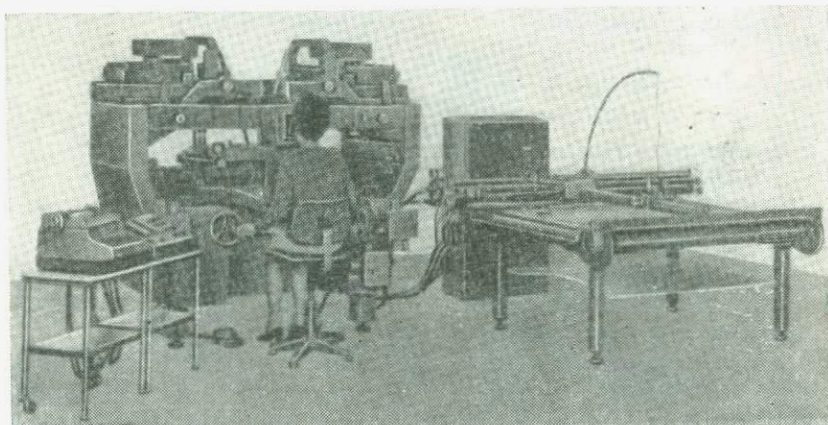


Рис. 199

Цифровой моделью называется совокупность координат выбранных точек модели, построенной по снимкам. Число точек цифровой модели зависит от рельефа местности. Они выбираются так, чтобы путем интерполирования получить с достаточной точностью положение любой точки стереомодели. В зависимости от требований заказчика координаты точек цифровой модели определяются в фотограмметрической или в геодезической системах координат.

В основе конструкции автографа А-10, как и в других моделях автографа Вильда, лежит принцип восстановления связок лучей, существовавших во время фотографирования, при помощи прецизионных пространственных рычагов.

Фирма рекомендует сочетать автограф А-10 с несколькими авиографами В-8 (см. следующий параграф). В этом случае автограф используется для фототриангуляции и составления карт в масштабах крупнее 1 : 2000, а авиографы — для составления карт в масштабах 1 : 2000 и мельче.

Прибор снабжен устройствами для учета влияния дисторсии объектива съёмочной камеры, кривизны Земли и атмосферной рефракции, автоматическим регистратором координат ЕК-5, перфоратором SL-15, профилоскопом PR-1.

Основные характеристики автографа А-10:

Размеры снимков	до 23×23 см
Фокусное расстояние проектирующих камер	от 86 до 308 мм
Увеличение наблюдательной системы	8^{\times}
Диаметр поля зрения	31 мм
Углы наклона и поворота проектирующих камер:	
ω_1 и ω_2 от -7 до $+6^g$	
α_1 и $\alpha_2 \pm 6^g$	
\varkappa_1 и $\varkappa_2 \pm 15^g$	
Диапазоны движений:	
$X = \pm 185$ мм, b_X от 0 до 210 мм	
$Y = \pm 230$ мм, $b_{Y_2} = \pm 16$ мм	
Z от 90 до 320 мм, $b_{Z_1} = \pm 25$ мм	
Максимальное отклонение проектирующих рычагов вдоль осей X и Y	60°
Точность отсчета величин:	
угловых	$0,01^g$
линейных	0,01 мм
Размеры автографа	$395 \times 291 \times 190$ см
Масса	1200 кг
Размеры координатографа	110×140 см
Масса	340 кг

§ 88. АВИОГРАФЫ ВИЛЬДА

Фирма Вильда изготовила авиографы В-8 и В-9 для составления карт по плановым снимкам, полученным сверхширокоугольной камерой РС-9 с фокусным расстоянием 88 мм. Модель В-8 позволяет обрабатывать оригинальные снимки, а В-8— уменьшенные в два раза.

Как и автографы, авиографы строго решают фотограмметрическую засечку, но устройство их проще.

Фирма рекомендует два варианта обработки снимков, полученных камерой РС-9. В первом варианте фототриангуляция выполняется аналитически по оригинальным снимкам при помощи автоматизированного стереокомпаратора Вильда и электронной вычислительной машины, а карта составляется по тем же снимкам на авиографе В-8. Во втором варианте используются только уменьшенные в два раза снимки, по которым развивается фототриангуляция на автографе А-9 и составляется карта на авиографе В-9. Стоимость приборов, необходимых для второго варианта, значительно ниже, чем для первого. Однако второй вариант уступает первому по точности.

В авиографе В-8 карданы S_1 и S_2 , вокруг которых вращаются проектирующие рычаги, находятся выше снимков (рис. 200). Центры этих карданов представляют собой центры проектирования.

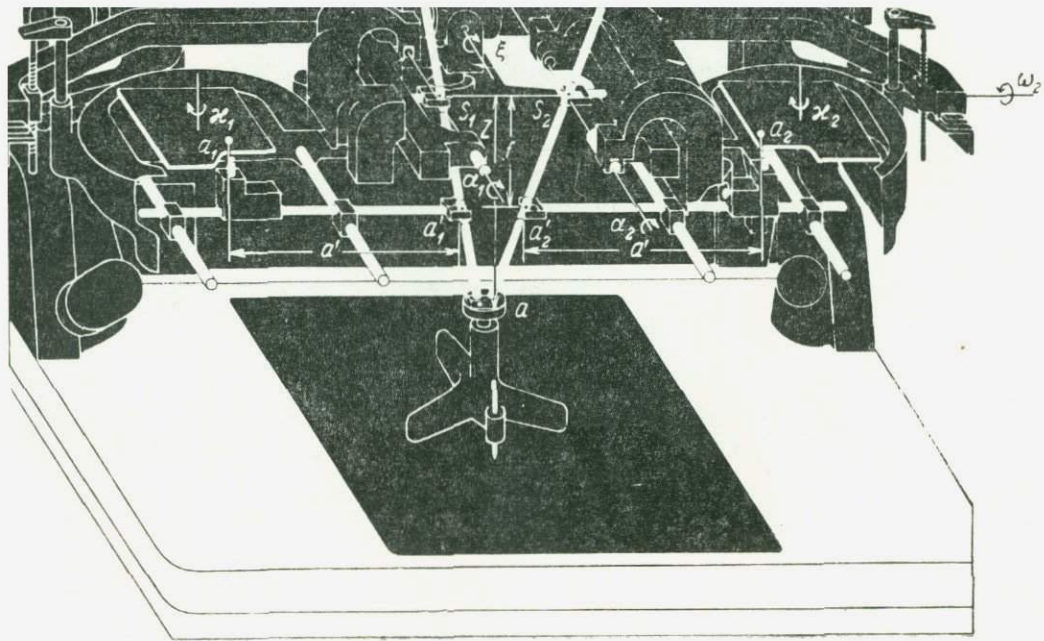


Рис. 200

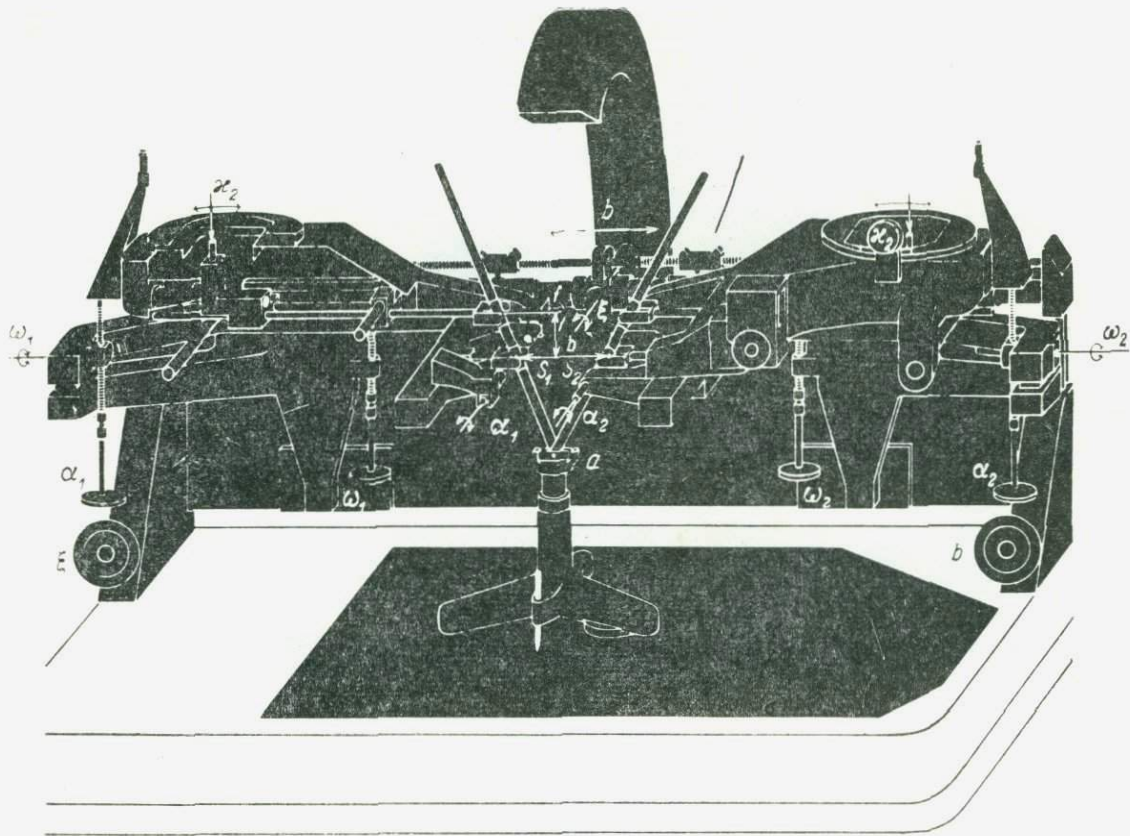


Рис. 201

Изменяя расстояние между ними, устанавливают базис фотография. Фотограмметрическая засечка осуществляется с помощью рычагов путем построения треугольника S_1S_2a . При этом точка модели определяется пересечением осей проектирующих рычагов, нижние концы которых смонтированы на шарнире. Шарнир можно перемещать по вертикальным направляющим измерительного столика, с которым связан карандаш. Столик передвигается на планшете рукой наблюдателя. Эти движения вызывают повороты рычагов и смещение шарнира a'_1 в плоскости, параллельной левому снимку, и шарнира a'_2 в плоскости, параллельной правому снимку. Эти плоскости удалены от центров карданов S_1 и S_2 на расстояние, равное фокусному расстоянию снимков.

С шарнирами a'_1 и a'_2 связаны подвижные части наблюдательной системы, визирные оси которой всегда перпендикулярны к снимкам.

Проектирующие камеры и наблюдательная система устроены так же, как в автографе А-8. Увеличение наблюдательной системы $6\times$, диаметр измерительной марки $0,07$ мм.

Масштаб модели по сравнению с масштабом снимков можно увеличить в $1,4$ — $2,3$ раза. Если нельзя установить масштаб модели равным заданному масштабу карты, то пользуются пантографом.

Авиограф В-9 позволяет обрабатывать снимки формата не больше $11,5 \times 11,5$ см. Другим существенным отличием этого прибора от авиографа В-8 является расположение карданов S_1 и S_2 : они находятся ниже снимков (рис. 201).

Увеличение наблюдательной системы $7,5\times$, что соответствует увеличению оригинального снимка $3,75\times$.

Для учебных целей авиограф В-9 снабжен дополнительными окулярами, что позволяет рассматривать модель двум наблюдателям одновременно.

§ 89. СТЕРЕОМАТЫ ВИЛЬДА

Стереомат В-8 Вильда представляет собой сочетание авиографа В-8 с устройством для дифференциального трансформирования снимков (рис. 202). Существенная особенность прибора состоит в том, что трансформирование снимка, проведение горизонталей и составление профиля можно выполнять автоматически, с помощью сканирующих систем.

Сканирующая система представлена на рис. 203. Лучи от светового пятна, бегущего по экрану электроннолучевой трубки 1, проходят призму 2 и объектив 3 и фокусируются в плоскости снимка (диапозитива) 4. В зависимости от плотности деталей на снимке, которые сканируются изображением пятна, объектив 5 пропускает через наклонное наполовину посеребренное зеркало 6 больше или меньше света на фотоэлемент 7.

Одновременно со сканированием снимок освещается с помощью лампочки 8, зеркала 6 и объектива 5. Объектив 3 и посеребренная наполовину диагональная грань призмы 2 строят изображение освещенного поля снимка в плоскости измерительной марки 9. Это позволяет с помощью наблюдательной системы рассматривать снимок, который передвигается относительно неподвижной марки. Таким образом обеспечивается возможность оптического наблюдения автоматической работы прибора.

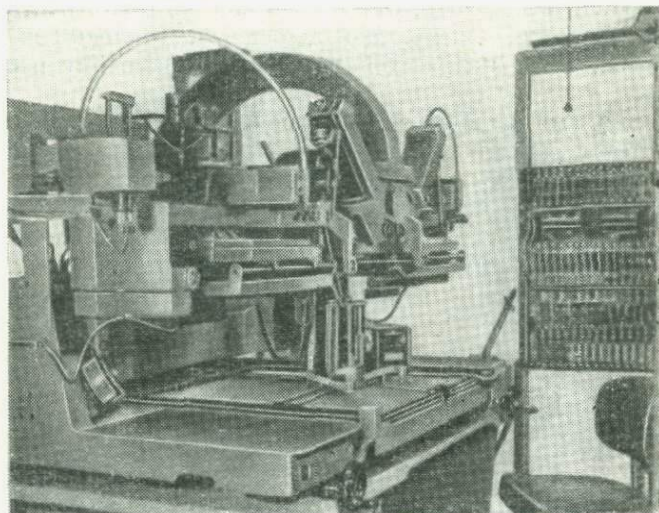


Рис. 202

Принцип автоматического определения высот показан на рис. 204. Пусть пересечение проектирующих рычагов R_1 и R_2 находится на неверной высоте. Тогда оптические оси левой и правой сканирующих систем проходят через несоответственные точки стереопары. Световые пятна в левой и правой сканирующих системах перемещаются одинаково и одновременно. Поэтому в данном случае сканирующие пятна пересекают границы светлых и темных деталей на снимках в различное время, и в фотоэлементах возникают различные фототоки. Вследствие этого образуется разность фаз, величина которой зависит от высотной ошибки пересечения проектирующих рычагов.

Разность фаз измеряется электрическим способом и результирующий сигнал используется для перемещения кареток X , Y и Z с помощью сервомоторов.

Если разность фаз равна нулю, то проектирующие рычаги занимают правильное положение и оптические оси сканирующих систем проходят через соответственные точки снимков.

Сканирующие системы позволяют автоматически проводить горизонтали и строить профили. Эта задача была решена в первом стереомате, разработанном Хоброухом (Hobrough) в Канаде.

Для дифференциального трансформирования снимка модель автоматически сканируется по параллельным направлениям, прокладываемым с помощью сервомоторов X и Y . На экране третьей электроннолучевой трубки получается изображение зоны снимка, которая сканируется. Эта трубка смонтирована на каретке, которая перемещается над столом в задней части прибора, повторяя движения сканирующей системы. Изображение, построенное на экране третьей трубки, с помощью объектива, жестко связанного с этой трубкой, проектируется на неподвижный светочувствительный материал.

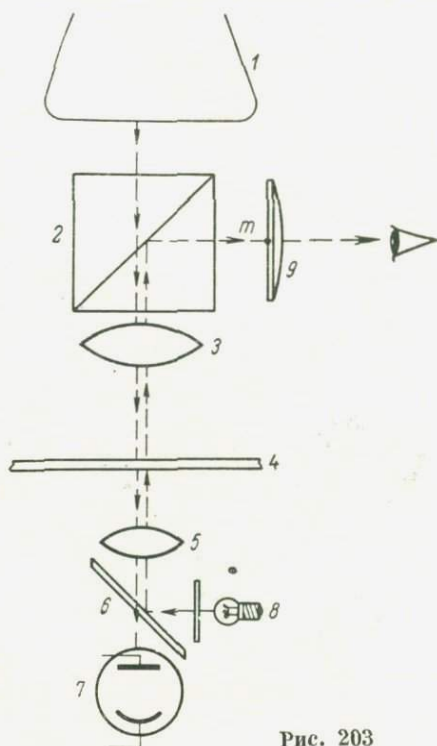


Рис. 203

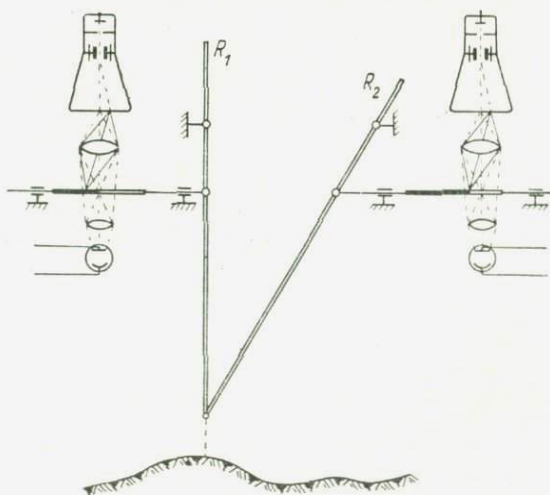


Рис. 204

Недостатками стереомата В-8 являются небольшой диапазон изменения масштаба ортофотоснимка по сравнению с масштабом снимка и невозможность одновременного получения ортофотоснимка и горизонталей.

Стереомат А-2000 — более совершенный и универсальный прибор (рис. 205). Он разработан фирмой Вильда и американской фирмой Raytheon и впервые показан на выставке, посвященной XI Международному конгрессу, в Лозанне в 1968 г.

Стереомат служит для автоматического получения ортофотоснимков и горизонталей в виде прерывистых линий. Кроме того, он может быть использован для построения цифровой модели местности и для фототриангуляции способом независимых моделей.

Фотограмметрическая засечка осуществляется механическим путем.

Ортофотоснимок и горизонталей получаются при помощи электроннолучевых трубок в результате дифференциального трансформирования.

Горизонталей экспонируются в процессе сканирования модели вдоль оси X или Y на отдельную фото пленку или на ту же пленку, на которой строится ортофотоизображение.



Рис. 205

Автоматическая работа прибора обеспечивается сканирующим устройством и коррелятором. По результатам сканирования левого и правого снимков коррелятор вырабатывает сигналы продольных параллаксов, которые приводят в действие мотор Z до тех пор, пока марка не совместится с поверхностью модели. Кроме того, коррелятор вырабатывает сигналы поперечного параллакса, используемые при ориентировании снимков и построении профилей, а также сигнал направления ската, по которому ориентируется отмечающий горизонталь штрих таким образом, чтобы он был перпендикулярен к направлению ската местности.

Изображения контуров и горизонталей на ортофотоснимке можно получить в разных цветах: контуры в голубом, а горизонталей в желтом или в красном.

Предусмотрена возможность магнитной записи результатов сканирования модели.

Стереомат А-2000 предназначен для картографирования в масштабах $1 : 5000$ — $1 : 50\,000$.

Основные характеристики стереомата А-2000:

Размеры снимков	до 23 × 23 см
Фокусное расстояние проектирующих камер	от 87 до 155 мм
Увеличение наблюдательной системы	10,7 [×]
Диаметр поля зрения	12,5 мм
Углы наклона и поворота проектирующих камер:	
$\omega_1 = \omega_2 = \pm 5^g$	
$\alpha_1 = \alpha_2 = \pm 5^g$	
$\kappa_1 = \kappa_2 = \pm 15^g$	
Диапазоны движений:	
$X = 400$ мм, b_X от 0 до 220 мм	
$Y = 485$ мм, $b_{Z_1} = \pm 25$ мм	
Z от 158 до 318 мм $b_{Y_2} = \pm 25$ мм	
Максимальный размер ортофотоснимка	40 × 50 см
Длина щели	от 1 до 4 мм
Скорость сканирования	до 8 мм/с
Минимальное расстояние между горизонталями на модели по высоте (минимальное сечение модели)	
	0,08 мм
Размеры прибора	210 × 115 × 210 см
Масса	1440 кг

§ 90. СТЕРЕОТРИГОМАТ ЦЕЙССА

Стереотригогат — прибор механического типа, предназначенный для составления карт и дифференциального трансформирования снимков (рис. 206).

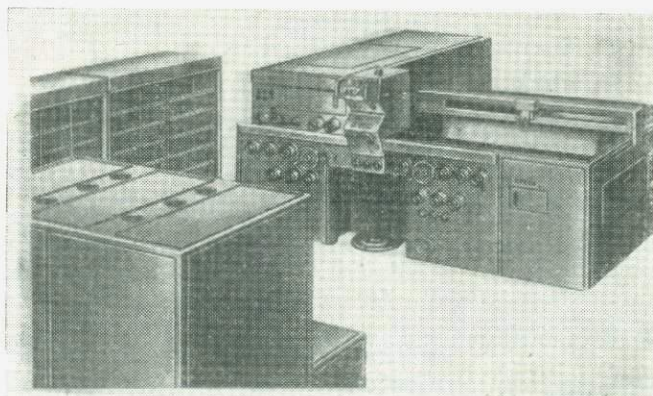


Рис. 206

Фотограмметрическая засечка в стереотригогате решается с помощью плоскостных механизмов, обеспечивающих высокую точность обработки снимков с преобразованными связками.

Дифференциальное трансформирование осуществлено путем щелевого проектирования левого снимка стереопары.

Стереотригогат состоит из стереокомпаратора, пяти плоскостных механизмов (вычислителей), координатографа и дифференциального трансформатора — ортофотоскопа.

Четыре вычислителя редуцируют измеренные на стереокомпараторе координаты пары соответственных точек, т. е. приводят

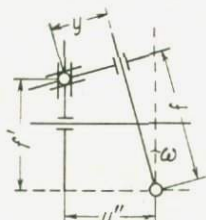


Рис. 207

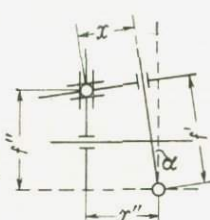


Рис. 208

эти величины к горизонтальным снимкам. Затем пятым вычислителем по редуцированным координатам находят координаты соответствующей точки модели. Последние можно передать на координатограф или в ортофотоскоп, а также автоматически записать с целью построения фотограмметрической сети

методом на координатографе или составления карты точечным методом с программным управлением.

Получим основные уравнения, решаемые в стереотригогате. Для этого используем равенства (1.19) и (1.15), полагая, что координаты левой точки фотографирования X_0, Y_0, Z_0 , углы поворота снимков κ и координаты главной точки снимка x_0, y_0 равны нулю. Получим

$$\left. \begin{aligned} X &= -Z \frac{(f \cos \omega - y \sin \omega) \sin \alpha + x \cos \alpha}{(f \cos \omega - y \sin \omega) \cos \alpha - x \sin \alpha} = -Z \frac{x''}{f''} \\ Y &= -Z \frac{y \cos \omega + f \sin \omega}{(f \cos \omega - y \sin \omega) \cos \alpha - x \sin \alpha} = -Z \frac{y''}{f''} \end{aligned} \right\}, \quad (11.41)$$

где X, Y, Z — координаты точки модели,

x, y — координаты точки снимка,

α, ω — продольный и поперечный углы наклона снимка,

f — фокусное расстояние снимка.

Первый вычислитель по введенным в него величинам ω, f и y находит

$$y'' = f \sin \omega + y \cos \omega,$$

$$f' = f \cos \omega - y \sin \omega$$

(рис. 207). Второй вычислитель по величинам f', α и x определяет

$$f'' = f' \cos \alpha - x \sin \alpha,$$

$$x'' = f' \sin \alpha + x \cos \alpha$$

(рис. 208).

Таким образом, первый и второй вычислители позволяют получить редуцированные координаты x''_1 и y''_1 и фокусное расстояние f''_1 . Третий и четвертый вычислители аналогично находят x''_2 , y''_2 и f''_2 .

Редуцированные координаты соответственных точек и фокусные расстояния поступают в пятый вычислитель, который находит координаты точки модели (рис. 209). В этом вычислителе устанавливают составляющие базиса b_x , b_{y1} , b_{y2} , b_{z1} и b_{z2} . Он решает уравнения (11.41) и

$$b_x = (Z - b_{z2}) \frac{x_2''}{f_2''} - (Z - b_{z1}) \frac{x_2''}{f_2''}. \quad (11.42)$$

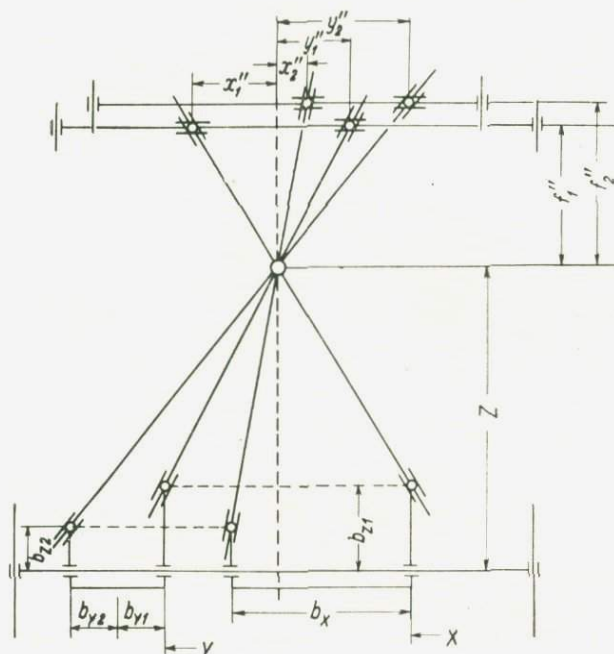


Рис. 209

С преобразованными связками обрабатываются снимки, полученные сверхширокоугольными камерами. В этом случае редуцированные фокусные расстояния f'' умножаются первыми четырьмя вычислителями на коэффициент преобразования связки, после чего вводятся в пятый вычислитель.

В стереотриграмме имеется устройство для увеличения или уменьшения координат точек снимков и фокусного расстояния на коэффициент ν . Оно позволяет представить эти величины в увеличенном масштабе, когда фокусные расстояния малы, или в уменьшенном масштабе, когда фокусные расстояния значительны.

Выше предполагалось, что информация в стереотриграмме идет от снимка к модели. В действительности поток информации

в этом приборе имеет обратное направление, как показано на рис. 210.

Ортофотоскоп находится слева от стереокомпаратора (см. рис. 206). Ход лучей в ортофотоскопе показан на рис. 211, а поток

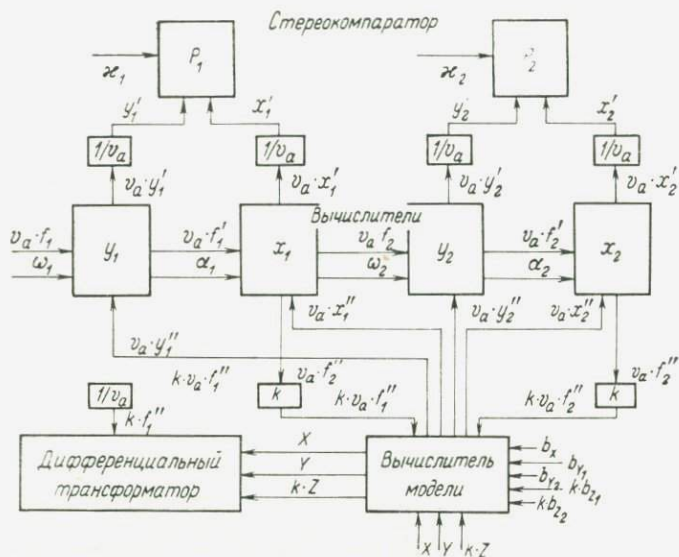


Рис. 210

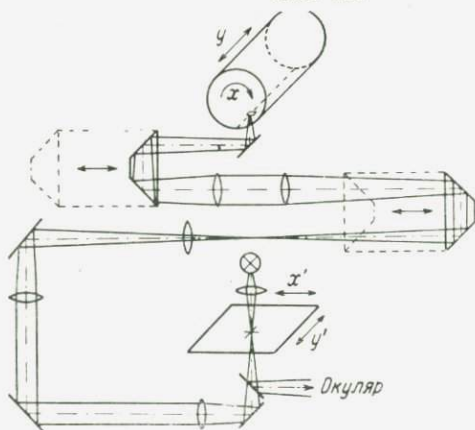


Рис. 211

информации — на рис. 210. Фотоматериал размещается на цилиндре.

Наиболее существенной частью ортофотоскопа является инверсор, перемещающий призмы (рис. 212). Он обеспечивает резкость изображения снимка на фотоматериале, т. е. решает уравнение

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{F},$$

где a — расстояние от передней узловой точки объектива до снимка,
 d' — расстояние от задней узловой точки объектива до фото-материала,
 F — фокусное расстояние объектива.
 При этом

$$a = F \left(1 + \frac{1}{v} \right), \quad a' = F (1 + v),$$

где v — увеличение ортофотоснимка по сравнению со снимком.

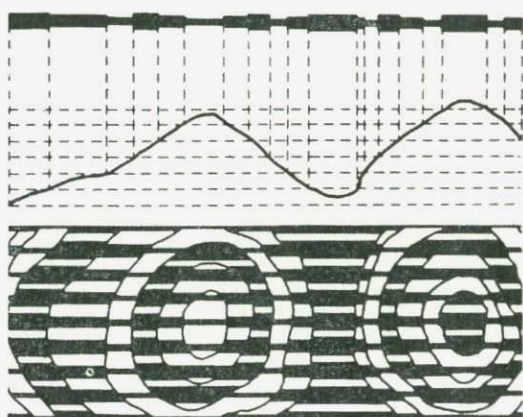
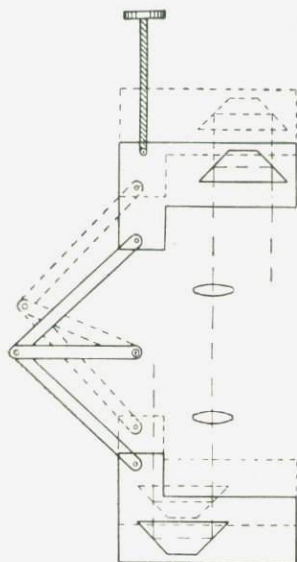


Рис. 213

Рис. 212

В стереотригамате

$$v = v_1 v_2 = \frac{a'}{a};$$

здесь v_1 — увеличение модели по сравнению со снимком,
 v_2 — увеличение ортофотоснимка по сравнению с моделью.
 Следовательно,

$$\left. \begin{aligned} a &= F + \frac{F f''}{Z v_2} = F + m \\ a' &= F + \frac{F Z v_2}{f''} = F + m' \end{aligned} \right\}. \quad (11.43)$$

Величины m и m' определяются при помощи электрического вычислителя, а v_2 — посредством механизма.

Одновременно с созданием ортофотоснимка на стереотригамате можно получить изображение рельефа в виде штрихов (рис. 213). Для этого служит орограф. В процессе сканирования модели

вырабатываются сигналы при прохождении измерительной марки через горизонтальные плоскости, соответствующие заданной высоте сечения рельефа. Эти сигналы используются для нанесения высотных штрихов. Соединив между собой концы штрихов, можно получить горизонтали.

Для передачи информации о высоте стереотригомам соединен с орографом посредством сельсина. На входе орографа высотные величины преобразуются в цифровую форму посредством опико-электрического преобразователя. Эти данные передаются в обратимый счетчик регулируемой емкости. Показания счетчика постоянно контролирует опросный блок и при прохождении марки

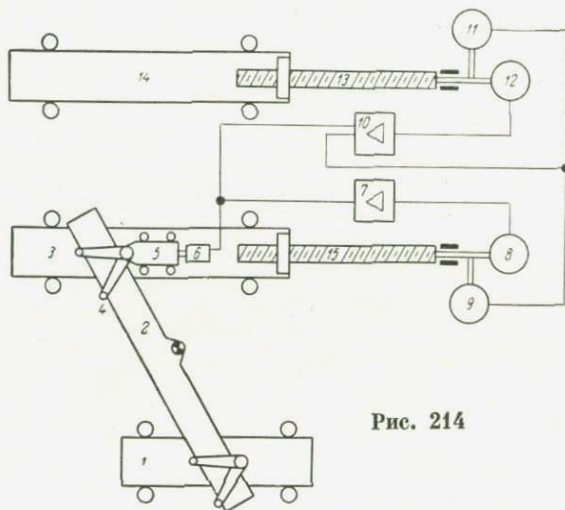


Рис. 214

через заданные горизонтальные плоскости посылает импульсы в схему управления, где они преобразуются в необходимую для орографирования циклическую последовательность сигналов. Штрихи наносятся с помощью специальной чертежной головки на координатографе, приводимом в движение от стереотригомата. При этом чертежная головка управляет толщиной штрихов.

К конструктивным особенностям стереотригомата относится устройство, обеспечивающее синхронное смещение кареток с точностью порядка 1 мкм (рис. 214). Смещение каретки 1 вызывает поворот рычага 2, связанного шарниром 4 с кареткой 5, и смещение вспомогательной каретки 5 относительно каретки 3, а также поворот стрелки индикатора 6 относительно начального положения. В индикаторах возникает ток, который усиливается усилителями 7 и 10 и приводит в движение винты при помощи моторов 8 и 12. Каретки 3 и 14 винтами 13 и 15 передвигаются до тех пор, пока каретка 5 и стрелка индикатора 6 не вернуться в начальное положение. Сельсины 9 и 11 контролируют синхронность враще-

ния винтов. В стереотригомае имеется 12 таких устройств. Соответствующие им усилители объединены в блок (на рис. 206 — слева).

Другой конструктивной особенностью является шариковая винтовая передача (рис. 215) вместо обычной винтовой передачи со скользящим трением. Шариковая винтовая передача практически не имеет мертвого хода и не изнашивается.

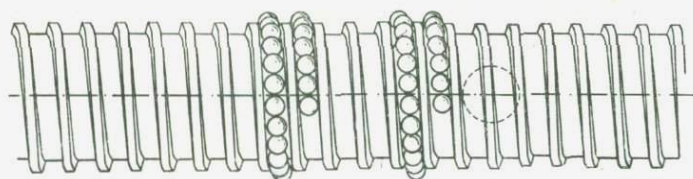


Рис. 215

Стереотригомае позволяет обрабатывать не только аэроснимки, но и наземные снимки, если углы наклона их и углы отклонения главных лучей от перпендикуляра к базису находятся в пределах $\pm 6^\circ$.

Основные характеристики стереотригомае:

Формат снимков	до 24×24 см
Фокусное расстояние проектирующих камер	от 35 до 600 мм
Углы наклона и углы поворота снимков	$\alpha = \omega = \pm 6^\circ$, $\kappa = 400^\circ$
Увеличение наблюдательной системы	8, 12 и $18\times$
Диаметр поля зрения при увеличении $8\times$	32 мм
Диапазон движений:	
$X = \pm 350$ мм, $b_X = \pm 280$ мм	
$Y = \pm 350$ мм, $b_Y = \pm 40$ мм	
Z от 200 до 600 мм, $b_Z = \pm 50$ мм	
Отношение масштаба карты к масштабу модели	0,1—5
Увеличение ортофотоснимка относительно снимка	0,8— $5\times$
Максимальный размер ортофотоснимка	75×60 см
Скорость сканирования	25 мм/с
Длина щели в ортофотоскопе	0,125—4 мм

§ 91. СТЕРЕОМЕТРОГРАФ ЦЕЙССА

Стереометрограф служит для графической и аналитической обработки плановых снимков с целью составления топографических карт (рис. 216 и 217).

Фотограмметрическая засечка в стереометрографе осуществляется механическим способом по принципу треугольник плюс параллелограмм. Для этого используются пространственные рычаги, которые вращаются вокруг центров проекции, восстанавливая связки лучей, существовавшие во время съемки.

Проектирующий рычаг *1* подвешен в кардане *2*, прикрепленном к каретке *3* объектива наблюдательной системы. Рычаг *1* проходит через скользящие шарниры *4* и *5*. Центр шарнира *4* служит центром проекции. Шарнир *5* связан с базисной кареткой *6*, которая

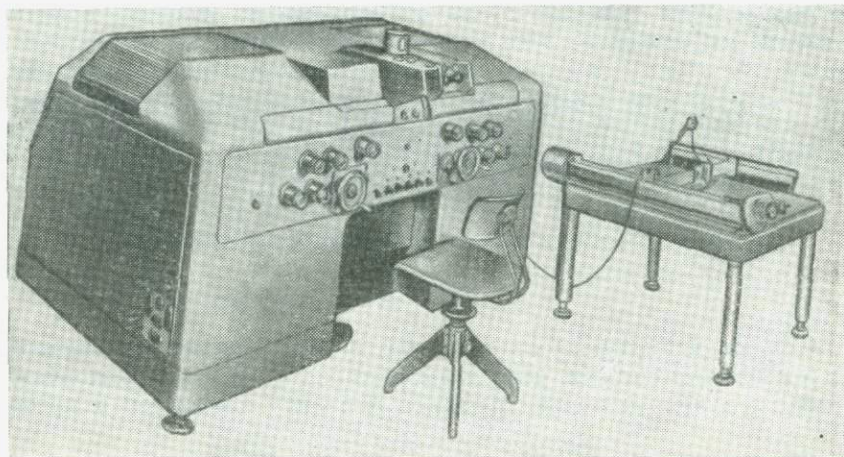


Рис. 216

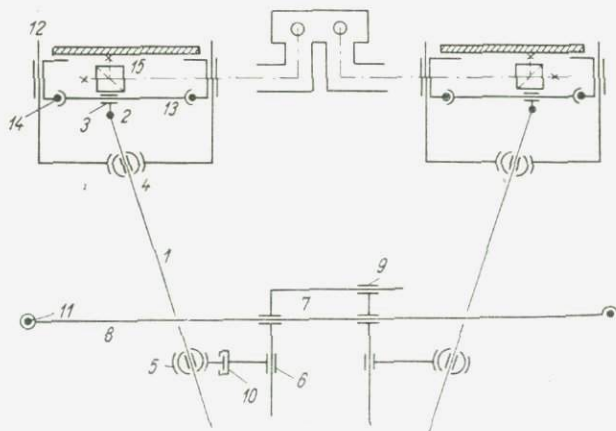


Рис. 217

находится на каретке *7*, перемещающейся с помощью штурвала по направляющей *8* вдоль оси *X* прибора. Направляющая *8* прикреплена к другой каретке, которая перемещается с помощью штурвала вдоль оси *Y* по направляющей *11*.

Винтом *9* можно изменить расстояние между центрами шарниров *5*, т. е. установить составляющую базиса b_X . Составляющая

базиса b_Y устанавливается путем смещения шарнира 5 вдоль оси Y по направляющей 10.

Проектирующая камера находится в кардане и может наклоняться на углы α и ω . Снимкодержатели имеют повороты κ . Оси этих трех вращений проходят через центр кардана 4. Верхнюю часть камеры можно перемещать относительно нижней по направляющим 12 для установки фокусного расстояния снимка.

Каретка 3 объектива наблюдательной системы при повороте рычага 1 перемещается по взаимно перпендикулярным направляющим 13 и 14. При этом центр шарнира 2 всегда находится в плоскости, параллельной снимку и удаленной от центра шарнира 4 на расстояние, равное фокусному расстоянию снимка f . Кроме объектива, на каретке 3 находится призма-куб 15 с посеребренной наполовину диагональной гранью, в центре которой нанесена измерительная марка.

Наблюдательная система стереометрографа аналогична наблюдательной системе автографа Вильда и позволяет рассматривать снимки при ортогональном визировании. Для компенсации поворота изображения снимка, вызванного наклоном камеры, служит призма Дове.

Центр шарнира соответствует наблюдаемой точке снимка, а центр шарнира 5 — наблюдаемой точке модели.

Для автоматической регистрации координат точек модели, а также для вычисления геодезических координат соответствующих точек местности к стереометрографу можно подключить координметр.

Для пространственной фототриангуляции стереометрограф не приспособлен, так как в нем нет переключения осей визирования и нельзя устанавливать отрицательные базисы.

Закрытая конструкция стереометрографа создает хорошую защиту от механических повреждений и проникновения пыли, что удлиняет срок эксплуатации прибора. Все направляющие имеют цилиндрическую форму. Движения передаются с помощью сельсинов.

Основные характеристики стереометрографа:

Формат снимков	до 23×23 см
Фокусные расстояния снимков	98—215 мм
Углы наклона и углы поворота снимков	$\alpha = \omega = \pm 5^\circ$, $\kappa = \pm 30^\circ$
Увеличение наблюдательной системы	$8,7^\times$
Диаметр поля зрения	16 мм
Диаметр измерительной марки (в плоскости снимка)	0,04 мм

Пределы движений:

$$X = \pm 280 \text{ мм}, b_X \text{ от } 0 \text{ до } 280 \text{ мм}$$

$$Y = \pm 250 \text{ мм}, b_Y = \pm 10 \text{ мм},$$

$$Z \text{ от } 125 \text{ до } 315 \text{ мм}, b_Z = \pm 15 \text{ мм}$$

Увеличение масштаба модели по отношению к масштабу снимка при	
$f = 100$ мм	2,5 [×]
$f = 200$ мм	1,2 [×]
Увеличение масштаба составляемой карты по сравнению с масштабом модели	0,2—5 [×]
Размеры прибора (без координатографа)	210 × 150 × 130 см
Масса	1200 кг
Размеры координатографа	140 × 160 × 95 см
Масса	230 кг
Точность отсчета величин:	
угловых	0,01 ^g
линейных	0,01 мм
Средняя погрешность определения положения точек модели	0,04 мм

Стереометрограф (модель *D*) позволяет производить обработку снимков с преобразованными связками.

Координметр, подключаемый к стереометрографу с помощью сельсинной передачи, представляет собой электромеханический

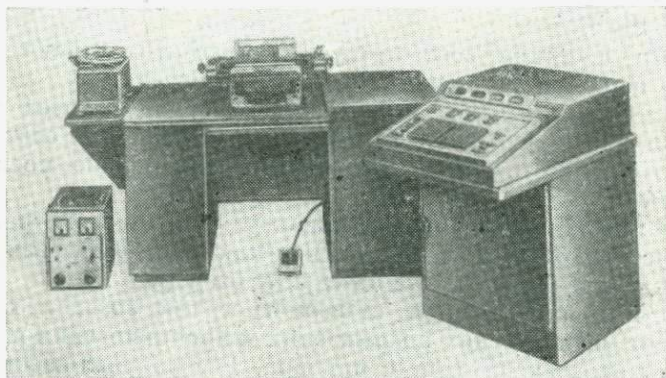


Рис. 218

счетнорегистрирующий аппарат с программным управлением (рис. 218).

Координметр не только регистрирует координаты точек модели и другие данные, но и немедленно обрабатывает их при помощи системы программного управления. Это позволяет быстро найти геодезические координаты точек местности, площади участков, поправки к элементам ориентирования снимков и модели, т. е. автоматически выполнить все вычислительные операции, необходимые для обработки снимков.

Координметр состоит из прибора управления и регистрирующего автомата (рис. 219).

В прибор управления входят: счетчик точек *1*, счетчики координат *X*, *Y* и *Z* с сельсинами-приемниками, клавиатура обслужи-

вания 2 и 3, запоминающее устройство 4 и устройство программного управления 5.

Регистрирующий автомат составляют: распределительная коробка 6, кодирующее и декодирующее устройство 7, пишущий механизм 8, клавиатура управления 9, первый перфоратор 10, первое считывающее устройство 11, второй перфоратор 12 и второе считывающее устройство 13.

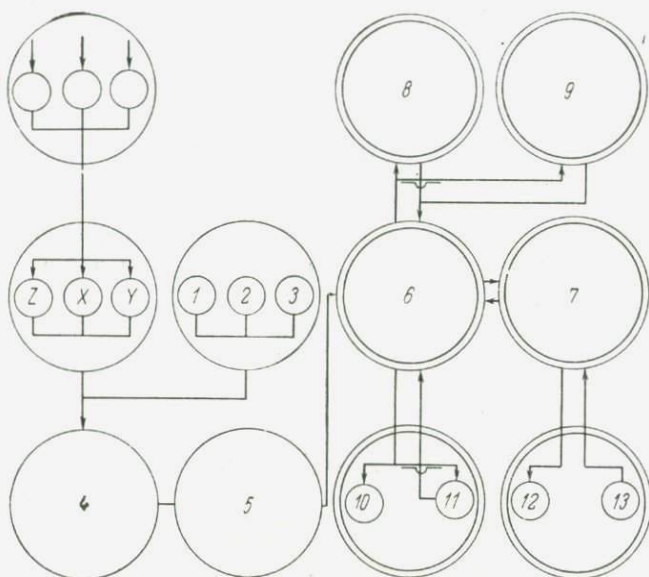


Рис. 219

Сельсины-приемники приводят в действие цифровые счетчики.

Главные клавиши клавиатуры обслуживания: *R* — регистрация, *A* — отсчет, *M* — измерение, *L_I* и *L_{II}* — сброс.

При нажатии на клавишу *R* координаты точки модели передаются из стереометрографа в запоминающее устройство прибора управления. Импульсы, поступающие из прибора управления, идут в распределительную коробку. Отсюда они направляются на пишущий механизм и через кодирующее и декодирующее устройство — на ленточный перфоратор.

В качестве пишущего механизма применяется электромеханическая пишущая машинка.

Клавиатура управления имеет клавиши управления записывающим автоматом и клавиши для пробивки отдельных команд.

Кодирующее и декодирующее устройство переводит импульсы, поступающие от пишущего механизма, в соответствующие коды для передачи их на ленточный перфоратор. Декодирующее

устройство переводит накопленную на перфоленте информацию в открытый текст.

Одновременно с печатанием открытого текста производится запись данных на перфоленту.

Перед регистрацией координат точки модели стереометрограф блокируется через сельсины и таким образом защищается от непреднамеренных перестановок во время отсчета и в начале регистрации. Регистрация номера точки и координат ее продолжается около 12 с. Однако через 2 с после нажатия на клавишу *R* блокировка со штурвалов прибора снимается и можно продолжать измерения во время регистрации.

Координметр позволяет выполнить любую из следующих восьми программ:

- 1) регистрация координат точек модели;
- 2) регистрация координат точек модели и вычисление высот соответствующих точек местности;
- 3) регистрация координат точек модели, вычисление аффинно-преобразованных координат X и Y точек модели и геодезических высот соответствующих точек местности;
- 4) регистрация координат Y стандартно расположенных точек модели и вычисление поправок к элементам взаимного ориентирования снимков;
- 5) регистрация координат Z опорных точек модели и вычисление поправок к элементам внешнего ориентирования модели;
- 6) регистрация координат X и Y точек модели и преобразование их с целью составления плана аналитическим способом;
- 7) регистрация координат точек модели и вычисление площади участка;
- 8) регистрация координат точек модели и определение поправок к элементам внешнего ориентирования модели по двум опорным точкам.

Основные характеристики координметра:

Счетчик точек	4-разрядный
Счетчики координат	6-разрядные
Максимальная скорость печатания	20 знаков/с
Максимальная скорость перфорирования	20 знаков/с
Скорость считывания	10 знаков/с
Длительность выполнения программы	1—12 с
Размеры прибора управления	94,5 × 64 × 88 см
Масса	206 кг
Размеры регистрирующего автомата	153 × 76 × 93 см
Масса	200 кг

Координметр можно подключать не только к стереометрографу, но и к стереопланиграфу, стереотриголату и к другим универсальным стереоприборам. Однако опыт показал, что надежность координметра недостаточная. Более надежными и перспективными являются не электрические, а электронные схемы решения задач, для которых предназначен координметр.

§ 92. СТЕРЕОПЛАНИГРАФ ЦЕЙССА

Стереопланиграф — высокоточный универсальный стереоприбор, предназначенный для составления топографических карт и сгущения опорной сети по снимкам (рис. 220). В основу прибора положен оптический способ решения фотограмметрической задачи по принципу треугольник плюс параллелограмм.

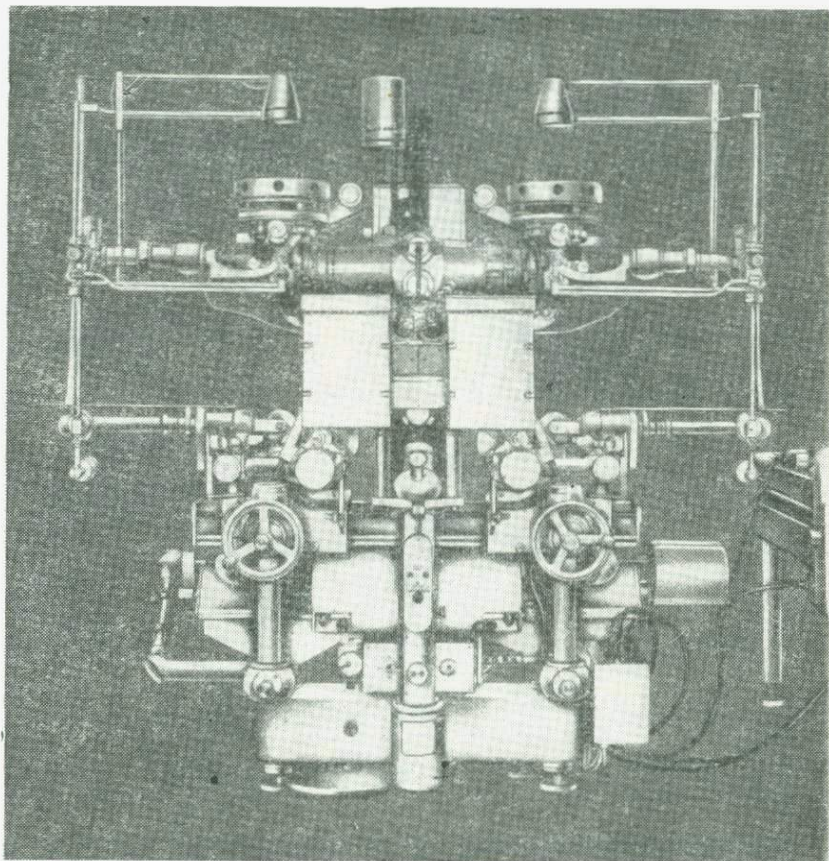


Рис. 220

Основные части прибора: направляющие, проектирующая система, дополнительная проектирующая система, наблюдательная система, измерительные приспособления и координатограф (рис. 221).

Направляющие осуществляют координатную систему прибора. Направляющие X и Y неподвижны, а Z перемещается

вдоль Y . По направляющей Z передвигается кронштейн, на котором смонтированы две камеры, составляющие проектирующую систему. Каждая камера имеет три поворота α , ω и χ вокруг осей, проходящих через переднюю узловую точку объектива. Эти повороты используются при взаимном ориентировании снимков. Для внешнего ориентирования модели имеются совместные повороты камер в продольном и поперечном направлениях.

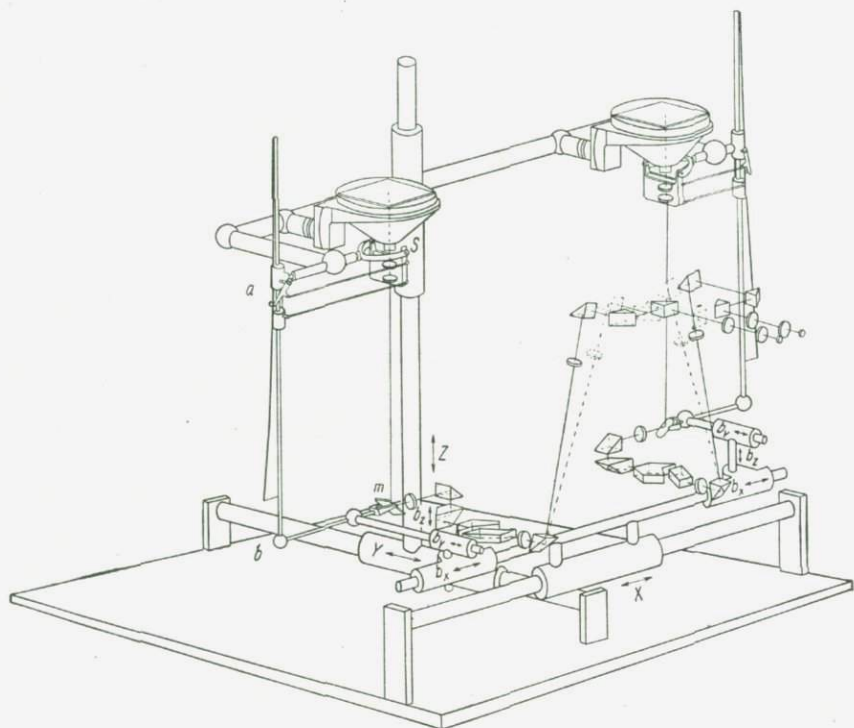


Рис. 221

Стереопланиграф снабжен тремя комплектами проектирующих камер: с фокусными расстояниями 100, 150 и 200 мм. Фокусное расстояние каждой камеры можно изменять в небольших пределах, перемещая прикладную рамку относительно объектива. Камеры проектируют снимки на зеркальные экраны, в плоскости которых находятся измерительные марки. Расстояние между передними узловыми точками объективов левой и правой камер — величина постоянная. Для установки базиса измерительные марки имеют движения b_x , b_y и b_z .

Дополнительная проектирующая система обеспечивает резкость изображения снимка на экране измери-

тельной марки при различных положениях экрана относительно камеры.

Наблюдательная система служит для стереоскопического рассматривания изображений снимков и измерительных марок.

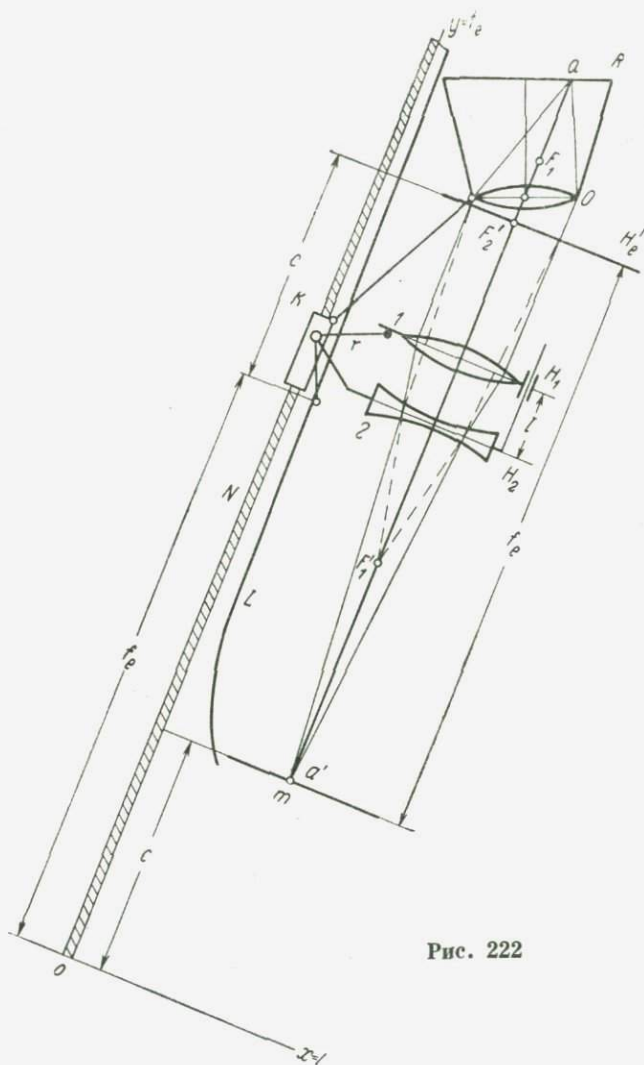


Рис. 222

С каретками X и Y связан карандаш координатографа, вычерчивающий на планшете элементы карты в заданном масштабе.

Рассмотрим левую часть основной и дополнительной проектирующих систем (рис. 222).

Плоскость прикладной рамки R проектирующей камеры совпадает с главной плоскостью объектива. Поэтому лучи, исходящие из точки снимка a и проходящие объектив, направляются параллельным пучком. Дополнительная проектирующая система собирает этот пучок и строит изображение a' точки снимка на экране в плоскости измерительной марки m . Эта система состоит из двух линз — положительной 1 и отрицательной 2 , которые играют роль телеобъектива с переменным фокусным расстоянием. Абсолютные значения фокусных расстояний линз одинаковы.

Пусть F'_2 — картинный фокус¹ отрицательной линзы, F'_1 — картинный фокус положительной линзы. Положение главных плоскостей и эквивалентное фокусное расстояние системы определяются следующими формулами, известными из оптики:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{f_1(f'_1 - f_2)}{\Delta}, & x' &= \frac{f'_2(f'_1 - f_2)}{\Delta} \\ f'_e &= -\frac{f'_1 f'_2}{\Delta} \end{aligned} \right\}; \quad (11.44)$$

здесь x — расстояние от переднего фокуса первой линзы F_1 до предметной главной плоскости системы,

x' — расстояние от картинного фокуса второй линзы F'_2 до картинной главной плоскости системы H'_e ,

f_1, f_2 — передние фокусные расстояния линз,

f'_1, f'_2 — задние фокусные расстояния линз,

Δ — оптический интервал, т. е. расстояние между двумя последующими фокусами линз:

$$\Delta = l - f'_1 - f'_2, \quad (11.45)$$

где l — расстояние между главными плоскостями линз.

В данном случае

$$f_1 = -f'_1 = -f_2 = f'_2 = f.$$

Поэтому формулы (11.44) и (11.45) принимают вид

$$x = x' = 0, \quad f'_e = \frac{f^2}{l}, \quad \Delta = l, \quad (11.46)$$

т. е. предметная и картинная плоскости телеобъектива проходят соответственно через предметный фокус положительной линзы и картинный фокус отрицательной линзы, а оптический интервал равен расстоянию между линзами.

Телеобъектив поворачивается вокруг передней узловой точки объектива камеры. С этой точкой совмещен картинный фокус отрицательной линзы F'_2 . Для изменения фокусного расстояния телеобъектива меняется расстояние l между линзами.

¹ Картинный (задний) фокус находится в пространстве изображения, предметный (передний) фокус — в пространстве предмета,

Так как удаление отрицательной линзы от центра вращения телеобъектива постоянно, то расстояние между линзами изменяется движением положительной линзы. При этом главная фокальная плоскость телеобъектива всегда проходит через марку m . Эту задачу решает лекальный инверсор.

Обозначим l через x и f_e через y . Тогда можно написать

$$y = \frac{f^2}{x}. \quad (11.47)$$

Это уравнение гиперболы, центр которой совпадает с началом координат, а асимптоты — с координатными осями. Кривая лекала построена в соответствии с формулой (11.47). Лекало прикреплено к направляющей N , которая поворачивается вокруг марки m . При перемещении проектирующей камеры вдоль оси Z прибора, а также при изменении положения марки по направляющей N скользит каретка K с рычагом r . Один конец рычага опирается на лекало, а другой перемещает положительную линзу телеобъектива.

Конец рычага r , опирающийся на лекало, смещен на величину s относительно центра вращения телеобъектива. Поэтому и центр кривой o не находится в плоскости марки, а смещен на ту же величину s .

Зеркальный экран связан с телеобъективом при помощи параллелограмма $Sabm$ (см. рис. 221). Когда проектирующие камеры перемещаются вдоль оси Y прибора, параллелограмм поворачивается вдоль осей Sa и mb . При этом поворачивается и экран вокруг оси mb , направляя отраженные лучи вдоль оси X в наблюдательную систему. Если общая каретка смещается вдоль оси X прибора, то стержень L (см. рис. 222) поворачивается вокруг оси, проходящей через точку b параллелограмма (см. рис. 221), а зеркальный экран при помощи шестерен поворачивается вокруг оси, параллельной оси Y , на половину угла поворота стержня. В результате этого отраженный от экрана пучок лучей направляется в наблюдательную систему вдоль той же оси X .

На рис. 223 изображена левая часть проектирующей и наблюдательной системы. Аналогично устроена и правая часть.

Лучи, идущие от изображения снимка 1 , полученного с помощью объектива камеры 2 и телеобъектива 3 на зеркальном экране 4 , падают на линзу 5 , представляющую часть первого объектива наблюдательной системы. Пройдя линзу 5 и цилиндр 6 , лучи падают на прямоугольную призму 7 , которая направляет их вдоль оси z в сложную призму 8 . После первого отражения в этой призме лучи идут в направлении оси x , после второго — в направлении оси y . Далее лучи проходят призму Пехана 9 , состоящую из двух призм и предназначенную для поворота изображения в его плоскости, и падают на линзу 10 — вторую часть первого объектива наблюдательной системы.

Пройдя эту линзу, пучок лучей становится параллельным. Через призму 11 и покрывное стекло 12 он направляется в окулярную

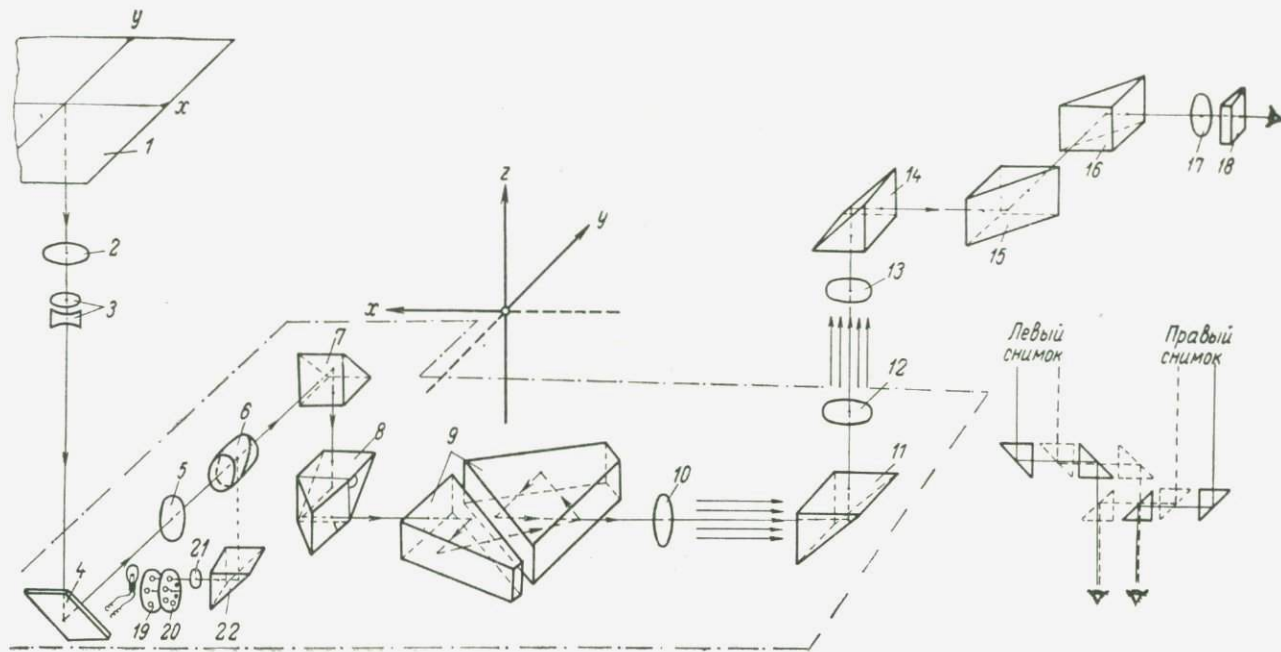


Рис. 223

часть наблюдательной системы. Второй объектив 13 преобразует параллельный пучок в сходящийся. Трехгранная призма 14 направляет сходящийся пучок на подвижные призмы 15 и 16 окулярной головки. Пройдя эти призмы, пучок строит изображение, рассматриваемое наблюдателем с помощью окуляра 17 и оптического клина 18. Вращая оптический клин, можно совместить визирную ось глаза с оптической осью окуляра.

В наблюдательной системе имеются еще вращающиеся диски с фильтрами 19 и марками 20. Марка вводится в наблюдательную систему с помощью объектива 21, призмы 22 и отражающей грани, установленной в цилиндре 6 под углом в 45° к оси X прибора. Цвет марки зависит от установленного фильтра.

Если подвижные призмы 15 и 16 левой части и подвижные призмы 15 и 16 правой части наблюдательной системы занимают положение, показанное справа на рис. 223 сплошными линиями, то изображение левого снимка поступает в левый окуляр. Если же эти призмы находятся в положении, показанном пунктиром, то левый снимок наблюдается через правый окуляр. Таким образом, в стереопланиграфе можно переключать оси визирования относительно глаз наблюдателя.

Оптическая система 5—12 вместе с зеркальным экраном 4 находится на базисных салазках, смонтированных на общей каретке (см. рис. 221). Рассматривая различные точки снимка, перемещают вдоль оси X общую каретку K_X , а следовательно, и систему 5—12 (см. рис. 223). При этом призмы 11 и 14 вращаются вокруг взаимно параллельных осей, а промежуток между покровным стеклом 12 и линзой 13 изменяется. Однако эти движения не нарушают резкости изображения в наблюдательной системе, так как отражающие плоскости призм 11 и 14 остаются взаимно параллельными при параллельном пучке лучей в интервале 10—13. При наблюдении снимка пользуются еще движением проектирующих камер вдоль оси Y прибора. В этом случае экран 4 поворачивается вокруг оси X и становится непараллельным отражающей плоскости призмы 7, что вызывает вращение изображения в его плоскости сначала вокруг оси X , а затем вокруг оси Y . С целью компенсации этого вращения призма 9 поворачивается вокруг оси Y в обратную сторону на половину угла поворота экрана 4. Этот поворот осуществляется механической передачей вращения от экрана 4 к призме 9. Призма 9 имеет и независимый поворот для вращения изображения.

Общее увеличение v изображения снимка, наблюдаемого в стереопланиграфе, зависит от увеличения v_1 изображения, построенного на зеркальном экране, и увеличения v_2 наблюдательной системы. Величина v_1 равна отношению фокусных расстояний телеобъектива и проектирующей камеры

$$v_1 = \frac{f_e}{F} \cdot \quad (11.48)$$

Следовательно,

$$v = \frac{f_0}{f'} v_2. \quad (11.49)$$

Измерительные приспособления состоят из винтовых передач, линейных и угловых шкал и счетчиков. Для отсчета высот в метрах счетчик снабжен набором шкал, используемых в зависимости от масштаба модели.

Координатограф приводится в действие вращением ведущих винтов X и Y прибора. Он связан с этими винтами через коробку передач, в которой находятся сменные шестерни, позволяющие изменять масштаб составляемой карты по сравнению с масштабом модели.

Для автоматической регистрации координат точек модели и решения различных вычислительных задач к стереопланиграфу можно подключить координметр (см. § 91).

Основные характеристики стереопланиграфа:

Формат снимков	23 × 23 см
Фокусные расстояния камер	206 ± 5 мм, 211 ± 5 мм, 152 ± 4 мм, 115 ± 2,5 мм, 100 ± 2,5 мм

Углы наклона и поворота камер:

$$\alpha_1 \text{ от } +15 \text{ до } -30^\circ, \alpha_2 \text{ от } +30 \text{ до } -15^\circ$$

$$\omega_1 \text{ от } +10 \text{ до } -10^\circ, \omega_2 \text{ от } +10 \text{ до } -10^\circ$$

$$\kappa_1 \text{ от } 0 \text{ до } 400^\circ, \kappa_2 \text{ от } 0 \text{ до } 400^\circ$$

Углы наклона модели ξ от +9 до -9°, η от +75 до -20°

Пределы движений:

$$X \text{ от } +280 \text{ до } -280 \text{ мм}, b_X = \pm 270 \text{ мм}$$

$$Y \text{ от } +310 \text{ до } -430 \text{ мм}, b_Y = \pm 30 \text{ мм}$$

$$Z \text{ от } 150 \text{ до } 640 \text{ мм}, b_Z = \pm 20 \text{ мм}$$

Общее увеличение

при $f = 200$ мм	от 3 до 13 [×]
$f = 152$ мм	от 4,2 до 10 [×]
$f = 100$ мм	от 6 до 14 [×]

Увеличение масштаба составляемой карты по сравнению с масштабом модели

$$\text{от } 0,1 \text{ до } 5^\times$$

(24 ступени)

Точность измерения координат X и Y точки местности

$$0,01 \text{ мм в масштабе снимка}$$

Точность измерения высоты

$$0,01\% \text{ от высоты полета над землей}$$

Размеры:

стереопланиграфа	2,3 × 1,8 × 2,5 м
координатографа	1,4 × 1,6 × 0,8 м
Масса прибора	1730 кг

Стереопланиграф С-8 отличается от описанного выше только тем, что позволяет обрабатывать снимки с фокусными

расстояниями от 100 до 600 мм и снабжен ортофотопроектором Гигас — Цейсса (ФРГ) для дифференциального трансформирования снимков.

Ортофотопроектор состоит из камеры, дополнительной проектирующей системы, координатографа с кассетой и запоминающего устройства (рис. 224). Камера перемещается вдоль оси z прибора.

Снимок, установленный в камере, проектируется на фотоматериал через щель, прикрепленную к каретке координатографа. Дополнительная проектирующая система обеспечивает резкое изображение снимка на фотоматериале.

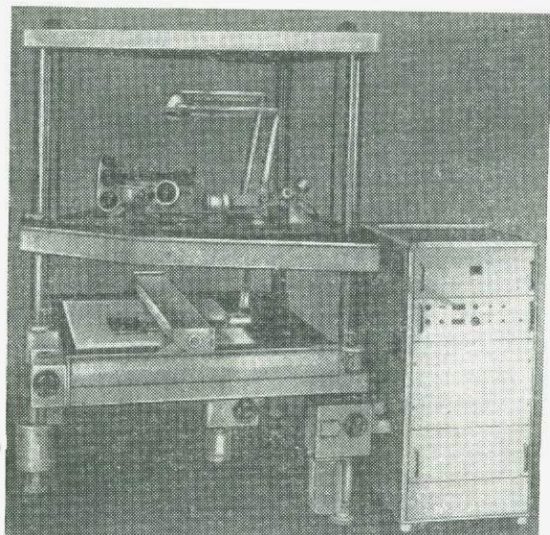


Рис. 224

Ортофотопроектор можно подключить к стереопланиграфу и получить ортофотоснимок путем сканирования модели по параллельным маршрутам и одновременного дифференциального трансформирования снимка.

Эти процессы можно выполнять раздельно: сначала зарегистрировать в запоминающем устройстве результаты сканирования оператором модели, а затем по этой информации автоматически построить ортофотоснимок.

В первом случае скорость сканирования и скорость дифференциального трансформирования одинаковы — около 5 мм/с, во втором скорость трансформирования значительно выше. Поэтому целесообразно одним ортофотоснимком обслуживать несколько стереопланиграфов, снабженных устройствами для накопления информации при сканировании модели.

§ 93. ФОТОСТЕРЕОГРАФ НИСТРИ

Фотостереограф Нистри — универсальный стереоприбор оптического-механического типа (рис. 225, а). Он предназначен для пространственной фототриангуляции и составления карт по аэро-снимкам и наземным снимкам.

Связки проектирующих лучей в фотостереографе восстанавливаются с помощью камер, а для построения модели используются рычаги, вращающиеся вокруг передних узловых точек объективов камер. Фотограмметрическая засечка решается по принципу треугольник плюс параллелограмм.

Каждая камера имеет три поворота α , ω и κ , оси которых проходят через центр проекции. Кроме того, камеры имеют совместные продольный и поперечный повороты ξ и η . Объективы камер аналогичны объективу съемочной камеры. Прикладная рамка камеры находится в главной фокальной плоскости объектива. Поэтому лучи, идущие от точки снимка и проходящие объектив, направляются параллельно друг другу.

Для наблюдения снимков служит телескопическая бинокулярная система (рис. 225, б). Зеркала этой системы, находящиеся перед объективами камер, посеребрены наполовину. Поэтому наблюдатель видит не только снимки, но и марки, которые вмонтированы в полые рычаги и проектируются с помощью объективов, установленных на бесконечность. Ось рычага проходит через марку и центр проекции. Призмы Дове позволяют поворачивать параллакс с одинаковой точностью.

а

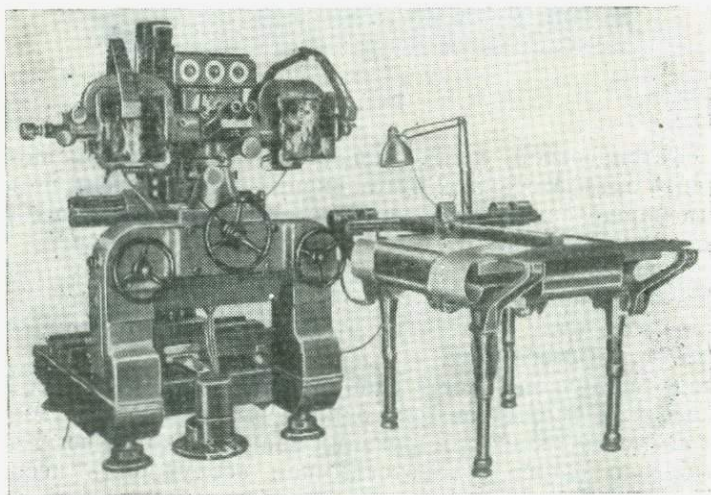


Рис. 225, а

Рычаги связаны с базисным мостиком, на котором устанавливаются составляющие базиса b_x , b_y и b_z . Базисный мостик перемещается по трем взаимно перпендикулярным направляющим X , Y и Z . Движения X и Y передаются координатографу, на котором вычерчивается карта.

Базисный мостик можно перемещать двумя крайними штурвалами и ножным диском или средним штурвалом и ножным диском. Средний штурвал позволяет передвигать измерительную марку в любом направлении в плоскости XY модели. Оригинальное устройство, обеспечивающее такое перемещение марки только одним штурвалом, названо велтрополо (Veltropolo).

Прибор снабжен электрическим устройством для автоматической фиксации координат точек модели с целью обработки этих данных на электронной вычислительной машине.

Основные характеристики фотостереографа (модель Бета-2):

Формат снимков	23 × 23 см
Фокусное расстояние проектирующих камер	152 и 210 мм
Углы наклона и поворота камер	$\alpha = \omega = \pm 10^g$ $\kappa = \pm 25^g$
Углы наклона модели	$\xi = \pm 10^g$, η от -10 до 110^g
Увеличение наблюдательной системы	10,3—8,3 ^x ($f = 152$ мм) 7,5—6,0 ^x ($f = 210$ мм)

Пределы движений:

X и Y от 0 до 600 мм, b_x от 0 до 240 мм

Z от 140 до 700 мм, b_y и b_z от 0 до 55 мм

Скорость движения марки с помощью велтрополо от 0 до 15 мм/с

Увеличение масштаба карты по сравнению с масштабом модели от 0,2 до 4,5^x

Размер прибора без координатографа 1,3 × 1,2 × 2,4 м

Масса 800 кг

§ 94. АНАЛИТИЧЕСКИЙ СТЕРЕОПРИБОР AP

В Италии по предложению Хелавы (Канада) фирмой Ottico Meccanica Italiana (ОМI) разработан аналитический стереоприбор для составления топографических карт и пространственной фотоангуляции.

Фотограмметрическая засечка в этом приборе решается с помощью электронной вычислительной машины (вычислителя).

Прибор состоит из координатного устройства, вычислителя, стереокомпаратора и координатографа (рис. 226, а).

В координатное устройство входят два штурвала и ножной диск. Движения штурвалов и диска, соответствующие координатам X , Y и Z точки модели, преобразуются в электрические импульсы, которые поступают в вычислитель. По этим данным и

а

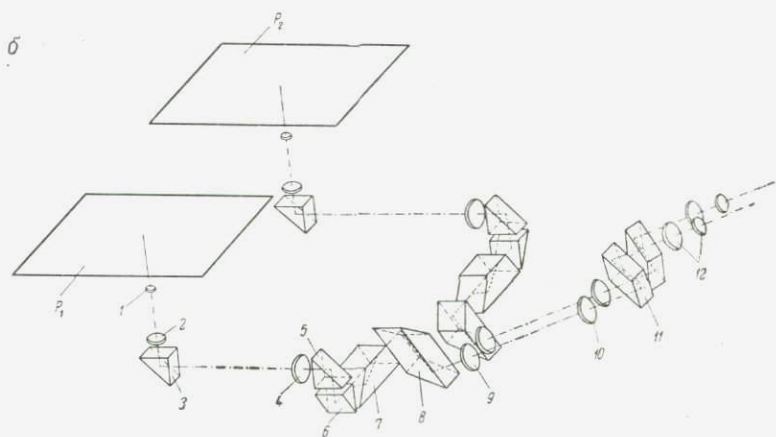


Рис. 226

элементам ориентирования снимков вычислитель находит координаты соответственных точек левого и правого снимков, а также координаты точки карты. При этом учитывается влияние дисторсии объектива съемочной камеры, кривизны Земли и атмосферной рефракции, систематической деформации снимка и др. Все вычисления выполняются по заранее составленным программам. Программы и параметры, необходимые для расчетов, вводятся в вычислитель.

Полученные вычислителем координаты соответственных точек стереопары и координаты точки карты преобразуются из цифровой

в аналоговую форму и используются для установки снимков в стереокомпараторе и каретки координатографа.

Изготовлено четыре модели аналитического стереоприбора: АР-1 и АР-2 по заказу армии США, а также АР-1С и АР/С для гражданских организаций.

Одно из существенных отличий модели АР-1 от последующих моделей состоит в том, что с помощью штурвалов не только получают координаты точки модели, но и перемещают на эти величины левый и правый снимки в стереокомпараторе. Поэтому вычислитель находит не координаты соответственных точек стереопары, а поправки, равные разностям этих координат и координат точки модели. Эти поправки преобразуются из цифровой в аналоговую форму и учитываются путем дополнительного перемещения снимков.

Наблюдательная система стереокомпаратора состоит из двух симметричных ветвей (рис. 226, б). Она позволяет отдельно и совместно поворачивать изображения снимков вокруг визирных осей и переключать эти оси, т. е. рассматривать каждым глазом левый или правый снимки. Таким образом обеспечивается наблюдение модели с внутренним и внешним базисами.

Объектив 1 строит изображение снимка P в плоскости измерительной марки 2. Лучи, идущие от этого изображения и проходящие призму 3, попадают на объектив 4. Пройдя этот объектив, пучок лучей становится параллельным. Он проходит призмы 5 и 6, призму Дове 7, а также призму 8 и объектив 9, который строит изображение снимка и марки в фокальной плоскости 10 окуляра 12. Ромбическая призма 11 служит для установки глазного базиса.

Для визирования на точки стереопары снимки перемещаются вдоль оси Y прибора, а подвижная часть 1—6 наблюдательной системы — вдоль оси X .

Быстрое движение марки, а следовательно, и карандаша координатографа производится с помощью устройства велтрополо. Оно приводит в действие одновременно два мотора независимо от штурвалов X и Y . При этом скорость движения марки можно регулировать.

Основные процессы обработки снимков на аналитическом стереоприборе следующие:

- внутреннее ориентирование снимков,
- взаимное ориентирование снимков,
- внешнее ориентирование модели,
- съемка контуров и рельефа.

При внутреннем ориентировании снимков определяется точное положение координатных меток каждого снимка относительно системы координат прибора (вычислителя). Установив снимки в стереокомпараторе, оператор нажимает кнопку «внутреннее ориентирование» на панели управления. По этой команде в вычислитель вводится соответствующая программа. Затем вклю-

чается кнопка F_1 . В этот момент вычислитель воздействует на стереокомпаратор так, что в поле зрения наблюдательной системы появляется первая координатная метка левого снимка. Оператор точно наводит марку на эту метку, нажимает другую кнопку и машина регистрирует координаты первой метки. Аналогично вводятся в вычислитель координаты остальных меток. По этим координатам определяется положение начала координат на левом и правом снимках.

Для определения элементов взаимного ориентирования снимков оператор последовательно наводит марку на стандартно расположенные точки левого и правого снимков и вводит координаты этих точек в вычислитель. По соответствующей программе вычислитель находит элементы взаимного ориентирования снимков.

Внешнее ориентирование модели выполняется по опорным точкам. Оператор визирует на опорные точки на снимках и регистрирует их координаты. Вычислитель по этим данным и элементам взаимного ориентирования снимков определяет координаты соответствующих точек модели. Сравнивая эти координаты с геодезическими координатами опорных точек, вычислитель находит элементы внешнего ориентирования модели.

Съемка контуров и рельефа заключается в обведении маркой элементов модели, подлежащих отображению на карте. Карандаш координатографа, управляемый вычислителем, вычерчивает эти элементы на планшете в заданной проекции. Если в вычислитель ввести дополнительные программы, то можно автоматически проводить на планшете прямую через данные две точки, параболу через три точки, найти дирекционный угол и расстояние между двумя данными точками, вычислить площадь участка, вычертить условные знаки и т. д.

Основные характеристики аналитического стереоприбора АР-1:

Формат снимков	23 × 23 см
Фокусное расстояние снимков	до 150 мм
Углы наклона снимков	до 3°
Увеличение наблюдательной системы	6, 10 и 14×
Движения X, Y и Z, соответствующие одному импульсу	2 мкм
Скорость вычислителя	2 млн. импульсов в секунду
Время выполнения операций умножения, деления и извлечения квадратного корня	от 24 до 256 мкс
Число команд	50
Объем внутренней памяти	2576 ячеек

Аналогичные характеристики имеют и модели АР-1С и АР/С. Модель АР-2 позволяет обрабатывать плановые, перспективно параллельные и конвергентные снимки с фокусными расстояниями до 1200 мм, а также панорамные и щелевые снимки. Увеличение

наблюдательной системы — 6, 10, 14—28×. Модель прибора AP-1С снабжена устройством для дифференциального трансформирования снимков.

Фирма OMI совместно с американской исследовательской лабораторией Bendix разработала другую модель аналитического прибора AS-ПВ-1, обладающую более широкими возможностями, чем предыдущие. Стереоскоп имеет оптическую систему с переменным увеличением от 8 до 34,5. Размеры снимкодержателей увеличены до 23 × 45 см. Прибор снабжен более мощной вычислительной машиной, устройством для получения ортофотоснимков, а также сканирующим устройством и коррелятором для автоматического проведения горизонталей и построения профилей в любых направлениях.

Эта модель предназначена для составления карт и ортофотоснимков, а также для построения профилей и цифровой модели местности.

§ 95. СТЕРЕОКАРТОГРАФ ГАЛИЛЕО

Пятая модель стереокартографа итальянской фирмы Галилео (рис. 227, а), как и предыдущие модели, разработанные Сантони, основана на механическом принципе восстановления связей лучей, существовавших во время фотографирования, при помощи пространственных рычагов.

Стереокартограф служит для составления карт и построения фотограмметрических сетей по аэроснимкам и наземным снимкам, полученным фотокамерами с полем зрения до 120°.

Основные части стереокартографа: проектирующая система, оптическая система, измерительная система, корректоры для учета влияния систематических ошибок и координатограф.

Проектирующая система (рис. 227, б) состоит из двух камер и двух пространственных рычагов, вращающихся в шаровых шарнирах, центры которых служат центрами проекции. Концы рычагов, находящиеся в пространстве модели, карданно соединены с базисными каретками b_X . Составляющие базиса b_Y и b_Z устанавливаются путем смещения проектирующих камер в горизонтальной плоскости. Таким образом, горизонтальные аэроснимки в приборе занимают вертикальное положение, координатная ось X направлена вверх, а оси Y и Z горизонтальны. Концы рычагов, расположенные в пространстве стереопары, шарнирно связаны с призмами наблюдательной системы. При повороте рычагов центры этих шарниров перемещаются в плоскостях, параллельных снимкам.

Оптическая система состоит из левого и правого микроскопов. В каждом микроскопе — две части, вращающиеся вокруг осей, параллельных главному лучу связки (рис. 227, в). Первая подвижная часть шарнирно соединена с пространственным рычагом. Повороты этого рычага вызывают вращения подвижных частей микроскопа.

В первую подвижную часть входят призма 1, объективы 2 и 3, зеркала 4 и 5, марка 6 и призма 7 с малым проектором.

Призма 1 направляет лучи, идущие от снимка, в зеркало 4, от которого они отражаются и попадают на зеркало 5. Затем лучи идут параллельно оси *Z* прибора. Объективы 2 и 3 фокусируют изображение снимка в плоскости измерительной марки 6. Призма 7 имеет полупосеребренную диагональную грань, необходимую для введения в систему светящейся измерительной марки с помощью малого проектора.

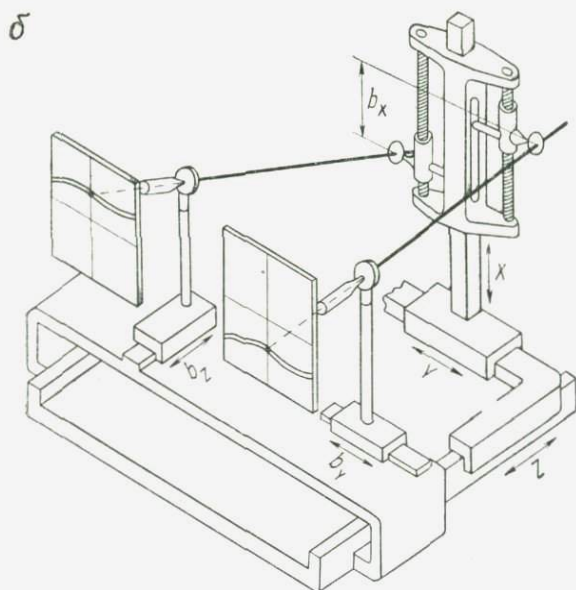
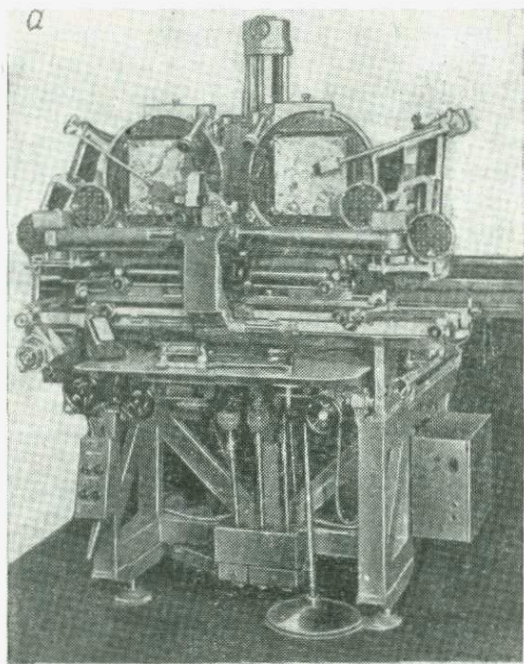
Призмы 8 и 9 относятся ко второй подвижной части оптической системы. Призма 8 направляет лучи на призму 9, которая посылает их через объектив 10 в призму 11. Объектив 10 образует параллельный пучок лучей. Элементы, находящиеся между призмой 11 и зеркалом 16, образуют оптическую связь между второй подвижной частью и неподвижной окулярной частью. К этим элементам относятся призма 12, призма Амичи 13, объектив 14 и зеркало 15. Призма Амичи служит для исключения поворота изображения, вызванного вращением камер. Кроме того, она может быть использована для оптического преобразования поперечного параллакса в продольный. Расстояние между объективом 14 и призмой 12 переменное. Объектив 14 образует изображение, которое наблюдается с помощью окуляра 17 или 17'. Переставляя окуляры, можно менять увеличение микроскопа. Каждый микроскоп позволяет рассматривать левый или правый снимки, что обеспечивается поворотом револьверной головки на 200°.

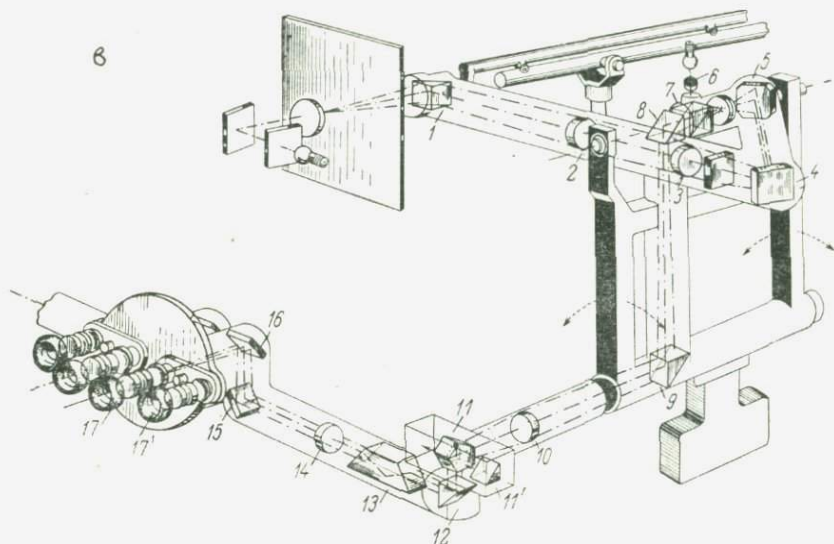
Измерительную систему составляют каретки *X*, *Y* и *Z*, перемещающиеся по цилиндрическим направляющим (см. рис. 227, б). Каретки *Y* и *Z* перемещаются по горизонтальным направляющим, каретка *X* — по вертикальным. На каретке *X* имеется базисный мостик. Каретки *X* и *Y* приводятся в движение ручными штурвалами, каретка *Z* — ножным диском или ручным штурвалом. Координаты точки модели можно отсчитать по счетчикам или зарегистрировать автоматически с помощью электронного устройства.

Каретки *X*, *Y* и *Z* имеют механическую связь с двумя каретками координатографа.

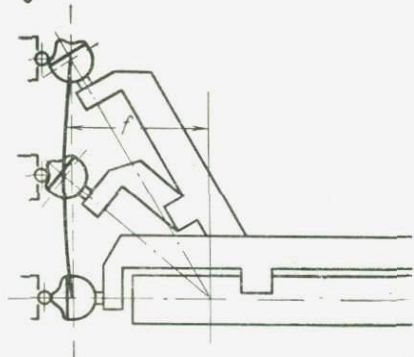
Каждая проектирующая камера имеет два корректора. Один корректор учитывает систематические погрешности, величина которых постоянна для данных снимков и определяется в результате калибровки аэрофотоаппарата, юстировки и исследования стереокартографа и по другим данным (дисторсия объектива аэросъемочной камеры, инструментальные погрешности прибора, атмосферная рефракция). Другой учитывает случайные погрешности, величина которых изменяется от снимка к снимку и определяется как разность координат перекрестий контрольной сетки, установленной в аэрофотоаппарате, и координат изображений этих перекрестий на снимке.

В корректоре поправки осуществляются с помощью винтов в виде поверхности поправок, по которой скользит щуп, связанный





2



с движениями x и y центра шарнира пространственного рычага. Посредством параллелограмма движения щупа, соответствующие поправкам к координатам x и y , передаются на плоскопараллельную пластинку, находящуюся между снимком и оптической системой. Поправка вводится в результате поворота этой пластинки.

Размер поверхности поправок в три раза меньше размера снимка. Частота контрольной

сетки на снимке 3 см. Расстояние между ближайшими винтами корректора вдоль координатных осей x и y — 1 см. Масштаб построения поправок в корректоре равен 40 : 1, что позволяет устанавливать винты с точностью 0,2 мм.

Влияние дисторсии объектива фотокамеры можно учитывать и с помощью другого корректора в виде кулачка, прикрепленного к шарниру пространственного рычага (рис. 227, г). Форма этого кулачка зависит от кривой дисторсии.

Координатограф соединен с прибором посредством телескопических стержней, позволяющих регулировать расстояние от оператора до стола координатографа. Рабочая поверхность стола прозрачная. Установленную на столе основу, на которой составляется карта, можно освещать сверху или снизу.

Основные характеристики стереокартографа (модель V):

Размер снимков	до 23×23 см
Фокусное расстояние проектирующих камер	от 86 до 220 мм
Увеличение оптической системы	9 и $11\times$
Диаметр поля зрения	22 и 18 мм
Углы наклона и углы поворота проектирующих камер:	

$$\alpha = \pm 12^g$$

$$\omega = \pm 8^g$$

$$\kappa = \pm 20^g$$

Диапазоны движений координатных кареток:

$$X = 500 \text{ мм}, b_X = \pm 300 \text{ мм}$$

$$Y = 750 \text{ мм}, b_Y = \pm 120 \text{ мм}$$

$$Z = 150-525 \text{ мм}, b_Z = \pm 40 \text{ мм}$$

Увеличение масштаба составляемой карты по сравнению с масштабом модели

от 8 до $0,25\times$

Размеры стереокартографа $185 \times 155 \times 190$ см

Масса 895 кг

Размеры координатографа $185 \times 150 \times 90$ см

Масса 240 кг

§ 96. ТОПОКАРТ ЦЕЙССА

Топокарт Цейсса (рис. 228) служит для составления и обновления по аэроснимкам и наземным снимкам топографических карт,

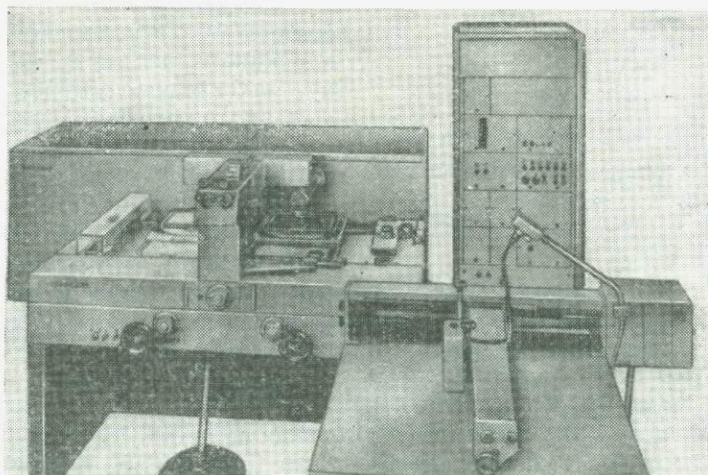


Рис. 228

а также для получения ортофотоснимков и орограмм. Фототриангуляционные сети топокарт позволяют строить способом независимых моделей или способом перестановки снимков.

Для получения ортофотоснимков и орограмм топокарт имеет специальные устройства — ортофот и орограф.

Фотограмметрическая засечка в топокарте решается при помощи двух плоскостных механизмов. Каждый из них вычисляет по координатам X , Y и Z точки модели сначала координаты x^0 и y^0 точки горизонтального снимка, а затем координаты x и y соответствующей точки наклонного снимка.

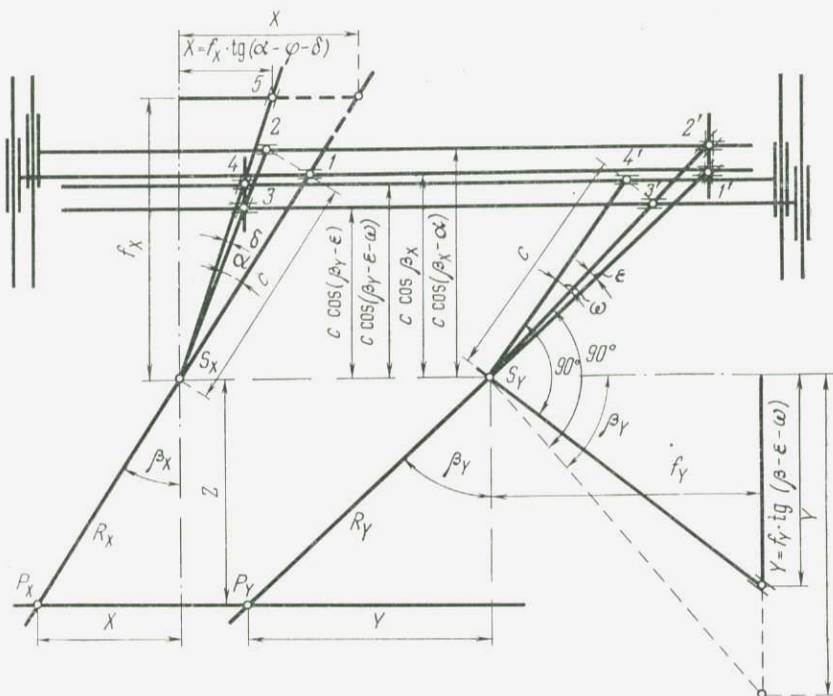


Рис. 229

Таким образом, плоскостной механизм представляет собой аналоговый вычислитель. Он решает уравнения (11.41):

$$X = -Z \frac{(f \cos \omega - y \sin \omega) \sin \alpha + x \cos \alpha}{(f \cos \omega - y \sin \omega) \cos \alpha - x \sin \alpha},$$

$$Y = -Z \frac{f \sin \omega + y \cos \omega}{(f \cos \omega - y \sin \omega) \cos \alpha - x \sin \alpha}.$$

Схема механизма представлена на рис. 229, из которого следует:

$$\left. \begin{aligned} x &= f_X \operatorname{tg}(\beta_X - \alpha - \delta) \\ y &= f_Y \operatorname{tg}(\beta_Y - \epsilon - \omega) \end{aligned} \right\} \quad (11.50)$$

При этом

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{Y(Z \cos \alpha + X \sin \alpha) - YZ}{Z(Z \cos \alpha + X \sin \alpha) + Y^2}, \quad (11.51)$$

$$\operatorname{tg} \delta = (X \cos \alpha - Z \sin \alpha) [(Z \cos \alpha + X \sin \alpha) \cos \omega + Y \sin \omega - \\ - (X \sin \alpha + Z \cos \alpha)] : \{(Z \cos \alpha + X \sin \alpha) [Z \cos \alpha + X \sin \alpha] \cos \omega + \\ + Y \sin \omega\} + (X \cos \alpha - Z \sin \alpha)^2, \quad (11.52)$$

где

$$\operatorname{tg} \beta_X = \frac{X}{Z}, \quad \operatorname{tg} \beta_Y = \frac{Y}{Z}. \quad (11.53)$$

Путем преобразования формул (11.50)—(11.53) можно получить уравнения (11.41), связывающие координаты точки модели с координатами соответствующей точки снимка.

Вычислитель по координатам X и Y точки модели $P (P_X, P_Y)$ определяет координаты x и y точки снимка. На рис. 229 S_X и S_Y — положение центра проекции в плоскостях XZ и YZ . Вокруг этих точек вращаются линейки R_X и R_Y , положение которых определяется углами β_X и β_Y . Ось линейки R_X пересекает плоскость снимка в точке I , удаленной от центра вращения S_X на расстояние s . При повороте линейки R_X точка I описывает дугу, причем отстояние этой точки от S_X равно $s \cos \beta_X$. Этот поворот вызывает поворот линейки R_Y , ось которой пересекает плоскость снимка в точке I' . С линейкой R_X под углом, равным продольному углу наклона снимка α , скреплена вспомогательная линейка $S_X 2$, имеющая постоянную длину s . Ее конец устанавливает направляющую $2-2'$ на расстоянии $s \cos (\beta_X - \alpha)$ от центра вращения S_X . Эта направляющая имеет отвесную линейку в точке $2'$, проходящую через точку I' , благодаря чему определяется направление вспомогательной линейки $S_Y 2'$. Эта линейка образует с линейкой R_Y переменный угол ε , величина которого получается по формуле (11.51). Точка $3'$ вспомогательной линейки $S_Y 2'$ находится на расстоянии s от центра вращения S_Y . Направляющая $3-3'$ удалена от S_X или S_Y на величину $s \cos (\beta_Y - \varepsilon)$ и пересекает вспомогательную линейку $S_X 2$ в точке 3 . С вспомогательной линейкой $S_Y 3'$ под углом, равным поперечному углу наклона снимка ω , связана вспомогательная линейка $S_Y 4'$, длина которой равна s . Своим концом она устанавливает направляющую $4-4'$ на отстояние, равное $s \cos (\beta_Y - \varepsilon - \omega)$ от центра вращения S_X . Эта направляющая имеет в точке 4 отвесную и проходящую через точку 3 направляющую, которая определяет положение вспомогательной линейки $S_X 4$, вращающейся вокруг S_X . Эта линейка образует с вспомогательной линейкой $S_X 3$ переменный угол δ , величина которого определяется формулой (11.52). Пересечение 5 оси вспомогательной линейки $S_X 4$ с направляющей, параллельной $S_X S_Y$ и отстоящей на расстоянии f_x от центра вращения S_X , определяет искомую координату x точки снимка. Пересечение $5'$ вспомогательной линейки $S_Y 5'$ с направляющей,

перпендикулярной к $S_X S_Y$ и отстоящей от S_Y на величину f_Y , определяет координату y точки снимка.

В топокарте два вычислителя, по одному для каждого снимка. Чтобы погрешности прибора были малы, центры S_X и S_Y , относящиеся к одному снимку, расположены один над другим.

Конструктивная схема топокарта показана на рис. 230. Линейки R_X и R_Y и снимки приводятся в движение при помощи ручных штурвалов. Каретки снимков можно перемещать и от руки, освободив муфты, связывающие их с линейками. Движение Z осуществляется при помощи ножного штурвала.

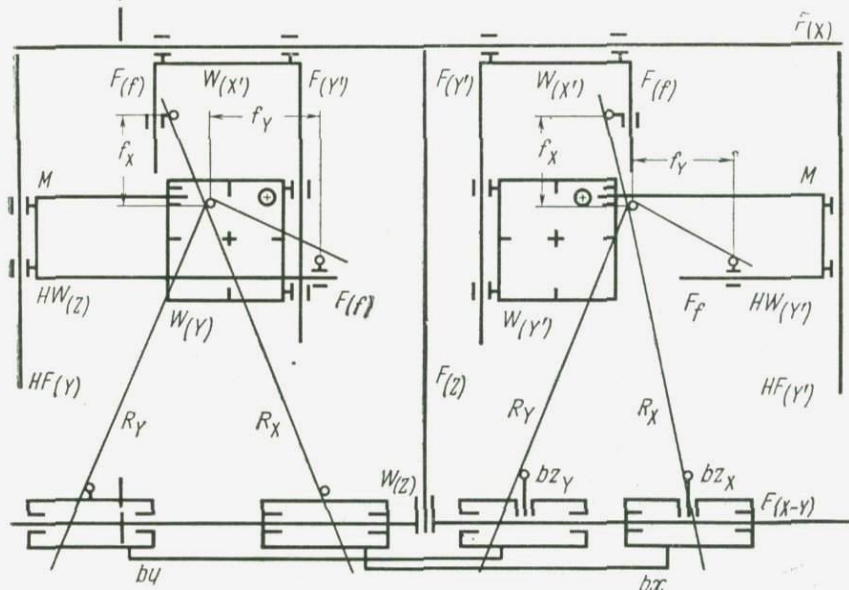


Рис. 230

Раздельная установка фокусных расстояний f_X и f_Y позволяет исключить влияние неравномерной деформации снимков.

В топокарте снимки находятся в горизонтальном положении. Поэтому наблюдательная система прибора имеет простое устройство по сравнению с автографом Вильда и стереопланиграфом Цейсса.

Оптическая схема наблюдательной системы и ортофота приведена на рис. 231. Пучок лучей, идущий от снимка I , разделяется призмой 2 на две части: одна часть его поступает в наблюдательную систему, а другая — в ортофот, который через щель строит на фотопленке 3 ортофотоснимок. Перемещение снимков и кассеты с фотопленкой вдоль оси y осуществляется синхронно при помощи мотора, а смещение вдоль оси x происходит автоматически на величину, соответствующую размеру щели. Движение Z

передается в ортофот от штурвала через преобразователь. В ортофоте имеется инверсор, обеспечивающий получение резкого изображения снимка на фотопленке, а также заданный масштаб ортофотоснимка (см. § 90).

Одновременно с построением ортофотоснимка можно получить штриховое изображение рельефа местности — орограмму так, как она создается в стереотригоамате Цейсса.

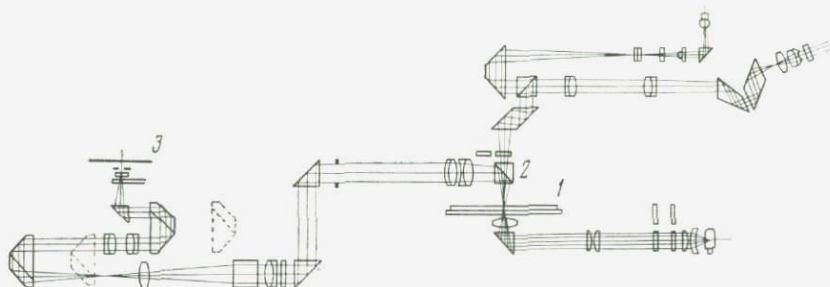


Рис. 231

Основные характеристики топокарта:

Формат снимков	до 23 × 23 см
Фокусное расстояние снимков	от 50 до 215 мм
Углы наклона и поворота снимков	$\alpha = \omega = \pm 5^g$, $\kappa = \pm 30^g$
Увеличение наблюдательной системы	6×
Диаметр поля зрения (на снимке)	40 мм
Диаметр измерительной марки (на снимке)	0,06 мм
Диапазон движений:	

$$X = Y = \pm 240 \text{ мм}, \quad Z \text{ от } 70 \text{ до } 320 \text{ мм},$$

$$b_X \text{ от } 0 \text{ до } 240 \text{ мм}, \quad b_Y = \pm 20 \text{ мм}, \quad b_Z = \pm 15 \text{ мм}$$

Переводные масштабы ν между снимком и моделью:

f	Формат снимка, см	ν
152	23 × 23	от 2,2 : 1 до 1 : 1,2
88	23 × 23	от 1,2 : 1 до 1 : 2
70	18 × 18	от 1 : 1 до 1 : 2,4
50	18 × 18	от 0,7 : 1 до 1 : 2,4

Увеличение ортофотоснимка относительно снимка	от 0,7 до 5×
Максимальный формат ортофотоснимка	75 × 60 см
Размер щели	16 × 4, 8 × 2, 4 × 1, 2 × 0,5 мм
Скорость сканирования	от 0 до 25 мм/с

Коэффициент передачи от топокарта к координатографу	от 0,16 до 5 ^x
Размеры топокарта	150 × 98 × 130 см
Масса	250 кг
Размеры координатографа	90 × 90 × 80 см
Масса	60 кг

§ 97. ТОПОФЛЕКС ЦЕЙССА

Топофлекс Цейсса (рис. 232) представляет собой двойной проектор и служит для составления и обновления топографических карт. Топофлекс можно использовать и в учебном процессе как простой и наглядный прибор.

При разработке этого прибора удалось устранить недостатки известных двойных проекторов и мультифлекса и улучшить условия работы. Топофлекс позволяет обрабатывать снимки без предварительного уменьшения их. Снимки проектируются не на один, а на два измерительных столика и наблюдаются способом мнимой марки с помощью стереоскопической системы. Благодаря этому можно рассматривать черно-белые и цветные снимки, не используя анаглифических, поляризационных или обтюрационных очков, мешающих

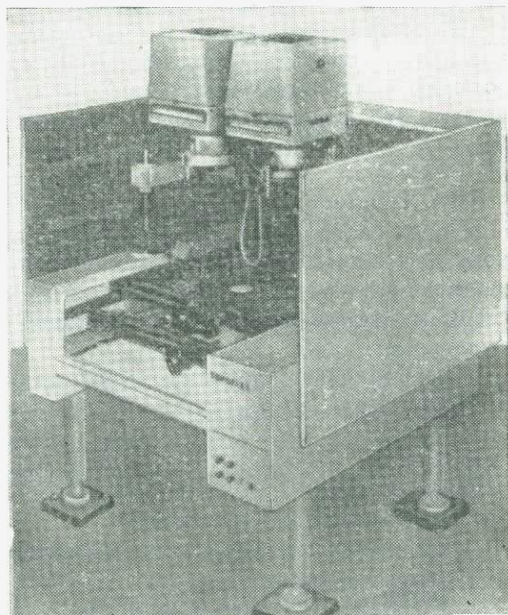


Рис. 232

наблюдению и значительно уменьшающих яркость. Предусмотрена возможность освещения всего снимка с целью трансформирования его и просмотра при обновлении карты. Яркость изображений снимков на измерительных столиках позволяет работать в незатемненном помещении.

Топофлекс состоит из двух проекторов, держателя, двух измерительных столиков, наблюдательной системы, крестообразных салазков, счетчика высот, планшета и корпуса.

Левый проектор подвешен неподвижно в держателе, а правый можно перемещать в трех направлениях для установки составляющих базиса (b_x , b_y , b_z). Каждый проектор поворачивается

вокруг трех осей (α , ω , κ). Держатель перемещается по высоте (Z) и наклоняется в продольном и поперечном направлении (ξ , η). Снимок освещается галогенной лампой через теплозащитный фильтр, рассеивающее стекло и конденсор Френеля. Снимок в приборе располагается на пластинке и выравнивается в плоскость прижимной пластиной.

Каждому проектору соответствует свой измерительный столик, на котором объектив проектора строит изображение снимка. На столике находится круглая светящаяся марка с лампой, зеленым фильтром и конденсорной линзой.

Наблюдательная система представляет собой зеркальный стереоскоп с переменным увеличением.

В приборе имеются две однотипные и расположенные одна над другой системы крестообразных салазок. На верхней системе находится наблюдательная система с кареткой Z для обоих столиков. Эта каретка свободно перемещается от руки в направлениях X и Y . Нижняя система относится к планшету. При этом на каретке Y перемещается каретка X , несущая карандашный штифт. Перемещения вдоль осей X и Y верхней системы крестообразных салазок передаются нижней системе с помощью стальных лент и сменных шестерен. Это позволяет выполнять равнонаправленные движения каретки модели и каретки с чертежным устройством и менять передаточное отношение между ними в широком диапазоне.

Особенностью счетчика высот является использование фрикционной передачи для плавной установки масштаба. Счетчиков X и Y в приборе нет. Для преобразования координат точек модели в цифровую форму к топофлексу можно подключить инкрементальные датчики кругового типа, а для регистрации этих координат — электронное устройство.

Основные характеристики топофлекса:

Формат снимков	до 30 × 30 см
Фокусное расстояние объективов	140 мм
Фокусное расстояние камер	152 мм
Диапазон фокусировки	от -3 до 8 мм
Диафрагма	16, 22, 32, 45
Проекционная лампа	24 В, 250 Вт
Увеличение наблюдательной системы	1,6, 3,2×
Общее увеличение при наблюдении	4; 8×
Поле зрения (на снимке)	30, 15 мм
Диаметр измерительного столика	88 мм
Диаметр измерительной марки	0,07 мм
Углы наклона измерительного столика	0—35°
Углы поворота наблюдательной системы	35—65°

диапазон движений:

$$X = 550 \text{ мм}, \quad b_X = 130-315 \text{ мм}$$

$$Y = 650 \text{ мм}, \quad b_Y = \pm 20 \text{ мм}$$

$$Z \text{ от } 300 \text{ до } 480 \text{ мм}, \quad b_Z = \pm 25 \text{ мм}$$

$$\Delta Z = 100 \text{ мм}$$

Масштабные коэффициенты:

Снимок — модель	2,2—2,8×
Модель — карта	0,16—2,0×
Снимок — карта	0,35—5,6×
Рабочая площадь чертежного стола	600 × 600 мм
Размеры прибора	125 × 125 × 185 см
Масса прибора	280 кг
Точность:	
средняя квадратическая погрешность координат точек на планшете	0,2 мм
средняя квадратическая погрешность высот в ‰ от высоты полета над поверхностью земли	0,15

Топофлекс не имеет дополнительной проектирующей системы для получения резкого изображения снимков при различном положении измерительных столиков по высоте. Поэтому данный прибор пригоден для обработки стереопар только равнинных и холмистых районов.

§ 98. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТЕРЕОПРИБОРОВ

В результате анализа рассмотренных в данной главе отечественных и иностранных универсальных стереоприборов можно отметить следующие основные направления их развития.

1. Создание аналитических приборов, отличающихся большей точностью и универсальностью по сравнению с аналоговыми приборами. Однако стоимость аналитических приборов пока высокая, что ограничивает их применение. Они используются главным образом для создания крупномасштабных карт по снимкам мелкого масштаба.

2. Разработка автоматизированных приборов, выполняющих отдельные процессы — взаимное ориентирование и дифференциальное трансформирование снимков, съемку рельефа и построение профилей почти без участия оператора, что повышает производительность труда в 3—4 раза.

3. Создание новых аналоговых приборов, снабженных устройствами для дифференциального трансформирования снимков и съемки рельефа, а также приспособлениями для учета влияния систематических ошибок и для автоматической регистрации координат точек модели. При этом обеспечивается возможность обработки снимков, полученных нормальноугольными, широкоугольными и сверхширокоугольными фотокамерами, с сохранением принципа восстановления связок проектирующих лучей.

4. Использование теории стереофотограмметрической обработки снимков с преобразованными связками для создания новых приборов аналогового типа, значительно расширяющих возможности фотограмметрии (обработка снимков с любыми фокусными расстояниями, построение аффинной модели местности).

5. Усовершенствование известных аналоговых приборов путем введения устройств для дифференциального трансформирования снимков, учета влияния систематических ошибок и для автоматической регистрации результатов измерений.

6. Сочетание универсального стереоприбора с электронной вычислительной машиной при построении фотограмметрических сетей и проектировании инженерных сооружений. Для построения фотограмметрической сети на универсальном стереоприборе создаются одиночные независимые модели. Затем при помощи электронной вычислительной машины эти модели соединяются в общую систему — свободную фотограмметрическую сеть, которая ориентируется относительно геодезической системы координат. Такое сочетание позволяет упростить конструкцию универсального стереоприбора, так как отпадает необходимость иметь устройства для переключения осей визирования и установки отрицательных базисов. Точность инструментально-аналитического способа фототриангуляции выше по сравнению с инструментальным способом, но уступает точности аналитической фототриангуляции. Для проектирования инженерных сооружений на стереоприборе определяются координаты довольно большого количества точек модели, т. е. получается цифровая модель местности. Результаты этих измерений используются для инженерных расчетов при помощи электронной вычислительной машины.

СТЕРЕОМЕТР И СОЗДАНИЕ КАРТЫ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫМ СПОСОБОМ

§ 99. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В 1932 г. Ф. В. Дробышев изобрел оригинальный прибор — стереометр (рис. 233), являющийся основным прибором дифференцированного способа создания карт. Он служит для измерения исправленных разностей продольных параллаксов и проведения горизонталей на плановых снимках.

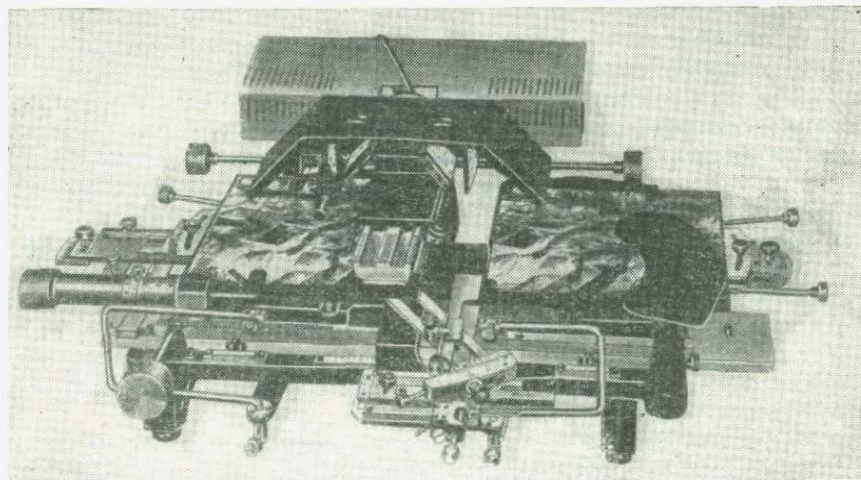


Рис. 233

Идея стереометра заключается в следующем. Допустим, что в стереокомпараторе находятся горизонтальные снимки, полученные с одной и той же высоты, т. е. снимки, соответствующие идеальному случаю съемки. Установим по шкале продольных параллаксов какой-либо отсчет. Затем, рассматривая снимки и не изменяя установленного отсчета ($\Delta p = \text{const}$), проведем пространственную марку по поверхности видимой модели. Если на каком-либо снимке, например на правом, зафиксировать след марки, то получим линию равных высот ($Z = \text{const}$), т. е. горизонталь. Это следует из уравнения (7.13). Обозначив продольные

параллаксы и разность их на горизонтальных снимках через p^0 и Δp^0 , напишем

$$Z_T = Z_{T1} + H_1 \frac{\Delta p^0}{p_1^0 + \Delta p^0} \cdot \quad (12.1)$$

Теперь предположим, что вместо горизонтальных снимков в стереокомпаратор заложены плановые снимки и что при постоянном отсчете по шкале продольных параллаксов мы провели пространственную марку по поверхности видимой модели. В данном случае след марки на снимке не является горизонталью, так как разности продольных параллаксов на плановых снимках искажены вследствие влияния углов наклона снимков и других отличий от идеального случая съемки. Чтобы этот след был горизонталью, достаточно в процессе проведения марки по модели перемещать один снимок относительно другого на величины, равные поправкам за искажения разности продольных параллаксов.

В стереомере эта задача решается с помощью коррекционных механизмов.

Таким образом, *стереомер* представляет собой стереокомпаратор с коррекционными механизмами, с помощью которых разности продольных параллаксов на плановых снимках трансформируются, т. е. приводятся к идеальному случаю съемки.

Чтобы на стереомере измерять разности продольных параллаксов, соответствующие идеальному случаю съемки, необходимо правильно установить снимки и коррекционные механизмы.

Ориентирование снимков на стереомере можно производить по установочным величинам или по опорным высотным точкам. Установочные величины вычисляются по элементам ориентирования снимков. Высоты опорных точек определяются в поле или путем построения фотограмметрических сетей.

В топографическом стереомере измерительными марками служат тонкие нити, натянутые над снимками приблизительно перпендикулярно к начальным направлениям. Разности продольных параллаксов можно исправлять не только изменением относительного положения снимков, но и изменением взаимного положения нитей.

По исправленным с помощью стереомера разностям продольных параллаксов вычисляют высоты точек местности, используя формулу (12.1) и предварительно определив для данной стереопары высоту фотографирования и продольный параллакс начальной точки.

Горизонталь проводят на правом снимке после установки соответствующего отсчета по шкале продольных параллаксов. С этой целью на снимке последовательно соединяют точки, которые соответствуют сечению модели стереоскопической нитью, наблюдаемому при перемещении общей каретки стереомера вдоль начального направления. Очевидно, горизонталь, как и

контуры на снимке, получают в центральной проекции. Для составления карты снимок с нанесенными на нем горизонталями трансформируют. Трансформирование выполняют по опорным точкам с помощью проектора или фототрансформатора, позволяющих получать оптическое изображение снимка на планшете. Это изображение вычерчивают. С целью уменьшения на карте ошибок за рельеф снимок трансформируют по зонам.

Таким образом, основными процессами дифференциального способа создания карты являются:

- 1) сгущение по снимкам опорной сети;
- 2) съемка рельефа с помощью стереометра;
- 3) составление карты с помощью проектора.

В настоящей главе мы рассмотрим теорию и устройство стереометра, съемку рельефа с помощью этого прибора, а также составление карты по снимкам, обработанным на стереометре.

§ 100. УРАВНЕНИЕ ОРИЕНТИРОВАНИЯ СНИМКОВ НА СТЕРЕОМЕТРЕ

Выведем уравнение ориентирования снимков на стереометре. Это уравнение выражает зависимость между разностью продольных параллаксов на горизонтальных снимках и соответствующей разностью продольных параллаксов на плановых снимках. Оно решается коррекционными механизмами прибора.

Согласно формуле (7.18) между продольными параллаксами на горизонтальных и плановых снимках существует следующая связь:

$$p^0 = p - f \Delta\alpha + \frac{p^2}{f} \alpha_1 - \frac{x_2^2}{f} \Delta\alpha - \frac{x_2 y_2}{f} \Delta\omega - y_2 \left(\Delta\kappa - \frac{p}{f} \omega_1 \right) - \frac{x_2}{f} \left(f \frac{\Delta H}{H} - 2p\alpha_1 \right).$$

Пусть главная точка второго снимка принята за начальную. Обозначим через p_1 продольный параллакс этой точки на плановых снимках. Тогда для продольного параллакса любой другой точки стереопары, например точки a , можно написать следующее равенство:

$$p = p_1 + \Delta p, \quad (12.2)$$

где Δp — разность продольных параллаксов точки a и начальной точки.

Учитывая равенство (12.2), представим зависимость (7.18) между p^0 и p в таком виде:

$$p^0 = p - f \Delta\alpha + \frac{p_1^2}{f} \alpha_1 + 2 \frac{p_1}{f} \Delta p \alpha_1 + \frac{\Delta p^2}{f} \alpha_1 - \frac{x_2^2}{f} \Delta\alpha - \frac{x_2 y_2}{f} \Delta\omega - y_2 \left(\Delta\kappa - \frac{p_1}{f} \omega_1 - \frac{\Delta p}{f} \omega_1 \right) - \frac{x_2}{f} \left(f \frac{\Delta H}{H} - 2p_1 \alpha_1 - 2 \Delta p \alpha_1 \right). \quad (a)$$

Член $\frac{\Delta p^2}{f} \alpha_1$ в дальнейшем учитывать не будем, так как он мал. Например, при $\Delta p = 5$ мм, $f = 100$ мм и $\alpha = 1^\circ$ величина его меньше 5 мкм.

Для начальной точки ($x_2 = y_2 = \Delta p = 0$)

$$p_1^0 = p_1 - f \Delta \alpha + \frac{p_1^2}{f} \alpha_1. \quad (6)$$

Вычтем равенство (6) из равенства (а), обозначив $p^0 - p_1^0$ через Δp_0 :

$$\begin{aligned} \Delta p^0 = \Delta p - \frac{x_2}{f_1} \left(f \frac{\Delta H}{H} - 2p_1 \alpha_1 - 2 \Delta p \alpha_1 \right) - \frac{x_2^2}{f} \Delta \alpha - \\ - \frac{x_2 y_2}{f} \Delta \omega - y_2 \left(\Delta \kappa - \frac{p_1}{f} \omega_1 - \frac{\Delta p}{f} \omega_1 \right) + 2 \frac{p_1}{f} \Delta p \alpha_1. \end{aligned} \quad (12.3)$$

Это и есть уравнение ориентирования снимков на стереометре.

Из выражения (12.3) следует, что поправки к разности продольных параллаксов Δp зависят от элементов ориентирования снимков и рельефа местности, а также от положения точки на снимке. Коррекционные механизмы учитывают все поправки, входящие в выражение (12.3), за исключением последней.

Поправки, вводимые коррекционными механизмами, разделим на две группы:

а) поправки первого порядка

$$\delta p' = - \frac{x_2}{f} \left(f \frac{\Delta H}{H} - 2p_1 \alpha_1 \right) - \frac{x_2^2}{f} \Delta \alpha - \frac{x_2 y_2}{f} \Delta \omega - y_2 \left(\Delta \kappa - \frac{p_1}{f} \omega_1 \right); \quad (12.4)$$

б) поправки второго порядка

$$\delta p'' = 2x_2 \frac{\Delta p}{f} \alpha_1 + y_2 \frac{\Delta p}{f} \omega_1. \quad (12.5)$$

При небольшом рельефе поправками второго порядка можно пренебречь.

Таким образом,

$$\Delta p^0 = \Delta p + \delta p + 2 \frac{p_1}{f} \Delta p \alpha_1, \quad (12.6)$$

где

$$\delta p = \delta p' + \delta p''.$$

Поправки в измеряемую разность продольных параллаксов в стереометре вводятся с помощью механизма продольной коррекции и механизма поперечной коррекции.

§ 101. ТЕОРИЯ КОРРЕКЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ

Главными частями топографического стереометра являются основание O (рис. 234), общая каретка K , левая каретка K_1 , правая каретка K_2 , нити m_1 и m_2 , параллактический винт M_p , мостик и стереоскоп (см. рис. 233).

Общая каретка перемещается вдоль продольной оси X прибора по направляющим, прикрепленным к его основанию. Левая и правая каретки находятся на общей каретке и передвигаются тоже

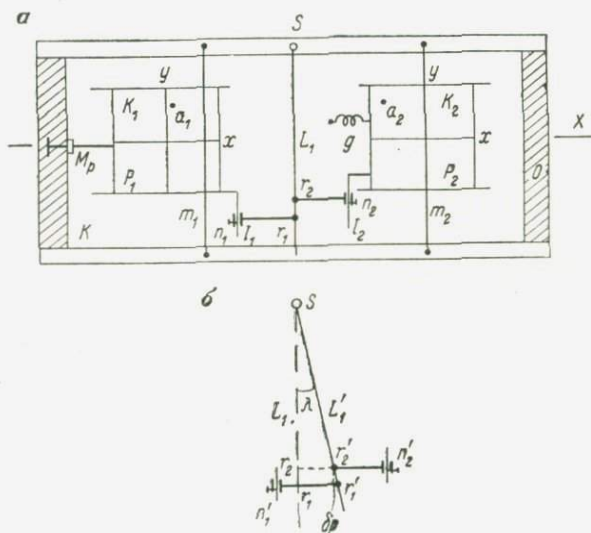


Рис. 234

в продольном направлении: левая — параллактическим винтом M_p , а правая — продольным коррекционным механизмом. На левой и правой каретках расположены снимкодержатели, которые можно поворачивать в их плоскостях. Нити натянуты над снимкодержателями и служат для визирования на точки снимков. Мостик прикреплен к основанию прибора. Зеркально-линзовый стереоскоп смонтирован на мостике и имеет движение в поперечном направлении.

Снимки в приборе устанавливают так, чтобы главные точки их совместились с соответствующими центрами вращения снимкодержателей, а начальные направления были параллельны продольной оси прибора.

Механизм продольной коррекции служит для введения в измеряемую разность продольных параллаксов поправок

$$\delta_{P1} = -\frac{x_2}{f} \left(f \frac{\Delta H}{H} - 2p_1\alpha_1 - 2\Delta p\alpha_1 \right) \quad (12.7)$$

$$\delta p_2 = -\frac{x_2^2}{f} \Delta \alpha. \quad (12.8)$$

Эти поправки вводятся путем смещения правой каретки относительно общей.

Механизм состоит из качающейся линейки L_1 , направляющих линеек l_1 и l_2 , ползушек n_1 и n_2 и роликов r_1 и r_2 (см. рис. 234). Линейка L_1 вращается вокруг оси S , прикрепленной к основанию прибора. Линейка l_1 связана с общей кареткой, а линейка l_2 — с правой кареткой. Ролики находятся на ползушках, скользящих вдоль линеек l_1 и l_2 . С помощью пружины g , действующей на правую каретку, ролики неизменно соприкасаются с линейкой L_1 при любом положении общей каретки.

Качающаяся линейка перпендикулярна к направляющим общей каретки, если последняя находится в начальном положении, т. е. если правая нить проходит через центр вращения правого снимкодержателя.

Если расстояния от оси вращения линейки L_1 до центров роликов одинаковы ($S_{r_1} = S_{r_2}$), то при передвижении общей каретки на какую-то величину правый снимкодержатель переместится в том же направлении и на ту же величину, т. е. правый снимок не сместится относительно левого. Наоборот, если расстояния S_{r_1} и S_{r_2} различны, то возникнет относительное смещение снимков при движении общей каретки.

На рис. 234, б показано положение частей коррекционного механизма после наведения правой нити на точку a_2 . Правый снимок сместился на величину $r_2 r'_2$, а левый — на величину $r_1 r'_1$. Разность этих величин, очевидно, равна поправке к измеряемой разности продольных параллаксов.

Обозначим эту поправку через $\delta p'_1$, а расстояния S_{r_2} и $r_2 r_1$ — через F и $\Delta F'$. Из рис. 234, б следует

$$\delta p'_1 = \Delta F' \operatorname{tg} \lambda,$$

где λ — угол поворота качающейся линейки.

Приняв $r_2 r'_2 = x_2$ (абсциссе точки a_2), получим

$$\delta p_1 = \frac{x_2}{F} \Delta F'. \quad (12.9)$$

Сравнивая (12.9) и (12.7), видим, что данный механизм решает уравнение (12.7) при условии

$$\Delta F' = \frac{F}{f} \left(f \frac{\Delta H}{H} - 2\rho_1 \alpha_1 - 2\Delta\rho \alpha_1 \right). \quad (12.10)$$

Здесь два первых члена в скобках — величины, постоянные для данной стереопары, третий — переменная величина, так как разность продольных параллаксов различна для различных точек.

Следовательно, элемент $\Delta F'$ необходимо изменять в зависимости от изменения разности продольных параллаксов.

Эта задача решается путем перемещения ползушки n_1 и ролика r_1 с помощью дополнительного механизма, основной частью которого является линейка L_3 (рис. 235). Линейку L_3 можно поворачивать вокруг оси c_3 , связанной с кареткой левого снимка K_1 , и устанавливать под углом ν относительно оси X прибора. Если $\nu = 0$, то при передвижении параллактическим винтом каретки левого снимка ползушка n_1 и ролик r_1 не смещаются, и элемент ΔF не изменяется. Если же $\nu \neq 0$, то ΔF изменяет свое значение.

Пусть стереоскопическая нить наведена на начальную точку, для которой $\Delta p = 0$. Сместим линейку L_3 относительно каретки

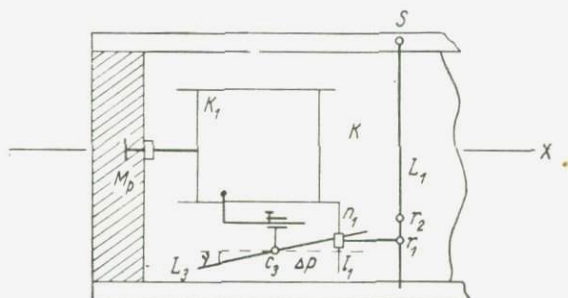


Рис. 235

левого снимка K_1 и установим ее так, чтобы ось c_3 находилась на оси линейки L_1 . Далее скрепим линейку L_3 с кареткой K_1 и, перемещая ползушку n_2 с роликом r_2 , введем величину ΔF , соответствующую начальной точке ($\Delta p = 0$). Теперь при перемещении параллактическим винтом каретки левого снимка элемент ΔF будет изменяться автоматически. Из рис. 235 следует, что

$$\Delta F = \nu \Delta p.$$

Сравнивая это выражение с равенством (12.10), находим

$$\nu = 2 \frac{F}{f} \alpha_1. \quad (12.11)$$

Для введения поправки за взаимный продольный угол наклона снимков механизм продольной коррекции имеет еще одну качающуюся линейку L_2 , которую устанавливают под углом β относительно линейки L_1 (рис. 236).

На рис. 236, а представлено начальное положение общей каретки и коррекционного приспособления. Пусть ролики одинаково удалены от направляющих общей каретки. Если угол β равен нулю, т. е. если линейки L_1 и L_2 совмещены друг с другом, то смещение каждого снимка относительно основания прибора равно смещению общей каретки. Если же $\beta \neq 0$, то смещение

левого снимка равно смещению общей каретки, а смещение правого снимка отличается от смещения общей каретки на величину, равную поправке за взаимный продольный угол наклона снимков.

Для доказательства этого рассмотрим рис. 236, б, на котором пунктирными линиями показано начальное положение коррекционного механизма, а сплошными — положение его после наведения правой нити m_2 на точку a_2 правого снимка. Здесь $r_1 r'_1$ —

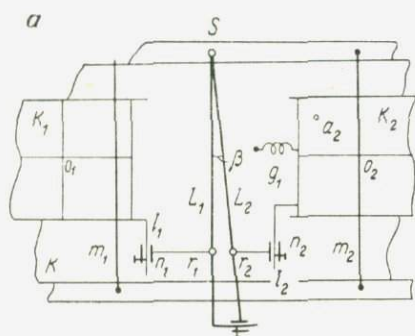


Рис. 236

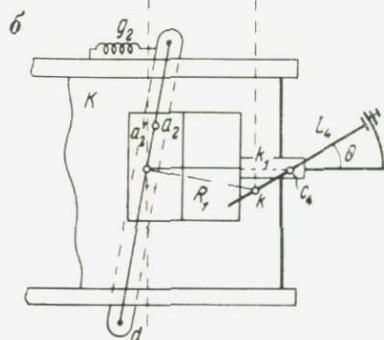
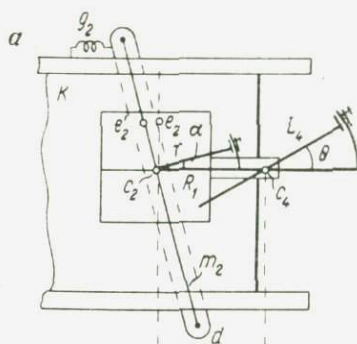


Рис. 237

путь, пройденный левым снимком, а $r_2 r'_2$ — путь, пройденный правым снимком. Положив $Sr_1 = F$, напишем:

$$r_1 r'_1 = F \operatorname{tg} \lambda,$$

$$r_2 r'_2 = r_1 r_2 - r_1 r_2 = F \operatorname{tg} (\lambda + \beta) - F \operatorname{tg} \beta,$$

где λ — угол поворота линейки L_1 относительно начального положения.

Угол β мал, а отрезок $r_1 r'_2$ близок к x_2 . Поэтому

$$r_2 r'_2 = F \operatorname{tg} \lambda + F \beta \sec^2 \lambda - F \beta = F \operatorname{tg} \lambda + F \beta \operatorname{tg}^2 \lambda = F \operatorname{tg} \lambda + \frac{x_2^2}{F} \beta.$$

Разность $r_1 r'_1$ и $r_2 r'_2$ равна поправке, которую вводит рассматриваемый коррекционный механизм,

$$\delta p_2 = -\frac{x_2^2}{f} \beta. \quad (12.12)$$

Сравнивая это выражение с выражением (12.8), видим, что данный коррекционный механизм действительно учитывает влияние взаимного продольного угла наклона снимков при условии, если

$$\beta = \frac{F}{f} \Delta \alpha. \quad (12.13)$$

Механизм поперечной коррекции служит для введения в измеряемую разность продольных параллаксов поправок

$$\delta p_3 = -\frac{x_2 y_2}{f} \Delta \omega \quad (12.14)$$

и

$$\delta p_4 = -y_2 \left(\Delta z - \frac{p_1}{f} \omega_1 - \frac{\Delta p}{f} \omega_1 \right). \quad (12.15)$$

Эти поправки учитываются поворотом правой нити.

Механизм состоит из держателя нити d , рычагов r , R_1 и линейки L_4 (рис. 237, а). Держатель нити можно поворачивать вокруг оси c_2 , прикрепленной к основанию прибора. Рычаг r скреплен с держателем d и составляет прямой угол с нитью m_2 , а рычаг R_1 поворачивается вокруг оси c_2 и может быть установлен относительно рычага r под углом γ . Правый конец рычага R_1 благодаря пружине g_2 неизменно касается линейки L_4 . Последняя вращается вокруг оси c_4 и устанавливается под углом θ относительно оси X прибора. Если нить m_2 проходит через центр правого снимкодержателя, то правый конец рычага R_1 находится на оси вращения линейки L_4 .

Пусть $\gamma = 0$ и $\theta = 0$. Тогда рычаги r , R_2 и линейка L_4 будут параллельны, а нить m_2 будет перпендикулярна к продольной оси прибора. В этом случае коррекционное приспособление не работает, т. е. не вводит никаких поправок, так как при любом положении общей каретки относительно основания прибора нить остается перпендикулярной к оси X .

Пусть $\gamma = 0$, а $\theta \neq 0$. Тогда правая нить будет перпендикулярна к продольной оси прибора, если она проходит через центр правого снимкодержателя, т. е. если общая каретка находится в начальном положении. При смещении общей каретки относительно начального положения правая нить поворачивается на угол $\Delta\gamma$, величина которого зависит от угла θ и смещения общей каретки. В результате поворота правой нити в измеряемую разность продольных параллаксов вводится поправка (рис. 237, б)

$$\delta p_3 = a_2 a_2' = y_2 \Delta \gamma.$$

Из рисунка следует

$$\Delta\gamma = \frac{k_1 k}{R_1} \approx -\frac{x_3}{R_1} \theta,$$

где R_1 — длина рычага. Итак,

$$\delta p_3 = -\frac{x_3 y_2}{R_1} \theta. \quad (12.16)$$

Сравнивая это выражение с выражением (12.14), можно заключить

$$\theta = \frac{R_1}{f} \Delta\omega. \quad (12.17)$$

Если установить угол γ , то можно ввести только часть поправки δp_4 , не зависящую от разности продольных параллаксов Δp , а именно:

$$\delta p'_4 = -y_2 \left(\Delta z - \frac{p_1}{f} \omega_1 \right). \quad (12.18)$$

Пусть $\gamma \neq 0$, а $\theta = 0$ (см. рис. 237, а). Тогда нить m_2 получает наклон относительно поперечной

оси прибора. Этот угол сохраняется при движении общей каретки. Благодаря этому в измеряемую разность продольных параллаксов вводится поправка

$$\delta p'_4 = e_2 e'_2 = -y_2 \gamma. \quad (12.19)$$

Сравнивая это выражение с выражением (12.18), можно написать

$$\gamma = \Delta z - \frac{p_1}{f} \omega_1. \quad (12.20)$$

Остальная часть поправки δp_4 , зависящая от разности продольных параллаксов, т. е. величина

$$\delta p''_4 = y_2 \frac{\Delta p}{f} \omega_1, \quad (12.21)$$

учитывается путем поворота левой нити m_1 с помощью второго дополнительного механизма, состоящего из линейки L'_4 , линеек l_3 и l_4 и рычага R_2 (рис. 238). Линейку L_4 можно повернуть вокруг оси c_4 , скрепленной с кареткой левого снимка K_1 , и установить под углом μ относительно оси X прибора. Линейки l_3 и l_4 скреплены друг с другом под прямым углом. Нижняя часть линейки

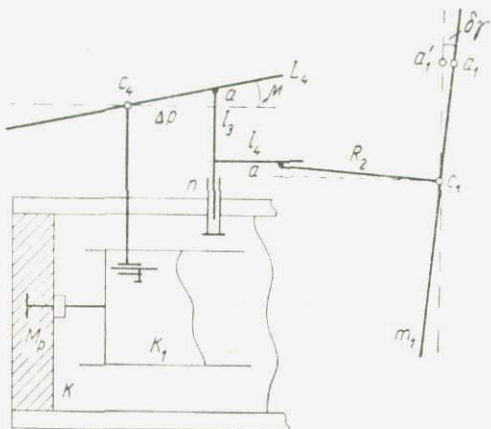


Рис. 238

l_3 находится в направляющих, прикрепленных к общей каретке, а верхний ее конец неизменно касается линейки L_4 . Левая нить прикреплена к держателю, который можно поворачивать вокруг оси c_1 , находящейся на основании прибора. С держателем нити скреплен рычаг R_2 , конец которого соприкасается с линейкой l_4 .

Если $\mu = 0$, то при передвижении каретки левого снимка параллактическим винтом линейки l_3 и l_4 остаются неподвижными, а нить m_1 перпендикулярной к оси X прибора. Если же $\mu \neq 0$, то параллактическое движение каретки левого снимка вызывает смещение линеек l_3 и l_4 , а также поворот рычага R_2 и нити m_1 .

Пусть $\mu \neq 0$ и стереоскопическая нить наведена на начальную точку ($\Delta p = 0$). Сместим линейку L_4' относительно каретки K_1 и установим ее так, чтобы верхний конец линейки l_3 находился на оси c_4 . Затем скрепим линейку L_4 с кареткой K_1 . В этом случае нить m_1 будет перпендикулярна к оси X прибора.

В результате визирования на какую-либо точку модели каретка K_1 сместится относительно общей каретки K на величину Δp , конец линейки l_3 пройдет путь a по направляющим n , а рычаг R_2 и нить m_1 повернутся на угол

$$\delta\gamma = \frac{a}{R_2} = \frac{\Delta p}{R_2} \mu,$$

где R_2 — длина рычага.

Благодаря повороту нити в измеряемую разность продольных параллаксов вводится поправка

$$\delta p_4'' = a_1 a_1' = y_1 \delta\gamma = y_1 \frac{\Delta p}{R_2} \mu. \quad (12.22)$$

Сравнив это выражение с выражением (12.21) и приняв $y_1 = y_2$, можно написать

$$\mu = \frac{R_2}{f} \omega_1. \quad (12.23)$$

Дополнительные коррекционные механизмы предложены М. Д. Коншиным.

Выразим теперь поправки к разности продольных параллаксов через установочные величины коррекционных механизмов. Из равенств (12.13), (12.17), (12.11) и (12.23) следует

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha &= \frac{f}{F} \beta, & \Delta\omega &= \frac{f}{R_1} \theta \\ \alpha_1 &= \frac{1}{2} \cdot \frac{f}{F} v, & \omega_1 &= \frac{f}{R_2} \mu \end{aligned} \right\}. \quad (12.24)$$

Учтя эти равенства, а также выражения (12.10) и (12.15), поправки (12.4) и (12.5) можно представить в виде

$$\delta p = \delta p' + \delta p'' = -\frac{x_2}{F} \Delta F - \frac{x_2^2}{F} \beta - \frac{x_2 y_2}{R_1} \theta - y_2 \gamma + \frac{x_2}{F} \Delta p v + \frac{y_2}{R_2} \Delta p \mu. \quad (12.25)$$

Подставив это значение δp в выражение (12.6), получим уравнение ориентирования снимков на стереометре в таком виде:

$$\frac{x_2}{f} \Delta F + \frac{x_2^2}{F} \beta + \frac{x_2 y_2}{R_1} \theta + y_2 \gamma - \frac{x_2}{F} \Delta p v - \frac{y_2}{R_2} \Delta p \mu - l = 0, \quad (12.26)$$

где

$$l = \Delta p - \Delta p^0 + 2 \frac{p_1}{f} \Delta p \alpha_1. \quad (12.27)$$

§ 102. ОРИЕНТИРОВАНИЕ СНИМКОВ ПО УСТАНОВОЧНЫМ ВЕЛИЧИНАМ

Чтобы в результате измерений на стереометре получить действительно исправленные разности продольных параллаксов, необходимо правильно установить снимки и коррекционные механизмы. Процесс установки снимков и коррекционных механизмов в положение, при котором измеренные на стереометре разности продольных параллаксов соответствуют идеальному случаю съемки, называется *ориентированием снимков*.

Ориентировать снимки на стереометре можно двумя способами:

- 1) по установочным величинам;
- 2) по опорным высотным точкам.

Первый способ основан на предварительном определении элементов ориентирования снимков, а второй позволяет решать задачу, когда элементы ориентирования снимков неизвестны.

Пусть элементы ориентирования снимков, необходимые для определения установочных величин, нам известны. По формулам, выведенным в предыдущем параграфе, можно вычислить установочные величины коррекционных механизмов

$$\left. \begin{aligned} \Delta F &= \frac{F}{f} \left(f \frac{\Delta H}{H} - 2p_1 \alpha_1 \right) \\ \beta &= \frac{F}{f} \Delta \alpha \\ \theta &= \frac{R_1}{f} \Delta \omega \\ \gamma &= \Delta \kappa - \frac{p_1}{f} \omega_1 \\ v &= 2 \frac{F}{f} \alpha_1 \\ \mu &= \frac{R_2}{f} \omega_1 \end{aligned} \right\} \quad (12.28)$$

Установим снимки в стереометре по начальным направлениям. Затем введем величины (12.28) в соответствующие коррекционные механизмы. После этих действий снимки будут ориентированы и,

как следует из уравнения (12.27), мы легко найдем исправленные разности продольных параллаксов

$$\Delta p^0 = \Delta p' + 2 \frac{p_1}{f} \Delta p \alpha_1, \quad (12.29)$$

где $\Delta p' = \Delta p + \delta p$ — измеренная на стереометре разность продольных параллаксов.

Перед ориентированием снимков прибор тщательно проверяют и определяют места нулей его шкал. В стереометре, приведенном в рабочее состояние, все движения должны быть плавными, параллактический винт и коррекционные линейки не должны иметь мертвого хода, каретки левого и правого снимков и нитедержатели должны быть свободны от люфта.

Места нулей шкал обычно находят путем установки коррекционных линеек в начальное положение. Эту установку выполняют с помощью контрольных сеток, закладываемых в прибор вместо снимков.

Места нулей шкал можно найти также и путем вычислений. В этом случае по шкалам устанавливают приближенные значения нульпунктов и измеряют разности продольных параллаксов стандартно расположенных точек на контрольных сетках. Затем составляют систему уравнений (12.26). Неизвестными в этих уравнениях являются поправки к приближенным значениям нульпунктов. Решив уравнения, получают поправки и вычисляют окончательные значения мест нулей. Число точек должно быть больше числа неизвестных. Задача решается по способу наименьших квадратов с оценкой точности определения неизвестных и точности работы прибора.

На практике снимки ориентируют обычно не по установочным величинам, а по опорным точкам. Это объясняется главным образом тем, что современные способы определения элементов внешнего ориентирования снимков в полете еще не обеспечивают точности, необходимой для целей стереофотограмметрической съемки.

§ 103. ОРИЕНТИРОВАНИЕ СНИМКОВ ПО ШЕСТИ ТОЧКАМ

Идея ориентирования снимков на стереометре по опорным высотным точкам вытекает из анализа уравнения (12.26)

$$\frac{x_2}{F} \Delta F + \frac{x_2^2}{F} \beta + \frac{x_2 y_2}{R_1} \theta + y_2 \gamma - \frac{x_2}{F} \Delta p v - \frac{y_2}{R_2} \Delta p u - l = 0,$$

где

$$l = \Delta p - \Delta p^0 + 2 \frac{p_1}{f} \Delta p \alpha_1 = \Delta p - \Delta p^0 + \frac{p_1}{F} \Delta p v.$$

Пусть даны две опорные высотные точки. Тогда, приняв одну из них за начальную, можно составить одно уравнение (12.26). Величину Δp^0 , входящую в свободный член l , найдем по высотам опорных точек. Для этого воспользуемся формулой (7.12)

$$h = H_1 \frac{\Delta p^0}{p_1^0 + \Delta p^0},$$

из которой следует

$$\Delta p^0 = \frac{h}{H_1 - h} p_1^0; \quad (12.30)$$

здесь H_1 — высота фотографирования над начальной опорной точкой,

h — разность высот опорных точек.

Уравнение (12.26) содержит четыре независимых неизвестных: ΔF , β , θ и γ . Величины ν и μ зависят соответственно от ΔF и γ . Чтобы показать эту зависимость, найдем α_1 и ω_1 из первой и четвертой формул группы (12.28)

$$\alpha_1 = \frac{f}{2p_1} \left(\frac{\Delta H}{H} - \frac{\Delta F}{F} \right),$$

$$\omega_1 = \frac{f}{p_1} (\Delta \kappa - \gamma).$$

Подставив найденные значения в последние формулы той же группы, получим

$$\left. \begin{aligned} \nu &= \frac{F}{p_1} \left(\frac{\Delta H}{H} - \frac{\Delta F}{F} \right) \\ \mu &= \frac{R_2}{p_1} (\Delta \kappa - \gamma) \end{aligned} \right\}. \quad (12.31)$$

Входящую сюда величину ΔH можно получить, например, по показаниям статографа; элемент $\Delta \kappa = 0$, так как снимки в стереомере устанавливаются по начальным направлениям.

Итак, две опорные точки позволяют составить одно уравнение (12.26) с четырьмя независимыми неизвестными. Каждая последующая опорная точка дает еще одно уравнение. Следовательно, для определения неизвестных необходимо иметь пять точек. Тогда можно составить четыре уравнения (12.26), решить их и найти неизвестные.

Если район равнинный или холмистый и влияние рельефа не превышает ошибок измерений, то при составлении уравнений (12.26) можно считать $\Delta p = 0$. В этом случае зависимые элементы ν и μ исчезают, и уравнения решаются обычным путем.

Если же разности продольных параллаксов значительны, то уравнения можно решать путем последовательных приближений. Сначала решим их, приняв $\Delta p = 0$. Полученные таким образом значения неизвестных будем считать первым приближением и

найдем элементы ν и μ по формулам (12.31). Затем вычислим новые значения свободных членов, учтя влияние рельефа

$$l' = \Delta p - \Delta p^0 + \frac{p_1}{F} \Delta p\nu + \frac{x_2}{F} \Delta p\nu + \frac{y_2}{R_2} \Delta p\mu, \quad (12.32)$$

после чего составим новую систему уравнений. Решив эту систему, получим второе приближение независимых неизвестных и т. д. Так нужно действовать до тех пор, пока разности между двумя последними приближениями не сравняются с заданными ошибками определения неизвестных.

Опорные высотные точки необходимо выбирать так, чтобы обеспечивать:

- 1) возможно высокую точность ориентирования снимков;
- 2) простое и быстрое решение задачи ориентирования;
- 3) контроль ориентирования.

Исследования показывают, что этим условиям отвечает схема расположения точек, представленная на рис. 239.

Здесь пять точек являются необходимыми (1, 2, 3, 4 и 7), а две — контрольными (5 и 6).

С целью сокращения количества опорных точек и облегчения ориентирования снимков элемент $\Delta\alpha$ находят по поперечным параллаксам, устанавливая в соответствии с этим элементом механизм продольной коррекции перед ориентированием снимков по опорным точкам. В этом случае в уравнении (12.26) будет только три неизвестных и для ориентирования снимков потребуются лишь четыре точки 1—4; точки 5 и 6 будут контрольными.

При сгущении опорной сети по снимкам каждую пару обеспечивают шестью высотными точками, которые используют для ориентирования снимков на стереометре, а также для контроля этого процесса (точки 1—6). Кроме того, пользуются еще элементом $\Delta\alpha$.

При полевой подготовке каждой стереопары обычно определяют только четыре точки, расположенные по ее углам (точки 3, 4, 5 и 6). В этом случае снимки ориентируют по четырем точкам и взаимному продольному углу их наклона $\Delta\alpha$, а контроль ориентирования осуществляют по взаимному поперечному их наклону $\Delta\omega$.

Рассмотрим ориентирование снимков по шести точкам.

Задача ориентирования снимков по опорным точкам будет решена, если мы найдем установочные элементы коррекционных механизмов стереометра.

Пусть нам известны высоты опорных точек 1—6 (см. рис. 239) и взаимный продольный угол наклона снимков $\Delta\alpha$. Для решения

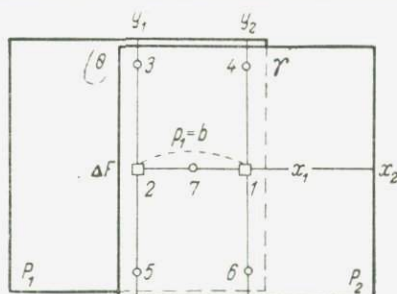


Рис. 239

задачи воспользуемся уравнением (12.26), которое представим в виде

$$\frac{x_2}{F} \Delta F + \frac{x_2 y_2}{R_1} \theta + y_2 \gamma - l' = 0, \quad (12.33)$$

где

$$l' = \Delta p - \Delta p^0 + \frac{p_1}{F} \Delta p v - \frac{x_2^2}{F} \beta + \frac{x_2}{F} \Delta p v + \frac{y_2}{R_2} \Delta p \mu. \quad (12.34)$$

Приняв точку I за начальную, напомним три уравнения (12.33) для точек 2, 3 и 4.

$$1. -\frac{b}{F} \Delta F - l'_2 = 0,$$

$$2. -\frac{b}{F} \Delta F - \frac{ab}{R_1} \theta + a\gamma - l'_3 = 0,$$

$$3. a\gamma - l'_4 = 0.$$

При вычислении свободных членов l' будем считать, что $v = \mu = 0$. Величину Δp^0 найдем по формуле (12.30).

Из уравнений 1 и 3 следует

$$\left. \begin{aligned} \Delta F &= -\frac{F}{b} l'_2 \\ \gamma &= \frac{1}{a} l'_4 \end{aligned} \right\}. \quad (12.35)$$

Подставив найденные значения ΔF и γ в уравнение 2, получим

$$l'_2 - \frac{ab}{R_1} \theta + l'_4 - l'_3 = 0,$$

откуда

$$\theta = \frac{R_1}{ab} (l'_2 - l'_3 + l'_4). \quad (12.36)$$

Найденные таким путем значения установочных элементов ΔF , γ и θ являются первым приближением.

Теперь по формулам (12.31) вычислим углы v и μ , а по формуле (12.34) — новые значения свободных членов l' , учтя найденные углы. Подставив новые значения свободных членов в выражения (12.35) и (12.36), найдем второе приближение установочных элементов ΔF , γ и θ . Затем можно вновь вычислить углы v и μ , свободные члены l' и получить третье приближение величин ΔF , γ и θ и т. д.

Определив элементы ΔF , γ , θ , v и μ , можно проконтролировать по точкам 5 и 6 решение задачи ориентирования снимков. С этой целью подставим в равенство (12.33) значения координат точки 5 и установочных элементов. Вследствие неизбежных ошибок левая часть полученного таким путем равенства будет отличаться от правой. Если это расхождение не выйдет за допустимые пределы, то решение можно считать удовлетворительным. Аналогично осуществляется и контроль по точке 6.

Изложенная здесь теория ориентирования снимков по шести точкам является обоснованием практических приемов. Приводим краткое описание этих приемов.

Перед ориентированием снимков находят их взаимный продольный угол наклона $\Delta\alpha$ и по формуле (12.28) вычисляют установочный элемент β . Кроме того, определяют высоту фотографирования H_1 над начальной точкой и редуцированный продольный параллакс этой точки p_1 (см. § 105). Затем вычисляют по формуле (12.30) исправленные разности продольных параллаксов Δp^0 для точек 2—6.

После этого устанавливают снимки в стереометре, причем так, чтобы их главные точки совпадали с центрами вращения соответствующих снимкодержателей, а начальные направления были параллельны оси X прибора. По шкалам коррекционных механизмов устанавливают элементы

$$\beta, \Delta F=0, \theta=0, \gamma=0, \nu=0, \mu=0,$$

учитывая места нулей этих шкал.

Затем приступают к ориентированию снимков по опорным точкам, т. е. к установке величин ΔF , γ , θ , ν и μ . При этом сначала устанавливают только три величины: ΔF , γ и θ , добиваясь, чтобы измеренные разности продольных параллаксов опорных точек были равны вычисленным. Из выражений (12.35) и (12.36) следует, что в общем случае несоответствия l между измеренными и вычисленными разностями продольных параллаксов на точке 2 зависят только от одной величины ΔF , на точке 4 — только от одной величины γ , на точке 3 — от трех величин: ΔF , γ и θ . Поэтому ориентирование снимков начинают с точек 2 и 3, устраняя несоответствия l в этих точках установкой величин ΔF и γ . После этого несоответствие на точке 4 вызывается только одной величиной θ и легко уничтожается механизмом поперечной коррекции.

На практике ориентирование снимков проводят следующим образом.

Наводят стереоскопически нить на начальную точку 1 и берут отсчет по шкале продольных параллаксов. Таким образом, получают начальный параллактический отсчет p'_1 .

Вычислив параллактический отсчет для точки 2

$$p'_2 = p'_1 + \Delta p'_2,$$

устанавливают его по шкале. Наблюдают точку 2. В общем случае нить не пройдет через эту точку. Уклонение нити на точке 2 устраняют механизм продольной коррекции, изменяя установочный элемент ΔF .

Вычисляют параллактический отсчет для точки 4

$$p'_4 = p'_1 + \Delta p'_4.$$

Устанавливают полученный отсчет по шкале и наблюдают точку 4. Уклонение нити на точке 4 устраняют механизмом поперечной коррекции, изменяя элемент γ .

Вычислив параллактический отсчет для точки 3

$$p'_3 = p'_1 + \Delta p_3^0,$$

устанавливают этот отсчет по шкале и наблюдают точку 3. Уклонение нити на точке 3 устраняют механизмом поперечной коррекции, изменяя элемент θ .

Расположение опорных точек часто не соответствует стандартной схеме, представленной на рис. 239. Поэтому ориентирование снимков выполняют путем последовательных приближений: устранив уклонение нити на какой-либо точке, не сразу переходят к следующей точке, а сначала возвращаются на предыдущие и уточняют установку коррекционных механизмов, если на этих точках появились уклонения.

Первое приближение ориентирования снимков считается законченным, если параллактические отсчеты, полученные после визирования на точки 2, 3 и 4, отличаются от соответствующих вычисленных отсчетов не более чем на 0,1 мм.

Затем отсчитывают по шкалам прибора величины ΔF и γ , вычисляют по формулам (12.31) углы ν и μ и вводят эти углы в коррекционные механизмы.

Второе приближение ориентирования снимков выполняют в той же последовательности, что и первое. Однако во втором приближении, вычисляя параллактические отсчеты, учитывают поправку за продольный наклон первого снимка

$$\delta p'' = 2 \frac{p_1}{f} \Delta p \alpha_1 = \frac{p_1}{F} \Delta p \nu, \quad (12.37)$$

которая входит в уравнение (12.26), но не вводится коррекционными механизмами. Параллактический отсчет находят по формуле

$$p' = p'_1 + \Delta p^0 - \delta p''. \quad (12.38)$$

Установив коррекционные механизмы по точкам 1—4, контролируют работу по точкам 5 и 6.

Ориентирование снимков считается выполненным, если расхождения между отсчетами, полученными после визирования на точки 1—6 и вычисленными, не превышают 0,04 мм.

Часто перед ориентированием снимков по опорным точкам в приборе устанавливают не только элемент β , но и элементы θ , γ , ν и μ , что позволяет ускорить процесс ориентирования стереопары. Для определения элемента θ , как следует из выражений (12.28), нужно знать взаимный поперечный угол наклона снимков $\Delta \omega$, а для вычисления γ , ν и μ — углы наклона первого снимка. Углы наклона снимков можно получить из результатов пространственной фототриангуляции.

Подсчитаем, в каких случаях можно не учитывать при ориентировании снимков углы ν и μ , а также поправку, вычисляемую по формуле (12.37). Очевидно, эти величины не имеют практического значения, если сумма поправочных членов, входящих в уравнение (12.26) и зависящих от разности продольных параллаксов Δp , не превышает заданного предела Δ :

$$\Delta = 2 \frac{x_2}{f} \Delta p \alpha_1 + \frac{y_2}{f} \Delta p \omega_1 + 2 \frac{p_1}{f} \Delta p \alpha_1.$$

Пусть

$$x_2 = y_2 = p_1 = a, \quad \alpha_1 = \omega_1 = \alpha.$$

Тогда

$$\Delta = 5 \frac{a}{f} \Delta p \alpha. \quad (12.39)$$

Например, если $a = 70$ мм, $f = 100$ мм, $\Delta p = 1$ мм и $\alpha = 30'$, то $\Delta = 0,03$ мм. В этом случае нет необходимости определять углы ν и μ и поправки $\delta p''$, что значительно облегчает процесс ориентирования снимков.

§ 104. ОРИЕНТИРОВАНИЕ СНИМКОВ ПО ЧЕТЫРЕМ ТОЧКАМ

Пусть известны высоты точек 3, 4, 5 и 6 (рис. 240) и взаимный продольный угол наклона снимков $\Delta \alpha$. Примем точку 4 за начальную и, определив высоту фотографирования H_1 над этой точкой, а также ее исправленный продольный параллакс p_1^0 ¹, вычислим по формуле (12.30) разности продольных параллаксов точек 3, 5 и 6 относительно точки 4.

Теперь найдем зависимости между вычисленной и измеренной разностями продольных параллаксов двух точек, учитывая при этом, что начальной точкой является точка 4, а продольный параллакс какой-либо точки равен

$$p = p_1 + \Delta p.$$

Согласно равенству (7.18) можно написать

$$p^0 = p - f \Delta \alpha + \frac{p_1^2}{f} \alpha_1 + \frac{2p_1 \Delta p}{f} \alpha_1 + \frac{\Delta p^2}{f} \alpha_1 - \frac{x_2^2}{f} \Delta \alpha - \frac{x_2 y_2}{f} \Delta \omega - y_2 \left(\Delta \alpha - \frac{p_1}{f} \omega_1 - \frac{\Delta p}{f} \omega_1 \right) - \frac{x_2}{f} \left(f \frac{\Delta H}{H} - 2p_1 \alpha_1 - 2 \Delta p \alpha_1 \right),$$

$$p_1^0 = p_1 - f \Delta \alpha + \frac{p_1^2}{f} \alpha_1 - a \left(\Delta \alpha - \frac{p_1}{f} \omega_1 \right).$$

¹ См. § 105.

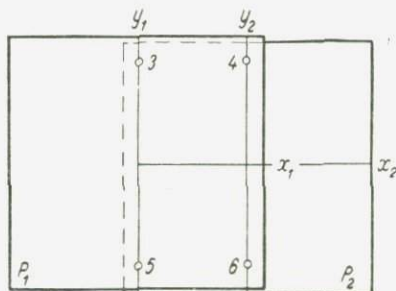


Рис. 240

Вычтем из первого равенства второе

$$\Delta p^0 = \Delta p - \frac{x_2^2}{f} \Delta \alpha - \frac{x_2 y_2}{f} \Delta \omega - y_2 \left(\Delta \kappa - \frac{p_1}{f} \omega_1 - \frac{\Delta p}{f} \omega_1 \right) - \\ - \frac{x_2}{f} \left(f \frac{\Delta H}{H} - 2p_1 \alpha_1 - 2 \Delta p \alpha_1 \right) + 2 \frac{p_1 \Delta p}{f} \alpha_1 + a \left(\Delta \kappa - \frac{p_1}{f} \omega_1 \right) + \frac{\Delta p^2}{f} \alpha_1.$$

Пренебрегая последним членом и учитывая равенства (12.28), представим это выражение в виде

$$\frac{x_2}{F} \Delta F + \frac{x_2 y_2}{R_1} \theta + y_2 \gamma - l - a \left(\Delta \kappa - \frac{p_1}{f} \omega_1 \right) = 0, \quad (12.40)$$

где

$$l = \Delta p - \Delta p^0 - \frac{x_2^2}{F} \beta + y_2 \frac{\Delta p}{R_2} \mu + x_2 \frac{\Delta p}{F} \nu + \frac{p_1}{F} \Delta p \nu. \quad (12.41)$$

Таким образом, мы получили уравнение ориентирования снимков на стереометре применительно к случаю, когда начальной точкой является точка 4.

Составим четыре уравнения (12.40) для опорных точек 3—6.

1. $a\gamma - l_4 - \delta p'_1 = 0,$
2. $-\frac{b}{F} \Delta F - \frac{ab}{R_1} \theta + a\gamma - l_3 - \delta p'_1 = 0,$
3. $-a\gamma - l_6 - \delta p'_1 = 0,$
4. $-\frac{b}{F} \Delta F + \frac{ab}{R_1} \theta - a\gamma - l_5 - \delta p'_1 = 0,$

где

$$\delta p'_1 = a \left(\Delta \kappa - \frac{p_1}{f} \omega_1 \right).$$

Найдем неизвестные ΔF , θ и γ . С целью исключения неизвестной величины $\delta p'_1$ вычтем уравнение 1 из остальных. Получим

1. $-\frac{b}{F} \Delta F - \frac{ab}{R_1} \theta - l_3 + l_4 = 0,$
2. $-2a\gamma - l_6 + l_4 = 0,$
3. $-\frac{b}{F} \Delta F + \frac{ab}{R_1} \theta - 2a\gamma - l_5 + l_4 = 0.$

Из уравнения 2 следует

$$\gamma = -\frac{1}{2a} (l_6 - l_4). \quad (12.42)$$

Подставим значение γ в уравнение 3

$$-\frac{b}{F} \Delta F + \frac{ab}{R_1} \theta + l_6 - l_5 = 0.$$

Прибавим и вычтем это равенство из уравнения 1

$$-2 \frac{b}{F} \Delta F + l_4 - l_3 + l_6 - l_5 = 0,$$

$$-2 \frac{ab}{R_1} \theta + l_4 - l_3 - l_6 + l_5 = 0.$$

Отсюда

$$\left. \begin{aligned} \Delta F &= -\frac{F}{2b} [(l_3 - l_4) + (l_5 - l_6)] \\ \theta &= -\frac{R_1}{2ab} [(l_6 - l_4) - (l_5 - l_3)] \end{aligned} \right\} \quad (12.43)$$

Полученные здесь формулы позволяют найти неизвестные γ , ΔF и θ путем последовательных приближений. Приняв $\nu = \mu = 0$, вычислим свободные члены l и установочные элементы γ , ΔF и θ . По формулам (12.31) найдем углы ν и μ . Таким образом, получим первое приближение неизвестных. Затем вычислим новые значения свободных членов, учитывая углы ν и μ , а по этим значениям — второе приближение неизвестных.

Из уравнения (12.42) следует, что установочный элемент γ является функцией несоответствия l между вычисленной и измеренной разностью продольных параллаксов точек 6 и 4 . Если это несоответствие устранить, то два других элемента (ΔF и θ) будут зависеть, как видно из выражений (12.43), только от несоответствий, наблюдаемых на точках 3 и 5 . Поэтому ориентирование снимков по четырем опорным точкам $3-6$ на практике принято выполнять в такой последовательности:

1. Устанавливают снимки в стереометре так, чтобы главные точки их совпали с центрами вращения соответствующих снимкодержателей, а начальные направления были параллельны оси x прибора. По шкалам коррекционных механизмов устанавливают элементы

$$F, \beta, \Delta F = 0, \theta = 0, \gamma = 0, \nu \text{ и } \mu,$$

учитывая места нулей этих шкал.

2. Стереоскопически визируют на начальную точку 4 и записывают отсчет p'_1 по шкале продольных параллаксов.

3. Вычисляют отсчет, который должен получиться при наведении нити на точку 6 ,

$$p'_6 = p'_4 + \Delta p'_{6-4};$$

здесь Δp_{6-4} — разность продольных параллаксов точек 6 и 4 , вычисленная по формуле (12.30). При этом $h = Z_6 - Z_4$. Визируют на точку 6 , снимают отсчет по шкале продольных параллаксов p''_6 и устанавливают на этой шкале отсчет

$$p'''_6 = \frac{1}{2} (p'_6 + p''_6)$$

Изменяя установку угла γ , добиваются, чтобы визирная нить проходила через точку 6 модели. Повторяют действия, указанные в пунктах 2 и 3, до тех пор, пока разность $p'_6 - p''_6$ не будет меньше 0,06 мм.

4. Визируют на точку 3, снимают отсчет p'_3 и вычисляют отсчет для точки 5

$$p'_5 = p'_3 + \Delta p_{5-3}^0.$$

Визируют на точку 5, снимают отсчет p''_5 и устанавливают по шкале продольных параллаксов отсчет

$$p'''_5 = \frac{1}{2} (p'_5 + p''_5).$$

Изменяют установку угла θ так, чтобы визирная нить проходила через точку 5 модели. Добившись равенства отсчетов p'_5 и p''_5 с точностью 0,06 мм, возвращаются на точки 4 и 6 и, если нужно, уточняют установку угла γ . Затем переходят к паре точек 4, 3 или 6, 5.

5. Визируют на точку 4, снимают отсчет p'_4 , вычисляют отсчет

$$p'_3 = p'_4 + \Delta p_{3-4}^0$$

и устанавливают его по шкале. Смещая общую каретку, подводят визирную нить к точке 3. Изменением установки элемента ΔF добиваются, чтобы визирная нить прошла через точку 3. Эти действия повторяют до тех пор, пока разность отсчетов при наведении на точки 3 и 4 не будет отличаться от Δp_{3-4}^0 больше чем на 0,06 мм. Вновь повторяют операции, описанные в пунктах 2—5.

Ориентирование снимков считают законченным, если измеренные разности продольных параллаксов любой пары точек отличаются от вычисленных не больше, чем на 0,04 мм.

Если предвычислены и установлены не только элементы β , ν и μ , но и элементы θ , γ , то первое приближение ориентирования начинают с выполнения действия, описанного в пункте 5, опуская действия, приведенные в пунктах 2, 3 и 4. В последующих приближениях выполняют все операции, изложенные в пунктах 2—5.

Если углы ν и μ неизвестны, то по соответствующим шкалам устанавливают $\nu = 0$ и $\mu = 0$ и, выполняя первое приближение ориентирования, добиваются, чтобы измеренные разности продольных параллаксов не отличались от вычисленных больше чем на 0,1 мм. Затем по формулам (12.31) вычисляют углы ν и μ , устанавливают их и повторяют действия, описанные в пунктах 2—5.

Для контроля ориентирования многократно (3—5 раз) наводят на начальную точку 4, определяют средний из полученных таким образом отсчетов p'_4 и вычисляют отсчеты $p' = p'_4 + \Delta p^0$ для всех опорных точек, имеющих на стереопаре. Затем последовательно наводят на опорные точки и снимают отсчеты p'' . Если разности

$\Delta = p'' - p'$ не превышают 0,06 мм, значит ориентирование произведено правильно и можно перейти к проведению горизонталей на снимке.

Недопустимые отклонения Δ могут быть по различным причинам. Например, если предвычисленный параллактический отсчет и отсчет, полученный при измерении, хорошо согласуются между собой для всех точек, кроме одной, то ошибка может быть в расчете исходных данных. Если для точек 3 и 5 величины Δ примерно равны, ошибку нужно искать в установке механизма продольной коррекции. Если на точках 4 и 6 или 3 и 5 разности Δ примерно равны по величине и противоположны по знаку, то следует уточнить установку механизма поперечной коррекции.

Ориентирование стереопары по четырем точкам можно проверить и по взаимному поперечному углу наклона снимков $\Delta\omega$, если этот элемент не использовался для установки коррекционных механизмов. В этом случае дважды находят угол θ : по формуле (12.28) и по шкале механизма поперечной коррекции. Разность двух значений этого угла не должна превышать $10'$.

§ 105. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТ ТОЧЕК И ПРОВЕДЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЕЙ

После ориентирования на стереометре определяют высоты точек, которые должны подписываться на карте, и проводят горизонталы на правом снимке стереопары.

Для определения высоты точки местности визируют на соответствующую точку модели, снимают отсчет p' по параллактической шкале и находят исправленную разность продольных параллаксов

$$\Delta p^0 = p' - p'_1 + 2 \frac{p_1}{f} \Delta p \alpha_1 = \Delta p' + \delta p'', \quad (12.44)$$

где p'_1 — параллактический отсчет, полученный при наведении нити на начальную точку.

Поправку

$$\delta p'' = 2 \frac{p_1}{f} \Delta p \alpha_1$$

необходимо учитывать потому, что она входит в формулу (12.3), но не вводится коррекционными механизмами. Если при ориентировании снимков дополнительные коррекционные механизмы не использовались, то поправку $\delta p''$ не учитывают.

Затем по формуле (12.1) вычисляют превышение h и высоту определяемой точки.

Для нанесения горизонталей на снимок вычисляют параллактические отсчеты p' , соответствующие горизонталям, проходящим в пределах стереопары. Из уравнения (12.44) следует

$$p' = p'_1 + \Delta p^0 - \delta p''; \quad (12.45)$$

здесь p'_1 — отсчет, полученный при наведении на начальную точку;

Δp^0 — разность продольных параллаксов, вычисленная по формуле (12.30),

$$\Delta p^0 = \frac{h}{H_1 - h} p_1^0,$$

где h — разность высот горизонтали и начальной точки,

$$h = Z - Z_1. \quad (12.46)$$

Поправку $\delta p''$ находят по формуле (12.37).

Далее изучают характерные особенности строения рельефа, рассматривая снимки стереоскопически. Определяют порядок и приемы нанесения горизонталей, обеспечивающие наиболее правильное и наглядное отображение рельефа. При этом руководствуются редакционными указаниями и общими требованиями к изображению рельефа на топографических картах. Кроме того, пользуются образцами изображения рельефа местности, подобной той, которая представлена на данных снимках. Такими образцами являются снимки с нанесенными на них горизонталями. С помощью стереоскопа образцы просматривают, сравнивают их со стереопарой, находящейся в стереомере, и изучают особенности отображения закономерностей рельефа. Затем на правом снимке проводят основные орографические линии и приступают к нанесению горизонталей. Эту работу целесообразно начинать с той горизонтали, которая вырисовывает наиболее характерные формы рельефа.

Горизонталь проводят следующим образом. На шкале продольных параллаксов устанавливают отсчет, соответствующий горизонтали, которую нужно нанести на снимок. Рассматривая стереомодель и плавно перемещая общую каретку, замечают точки, в которых визирная нить сечет модель. Эти точки соединяют линией, проводя ее на правом снимке. После проведения первой горизонтали на шкале продольных параллаксов устанавливают новый отсчет и наносят следующую горизонталь в том же порядке.

В местах с высокой растительностью горизонтали проводят по верху растительного покрова. В этом случае параллактический отсчет увеличивают на величину

$$\delta p = l \frac{p_1^0}{H_1}, \quad (12.47)$$

где l — высота растительности.

Если высота растительности неизвестна, то поправку δp находят как разность отсчетов по шкале продольных параллаксов, полученных при наведении на верх растительности и на ее основание.

Все проведенные горизонтали тщательно согласуют между собой. В случае необходимости несколько утрируют рисунок гори-

зонталей с целью обеспечения наибольшей выразительности изображения рельефа.

В местах, где формы рельефа при стереоскопическом рассмотрении заметны слабо, горизонталы проводят по пикетным точкам. В этом случае после нанесения на снимок основных орфографических линий намечают пикетные точки, определяют их высоты и наносят горизонталы путем интерполирования высотных отметок. На крутых склонах проводят только утолщенные горизонталы, если расстояние между ними не превышает 5 мм.

Нанесение горизонталей контролируют сравнением данных высот контрольных точек с высотами, отсчитанными по горизонталям, а также определением высот дополнительных пикетных точек.

После съемки рельефа в пределах стереопары производят сводку горизонталей со смежными снимками, причем несовпадения между горизонталями по границам рабочих площадей снимков не должны превышать установленных допусков.

Обработку снимков на стереометре можно ускорить, если пользоваться приспособлением, основанным на принципе фотовысотмера и позволяющим получать высоты без вычислений, в результате наведения нити на точку модели.

§ 106. ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ПАРАЛЛАКСА НАЧАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Для обработки снимков на стереометре необходимо знать трансформированный продольный параллакс начальной точки, т. е. точки I или точки A (см. рис. 239).

Найдем трансформированный продольный параллакс точки местности, соответствующей главной точке правого снимка.

Учитывая, что для главных точек $y = 0$, и приняв $\Delta x = 0$, представим формулу (7.18) в таком виде:

$$p^0 = p - f \Delta \alpha + \frac{p^2}{f} \alpha_1 - \frac{x_2^2}{f} \Delta \alpha - x_2 \left(\frac{\Delta H}{H} - 2 \frac{p}{f} \alpha_1 \right).$$

Подсчитаем по этой формуле параллаксы p_2^0 и p_1^0 для точек o_2 ($x_2 = 0$, $p_2 = b_1$) и o_1 ($x_2 = -b_2$, $p_1 = b$)

$$\left. \begin{aligned} p_2^0 &= b_1 - f \Delta \alpha + \frac{b_1^2}{f} \alpha_1 \\ p_1^0 &= b_2 - f \Delta \alpha - \frac{b_2^2}{f} \alpha_1 - \frac{b_2^2}{f} \Delta \alpha + b_2 \frac{\Delta H}{H} \end{aligned} \right\} \quad (a)$$

Учитывая, что точка o_2 начальная, напишем

$$p_1^0 = p_2^0 + \Delta p^0$$

или, согласно (12.30),

$$p_1^0 \approx p_2^0 + \frac{h}{H} p_2^0 \approx p_2^0 + \frac{h}{H} b_1,$$

где h — разность высот точек местности, соответствующих главным точкам левого и правого снимков.

Следовательно,

$$p_2^0 = b_2 - f \Delta\alpha + \frac{b_2^2}{f} \alpha_1 - \frac{b_2^2}{f} \Delta\alpha + b_2 \frac{\Delta H}{H} - \frac{h}{H} b_1. \quad (6)$$

Возьмем полусумму (а) и (б), положив в поправочных членах $b_1 = b_2 = b$:

$$p_0^2 = \frac{1}{2} (b_1 + b_2) - f \Delta\alpha - \frac{b^2}{2f} \Delta\alpha + b \frac{\Delta H - h}{2H} \quad (12.48)$$

Теперь найдем трансформированный продольный параллакс точки 4. Координаты изображения этой точки на втором снимке равны

$$x_2 = 0, \quad y_2 = a.$$

Согласно уравнению (7.18)

$$p_4^0 = p_4 - f \Delta\alpha + \frac{p_4^2}{f} \alpha_1 - a \left(\Delta\kappa - \frac{p_4}{f} \omega_1 \right) \quad (в)$$

Возьмем еще точку 6 ($x_2 = 0, y_2 = -a$). По той же формуле получим

$$p_6^0 = p_6 - f \Delta\alpha + \frac{p_6^2}{f} \alpha_1 + a \left(\Delta\kappa - \frac{p_6}{f} \omega_1 \right) \quad (г)$$

Составим полусумму равенств (в) и (г), считая, что в поправочных членах $p_4 = p_6 = p$,

$$\frac{1}{2} (p_4^0 + p_6^0) = \frac{1}{2} (p_4 + p_6) - f \Delta\alpha + \frac{p^2}{f} \alpha_1.$$

Представим это выражение в виде

$$\frac{1}{2} (p_4^0 + p_4^0 + \Delta p_{6-4}^0) = \frac{1}{2} (p_4 + p_6) - f \Delta\alpha + \frac{p^2}{f} \alpha_1.$$

Отсюда

$$p_4^0 = \frac{1}{2} (p_4 + p_6) - f \Delta\alpha + \frac{p^2}{f} \alpha_1 - \frac{1}{2} \Delta p_{6-4}^0.$$

Величину Δp_{6-4}^0 подсчитываем по приближенной формуле

$$\Delta p_{6-4}^0 = \frac{h_{6-4}}{H_4} \cdot \frac{1}{2} (p_4 + p_6).$$

Следовательно,

$$p_4^0 = \frac{1}{2} (p_4 + p_6) \left(1 - \frac{h_{6-4}}{2H_4} \right) - f \Delta\alpha + \frac{p^2}{f} \alpha_1. \quad (12.49)$$

По этой формуле можно найти приведенный параллакс точки 4, если продольный угол наклона первого снимка α_1 известен. Выведем вторую формулу для определения приведенного продольного параллакса точки 4 в случае, когда угол α_1 неизвестен.

Согласно выражению (7.18) и рис. 239,

$$p_5^0 = p_5 - f \Delta\alpha + \frac{p_5^2}{f} \alpha_1 - \frac{b^2}{f} \Delta\alpha - \frac{ab}{f} \Delta\omega + a \left(\Delta\kappa - \frac{p_5}{f} \Delta\omega \right) + \frac{b}{f} \left(f \frac{\Delta H}{H} - 2p_5 \alpha_1 \right) = p_4^0 + \Delta p_{5-4}^0.$$

Отсюда

$$p_4^0 = p_5 - f \Delta\alpha + \frac{p_5^2}{f} \alpha_1 - \frac{b^2}{f} \Delta\alpha - \frac{ab}{f} \Delta\omega + a \left(\Delta\kappa - \frac{p_5}{f} \Delta\omega \right) + \frac{b}{f} \left(f \frac{\Delta H}{H_4} - 2p_5 \alpha_1 \right) - \frac{h_{5-4}}{H_4} \cdot \frac{1}{2} (p_4 + p_5). \quad (д)$$

Составим полусумму равенств (в) и (д), приняв в поправочных членах $p_3 = p_6 = p = b$,

$$p_4^0 = \frac{1}{2} (p_4 + p_5) \left(1 + \frac{\Delta H - h_{5-4}}{2H_4} \right) - \left(f + \frac{b^2}{2f} \right) \Delta\alpha - \frac{ab}{2f} \Delta\omega. \quad (12.50)$$

§ 107. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ ФОТОГРАФИРОВАНИЯ

Кроме трансформированного продольного параллакса начальной точки для обработки снимков на стереометре необходимо знать высоту фотографирования относительно этой точки.

Высоту фотографирования можно определить по двум опорным точкам. Пусть известны координаты точек местности C и E , изображившихся на снимке P (рис. 241). Обозначим высоту фотографирования относительно точки C через H_C . Точки C и E следует выбирать на прямой, приблизительно проходящей через главную точку, и на равных расстояниях от главной точки, так как в этом случае почти исключается влияние угла наклона снимка.

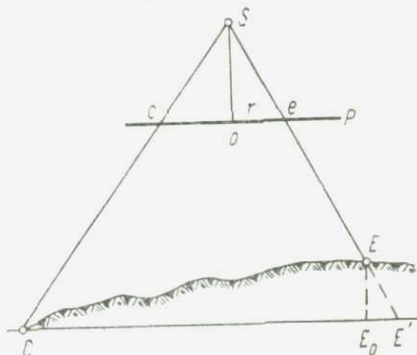


Рис. 241

Продолжим луч SE до пересечения его с горизонтальной плоскостью, проходящей через точку C . Полагая, что снимок горизонтальный и прямая ce проходит через главную точку o , из подобных треугольников SCE' и Sce найдем

$$H_C = (D + \Delta D) \frac{f}{d}, \quad (12.51)$$

где $D = CE_0$ — расстояние между ортогональными проекциями точек C и E ,

$\Delta D = E_0E'$ — поправка за превышение h точки E относительно точки C ,

f — фокусное расстояние снимка,

$d = ce$ — расстояние между изображениями опорных точек на снимке.

Найдем поправку ΔD . Из подобия треугольников EE_0E' и Soe следует

$$\Delta D = \frac{r}{f} h, \quad (12.52)$$

где r — расстояние на снимке от главной точки до точки e .

Вычислив высоту фотографирования над точкой C , можно найти абсолютную высоту фотографирования

$$H_{\text{абс}} = H_C^{\text{н}} + Z_C, \quad (12.53)$$

где Z_C — высота точки C .

Обычно величину $H_{\text{абс}}$, полученную по одному снимку, используют для обработки всех снимков данного маршрута.

§ 108. СОСТАВЛЕНИЕ КАРТЫ

Горизонтали, проведенные на снимках с помощью стереометра, получаются, как и контуры, в центральной проекции. Переход от центральной проекции к ортогональной, т. е. составление карты, производится двумя способами. Первый способ основан на проектировании на планшет одиночных снимков с помощью проектора или фототрансформатора. Этот способ применяют при создании карты холмистых районов, причем проектирование снимков, или, точнее, их трансформирование, выполняют по зонам с целью ослабления влияния рельефа местности. По второму способу получают карту, используя для этого предварительно составленный фотоплан. Этот способ целесообразно применять при картографировании равнинных районов, особенно участков с большим количеством контуров.

Первый способ включает следующие процессы:

- 1) подготовку снимков к фотографированию;
- 2) фотографирование снимков;
- 3) проектирование снимков.

1. Контуры с дешифрованных снимков переносят на снимки с зарисованным рельефом. Если контуры хорошо читаются на снимке, то их переносят монокулярно, в противном случае — стереоскопически. На снимках вычерчивают все элементы, которые должны быть перенесены на планшет. Затем подсчитывают допустимую величину ступени зоны и количество зон для каждого снимка.

Ошибка за рельеф на трансформированном снимке P^0 (рис. 242) определяется по формуле (1.76)

$$\delta r = \frac{h}{H} r,$$

где H — высота фотографирования относительно плоскости трансформирования;

h — превышение точки местности над плоскостью трансформирования,

r — расстояние на снимке от точки надира до изображения точки местности.

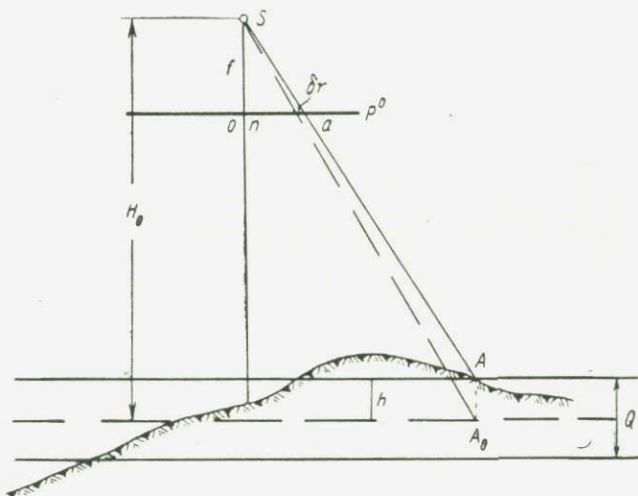


Рис. 242

Отсюда следует, что ошибки за рельеф можно уменьшить или увеличить путем изменения высоты плоскости трансформирования, т. е. путем трансформирования по зонам.

Зонай называется часть рабочей площади снимка, ограниченная горизонталями, в пределах которой ошибки за рельеф не превышают установленной величины. Максимальное превышение точек местности, соответствующей зоне, будем называть ступенью зоны и обозначать через Q .

В соответствии с рис. 242 и формулой (1.76) получим

$$Q = 2h = 2H \frac{\delta r}{r},$$

где δr — допустимая ошибка за рельеф на снимке.

Пусть M и m — знаменатели масштабов карты и снимка. Тогда

$$\delta r = \frac{M}{m} \delta r',$$

где $\delta r'$ — допустимая ошибка за рельеф на карте.

Величина $H = fm$. Следовательно,

$$Q = 2M \frac{f}{r} \delta r'. \quad (12.54)$$

Пусть $\delta r = 0,4$ мм. Тогда величина Q , выраженная в метрах, будет равна

$$Q = 0,0008 \frac{f}{r} M, \quad (12.55)$$

где r — среднее расстояние от углов рабочей площади снимка до главной точки.

Вычисленное значение Q округляют до величины, кратной основному сечению рельефа.

Число зон для данного снимка можно подсчитать по формуле

$$C = \frac{Z'' - Z'}{Q} \quad (12.56)$$

где Z'' — наибольшая абсолютная высота в пределах рабочей площади снимка,

Z' — наименьшая абсолютная высота в пределах той же площади, кратная величине сечения горизонталей.

Далее определяют горизонталы, служащие границами между зонами,

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= Z' + Q \\ Z_2 &= Z' + 2Q \\ &\dots \dots \dots \\ Z_C &= Z' + CQ \end{aligned} \right\}, \quad (12.57)$$

и выделяют их на снимке.

Для перехода от первой зоны к последующим при трансформировании с помощью проектора изменяют расстояние от объекта проектора до планшета на величину ΔZ , называемую ступенью проектирования и равную

$$\Delta Z = \frac{Q}{H_1} Z_{\text{пр}}, \quad (12.58)$$

где H_1 — высота фотографирования над средней плоскостью первой зоны,

$Z_{\text{пр}}$ — отстояние объектива проектора от планшета при проектировании первой зоны.

Если для составления карты используют трансформатор, то переход от одной зоны к другой осуществляют по стандартному отрезку ab (рис. 243), который наносят на снимок с помощью палетки так, чтобы середина его совпадала с главной точкой, а концы находились за пределами рабочей площади снимка. Расстояние ab зависит от размера снимка и обычно равно 150, 200 и 250 мм при формате снимков соответственно 18×18 , 23×23 и 30×30 см.

Для опорных точек, отмеченных на снимке, вычисляют поправки за рельеф в соответствии с формулой (1.76)

$$\delta r = \frac{h}{H_1} r,$$

где r — расстояние на снимке от главной точки до опорной, h — превышение опорной точки относительно средней плоскости первой зоны,

H_1 — высота фотографикования относительно средней плоскости первой зоны.

Поправки δr откладывают на снимке от опорных точек по направлению к главной точке, если h положительное, и наоборот, если h отрицательное. Таким образом, получают исправленное положение точек.

2) Снимки фотографируют с помощью проектора или трансформатора.

В первом случае предварительно находят расстояние от проектора до снимка, которое должно быть установлено при фотографировании,

$$Z_{\phi} = \frac{M}{m} Z_{\text{пр}}, \quad (12.59)$$

где M — знаменатель масштаба карты,
 m — знаменатель масштаба снимка,

$Z_{\text{пр}}$ — расстояние проектора от экрана в момент проектирования.

Рассчитывая величину Z_{ϕ} по формуле (12.59), стремятся выполнить два условия: а) изображение на негативе должно быть получено в возможно крупном масштабе, в связи с чем фотографируют не весь снимок, а только его рабочую часть, подлежащую переносу на планшет; б) величины Z_{ϕ} и $Z_{\text{пр}}$ не должны выходить за пределы, соответствующие практически резкому изображению снимка в проекторе (табл. 16).

В случае фотографирования с помощью фототрансформатора коэффициент уменьшения

$$n \approx \frac{M}{m}. \quad (12.60)$$

Фотографирование производят при параллельном положении трех плоскостей — снимка, объектива и фотопластинки.

3) Для проектирования негатив устанавливают в проектор или фототрансформатор, совмещая главную точку его с центром кассеты. На экран прибора помещают планшет с нанесенными

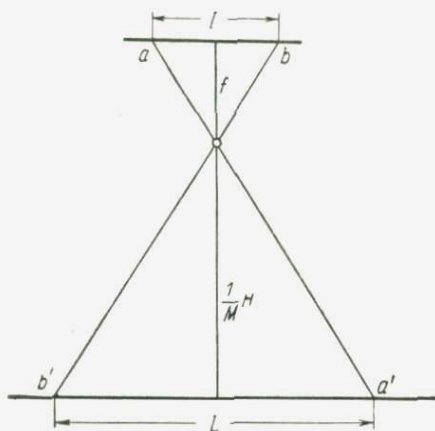


Рис. 243

Проекторы	Пределы изменения $Z_{пр}$, мм
Широкоугольный, с переменным фокусным расстоянием	100—400
Широкоугольный, с постоянным фокусным расстоянием	250—400
Нормальноугольный, с переменным фокусным расстоянием	200—500
Нормальноугольный, с постоянным фокусным расстоянием	250—400

опорными точками. Кроме опорных точек, на планшете с помощью восковки отмечают еще проекцию главной точки снимка.

Далее устанавливают наименьший отсчет по шкале проектора, отстояние объектива от экрана, равное Z_{ϕ} , и, включив свет, совмещают изображения опорных точек с соответствующими опорными точками планшета, т. е. трансформируют снимок на среднюю плоскость первой зоны. Эту операцию выполняют путем последовательных приближений: перемещают и поворачивают планшет, изменяют масштаб изображения и наклоняют проектор или экран трансформатора. В случае проектирования с помощью фототрансформатора вводят децентрацию снимка.

После совмещения опорных точек можно утверждать, что масштаб изображения снимка в пределах первой зоны практически равен масштабу карты. Для всех остальных зон масштаб изображения снимка будет крупнее масштаба карты.

Затем вычерчивают на планшете контуры и горизонтالي первой зоны и в случае использования фототрансформатора через проекции концов стандартного отрезка проводят прямую, служащую для ориентирования планшета при проектировании других зон.

Переходя к проектированию второй зоны, изменяют отсчет по вертикальной шкале на величину ΔZ , опуская проектор. Перемещают камеру в горизонтальной плоскости и совмещают изображение главной точки с соответствующей точкой на планшете, если при вертикальном движении это совмещение было нарушено. Изображения опорных точек должны лежать на прямых, соединяющих соответствующие точки планшета с главной точкой. Затем вычерчивают на планшете контуры и горизонтали второй зоны.

Аналогично проектируют другие зоны. Переход от зоны к зоне при работе на фототрансформаторе осуществляют с помощью стандартного отрезка и номограммы. Формулу для построения номограммы можно получить на основании рис. 243, где l — стандартный отрезок на снимке, L — соответствующий ему отрез-

зок на планшете масштаба $1 : M$, $H : M$ — высота фотографирования над средней плоскостью какой-либо зоны, выраженная в масштабе $1 : M$. Пренебрегая наклоном снимка, напишем

$$L = \frac{l}{f} \cdot \frac{H}{M} \quad (12.61)$$

Для построения номограммы на листе чертежной бумаги проводят ось H (рис. 244), наносят на нее шкалу, позволяющую отсчитывать высоты фотографирования с точностью $0,2 Q$. Через деления шкалы проводят перпендикуляры к оси H . На перпендикулярах, соответствующих крайним значениям H , откладывают отрезки L , вычисленные по формуле (12.61). Через верхние концы отрезков L проводят прямую tt .

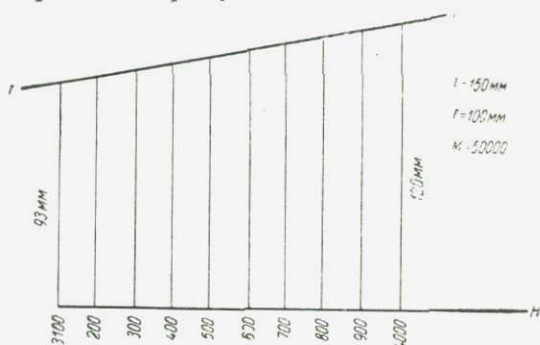


Рис. 244

Номограмму накладывают на планшет так, чтобы изображение стандартного отрезка было перпендикулярно к оси H номограммы, а его концы проектировались на эту ось и прямую tt . Затем отсчитывают по шкале H значение высоты фотографирования над средней плоскостью первой зоны H_1 . Вычисляют высоту фотографирования над средней плоскостью второй зоны ($H_2 = H_1 - Q$) и уменьшают масштаб изображения до тех пор, пока при описанном выше положении номограммы отсчет по шкале H не будет равен H_2 . Совмещают проекцию главной точки с соответствующей точкой, перемещая планшет, и ориентируют последний, добиваясь совпадения прямой, прочерченной на планшете при проектировании первой зоны, с изображением стандартного отрезка. После этого вычерчивают контуры и рельеф второй зоны. Аналогично проектируют другие зоны.

Для контроля установки проектора или фототрансформатора при переходе от зоны к зоне поправки за рельеф в положении опорных точек вычисляют не только относительно средней плоскости нижней зоны, но и относительно средней плоскости верхней зоны. После установки прибора для проектирования последней зоны проекции опорных точек, приведенных к плоскости этой

зоны, должны совпадать с соответствующими точками на планшете. Допускаемое уклонение не должно превышать 0,4 мм.

После переноса на планшет контуров и рельефа со снимков всего маршрута выполняют сводку подробностей по границам зон и рабочих площадей снимков. Несводки по границам рабочих площадей снимков не должны превышать 1 мм, а по границам зон — 0,8 мм. За окончательное положение подробностей при сводке их принимают среднее, сохраняя взаимное положение и форму контуров.

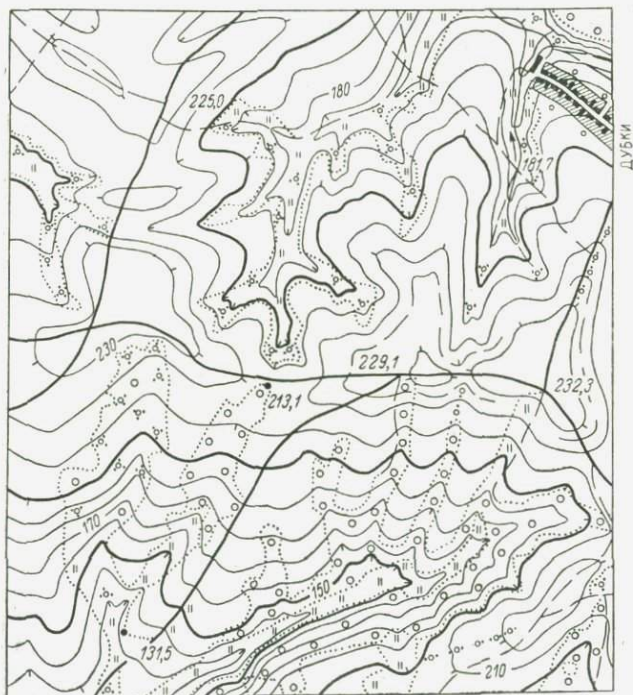


Рис. 245

На рис. 245 представлена часть карты, составленной первым способом.

Для составления карт разработан топографический проектор, позволяющий оптически проектировать снимки различных размеров (до 30 × 30 см) без предварительного уменьшения их. Прибор представляет собой трансформатор второго рода, работающий на просвет и на отражение. Основными частями прибора являются экран, вертикальные направляющие и проектирующая камера.

Экран находится в горизонтальном положении. Проектирующая камера состоит из объективной насадки, кассеты, осветителя

и светонепроницаемого меха. Насадка может занимать два положения: 1) объектив обращен к экрану; 2) объектив обращен к кассете. Перестановка объективной насадки и использование двух объективов с фокусными расстояниями 210 и 110 мм обеспечивают возможность значительного изменения коэффициента трансформирования от 0,2 до 2,5 при сравнительно небольших размерах прибора.

Проектирующие лучи преломляются зеркалом, установленным под углом 45° к экрану. Кассету можно поворачивать вокруг двух взаимно перпендикулярных осей на углы $\pm 10^\circ$ относительно вертикальной плоскости, перпендикулярной к конструктивной оси прибора. Проектирующая камера перемещается по вертикальным направляющим, а кассета — по горизонтальным. Резкое изображение снимка на экране обеспечивается масштабным инверсором и поворотом объектива от руки. Децентрации вводятся смещением объективной насадки и поворотом зеркала вокруг горизонтальной оси.

Осветитель состоит из двух рефлекторов.

В т о р о й с п о с о б включает следующие процессы:

- 1) изготовление фотоплана и репродукции с него;
- 2) дешифрирование фотоплана;
- 3) нанесение горизонталей на фотоплан;
- 4) оформление фотоплана.

Фотоплан изготавливают обычными приемами. Дешифрирование фотоплана выполняют или в поле, или камерально по эталонам. Горизонталю на фотоплан наносят с помощью стереоскопа с переменным увеличением со снимков, обработанных на стереомере.

По коэффициенту уменьшения снимков, выбранному при составлении фотоплана, подбирают линзу для стереоскопа. Затем устанавливают снимок на каретке стереоскопа, а стереоскоп — на фотоплане, причем так, чтобы правый глаз видел перекрывающуюся со снимком часть фотоплана. После этого левым глазом наблюдают снимок, а правым — фотоплан и добиваются стереоскопического эффекта, перемещая каретку со снимком по продольной оси прибора, а линзу — вдоль вертикальной оси. Перенесение сводится к обведению на фотоплане всех видимых горизонталей и дешифрированных контуров.

Если местность равнинная, то на стереомере набирают только пикетные точки, а горизонталю проводят по этим точкам на фотоплане с помощью стереоскопа с переменным увеличением.

Фотопланы вычерчивают соответствующими условными знаками в три цвета: контуры — черным цветом, рельеф — коричневым, воды — зеленым. Чтобы тушь не расплывалась при последующем отбеливании фотоплана, в нее добавляют формалин (6—8 капель на флакон).

Затем фотоплан проверяют, сличая его с отдешифрированными снимками и стереоскопически просматривая отдельные его участки. Проверенный фотоплан отбеливают в пятипроцентном

растворе красной кровяной соли, промывают, погружают в раствор гипосульфита, вновь промывают и сушат. В результате получают составительский оригинал карты.

Изложенный в данной главе советский дифференцированный метод составления карты широко применялся при картографировании территории СССР в масштабе 1 : 100 000 и крупнее. Он имеет существенное превосходство над американским дифференцированным методом Брокка, так как не требует предварительного высокоточного трансформирования снимков.

Автору стереометра проф. Ф. В. Дробышеву присуждена Государственная премия.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ

§ 109. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ

Пространственная фототриангуляция позволяет определить по снимкам плановое положение и высоты опорных точек, необходимых для составления топографических карт, планов, фотопланов и других документов о местности.

Основная цель пространственной фототриангуляции — максимально сократить трудоемкие полевые геодезические работы, заменив их камеральными.

Пространственная фототриангуляция применяется и для решения нетопографических задач, например для изучения траектории, скорости и других параметров, характеризующих поведение самолета.

Сущность пространственной фототриангуляции, как показано во введении, состоит в построении модели местности по снимкам, принадлежащим одному или нескольким маршрутам, и ориентировании ее относительно геодезической системы координат.

В зависимости от количества маршрутов, используемых для построения модели местности, пространственную фототриангуляцию разделяют на одномаршрутную, или маршрутную, и многомаршрутную, или блочную.

Маршрутная фототриангуляция строится по снимкам, принадлежащим одному маршруту. При этом маршрут должен иметь опорные точки, необходимые для ориентирования модели относительно геодезической системы координат.

Многомаршрутная, или блочная фототриангуляция развивается по снимкам, принадлежащим двум маршрутам и более. Для построения ее нет необходимости обеспечивать опорными точками каждый маршрут, достаточно иметь несколько опорных точек на весь блок. Поэтому блочная фототриангуляция позволяет в большей степени сократить полевые геодезические работы, чем маршрутная, что имеет исключительно важное значение, особенно при картографировании труднодоступных и недоступных территорий.

В зависимости от применяемых технических средств различают два вида пространственной фототриангуляции — аналитическую и инструментальную, или аналоговую.

Аналитическая фототриангуляция вычисляется по измеренным координатам точек каждой пары снимков. Современная аналитическая фототриангуляция основана на

применении высокоточных автоматизированных стереокомпараторов и электронных вычислительных машин.

В основу аналоговой фототриангуляции положено использование универсальных стереоприборов, позволяющих строить одиночные модели или общую модель в пределах каждого маршрута.

Различают еще фототриангуляцию без использования элементов внешнего ориентирования снимков и фототриангуляцию с использованием элементов внешнего ориентирования снимков, зарегистрированных в полете. Использование в фототриангуляции элементов внешнего ориентирования снимков и других дополнительных данных, например разностей высот фотографирования, высот фотографирования и координат центров проекции, приводит к значительному сокращению полевых геодезических работ.

Наконец, в зависимости от назначения пространственную фототриангуляцию разделяют на каркасную и заполняющую.

Каркасная фототриангуляция развивается обычно по маршрутам, проложенным перпендикулярно к направлению заполняющих маршрутов с целью обеспечения опорными точками, необходимыми для фототриангуляции по заполняющим маршрутам. Заполняющая фототриангуляция обеспечивает опорными точками каждую стереопару для обработки ее при составлении топографической карты.

Существенными преимуществами аналитической фототриангуляции перед аналоговой являются:

— более высокая точность, обусловленная использованием прецизионного стереокомпаратора для измерения снимков и строгих методов обработки результатов измерений;

— большая производительность, достигаемая благодаря применению электронных вычислительных машин, автоматизирующих все вычислительные процессы;

— универсальность — не накладываются ограничения на значения элементов ориентирования снимков и формат их.

Аналитическая фототриангуляция позволяет учитывать все систематические ошибки, влияние которых можно выразить в математической форме. К источникам таких ошибок относятся дисторсия объектива фотокамеры, кривизна Земли, атмосферная рефракция, равномерная и неравномерная деформации снимков и др.

В аналоговой фототриангуляции возможности учета систематических ошибок ограничены. Например, почти все универсальные стереоприборы не позволяют исключить влияние неравномерной деформации снимков.

В аналитической фототриангуляции удается уменьшить и воздействие случайной деформации снимков. Это достигается использованием в аэрофотоаппарате контрольной сетки, нанесенной с частотой 1—2 см на стеклянной пластинке, к которой прилегает светочувствительный слой фотоэмульсии. В момент экспозиции кон-

трольная сетка впечатывается в снимок. Координаты перекрестий контрольной сетки известны с высокой точностью. На снимке измеряют приращения координат наблюдаемой точки относительно ближайшего перекрестия, т. е. малые отрезки, практически свободные от влияния случайной деформации.

В отдельных случаях аналоговую фототриангуляцию сочетают с аналитической: на универсальных стереоприборах создают независимые модели, а затем с помощью электронной вычислительной машины соединяют эти модели в общую модель и ориентируют ее внешне.

§ 110. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МАРШРУТНАЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ

Различают три варианта аналитической маршрутной фототриангуляции. Первый вариант основан на последовательном построении по стереопарам частично зависимых моделей и соединении их в общую модель. Второй вариант позволяет сначала построить по стереопарам независимые модели, а затем соединить их в общую модель. В основу третьего варианта положено одновременное построение общей модели по всем снимкам, принадлежащим данному маршруту.

Рассмотрим каждый из этих вариантов.

Первый вариант. Для построения первой модели произвольно выбирают элементы внешнего ориентирования левого снимка, т. е. первого снимка маршрута. Затем определяют элементы взаимного ориентирования первой стереопары и вычисляют дирекционный угол и угол наклона базиса фотографирования, а также элементы внешнего ориентирования второго снимка. При этом длину базиса фотографирования выбирают произвольно. Зная элементы ориентирования снимков и координаты соответственных точек стереопары, находят координаты точек модели путем решения прямых засечек. Аналогично создают вторую и последующие модели. Однако в качестве элементов внешнего ориентирования левого снимка второй (последующей) стереопары принимаются не произвольные величины, а полученные в результате обработки первой (предыдущей) стереопары. При этом масштаб последующей модели отличается от масштаба предыдущей, так как длину базиса фотографирования выбирают произвольно при построении каждой модели. Последующая модель приводится к масштабу предыдущей по связующим точкам. Полученную таким образом общую модель ориентируют по опорным точкам, устраняя при этом деформацию модели.

Элементы взаимного ориентирования пары снимков α'_1 , κ'_1 , α'_2 , ω'_2 и κ'_2 определяют способом, изложенным в § 66.

Дирекционный угол и угол наклона базиса фотографирования найдем по угловым элементам внешнего ориентирования левого снимка α_1 , ω_1 , κ_1 и элементам взаимного ориентирования α'_1 и κ'_1 (рис. 246).

Как известно, углы $\alpha_1, \omega_1, \kappa_1$ определяют положение системы координат S_1xyz относительно системы S_1XYZ . Этим системам соответствует матрица

$$A_{\alpha_1, \omega_1, \kappa_1} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ b_{11} & b_{21} & b_{31} \\ c_{11} & c_{21} & c_{31} \end{pmatrix}, \quad (13.1)$$

коэффициенты которой можно найти по формулам (1.15), подставив в них $\alpha_1, \omega_1, \kappa_1$ вместо α, ω, κ .

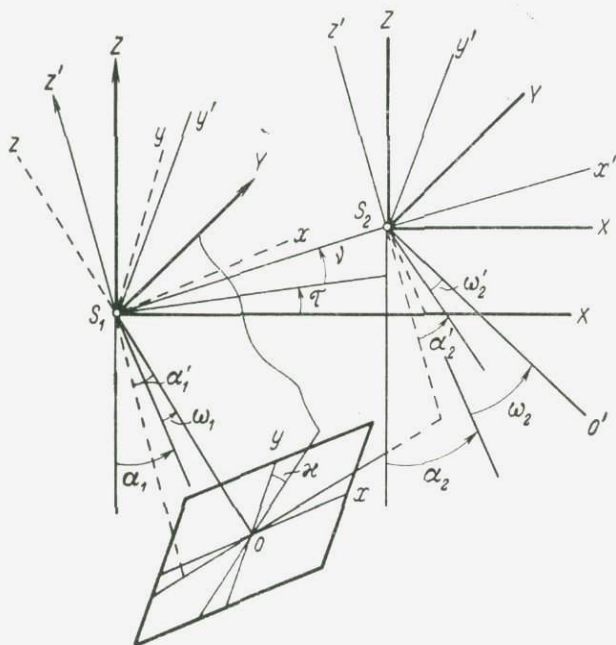


Рис. 246

Углы τ и ν получим по направляющим косинусам как углы Эйлера. Для этого систему координат S_1xyz установим в положение $S_1x'y'z'$, при котором ось абсцисс x' совпадает с базисом фотографирования, а ось z' находится в главной базисной плоскости левого снимка S_1oS_2 . Чтобы придать системе S_1xyz такое положение, повернем ее на углы κ'_1 и α'_1 . Этим поворотом соответствует матрица

$$A'_{\alpha'_1, \kappa'_1} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix}, \quad (13.2)$$

которая получается путем транспортирования матрицы

$$A_{\alpha'_1 \kappa'_1} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix}. \quad (13.3)$$

Элементы матрицы $A_{\alpha'_1 \kappa'_1}$ найдем по формулам (1.15), принимая $\omega = 0$, $\alpha = \alpha'_1$ и $\kappa = \kappa'_1$.

Взаимное положение систем координат $S_1 x' y' z'$ и $S_1 XYZ$ определяет матрица

$$A_{\tau\nu} = A_{\alpha_1 \omega_1 \kappa_1} A'_{\alpha'_1 \kappa'_1} = \begin{pmatrix} (a_1) & (a_2) & (a_3) \\ (b_1) & (b_2) & (b_3) \\ (c_1) & (c_2) & (c_3) \end{pmatrix}. \quad (13.4)$$

Умножить матрицу A на матрицу A' — значит составить новую матрицу, элементы которой получаются в результате умножения строк матрицы A на столбцы матрицы A' .

При введении углов α , ω , κ примем за основные оси z и Z , а при использовании углов τ и ν — оси x и X . При этом углам α и ω соответствуют $-\tau$ и $-\nu$. Учитывая это, найдем τ и ν по формулам (1.16) путем циклической замены букв и индексов: a заменим на b , b на c , c на a ; индексы 1, 2, 3 — на 2, 3, 1. В результате получим

$$\operatorname{tg} \tau = \frac{(b_1)}{(a_1)}, \quad \sin \nu = (c_1). \quad (13.5)$$

Вычислим элементы матрицы $A_{\tau\nu}$ и подставим их значения в формулы (13.5). После преобразований

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \tau &= [\cos \alpha'_1 \cos \omega_1 \sin (\kappa_1 - \kappa'_1) + \sin \alpha'_1 \sin \omega_1] : \\ &: [\cos \alpha'_1 \cos \alpha_1 \cos (\kappa_1 - \kappa'_1) - \cos \alpha'_1 \sin \alpha_1 \sin \omega_1 \times \\ &\times \sin (\kappa_1 - \kappa'_1) + \sin \alpha'_1 \sin \alpha_1 \cos \omega_1]; \\ \sin \nu &= \cos \alpha'_1 \sin \alpha_1 \cos (\kappa_1 - \kappa'_1) + \cos \alpha'_1 \cos \alpha_1 \sin \omega_1 \times \\ &\times \sin (\kappa_1 - \kappa'_1) - \sin \alpha'_1 \cos \alpha_1 \sin \omega_1. \end{aligned} \right\} \quad (13.6)$$

Кроме того, для контроля получим

$$\sin \tau = \frac{1}{\cos \nu} [\cos \alpha'_1 \cos \omega_1 \sin (\kappa_1 - \kappa'_1) + \sin \alpha'_1 \sin \omega_1]. \quad (13.7)$$

Если угловые элементы внешнего ориентирования снимков малы, то эти формулы можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \kappa_1 - \kappa'_1 + \omega_1 \alpha'_1 \\ \nu &= \alpha_1 - \alpha'_1 + \omega_1 (\kappa_1 - \kappa'_1) \end{aligned} \right\} \quad (13.8)$$

Угловые элементы внешнего ориентирования правого снимка $\alpha_2, \omega_2, \kappa_2$ найдем по угловым элементам внешнего ориентирования левого снимка $\alpha_1, \omega_1, \kappa_1$ и элементам взаимного ориентирования $\alpha'_1, \kappa'_1, \alpha'_2, \omega'_2, \kappa'_2$.

Перенесем систему координат $S_1x'y'z'$ параллельно из левого конца базиса S_1 в правый S_2 и повернем ее на углы $\alpha'_2, \omega'_2, \kappa'_2$ (см. рис. 246). Тогда она совпадет с системой S_2xyz правого снимка. При этом ось z будет совмещена с главным лучом S_2o' правой связи. Положение системы координат S_2XYZ относительно S_2XYZ определяется матрица

$$A_{\alpha_2\omega_2\kappa_2} = A_{\tau\nu} A_{\alpha'_2\omega'_2\kappa'_2},$$

где

$$A_{\alpha'_2\omega'_2\kappa'_2} = \begin{pmatrix} a'_1 & a'_2 & a'_3 \\ b'_1 & b'_2 & b'_3 \\ c'_1 & c'_2 & c'_3 \end{pmatrix}. \quad (13.9)$$

Элементы этой матрицы найдем по формулам (1.15), подставив $\alpha'_2, \omega'_2, \kappa'_2$, вместо α, ω, κ .

Учитывая (13.4), напишем

$$A_{\alpha_2\omega_2\kappa_2} = A_{\alpha_1\omega_1\kappa_1} A_{\alpha'_1\kappa'_1} A_{\alpha'_2\omega'_2\kappa'_2} = \begin{pmatrix} a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ b_{12} & b_{22} & b_{32} \\ c_{12} & c_{22} & c_{32} \end{pmatrix}. \quad (13.10)$$

Теперь можно применить формулы (1.16) и получить

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = -\frac{a_{32}}{c_{32}}; \quad \sin \omega_2 = -b_{32}; \quad \operatorname{tg} \kappa_2 = \frac{b_{12}}{b_{22}}. \quad (13.11)$$

Если значения угловых элементов ориентирования снимков малы, то эти формулы можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} \alpha_2 &= \alpha_1 + \alpha'_2 - \alpha'_1 - (\kappa_1 - \kappa'_1) \omega'_2 \\ \omega_2 &= \omega_1 + \omega'_2 + (\kappa_1 - \kappa'_1) (\alpha'_2 - \alpha'_1) \\ \kappa_2 &= \kappa_1 + \kappa'_2 - \kappa'_1 - \omega_1 (\alpha'_2 - \alpha'_1) \end{aligned} \right\}. \quad (13.12)$$

Приращения фотограмметрических координат правой точки фотографирования S_2 (см. рис. 246) относительно левой S_1 найдем по формулам

$$\left. \begin{aligned} B_X &= B \cos \nu \cos \tau \\ B_Y &= B \cos \nu \sin \tau \\ B_Z &= B \sin \nu \end{aligned} \right\}. \quad (13.13)$$

где B — базис фотографирования.

Зная координаты левой точки фотографирования и составляющие базиса по координатным осям, найдем координаты правой точки фотографирования

$$\left. \begin{aligned} X_{S_2} &= X_{S_1} + B_X \\ Y_{S_2} &= Y_{S_1} + B_Y \\ Z_{S_2} &= Z_{S_1} + B_Z \end{aligned} \right\}. \quad (13.14)$$

Для построения модели приведем координаты соответственных точек стереопары к горизонтальным снимкам. Используя для этого формулы (1.35) и учитывая (1.6), найдем

$$\left. \begin{aligned} x_1^0 &= -f \frac{X'_1}{Z'_1}, & x_2^0 &= -f \frac{X'_2}{Z'_2} \\ y_1^0 &= -f \frac{Y'_1}{Z'_1}, & y_2^0 &= -f \frac{Y'_2}{Z'_2} \end{aligned} \right\}, \quad (13.15)$$

где X'_1, Y'_1, Z'_1 — пространственные координаты точки левого снимка, вычисленные по формулам (1.6) как функции плоских координат x_1, y_1 и элементов a_{i1}, b_{i1}, c_{i1} матрицы (13.1),

X'_2, Y'_2, Z'_2 — пространственные координаты точки правого снимка, вычисленные по формулам (1.6) как функции плоских координат x_2, y_2 и элементов a_{i2}, b_{i2}, c_{i2} матрицы (13.10),

f — фокусное расстояние снимков.

Теперь вычислим приращения координат каждой точки модели относительно левой точки фотографирования. Для этого преобразуем формулы (7.6) и (7.7). Учитывая, что в данном случае $X_0 = B_X$ и $Z_0 = B_Z$, $X' = x$, $Y' = y$, $Z' = -f$, получим

$$\Delta X = Nx_1^0, \quad \Delta Y = Ny_1^0, \quad \Delta Z = -Nf, \quad (13.16)$$

$$N = \frac{Z_0 X'_2 - X_0 Z'_2}{Z'_1 X'_2 - X'_1 Z'_2} = \frac{B_X + \frac{x_2^0}{f} B_Z}{x_1^0 - x_2^0}. \quad (13.17)$$

Фотограмметрические координаты точек модели найдем по формулам

$$\left. \begin{aligned} X &= X_{S_1} + \Delta X \\ Y &= Y_{S_1} + \Delta Y \\ Z &= Z_{S_1} + \Delta Z \end{aligned} \right\}. \quad (13.18)$$

Аналогично построим вторую модель по второй стереопаре.

Для приведения второй модели к масштабу первой найдем масштабный коэффициент

$$k = \frac{D}{D'}, \quad (13.19)$$

где D и D' — расстояния от точки фотографирования S_2 до связующей точки на первой и второй моделях (рис. 247).

Эти расстояния вычисляются по разностям координат связующей точки и точки S_2

$$D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}. \quad (13.20)$$

Масштабный коэффициент определяется обычно по центральной и двум боковым связующим точкам. В качестве вероятнейшего значения этой величины берется среднее весовое.

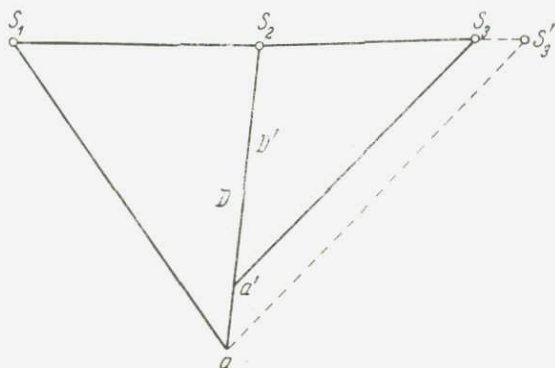


Рис. 247

Координаты точки фотографирования S_3 и всех точек второй модели в системе координат первой модели найдем по формулам

$$\left. \begin{aligned} X_{S_3} &= X_{S_2} + kB_X & X &= X_{S_2} + k\Delta X \\ Y_{S_3} &= Y_{S_2} + kB_Y & Y &= Y_{S_2} + k\Delta Y \\ Z_{S_3} &= Z_{S_2} + kB_Z & Z &= Z_{S_2} + k\Delta Z \end{aligned} \right\}, \quad (13.21)$$

где B_X, B_Y, B_Z — составляющие базиса фотографирования второй модели, вычисленные по формулам (13.13),

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ — приращения координат точки второй модели относительно точки S_2 , полученные по формулам (13.16).

Аналогично построим и приведем к масштабу третью и остальные модели. В результате получим модель маршрута, имеющую одинаковый масштаб и единую систему координат, начало которой находится в первой точке фотографирования S_1 .

Теперь перейдем к внешнему ориентированию маршрутной сети. Для решения этой задачи необходимы опорные точки.

Положение опорных и других точек местности определяется обычно в системе координат Гаусса. Начало и направления координатных осей этой системы устанавливаются отдельно для каждой зоны.

В общем случае фототриангуляционная сеть может иметь значительную длину и располагаться в нескольких зонах. Однако для внешнего ориентирования сети необходимо определить положение опорных точек в единой системе координат. В качестве такой системы используют систему прямоугольных координат X_r, Y_r, Z_r с началом в центре эллипсоида (рис. 248). Эти координаты называются геоцентрическими. Достоинство системы геоцентрических координат состоит в том, что она едина для всего эллипсоида.

Переход от координат Гаусса к геоцентрическим координатам опорных точек выполняется по формулам, известным из курса

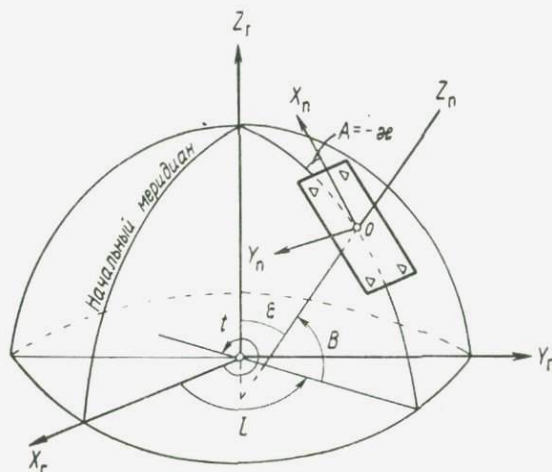


Рис. 248

высшей геодезии. При этом сначала вычисляются геодезические координаты L, B и H , а затем геоцентрические X_r, Y_r и Z_r .

При внешнем ориентировании модели необходимо исключить деформации ее, возникшие при построении сети. Поправки за деформацию вводятся обычно с помощью полиномов второго или третьего порядка, для применения которых необходимо, чтобы фотограмметрическая и геоцентрическая системы были приблизительно параллельны. В общем случае это невозможно. Поэтому используем промежуточную систему координат X_n, Y_n, Z_n , которую установим так, чтобы координаты опорных точек в этой системе отличались возможно меньше от фотограмметрических. Затем найдем элементы ориентирования модели относительно промежуточной системы координат. Зная эти элементы, вычислим координаты определяемых точек в промежуточной системе. Используя полиномы, внесем поправки в эти координаты за деформацию модели. От исправленных координат точек сети в промежуточной системе перейдем к геоцентрическим, а затем к координатам Гаусса.

За начало промежуточной системы примем центр тяжести опорных точек. Координаты его

$$\left. \begin{aligned} L_0 &= \frac{\sum L_i}{n} & X_{r0} &= \frac{\sum X_r}{n} \\ B_0 &= \frac{\sum B_i}{n} & Y_{r0} &= \frac{\sum Y_r}{n} \\ H_0 &= \frac{\sum H_i}{n} & Z_{r0} &= \frac{\sum Z_r}{n} \end{aligned} \right\}, \quad (13.22)$$

где n — число опорных точек.

Ось Z совместим с нормалью к эллипсоиду, а ось X направим так, чтобы ее азимут A был приблизительно равен азимуту оси X фотограмметрической системы координат.

Направляющие косинусы, характеризующие ориентирование промежуточной системы координат относительно геоцентрической, обозначим через a_{i0} , b_{i0} и c_{i0} и найдем их по формулам (6.21)

$$\left. \begin{aligned} a_{10} &= -\cos L_0 \sin B_0 \cos A_0 - \sin A_0 \sin L_0 \\ a_{20} &= -\cos L_0 \sin B_0 \sin A_0 - \sin L_0 \cos A_0 \\ a_{30} &= \cos L_0 \cos B_0 \\ b_{10} &= -\sin L_0 \sin B_0 \cos A_0 - \cos L_0 \sin A_0 \\ b_{20} &= -\sin L_0 \sin B_0 \sin A_0 - \cos L_0 \cos A_0 \\ b_{30} &= \sin L_0 \cos B_0 \\ c_{10} &= \cos B_0 \cos A_0 \\ c_{20} &= \cos B_0 \sin A_0 \\ c_{30} &= \sin B_0 \end{aligned} \right\}. \quad (13.23)$$

Теперь по геоцентрическим координатам опорных точек вычислим координаты их в промежуточной системе

$$\left. \begin{aligned} X_n &= a_{10} (X_r - X_{r0}) + b_{10} (Y_r - Y_{r0}) + c_{10} (Z_r - Z_{r0}) \\ Y_n &= a_{20} (X_r - X_{r0}) + b_{20} (Y_r - Y_{r0}) + c_{20} (Z_r - Z_{r0}) \\ Z_n &= a_{30} (X_r - X_{r0}) + b_{30} (Y_r - Y_{r0}) + c_{30} (Z_r - Z_{r0}) \end{aligned} \right\}. \quad (13.24)$$

Начало фотограмметрических координат перенесем также в центр тяжести опорных точек. Координаты его

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= \frac{\sum X_i}{n} \\ Y_0 &= \frac{\sum Y_i}{n} \\ Z_0 &= \frac{\sum Z_i}{n} \end{aligned} \right\}. \quad (13.25)$$

Таким образом, новые значения фотограмметрических координат

$$\left. \begin{aligned} X' &= X - X_0 \\ Y' &= Y - Y_0 \\ Z' &= Z - Z_0 \end{aligned} \right\}. \quad (13.26)$$

Теперь найдем масштабный коэффициент по опорным точкам

$$r = \frac{D_r}{D'} = \frac{\sqrt{\Delta X_r^2 + \Delta Y_r^2 + \Delta Z_r^2}}{\sqrt{\Delta X'^2 + \Delta Y'^2 + \Delta Z'^2}}. \quad (13.27)$$

Эту величину получим по нескольким парам опорных точек. Вероятнейшее значение ее выведем как среднее весовое и используем для приведения фотограмметрической сети к масштабу промежуточной системы

$$\left. \begin{aligned} X'' &= X' r \\ Y'' &= Y' r \\ Z'' &= Z' r \end{aligned} \right\}. \quad (13.28)$$

Полагая, что модель подобна местности, найдем элементы ориентирования ее $X_{п0}$, $Y_{п0}$, $Z_{п0}$, ξ , η , θ , t относительно промежуточной системы координат. Эту задачу решим по опорным точкам, применив способ, изложенный в гл. 9.

Затем вычислим координаты определяемых точек сети в промежуточной системе

$$\left. \begin{aligned} X_{п} &= X_{п0} + (a_1 X'' + a_2 Y'' + a_3 Z'') t \\ Y_{п} &= Y_{п0} + (b_1 X'' + b_2 Y'' + b_3 Z'') t \\ Z_{п} &= Z_{п0} + (c_1 X'' + c_2 Y'' + c_3 Z'') t \end{aligned} \right\}, \quad (13.29)$$

где a_i , b_i , c_i — направляющие косинусы, полученные по формулам (9.2) как функции углов ξ , η и θ .

Используя полиномы, найдем исправленные за деформацию координаты определяемых точек в промежуточной системе

$$\left. \begin{aligned} X'_{п} &= X_{п} + A_0 + A_1 X_{п} + A_2 Y_{п} + A_3 X_{п} Y_{п} + A_4 X_{п}^2 + A_5 X_{п}^3 \\ Y'_{п} &= Y_{п} + B_0 + B_1 X_{п} + B_2 Y_{п} + B_3 X_{п} Y_{п} + B_4 X_{п}^2 + B_5 X_{п}^3 \\ Z'_{п} &= Z_{п} + C_0 + C_1 X_{п} + C_2 Y_{п} + C_3 X_{п} Y_{п} + C_4 X_{п}^2 + C_5 X_{п}^3 \end{aligned} \right\}. \quad (13.30)$$

Коэффициенты A_i , B_i и C_i получим по опорным точкам, составив и решив уравнения

$$\left. \begin{aligned} A_0 + X_{п} A_1 + Y_{п} A_2 + X_{п} Y_{п} A_3 + X_{п}^2 A_4 + X_{п}^3 A_5 + X_{п} - X'_{п} &= v_X \\ B_0 + X_{п} B_1 + Y_{п} B_2 + X_{п} Y_{п} B_3 + X_{п}^2 B_4 + X_{п}^3 B_5 + Y_{п} - Y'_{п} &= v_Y \\ C_0 + X_{п} C_1 + Y_{п} C_2 + X_{п} Y_{п} C_3 + X_{п}^2 C_4 + X_{п}^3 C_5 + Z_{п} - Z'_{п} &= v_Z \end{aligned} \right\}. \quad (13.31)$$

Каждая опорная точка позволяет составить три уравнения (13.31) с 18-ю неизвестными. Таким образом, для определения коэффициентов A_i, B_i, C_i необходимо иметь не менее шести опорных точек¹.

От исправленных координат определяемых точек сети в промежуточной системе перейдем к геоцентрическим координатам

$$\left. \begin{aligned} X_{\Gamma} &= X_{\Gamma 0} + a_1 X'_{\Pi} + a_2 Y'_{\Pi} + a_3 Z'_{\Pi} \\ Y_{\Gamma} &= Y_{\Gamma 0} + b_1 X'_{\Pi} + b_2 Y'_{\Pi} + b_3 Z'_{\Pi} \\ Z_{\Gamma} &= Z_{\Gamma 0} + c_1 X'_{\Pi} + c_2 Y'_{\Pi} + c_3 Z'_{\Pi} \end{aligned} \right\}. \quad (13.32)$$

Наконец, по геоцентрическим координатам вычислим геодезические координаты L, B и H , а затем координаты Гаусса определяемых точек сети, применив формулы, известные из курса высшей геодезии.

Если ряд короткий, то при внешнем ориентировании его нет необходимости применять геоцентрическую систему. В этом случае можно использовать только систему координат Гаусса, учитывая, что эта система левая, а система фотограмметрических координат правая. В связи с этим следует перед внешним ориентированием сети заменить координатные оси X и Y системы Гаусса на Y и X , а в конце этого процесса произвести обратную замену.

Кроме того, после приведения сети к масштабу фотограмметрические высоты точек необходимо исправить за влияние кривизны Земли

$$Z' = Z + \frac{D^2}{2R}, \quad (13.33)$$

где D — расстояние от середины сети до точки, а R — радиус Земли.

Второй вариант. Второй вариант аналитической маршрутной фототриангуляции основан, как отмечено выше, на построении по стереопарам независимых моделей и соединении их в общую модель.

Каждая модель строится независимо от других моделей. Для этого измеряют координаты точек стереопары, включенных в фотограмметрическую сеть, определяют элементы взаимного ориентирования снимков и вычисляют координаты точек модели. Созданные таким образом одиночные модели соединяют в общую модель с помощью связующих точек. По этим точкам находят элементы ориентирования последующей модели относительно предыдущей. Зная эти элементы, вычисляют координаты точек после-

¹ Этот способ нестрогий, так как коэффициенты A_i, B_i, C_i нельзя считать независимыми.

дующей модели в системе координат, принятой при построении предыдущей модели. Следовательно, общая модель имеет единую систему координат, принятую при построении первой модели. Общая модель ориентируется по опорным точкам относительно геодезической системы координат. При этом вводятся поправки за деформацию модели.

Таким образом, второй вариант маршрутной фототриангуляции не требует определения элементов внешнего ориентирования снимков. Для построения каждой одиночной модели используются элементы взаимного ориентирования пары снимков и система координат, ось X которой совмещена с базисом фотографирования, а плоскость XZ — с главной базисной плоскостью левого снимка (см. рис. 141, а).

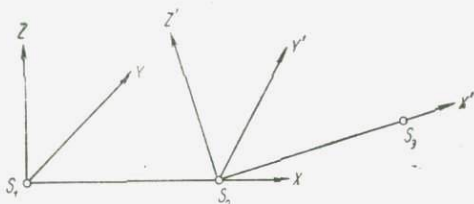


Рис. 249

Элементы взаимного ориентирования снимков $\alpha'_1, \kappa'_1, \alpha'_2, \omega'_2$ и κ'_2 определяются способом, изложенным в § 66.

Фотограмметрические координаты точек модели вычисляют по трансформированным координатам x_1^0, y_1^0 и x_2^0, y_2^0 точек стереопары, применяя формулы (7.8), выведенные для нормального случая съемки,

$$X = B \frac{x_1^0}{p^0}, Y = B \frac{y_1^0}{p^0}; Z = -B \frac{f}{p^0},$$

где $p^0 = x_1^0 - x_2^0$.

При этом длина базиса фотографирования выбирается произвольно для каждой стереопары, т. е. каждая модель строится в произвольном масштабе.

Трансформированные координаты точек стереопары вычисляют по формулам (1.35). При этом направляющие косинусы находят по формулам (1.15): для левого снимка по элементам взаимного ориентирования $\alpha'_1, \omega'_1 = 0$ и κ'_1 , а для правого — по α'_2, ω'_2 и κ'_2 .

Вторую модель присоединяют к первой следующим образом.

Пусть X, Y, Z — координаты связующей точки в системе S_1XYZ первой модели, а X', Y', Z' — координаты соответствующей точки второй модели в системе $S_2X'Y'Z'$ (рис. 249).

Элементами ориентирования второй модели относительно первой служат: координаты точки S_2 в системе S_1XYZ , т. е. величины X_0, Y_0 и Z_0 ; углы ζ, η и θ , определяющие направления осей координат системы $S_2X'Y'Z'$ относительно S_1XYZ , и масштабный коэффициент t .

Пусть известны приближенные значения этих элементов. Для плановых снимков можно считать, что начальные приближения углов ξ , η и θ равны нулю. Приближенные значения $X_0 = B$, $Y_0 = Z_0 = 0$, а приближенное значение коэффициента t найдем как отношение соответственных отрезков D и D' для какой-либо связующей точки.

Воспользуемся способом внешнего ориентирования модели, изложенным в § 72, и составим уравнения поправок (9.5) для связующих точек. Затем найдем вероятнейшие значения элементов ориентирования второй модели относительно первой, решив систему уравнений поправок способом последовательных приближений с учетом весов связующих точек.

Очевидно, что при решении этой задачи вместо геодезических координат X_g , Y_g и Z_g нужно использовать координаты связующих точек в системе первой модели — S_1XYZ .

Координаты точек второй модели в системе координат первой модели вычислим по формулам (9.4).

Аналогично определяют координаты точек третьей и других моделей в системе координат первой модели.

Построенную таким образом общую модель ориентируют относительно геодезической системы координат способом, изложенным в первом варианте.

В результате этих действий получают геодезические координаты всех определяемых точек фотограмметрической сети.

Третий вариант. Третий вариант аналитической маршрутной фототриангуляции существенно отличается от первых двух тем, что фотограмметрическая сеть строится и уравнивается одновременно по всем снимкам данного маршрута.

Для каждой точки снимка, включенной в фотограмметрическую сеть, составляют два уравнения, связывающие ее координаты с координатами соответствующей точки местности. Как известно, в эти уравнения входят и элементы внешнего ориентирования снимка. Обычно используют приближенные значения элементов внешнего ориентирования снимков и координат определяемых точек сети, а также уравнения, приведенные к линейному виду и содержащие в качестве неизвестных поправки к приближенным значениям элементов внешнего ориентирования снимков и координат определяемых точек. Очевидно, что число уравнений поправок будет в два раза больше количества всех изображений точек, включенных в маршрутную сеть. При этом каждая связующая точка дает шесть уравнений поправок, так как она изображается на трех снимках.

Система уравнений поправок решается под условием $(pv^2) = \min$, где v — поправки к измеренным координатам точек снимков, а p — веса измеренных величин. Для этого от уравнений поправок переходят к нормальным уравнениям, в результате решения которых находят вероятнейшие значения координат точек сети и элементов внешнего ориентирования снимков.

В качестве исходных в данном варианте маршрутной фототриангуляции используются уравнения (1.20)

$$x - x_0 = -f \frac{a_1(X - X_0) + b_1(Y - Y_0) + c_1(Z - Z_0)}{a_3(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + c_3(Z - Z_0)} = -f \frac{X^*}{Z^*},$$

$$y - y_0 = -f \frac{a_2(X - X_0) + b_2(Y - Y_0) + c_2(Z - Z_0)}{a_3(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + c_3(Z - Z_0)} = -f \frac{Y^*}{Z^*},$$

где X, Y, Z — координаты точки местности;

x, y — координаты точки снимка;

X_0, Y_0, Z_0 — координаты точки фотографирования;

f — фокусное расстояние снимка;

x_0, y_0 — координаты главной точки снимка;

a_i, b_i, c_i — направляющие косинусы, зависящие от угловых элементов внешнего ориентирования снимка, α, ω и κ и вычисляемые по формулам (1.15);

X^*, Y^* — числители дроби;

Z^* — знаменатель дроби.

В общем случае уравнения (1.20) содержат девять неизвестных: шесть элементов внешнего ориентирования снимка и три координаты определяемой точки местности. При этом предполагается, что элементы внутреннего ориентирования снимка известны, а координаты точки снимка измерены с возможно высокой точностью. Если точка местности служит опорной и ее положение определено практически безошибочно, то уравнения (1.20) включают только шесть неизвестных — элементы внешнего ориентирования снимка.

Пусть известны приближенные значения неизвестных. Тогда по формулам (1.20) можно вычислить координаты x и y точки снимка. Обозначим вычисленные значения этих величин через x_B и y_B . Очевидно, что они будут отличаться от измеренных x и y . Обозначим поправки к приближенным значениям неизвестных через $\delta X_0, \delta Y_0, \delta Z_0, \delta \alpha, \delta \omega, \delta \kappa, \delta X, \delta Y, \delta Z$.

Полагая, что мы имеем избыточные измерения, составим уравнения поправок

$$\left. \begin{aligned} a\delta X_0 + b\delta Y_0 + c\delta Z_0 + d\delta\alpha + e\delta\omega + f\delta\kappa + \\ + g\delta X + h\delta Y + i\delta Z + x_B - x = v \\ a'\delta X_0 + b'\delta Y_0 + c'\delta Z_0 + d'\delta\alpha + e'\delta\omega + \\ + f'\delta\kappa + g'\delta X + h'\delta Y + i'\delta Z + y_B - y = v' \end{aligned} \right\}, \quad (13.34)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a = \frac{\partial x}{\partial X_0} &= \frac{1}{Z^*} [a_1 f + a_3 (x - x_0)] \\ b = \frac{\partial x}{\partial Y_0} &= \frac{1}{Z^*} [b_1 f + b_3 (x - x_0)] \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned}
c &= \frac{\partial x}{\partial Z_0} = \frac{1}{Z^*} [c_1 f + c_3 (x - x_0)] \\
d &= \frac{\partial x}{\partial \alpha} = \frac{f}{Z^*} [c_1 (X - X_0) - a_1 (Z - Z_0)] + \\
&\quad + \frac{x - x_0}{Z^*} [c_3 (X - X_0) - a_3 (Z - Z_0)] \\
e &= \frac{\partial x}{\partial \omega} = -f \sin \alpha + (x - x_0) \left(\operatorname{tg} \omega + \frac{Y - Y_0}{Z^* \cos \omega} \right) \\
f &= \frac{\partial x}{\partial \alpha} = y - y_0 \\
g &= \frac{\partial x}{\partial X} = -\frac{1}{Z^*} [a_1 f + a_3 (x - x_0)] \\
h &= \frac{\partial x}{\partial Y} = -\frac{1}{Z^*} [b_1 f + b_3 (x - x_0)] \\
i &= \frac{\partial x}{\partial Z} = -\frac{1}{Z^*} [c_1 f (x - x_0)] \\
a' &= \frac{\partial y}{\partial X_0} = \frac{1}{Z^*} [a_2 f + a_3 (y - y_0)] \\
b' &= \frac{\partial y}{\partial Y_0} = \frac{1}{Z^*} [b_2 f + b_3 (y - y_0)] \\
c' &= \frac{\partial y}{\partial Z_0} = \frac{1}{Z^*} [c_2 f + c_3 (y - y_0)] \\
d' &= \frac{\partial y}{\partial \alpha} = \frac{f}{Z^*} [c_2 (X - X_0) - a_2 (Z - Z_0)] + \\
&\quad + \frac{y - y_0}{Z^*} [c_3 (X - X_0) - a_3 (Z - Z_0)] \\
e' &= \frac{\partial y}{\partial \omega} = -f \cos \alpha + (y - y_0) \left(\operatorname{tg} \omega + \frac{Y - Y_0}{Z^* \cos \omega} \right) \\
f' &= \frac{\partial y}{\partial \alpha} = -(x - x_0) \\
g' &= \frac{\partial y}{\partial X} = -\frac{1}{Z^*} [a_2 f + a_3 (y - y_0)] \\
h' &= \frac{\partial y}{\partial Y} = -\frac{1}{Z^*} [b_2 f + b_3 (y - y_0)] \\
c' &= \frac{\partial y}{\partial Z} = -\frac{1}{Z^*} [c_2 f + c_3 (y - y_0)]
\end{aligned}
\tag{13.35}$$

Частные производные a, b, \dots, f и a', b', \dots, f' были вычислены в гл. 6 при определении элементов внешнего ориентирования снимка по опорным точкам. Аналогично получаются частные производные g, h, i и g', h', i' .

Технология маршрутной фототриангуляции в данном случае состоит в следующем. При помощи стереокомпаратора измеряют на снимках координаты всех точек, выбранных для построения сети. Находят приближенные значения неизвестных — элементов

внешнего ориентирования снимков и координат определяемых точек, используя для этого материалы аэрофотосъемки, старую карту и другие данные. Результаты измерения снимков, координаты опорных точек, приближенные значения неизвестных и другие исходные данные вводят в электронную вычислительную машину. Вычисления начинаются с введения в измеренные координаты точек снимков поправок за влияние различных систематических ошибок. Затем для каждой точки снимка, участвующей в построении сети, составляются два уравнения поправок (13.34) с весами p и p' . Для этого используются исправленные координаты точки снимка. Общее число уравнений поправок всегда больше количества неизвестных. Неизвестные определяются под условием $[pv^2 + p'v'^2] = \min$ путем последовательных приближений.

От уравнений поправок переходят к нормальным уравнениям, в результате решения которых получают поправки к приближенным значениям неизвестных, т. е. к начальному или нулевому приближению. Введя эти поправки, находят первое приближение неизвестных.

Чтобы вычислить второе приближение неизвестных, вновь составляют уравнения поправок. При этом используют первое приближение неизвестных. Затем составляют и решают нормальные уравнения, в результате чего получают поправки к первому приближению неизвестных. После ввода этих поправок образуется второе приближение неизвестных.

Аналогично вычисляется третье приближение неизвестных.

Этот процесс продолжается до тех пор, пока разность значений каждого неизвестного, полученных в двух последних приближениях, будет меньше установленного допуска.

Итак, третий вариант аналитической маршрутной фототриангуляции позволяет построить фотограмметрическую сеть непосредственно в геоцентрической системе координат или в системе координат Гаусса, без определения элементов взаимного ориентирования снимков. Конечно, не исключается и случай построения свободной маршрутной сети с последующим внешним ориентированием ее по опорным точкам. Но и в этом случае нет необходимости находить элементы взаимного ориентирования снимков.

Для оценки точности построения фотограмметрической сети определяют весовые коэффициенты уравненных величин. Методы вычисления этих коэффициентов изложены в геодезической литературе.

Третий вариант обеспечивает возможность наиболее эффективного использования зафиксированных в полете элементов внешнего ориентирования снимков и других дополнительных данных. В этом случае фотограмметрические, геодезические и бортовые измерения уравнивают совместно, учитывая их веса.

Составим уравнения поправок для фотограмметрических измерений.

Напишем уравнения (13.34) для определяемой точки i , изображенной на снимке j :

$$\begin{aligned} a_{ij}\delta X_{S_i} + b_{ij}\delta Y_{S_i} + c_{ij}\delta Z_{S_i} + d_{ij}\delta\alpha_i + e_{ij}\delta\omega_i + f_{ij}\delta\kappa_i + \\ + g_{ij}\delta X_j + h_{ij}\delta Y_j + i_{ij}\delta Z_j + l_{ij} = v_{ij}, \\ a'_{ij}\delta X_{S_i} + b'_{ij}\delta Y_{S_i} + c'_{ij}\delta Z_{S_i} + d'_{ij}\delta\alpha_i + e'_{ij}\delta\omega_i + f'_{ij}\delta\kappa_i + \\ + g'_{ij}\delta X_j + h'_{ij}\delta Y_j + i'_{ij}\delta Z_j + e'_{ij} = v'_{ij}. \end{aligned}$$

Введем обозначения

$$\begin{aligned} \bar{B}'_{ij} &= \begin{bmatrix} a_{ij} & b_{ij} & c_{ij} & d_{ij} & e_{ij} & f_{ij} \\ a'_{ij} & b'_{ij} & c'_{ij} & d'_{ij} & e'_{ij} & f'_{ij} \end{bmatrix}, \\ \bar{B}''_{ij} &= \begin{bmatrix} g_{ij} & h_{ij} & i_{ij} \\ g'_{ij} & h'_{ij} & i'_{ij} \end{bmatrix}, \\ \bar{\delta}_i &= \begin{pmatrix} \delta X_{S_i} \\ \delta Y_{S_i} \\ \delta Z_{S_i} \\ \delta\alpha_i \\ \delta\omega_i \\ \delta\kappa_i \end{pmatrix}, \quad \bar{\delta}_j = \begin{bmatrix} \delta X_j \\ \delta Y_j \\ \delta Z_j \end{bmatrix}, \\ \bar{l}_{ij} &= \begin{bmatrix} l_{ij} \\ l'_{ij} \end{bmatrix}, \quad \bar{v}_{ij} = \begin{bmatrix} v_{ij} \\ v'_{ij} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Тогда уравнения поправок можно представить в матричной форме

$$\bar{B}'_{ij}\bar{\delta}_i + \bar{B}''_{ij}\bar{\delta}_j + \bar{l}_{ij} = \bar{v}_{ij}.$$

Пусть точка j изображилась на m снимках. В этом случае получим уравнения

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{B}'_{1j} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \bar{B}'_{2j} & \dots & 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & \dots & \bar{B}'_{mj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\delta}_1 \\ \bar{\delta}_2 \\ \vdots \\ \bar{\delta}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{B}''_{1j} \\ \bar{B}''_{2j} \\ \vdots \\ \bar{B}''_{mj} \end{bmatrix} \bar{\delta}_j + \\ + \begin{bmatrix} \bar{l}_{1j} \\ \bar{l}_{2j} \\ \vdots \\ \bar{l}_{mj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_{1j} \\ \bar{v}_{2j} \\ \vdots \\ \bar{v}_{mj} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Запишем их так:

$$\bar{B}'_j \bar{\delta} + \bar{B}'' \bar{\delta}_j + \bar{l}_j = \bar{v}_j.$$

Пусть в маршрутной сети k определяемых точек. Тогда можно составить систему уравнений

$$\begin{bmatrix} \bar{B}'_1 \\ \bar{B}'_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{B}'_k \end{bmatrix} \bar{\delta} + \begin{bmatrix} \bar{B}''_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \bar{B}''_2 & \dots & 0 \\ \cdot & & & \\ \cdot & & & \\ 0 & 0 & \dots & \bar{B}''_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\delta}_1 \\ \bar{\delta}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{\delta}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{l}_1 \\ \bar{l}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{l}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{v}_k \end{bmatrix}.$$

Представим эти уравнения в виде

$$\bar{B}' \bar{\delta}' + \bar{l}' = \bar{v}'.$$

Это выражение содержит все уравнения поправок для фотограмметрических измерений.

Перейдем к составлению уравнений поправок для геодезических измерений.

Пусть X_j, Y_j, Z_j — истинные координаты опорной точки j . Обозначим через X'_j, Y'_j, Z'_j измеренные координаты этой точки, а через X_j^0, Y_j^0, Z_j^0 — приближенные значения координат. Тогда

$$X_j = X'_j + v_{X_j} = X_j^0 + \delta X_j,$$

$$Y_j = Y'_j + v_{Y_j} = Y_j^0 + \delta Y_j,$$

$$Z_j = Z'_j + v_{Z_j} = Z_j^0 + \delta Z_j,$$

где $v_{X_j}, v_{Y_j}, v_{Z_j}$ — поправки к измеренным координатам, а $\delta X_j, \delta Y_j, \delta Z_j$ — поправки к приближенным координатам.

Таким образом, получаем уравнения поправок

$$\delta X_j + X_j^0 - X'_j = v_{X_j},$$

$$\delta Y_j + Y_j^0 - Y'_j = v_{Y_j},$$

$$\delta Z_j + Z_j^0 - Z'_j = v_{Z_j}$$

или в матричной форме

$$\bar{\delta}_j + \bar{l}_j = \bar{v}_j,$$

где

$$\bar{\delta}_j = \begin{bmatrix} \delta X_j \\ \delta Y_j \\ \delta Z_j \end{bmatrix}, \quad \bar{l}_j = \begin{bmatrix} X_j^0 - X_j' \\ Y_j^0 - Y_j' \\ Z_j^0 - Z_j' \end{bmatrix}, \quad \bar{v}_j = \begin{bmatrix} v_{X_j} \\ v_{Y_j} \\ v_{Z_j} \end{bmatrix}.$$

Напишем уравнения поправок для t опорных точек

$$\begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_t \end{bmatrix}$$

и представим эти уравнения в виде

$$\bar{\delta} + \bar{l} = \bar{v}.$$

Пусть S'_{ik} — измеренное, а S_{ik}^0 — приближенное расстояние между точками i и k на местности. Тогда

$$S_{ik}^2 + v_{S_{ik}} = S_{ik}^0 + \delta S_{ik},$$

где $v_{S_{ik}}$ и δS_{ik} — поправки. Известно

$$S_{ik}^2 = (X_k - X_i)^2 + (Y_k - Y_i)^2 + (Z_k - Z_i)^2.$$

Отсюда

$$\delta S_{ik} = a \delta X_i + b \delta Y_i + c \delta Z_i + a' \delta X_k + b' \delta Y_k + c' \delta Z_k,$$

где a, b, \dots, c' — частные производные от S_{ik} по соответствующим переменным. Следовательно,

$$a \delta X_i + b \delta Y_i + c \delta Z_i + a' \delta X_k + b' \delta Y_k + c' \delta Z_k - l_{S_{ik}} = v_{S_{ik}}.$$

Запишем это уравнение в матричной форме

$$\bar{B}_{S_{ik}} \bar{\delta} + l_{S_{ik}} = v_{S_{ik}},$$

где $B_{S_{ik}}$ — матрица коэффициентов, а

$$l_{S_{ik}} = S_{ik}^0 - S_{ik}^2.$$

Пусть измерено d расстояний. Тогда получим уравнения поправок

$$\bar{B}_S \bar{\delta} + \bar{l}_S = \bar{v}_S.$$

Аналогично можно получить уравнения поправок для других геодезических измерений, например, для превышений, горизонтальных и вертикальных углов или для дирекционных углов.

Собрав уравнения поправок для всех геодезических измерений, напишем

$$\bar{B}^n \bar{\delta}^n + \bar{l}^n = \bar{v}^n.$$

Теперь составим уравнения поправок для бортовых измерений.

Для координат точки фотографирования, углов наклона и угла поворота снимка i можно написать

$$X'_{S_i} + v_{X_i} = X^0_{S_i} + \delta X_{S_i},$$

$$Y'_{S_i} + v_{Y_i} = Y^0_{S_i} + \delta Y_{S_i},$$

$$Z'_{S_i} + v_{Z_i} = Z^0_{S_i} + \delta Z_{S_i},$$

$$\alpha'_i + v_{\alpha_i} = \alpha_i^0 + \delta \alpha_i,$$

$$\omega'_i + v_{\omega_i} = \omega_i^0 + \delta \omega_i,$$

$$\kappa'_i + v_{\kappa_i} = \kappa_i^0 + \delta \kappa_i,$$

где $X'_{S_i}, Y'_{S_i}, \dots, \kappa'_i$ — измеренные, а $X^0_{S_i}, Y^0_{S_i}, \dots, \kappa_i^0$ — приближенные элементы внешнего ориентирования снимка i , $v_{X_i}, v_{Y_i}, \dots, \delta \kappa_i$ — поправки к ним.

Представим эти уравнения в матричном виде

$$\bar{\delta}_i + \bar{l}_i = \bar{v}_i,$$

где

$$\bar{\delta}_i = \begin{bmatrix} \delta X_{S_i} \\ \delta Y_{S_i} \\ \delta Z_{S_i} \\ \delta \alpha_i \\ \delta \omega_i \\ \delta \kappa_i \end{bmatrix}, \quad \bar{l}_i = \begin{bmatrix} X^0_{S_i} - X'_{S_i} \\ Y^0_{S_i} - Y'_{S_i} \\ Z^0_{S_i} - Z'_{S_i} \\ \alpha_i^0 - \alpha'_i \\ \omega_i^0 - \omega'_i \\ \kappa_i^0 - \kappa'_i \end{bmatrix}, \quad \bar{v}_i = \begin{bmatrix} v_{X_i} \\ v_{Y_i} \\ v_{Z_i} \\ v_{\alpha_i} \\ v_{\omega_i} \\ v_{\kappa_i} \end{bmatrix}.$$

Если элементы внешнего ориентирования измерены для m снимков, то получим

$$\begin{bmatrix} \bar{\delta}_{S_1} \\ \bar{\delta}_{S_2} \\ \vdots \\ \bar{\delta}_{S_m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{l}_{S_1} \\ \bar{l}_{S_2} \\ \vdots \\ \bar{l}_{S_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_{S_1} \\ \bar{v}_{S_2} \\ \vdots \\ \bar{v}_{S_m} \end{bmatrix}$$

или в более общей форме

$$\bar{\delta}_S + \bar{l}_S = \bar{v}_S.$$

Уравнение поправки для измеренного базиса фотографирования B'_{ik} аналогично полученному выше уравнению поправки для измеренного расстояния на местности

$$a\delta X_{S_i} + b\delta Y_{S_i} + c\delta Z_{S_i} + a'\delta X_{S_k} + b'\delta Y_{S_k} + c'\delta Z_{S_k} + l_{B_{ik}} = v_{B_{ik}}.$$

Запишем его в виде

$$\bar{B}_{ik}\bar{\delta} + l_{B_{ik}} = v_{B_{ik}},$$

Пусть измерено g базисов фотографирования. Тогда можно составить уравнения

$$\bar{B}\bar{\delta} + \bar{l}_B = \bar{v}_B.$$

Аналогично получим уравнения поправок для других бортовых измерений — для разностей высот фотографирования, для расстояний от центра проекции до точки отраженного импульса и т. д.

Запишем все уравнения поправок для бортовых измерений в обобщенном виде

$$\bar{B}'''\bar{\delta}''' + l''' = \bar{v}'''.$$

Итак, третий вариант маршрутной фототриангуляции заключается в составлении и решении трех групп уравнений поправок для фотограмметрических, геодезических и бортовых измерений

$$\bar{B}'\bar{\delta}' + \bar{l}' = \bar{v}',$$

$$\bar{B}''\bar{\delta}'' + \bar{l}'' = \bar{v}''.$$

$$\bar{B}'''\bar{\delta}''' + \bar{l}''' = \bar{v}'''.$$

Представим эти уравнения в более общем виде

$$\bar{B}\bar{\delta} + \bar{l} = \bar{v}.$$

Решая эту систему по способу наименьших квадратов, переходим к нормальным уравнениям

$$\bar{B}'\bar{P}\bar{B}\bar{\delta} + \bar{B}'\bar{P}\bar{l} = 0,$$

где

$$P = \begin{bmatrix} P' & 0 & 0 \\ 0 & P'' & 0 \\ 0 & 0 & P''' \end{bmatrix}$$

— весовая матрица измеренных величин.

Кроме рассмотренных выше существуют и другие варианты построения маршрутных сетей, например путем создания независимых двойных моделей или путем использования прямых и обратных засечек.

§ 111. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МНОГОМАРШРУТНАЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ

В многомаршрутной, или блочной, фототриангуляции широко используются фотограмметрические связи, существующие в каждом маршруте и между маршрутами. Благодаря этому нет необходимости обеспечивать опорными точками каждый маршрут. Для внешнего ориентирования многомаршрутной фототриангуляции достаточно иметь не менее трех опорных точек на все маршруты, составляющие блок.

Различают три варианта многомаршрутной фототриангуляции. Первый вариант позволяет строить и уравнивать сеть одновременно по всем снимкам, входящим в блок. Второй вариант основан на построении и соединении независимых моделей. В третьем варианте сначала создаются свободные маршрутные сети, а затем объединяются в блок, который ориентируется внешне по опорным точкам.

Первый вариант возник в результате развития изложенного в предыдущем параграфе третьего варианта аналитической маршрутной фототриангуляции. На снимках измеряют координаты

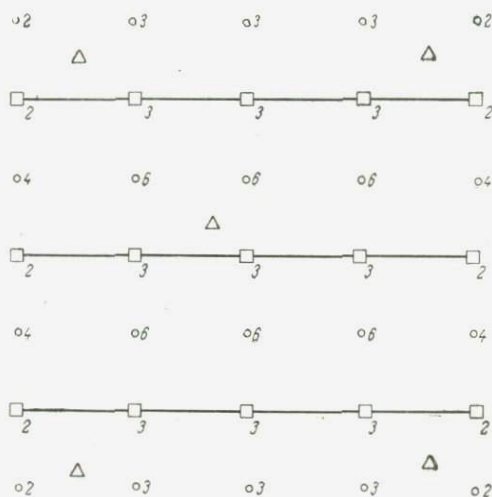


Рис. 250

выбранных точек и определяют приближенные значения неизвестных — элементов внешнего ориентирования снимков и координат определяемых точек местности. Затем для каждого изображения точки сети составляют уравнения поправок (13.34). Таким образом получают систему уравнений для всего блока, которую решают методом последовательных приближений.

Пусть блочная сеть строится по r маршрутам, каждый из которых содержит n снимков (рис. 250). Подсчитаем общее количество неизвестных и уравнений поправок в сети, полагая, что продольное перекрытие снимков 60%, а поперечное меньше 50%. При этом условимся определять шесть стандартно расположенных точек для каждой стереопары. Определяемые точки отмечены на рисунке квадратами и кружками, а опорные — треугольниками.

В этом случае число снимков в блоке равно rn , а количество определяемых точек

$$K = n(2r + 1). \quad (13.36)$$

Положение каждого снимка определяется шестью элементами внешнего ориентирования, а положение каждой определяемой точки — тремя координатами. Следовательно, общее число неизвестных

$$N = 6nr + 3n(2r + 1)$$

или

$$N = 3n(4r + 1). \quad (13.37)$$

Это число определяет порядок системы нормальных уравнений.

Каждая точка снимка, представляющая собой изображение точки сети, дает два уравнения (13.34). Таким образом, общее количество уравнений поправок в два раза больше количества изображений точек сети на снимках. Точки сети, представленной на рис. 250, изображаются на снимках от двух до шести раз. На этом рисунке отмечено число изображений каждой точки сети. Количество определяемых точек, изобразившихся два раза, равно $2r + 4$, три раза — $(n-2)(r+2)$, четыре раза — $2(r-1)$, шесть раз — $(n-2)(r-1)$. Следовательно, общее число изображений определяемых точек сети

$$m = 2(2r + 4) + 3(n-2)(r+2) + 4 \cdot 2(r-1) + 6(n-2)(r-1)$$

или

$$m = 3(3n-2)r. \quad (13.38)$$

Пусть k — количество изображений опорных точек. Тогда общее число уравнений поправок в сети

$$M = 6(3n-2)r + 2k \quad (13.39)$$

Для сети, представленной на рис. 250, $k = 10$.

В качестве примера рассмотрим блок, содержащий три маршрута по 5 снимков. Согласно формулам (13.36), (13.37) и (13.38) в этом случае сеть будет иметь:

определяемых точек K	35
неизвестных N	195
уравнений поправок M	$234 + 2k = 254 (k = 10)$

Итак, в данном случае можно составить 59 избыточных уравнений поправок.

По тем же формулам получим, что при построении блочной сети по десяти маршрутам, в каждом из которых 10 снимков,

определяемых точек K	210
неизвестных N	1230
уравнений поправок M	$1680 + 2k = 1700 (k = 10)$

Теперь с целью уменьшения времени, необходимого на построение блочной сети, сократим количество определяемых точек с шести до четырех на стереопару. Не будем включать в сеть все центральные точки, отмеченные на рис. 250 квадратами. Тогда число определяемых точек сети

$$K = n(r+1), \quad (13.40)$$

неизвестных

$$N = 3n(3r + 1) \quad (13.41)$$

и уравнений поправок

$$M = 4(3nr - 2r) + 2k. \quad (13.42)$$

Подсчитаем по этим формулам значения K , N и M для двух блочных сетей, полагая $k = 10$:

	$r = 3, n = 5$	$r = 10,$ $n = 10$
определяемых точек K	20	110
неизвестных N	150	930
уравнений поправок M	176	1140

Таким образом, и в данном случае построить сеть вполне возможно, так как число уравнений поправок превышает количество неизвестных. Если же строить сеть по отдельным маршрутам, применяя первый или второй варианты маршрутной фототриангуляции, то четырех точек для каждой стереопары недостаточно, так как для определения элементов взаимного ориентирования необходимо не менее пяти точек.

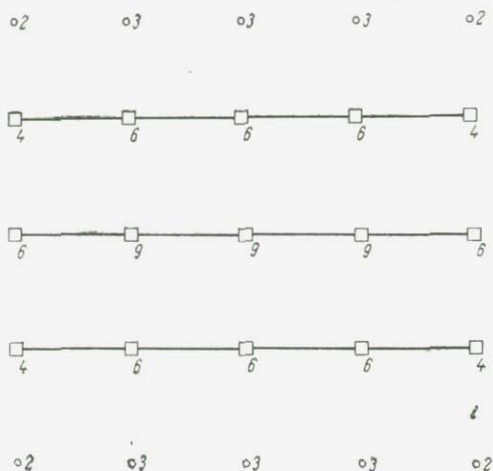


Рис. 251

Точность многомаршрутной фототриангуляции

будет выше, если поперечное перекрытие снимков увеличить до 60% (рис. 251) или использовать каркасные маршруты. В первом случае общее число определяемых точек сети

$$K = n(r + 2), \quad (13.43)$$

количество неизвестных

$$N = n(9r + 6) \quad (13.44)$$

и число уравнений поправок

$$M = 2(9n - 6)r + 2k. \quad (13.45)$$

Найдем эти величины для двух блочных сетей, полагая $k = 10$

	$r = 3, n = 5$	$r = 10,$ $n = 10$
определяемых точек K	25	120
неизвестных N	165	960
уравнений поправок M	254	1700

Повышение точности в данном случае обеспечивается значительным увеличением количества уравнений поправок по сравнению с примерами, рассмотренными выше.

Следовательно, при совместном уравнивании всех неизвестных параметров фотограмметрической сети образуются большие системы уравнений поправок, а нормальные уравнения имеют высокий порядок.

Составление таких обширных систем уравнений, особенно для сетей нестандартной конфигурации, представляет собой трудную задачу. Даже такая простая операция, как вычисление нормальной матрицы путем умножения матрицы уравнений поправок на ее собственную транспонированную матрицу, вызывает существенные затруднения в программировании вследствие ограниченного объема оперативной памяти электронных вычислительных машин. Кроме того, хранение и обработка большого объема промежуточной информации требует использования внешних накопителей машины и многократного обращения к ним, что снижает эффективность способа.

Рассмотрим другой путь решения больших систем уравнений, основанный на итеративном методе с последовательной вставкой неизвестных. Сущность этого метода заключается в минимизации квадратичной формы для каждого снимка и определяемой точки в отдельности способом приближений.

При минимизации квадратичной формы i -го снимка пространственные координаты соответствующих точек сети как опорных, так и определяемых принимаются за «твердые». В свою очередь при минимизации квадратичной формы для j -й определяемой точки элементы внешнего ориентирования всех снимков, на которых изобразилась эта точка, принимаются за «твердые».

Следовательно, в данном методе реализуется идея последовательной вставки «снимок» — «точка».

Математической основой метода является теория отыскания экстремума функции многих переменных

$$pv^2 = f(t_1, t_2, \dots, t_n), \quad (13.46)$$

где t — неизвестные (независимые переменные),

v — поправки к измеренным величинам x' .

В данной задаче x' — координаты точек, измеренные на снимках, а t — система неизвестных X и X' .

При отыскании экстремума функции (13.46) независимые переменные разделим на группы

$$X = (X_0 \ i Y_0 \ i Z_0 \ i \alpha \omega \kappa) \text{ и } X' = (X_j Y_j Z_j).$$

При этом $i = 1, 2, \dots, s; j = 1, 2, \dots, K$. Здесь s — число снимков, а K — число определяемых точек в блоке.

Процесс итерации состоит в последовательном отыскании точек экстремума функции по группам неизвестных с одновременным улучшением их приближенных значений. После последовательного

определения экстремумов функции по всем группам неизвестных и уточнения их приближенных значений получим точку $(t_1^m, t_2^m, \dots, t_n^m)$, которая и будет m -ым полным приближением точки экстремума.

Полные приближения искомой точки экстремума будем продолжать до тех пор, пока система поправок ΔX и $\Delta X'$ не будет иметь практического значения.

Для квадратичных форм полная сходимость такого процесса доказана П. А. Гайдаевым и Р. С. Гутером.

Пусть на i -ом снимке измерены координаты t точек. Запишем уравнения поправок (13.34) для этого снимка в матричном виде

$$D\bar{X} + L = v, \quad (13.47)$$

где

$$\bar{X} = (\delta X_{0t} \delta Y_{0t} \delta Z_{0t} \delta \alpha_t \delta \omega_t \delta \alpha_t), \quad (13.48)$$

$$D = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 & e_1 & f_1 \\ a'_1 & b'_1 & c'_1 & d'_1 & e'_1 & f'_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 & e_2 & f_2 \\ a'_2 & b'_2 & c'_2 & d'_2 & e'_2 & f'_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_t & b_t & c_t & d_t & e_t & f_t \\ a'_t & b'_t & c'_t & d'_t & e'_t & f'_t \end{pmatrix}. \quad (13.49)$$

$$L = \begin{pmatrix} L_1 \\ L'_1 \\ L_2 \\ L'_2 \\ \dots \\ L_t \\ L'_t \end{pmatrix}, \quad v = \begin{pmatrix} v_1 \\ v'_1 \\ v_2 \\ v'_2 \\ \dots \\ v_t \\ v'_t \end{pmatrix}. \quad (13.50)$$

При этом

$$\left. \begin{aligned} L_j &= g_j \delta X_j + h_j \delta Y_j + i_j \delta Z_j + (x_j) - x_j \\ L'_j &= g'_j \delta X_j + h'_j \delta Y_j + i'_j \delta Z_j + (y_j) - y_j \end{aligned} \right\}. \quad (13.51)$$

Здесь δX_j , δY_j и δZ_j — значения неизвестных для j -й точки из последней итерации; для опорной точки они равны нулю.

Далее составим систему нормальных уравнений шестого порядка

$$B\bar{X} + C = 0, \quad (13.52)$$

где

$$B = \bar{D}D \text{ и } C = \bar{D}L, \quad (13.53)$$

\bar{D} — транспонированная матрица.

В результате решения уравнений (13.52) определяются приближенные поправки к элементам внешнего ориентирования i -го снимка

$$X = (\delta X_{0i} \delta Y_{0i} \delta Z_{0i} \delta \alpha_i \delta \omega_i \delta \kappa_i). \quad (13.54)$$

Аналогично составим матрицу уравнений поправок (13.47) для любого другого снимка, входящего в блок, и минимизируем квадратичную функцию под условием $(pv^2) = \min$.

Таким образом найдем неизвестные для всех s снимков

$$\Delta X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta X_{01} & \delta Y_{01} & \delta Z_{01} & \delta \alpha_1 & \delta \omega_1 & \delta \kappa_1 \\ \delta X_{02} & \delta Y_{02} & \delta Z_{02} & \delta \alpha_2 & \delta \omega_2 & \delta \kappa_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta X_{0s} & \delta Y_{0s} & \delta Z_{0s} & \delta \alpha_s & \delta \omega_s & \delta \kappa_s \end{pmatrix}. \quad (13.55)$$

Затем приступим к минимизации квадратичной формы для определяемых точек.

Пусть j -я точка наблюдалась на q снимках. Тогда систему уравнений поправок для j -й точки в матричном виде можно написать так:

$$D' \bar{X}' + L' = v', \quad (13.56)$$

где

$$\bar{X} = (X_j Y_j Z_j), \quad (13.57)$$

$$D' = \begin{pmatrix} g_1 & h_1 & i_1 \\ g'_1 & h'_1 & i'_1 \\ g_2 & h_2 & i_2 \\ g'_2 & h'_2 & i'_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ g_q & h_q & i_q \\ g'_q & h'_q & i'_q \end{pmatrix}, \quad L' = \begin{pmatrix} L_1 \\ L'_1 \\ L_2 \\ L'_2 \\ \dots \\ L_q \\ L'_q \end{pmatrix}, \quad v' = \begin{pmatrix} v_1 \\ v'_1 \\ v_2 \\ v'_2 \\ \dots \\ v_q \\ v'_q \end{pmatrix}. \quad (13.58)$$

При этом

$$\left. \begin{aligned} L_i &= a_i \delta X_{0i} + b_i \delta Y_{0i} + c_i \delta Z_{0i} + d_i \delta \alpha_i + e_i \delta \omega_i + f_i \delta \kappa_i + (x_i) - x_i \\ L'_i &= a'_i \delta X_{0i} + b'_i \delta Y_{0i} + c'_i \delta Z_{0i} + d'_i \delta \alpha_i + e'_i \delta \omega_i + f'_i \delta \kappa_i + (y_i) - y_i \end{aligned} \right\}. \quad (13.59)$$

Таким образом, L' представляет собой столбец свободных членов уравнений поправок (13.56), вычисляемых по формулам (13.59), а δX_{0i} , δY_{0i} , δZ_{0i} , $\delta \alpha_i$, $\delta \omega_i$ и $\delta \kappa_i$ — значения неизвестных для i -го снимка из последней итерации.

Теперь составим систему нормальных уравнений третьего порядка для j -й точки

$$B' \bar{X}' + C' = 0, \quad (13.60)$$

где

$$B' = \bar{D}' D \quad \text{и} \quad C' = \bar{D}' L'.$$

В результате решения системы (13.60) найдем поправки в координаты j -й точки

$$X'_j = (\delta X_j \delta Y_j \delta Z_j). \quad (13.61)$$

Аналогично составим матрицу уравнений поправок для любой другой определяемой точки и минимизируем квадратичную форму под условием $[pv^2] = \min$.

Таким путем найдем поправки к координатам k определяемых точек блока

$$\Delta X' = \begin{pmatrix} X'_1 \\ X'_2 \\ \dots \\ X'_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta X_1 & \delta Y_1 & \delta Z_1 \\ \delta X_2 & \delta Y_2 & \delta Z_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ \delta X_k & \delta Y_k & \delta Z_k \end{pmatrix}. \quad (13.62)$$

После нескольких итераций уточним элементы внешнего ориентирования снимков и координаты определяемых точек сети

$$\left. \begin{aligned} X^0(m) &= X^0(m-1) + \Delta X^{(m)} \\ X^{0'}(m) &= X^{0'}(m-1) + \Delta X'^{(m)} \end{aligned} \right\} \quad (13.63)$$

где m — номер приближения,

$$\begin{pmatrix} X_1^0 \\ X_2^0 \\ \dots \\ X_s^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{X}_{01}^0 & Y_{01}^0 & Z_{01}^0 & \alpha_1^0 & \omega_1^0 & \kappa_1^0 \\ X_{02}^0 & Y_{02}^0 & Z_{02}^0 & \alpha_2^0 & \omega_2^0 & \kappa_2^0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{0s}^0 & Y_{0s}^0 & Z_{0s}^0 & \alpha_s^0 & \omega_s^0 & \kappa_s^0 \end{pmatrix}, \quad (13.64)$$

$$\begin{pmatrix} X_1^{0'} \\ X_2^{0'} \\ \dots \\ X_k^{0'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1^0 & \bar{Y}_1^0 & Z_1^0 \\ X_2^0 & Y_2^0 & Z_2^0 \\ \dots & \dots & \dots \\ X_k^0 & Y_k^0 & Z_k^0 \end{pmatrix}. \quad (13.65)$$

Построение сети можно считать законченным, если поправки в последнем приближении не выходят за пределы установленных допусков.

Следовательно, итеративный метод с последовательной вставкой неизвестных позволяет избежать необходимости составления и решения больших систем уравнений поправок и нормальных уравнений высокого порядка. В нашем случае используются уравнения только шестого и третьего порядков, составление и решение которых не вызывает затруднений. Это позволяет в десятки раз сократить объем промежуточной информации и обеспечить возможность решения задачи с использованием только оперативной памяти электронных вычислительных машин.

Второй вариант аналитической многомаршрутной фототриангуляции основан, как отмечено выше, на построении и соединении независимых моделей (рис. 252).

Процесс создания независимых моделей не отличается от изложенного в § 110. При построении каждой модели выбирают произвольно длину базиса фотографирования и индивидуальную систему координат. Таким образом получают фотограмметрические координаты всех точек блока, в том числе и связующих точек, которые являются общими для смежных моделей.

Фотограмметрические координаты связующих точек, найденные по смежным моделям, имеют различные значения, так как для построения моделей использованы индивидуальные системы координат и масштабы моделей неодинаковы.

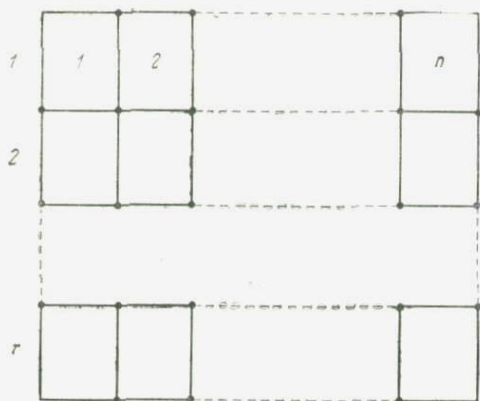


Рис. 252

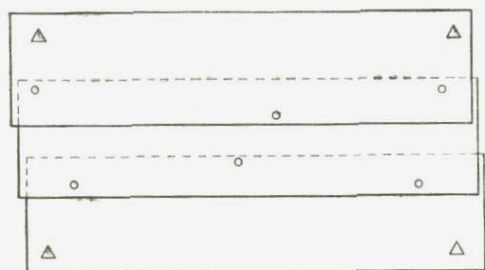


Рис. 253

Соединение моделей в единый блок и ориентирование блочной сети относительно системы геодезических координат преследуют цель привести модели к одному масштабу и найти вероятнейшее положение их, при котором сумма квадратов расхождений на связующих точках минимальна. В этом случае, как и в первом варианте, для внешнего ориентирования блочной сети используются опорные точки.

В третьем варианте блочной фототриангуляции сначала создаются свободные маршрутные сети, а затем они соединяются по связующим точкам в общую сеть, которая ориентируется внешне по опорным точкам (рис. 253).

Теория и технология аналитической фототриангуляции, основанной на применении стереокомпаратора и электронной вычислительной машины, изложены в работах А. Н. Лобанова, М. Д. Коншина, М. М. Машимова, И. Д. Каргополова, Ф. Ф. Лысенко, В. Б. Дубиновского, И. Т. Антипова, В. А. Поляковой, М. Н. Булушева, И. И. Финаревского, Ю. М. Трунина, В. Н. Белых и др.

§ 112. ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ НА УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТЕРЕОПРИБОРАХ

Кроме аналитической фототриангуляции применяется аналоговая, или инструментальная, основанная на использовании универсальных стереоприборов. Эти приборы позволяют строить независимые модели или общую модель в пределах каждого маршрута. В результате этих построений получают обычно фотограмметрические координаты точек сети. Соединение независимых моделей

выполняют по связующим точкам, а внешнее ориентирование общей модели — по опорным точкам аналитическим или графическим методами.

Для аналоговой фототриангуляции применяются различные универсальные стереопроборы: мультиплекс, стереопроектор, стереограф, стереопланиграф и др.

Фототриангуляция на мультиплексе. В отличие от стереопланиграфа и других приборов подобного типа мультиплекс содержит, как известно, не две, а ряд проектирующих камер. Эта особенность мультиплекса позволяет не только построить общую модель маршрута, но и ориентировать ее внешне в приборе, а также использовать для составления карты. Однако если маршрут длинный, то внешнее ориентирование общей модели в приборе нельзя считать окончательным: его необходимо уточнить путем введения поправок за влияние систематических ошибок.

Основными процессами фототриангуляции на мультиплексе являются:

- 1) подготовительные работы,
- 2) построение модели,
- 3) определение масштаба и горизонтирование модели,
- 4) измерение модели,
- 5) редуцирование свободной сети,
- 6) определение геодезических высот точек местности.

1. В подготовительные работы входят: составление технического проекта фототриангуляции, проверки мультиплекса и уменьшителя и изготовление диапозитивов.

2. Построение модели. Диапозитивы устанавливаются в проектирующие камеры и центрируют. Камеры приводят приблизительно в горизонтальное положение и размещают так, чтобы центры объективов находились примерно на прямой, параллельной оси X прибора ($b_Y = b_Z = 0$), а расстояния между центрами соседних объективов

$$b_X = \frac{1}{t} B, \quad (13.66)$$

где B — базис фотографирования; а $1:t$ — масштаб модели.

Приближенное значение базиса фотографирования можно найти, если измерить на снимке расстояние между главной точкой и точкой, соответствующей главной точке соседнего снимка, а затем умножить эту величину на знаменатель масштаба снимка:

$$B = bm.$$

Масштаб модели рассчитывают так, чтобы модель оказалась в зоне практически резкого изображения диапозитива

$$\frac{1}{t} = \frac{D_0}{H},$$

где D_0 — расстояние от объектива проектирующей камеры до плоскости резкого изображения,

H — высота фотографирования над средней плоскостью участка местности, изобразившегося на снимках данного маршрута.

Представим формулу (13.66) в виде

$$b_x = \frac{b}{f} D_0 = \frac{b'}{f} D_0; \quad (13.67)$$

здесь b' — расстояние на диапозитиве, соответствующее величине b на снимке, а f и f' — фокусные расстояния снимка и проектирующей камеры.

Величина b_x должна быть всегда несколько больше наименьшего расстояния между соседними проекторами, которое можно установить в приборе. Для широкоугольного мультиплекса наименьшее расстояние между центрами объективов соседних проекторов равно 80 мм, а для сверхширокоугольного — 110 мм.

Модель местности, изобразившейся на снимках данного маршрута, образуется путем последовательного построения по стереопарам отдельных моделей и приведения их к одному масштабу. Для этого взаимно ориентируют каждую пару снимков и изменяют установленное значение каждого базиса фотографирования, кроме первого, так, чтобы общие точки смежных моделей совпали.

Взаимное ориентирование начинают с первой пары и выполняют его первым или вторым способом, как изложено в гл. 8. В результате взаимного ориентирования первой пары образуется первая модель. Затем ориентируют третий снимок относительно второго, т. е. получают вторую модель.

Масштаб второй модели не равен масштабу первой, так как базисы фотографирования установлены в приборе приближенно. Вследствие этого общие точки двух моделей не совпадают друг с другом (см. рис. 247).

Несовпадение общих точек, а следовательно, и неравенство масштабов моделей характеризуют отсчеты по шкале измерительного столика, сделанные после визирования на эти точки.

Для приведения второй модели к масштабу первой наблюдают сначала первую модель и совмещают марку измерительного столика с точкой a . Затем, не нарушая этого визирования на точку a , наблюдают вторую модель и движением b_x третьей камеры совмещают точку a' с маркой.

Чтобы привести последующую модель к масштабу предыдущей, достаточно одной связующей точки. С целью контроля и повышения точности построения сети эту задачу решают обычно по трем связующим точкам: одну выбирают приблизительно на оси маршрута, а две — слева и справа от оси, на возможно большем удалении.

После совмещения точек a и a' движением b_x третьего проектора могут возникнуть поперечные параллаксы в пространстве

второй модели, т. е. может быть нарушено взаимное ориентирование второй пары. Для восстановления взаимного ориентирования устраняют поперечные параллаксы на стандартно расположенных точках соответствующими движениями третьего проектора.

Затем вновь визируют на связующие точки первой и второй моделей. Таким образом получают два отсчета по шкале высот для каждой связующей точки. Если разности отсчетов допустимы, то можно считать, что вторая модель приведена к масштабу первой.

Аналогично создают каждую последующую модель и приводят ее к масштабу предыдущей. В результате этих действий образуется модель местности, изобразившейся на всех стереопарах данного маршрута.



Рис. 254

3. Определение масштаба и горизонтирование модели, полученной в мультиплексе, выполняют по опорным точкам (рис. 254).

Сначала находят масштабный коэффициент по приближенной формуле

$$\lambda = \frac{d}{d_k}, \quad (13.68)$$

где d — расстояние между крайними опорными точками на экране,

d_k — расстояние между опорными точками на планшете.

Опорные точки на экране получают путем проектирования опорных точек модели с помощью измерительного столика.

Масштабный коэффициент определяют по двум-трем расстояниям между наиболее удаленными друг от друга опорными точками. В качестве вероятнейшего значения этой величины берут среднее из результатов нескольких определений.

Затем вычисляют знаменатель масштаба модели

$$t = \frac{t_k}{\lambda}, \quad (13.69)$$

где t_k — знаменатель масштаба, в котором нанесены опорные точки на планшет.

Горизонтирование модели выполняют по крайним опорным точкам. Одну из этих точек, например точку I , принимают за

начальную и вычисляют геодезические превышения опорных точек над начальной

$$h = \frac{1}{t} (Z - Z_1).$$

С помощью измерительного столика находят фотограмметрические превышения h' тех же точек. Подсчитывают разности $\delta h = h' - h$ и, учитывая их величины, поворачивают модель с помощью штурвалов и подъемных винтов. Далее вновь находят масштабный коэффициент λ , измеряют фотограмметрические превышения и вычисляют разности δh . Так продолжают до тех пор, пока модель не будет приведена в горизонтальное положение.

Подсчитаем допустимую ошибку горизонтирования модели. Для этого воспользуемся формулами (9.7), по которым можно найти изменения координат точек модели, вызванные ее наклоном,

$$\left. \begin{aligned} \delta X &= -h\xi \\ \delta Y &= -h\eta \\ \delta Z &= X\xi + Y\eta \end{aligned} \right\} \quad (13.70)$$

где h — превышение определяемой точки над начальной, ξ и η — продольный и поперечный углы наклона модели, X , Y , Z — координаты определяемой точки сети, отсчитанные от начальной точки.

Ошибки δZ исключаются, как увидим ниже, путем введения высотных поправок. Следовательно, необходимая точность горизонтирования модели определяется допустимыми погрешностями δX и δY и превышением h . При этом чем крупнее рельеф, тем точнее нужно приводить модель в горизонтальное положение.

Если $\delta X = \delta Y = 5$ м, $h = 200$ м, то ошибка горизонтирования модели не должна превышать $1,5^\circ$ в продольном и поперечном направлениях.

4. Измерение модели. Марку измерительного столика последовательно наводят на точки модели, включенные в маршрутную сеть. После каждого визирования накалывают точку на основе и берут отсчет по шкале высот. Модель измеряют двумя приемами. В каждом приеме на точки визируют дважды. Ко второму приему приступают после выполнения первого. За вероятнейшее положение точек принимают среднее из результатов двух приемов.

Затем с помощью вертикального измерителя определяют высоту передней узловой точки объектива каждого проектора относительно начальной точки, т. е. высоту фотографирования, а также продольные и поперечные углы наклона снимков. Эти величины необходимы для дальнейшей обработки снимков.

Результаты измерения модели заносят в журнал.

Отсчеты, полученные по шкале высот, используются для вычисления превышений точек сети над начальной точкой

$$h = t (h' - h_1'), \quad (13.71)$$

где h' и h'_1 — отсчеты, соответствующие определяемой и начальной точкам,

t — знаменатель масштаба модели.

5. Редуцирование свободной сети заключается в переносе точек с основы на планшет. Оно выполняется оптическим или другими способами, применяемыми в графической фототриангуляции (см. гл. 3).

6. Определение геодезических высот точек местности. По превышениям точек сети относительно начальной находят их фотограмметрические высоты

$$Z = Z_{r1} + h, \quad (13.72)$$

где Z_{r1} — геодезическая высота начальной точки.

Если бы модель была достаточно точно ориентирована относительно экрана мультитракса и построение ее не сопровождалось систематическими и случайными ошибками, то фотограмметрические высоты были бы равны геодезическим. В действительности вследствие наклона модели и влияния различных ошибок фотограмметрические высоты отличаются от геодезических. Систематические ошибки вызывают прогиб и кручение модели. Поэтому при определении геодезических высот учитывают поправки за продольный и поперечный наклоны модели, а также за ее прогиб и кручение. Высотная поправка за продольный наклон модели пропорциональна координате X определяемой точки, а поправка за поперечный наклон пропорциональна координате Y . Поправки за прогиб и кручение модели пропорциональны соответственно X^2 и XY . Поэтому высотные поправки находят по формуле

$$\delta Z = c_1 X + c_2 Y + c_3 X^2 + c_4 XY, \quad (13.73)$$

где c_1 и c_2 — продольный и поперечный углы наклона модели, выраженные в радианах,

c_3 и c_4 — коэффициенты, характеризующие соответственно прогиб и кручение модели.

Каждая опорная точка, кроме начальной, дает одно уравнение (13.73), содержащее четыре неизвестных коэффициента c_i . Следовательно, для определения этих коэффициентов необходимо иметь не менее пяти точек, расположенных, как показано на рис. 254. Зная фотограмметрические и геодезические высоты опорных точек, составляют и решают систему уравнений (13.73). При этом величину δZ получают как разность геодезической и фотограмметрической высот опорной точки.

Определив коэффициенты c_i , вычисляют по формуле (13.73) высотные поправки и вводят их в фотограмметрические высоты определяемых точек сети. Таким образом получают геодезические высоты этих точек.

На практике высотные поправки находят обычно не аналитическим способом, а графическим.

Фототриангуляция на стереопроекторе. Фотограмметрические сети можно строить и на универсальных стереоприборах, содержащих только две проектирующие камеры. Наиболее приспособлены для решения этой задачи приборы, снабженные устройствами для переключения осей визирования и установки положительных и отрицательных базисов. Если в универсальном стереоприборе таких приспособлений нет, то маршрутные сети можно строить путем перестановки снимков или путем создания независимых моделей и соединения их в общую модель аналитическим способом.

Рассмотрим построение маршрутной сети на стереопроекторе способом перестановки снимков. Этот способ состоит в том, что после обработки на приборе каждой пары, например P_1-P_2 , левый снимок P_1 удаляется и на его место переносится правый снимок P_2 , который устанавливается по элементам, полученным в результате ориентирования пары P_1-P_2 . На место снимка P_2 в правый снимкодержатель закладывается снимок P_3 . Этот снимок ориентируется относительно снимка P_2 , в результате чего получается вторая модель. По связующим точкам вторая модель приводится к масштабу первой. После измерения второй модели аналогично создается третья: левый снимок P_2 удаляется и на его место переносится правый снимок P_3 , затем в правый снимкодержатель устанавливается снимок P_4 , который ориентируется относительно снимка P_3 и т. д. При этом особое внимание должно обращать на сохранение элементов ориентирования при перестановке снимков, так как ошибки, допущенные в установке этих элементов, нельзя обнаружить при построении ряда.

Основные процессы фототриангуляции на стереопроекторе:

- 1) подготовительные работы,
- 2) построение и измерение моделей,
- 3) вычисление геодезических координат точек сети.

1. Подготовительные работы включают составление проекта построения сети, рабочие поверки прибора, изготовление диапозитивов, выбор масштаба построения сети и составляющих первого базиса фотографирования.

Горизонтальный масштаб построения сети выбирают, как правило, в полтора раза крупнее масштаба снимка, чтобы уменьшить влияние инструментальных ошибок на точность фототриангулирования. Для этого фокусное расстояние \bar{f} прибора устанавливают равным 270 мм. В данном случае вертикальный масштаб сети

$$\frac{1}{t_B} = \frac{27C}{ft_G}, \quad (13.74)$$

где f — фокусное расстояние снимков в мм,

t_G — знаменатель горизонтального масштаба сети.

Если разности высот точек местности значительны, то масштабы построения сети выбирают так, чтобы модель оказалась в пределах возможных перемещений по высоте верхней части

базисной каретки. Пусть в пределах участка местности, соответствующего одному или нескольким маршрутам, наибольшая и наименьшая высоты точек равны Z_{\max} и Z_{\min} . Тогда средняя высота фотографирования

$$H_c = H_0 - \frac{1}{2} (Z_{\max} - Z_{\min}), \quad (13.75)$$

где H_0 — абсолютная высота фотографирования, $Z_{\max} - Z_{\min} = \Delta Z$ — диапазон изменения высот точек местности. Очевидно, что величина $\Delta Z : t_b$ не должна превышать диапазон перемещения верхней части базисной каретки h'

$$\frac{1}{t_b} \Delta Z \leq h', \quad (13.76)$$

где ΔZ и h' должны быть выражены в м. Отсюда

$$\frac{1}{t_b} \leq \frac{h'}{\Delta Z}. \quad (13.77)$$

Выбрав вертикальный масштаб, находят фокусное расстояние

$$\bar{f} = D_c - \frac{1}{t_b} H_c \quad (13.78)$$

и устанавливают его в приборе. Здесь D_c — среднее значение разности высот верхнего и нижнего шарниров пространственного рычага.

Составляющая базиса

$$b_x = \frac{1}{t_r} B. \quad (13.79)$$

Составляющие базиса b_y и b_z для первой стереопары можно считать равными нулю, если маршрут короткий. Если же маршрут длинный, то эти составляющие первого базиса определяют, учитывая взаимное положение точек фотографирования в плане и по высоте, так, чтобы при построении сети центры проекции не вышли за пределы возможных движений b_y и b_z в приборе. Приближенное положение точек фотографирования в плане характеризуют, например, главные точки снимков на накладном монтаже, составленном для данного маршрута.

2. Для построения первой модели левый снимок P_1 устанавливают в левый снимкодержатель, а правый P_2 — в правый снимкодержатель. Снимки центрируют. Устанавливают величины b_x , b_y и b_z . Затем снимки взаимно ориентируют первым способом, т. е. движениями x_l , x_p , d_{x_l} , d_{x_p} и d_{y_p} , как изложено в гл. 10. При этом вводят децентрации снимков и коррекционных механизмов. Если первая модель имеет опорные точки или урезы вод, то ее приближенно горизонтируют в поперечном направлении путем изменения d_{y_l} и d_{y_p} на одну и ту же величину.

Построив первую модель, отсчитывают по шкалам и счетчикам величины, характеризующие ориентирование снимков, и записывают их в журнал. Затем измеряют двумя приемами координаты точек первой модели, входящих в сеть. Результаты измерений фиксируют в том же журнале. С целью контроля после измерения модели вновь отсчитывают элементы ориентирования снимков.

Построение второй модели начинают с установки в левой части прибора элементов ориентирования, которые получились для правого снимка первой пары. Левый снимкодержатель со снимком P_1 удаляют. На его место переносят правый снимкодержатель со снимком P_2 . На правую каретку устанавливают снимкодержатель с центрированным на нем снимком P_3 второй пары. Затем устанавливают $d_{xp} = d_{yp} = \Delta_{xp} = \Delta_{yp} = 0$ и выполняют взаимное ориентирование второй пары вторым способом, т. е. движениями $b_Y, \kappa_n, d_{yp}, b_{Zn}, d_{xp}$. При этом вводят децентрации правого снимка и правого коррекционного механизма.

Вторую модель приводят к масштабу первой по связующим точкам путем изменения установленной величины базиса фотографирования.

Далее фиксируют отсчеты, характеризующие ориентирование второй пары, и измеряют координаты точек второй модели, включенных в сеть. Аналогично строят третью и другие модели. В результате этих построений получают общую модель, имеющую единый масштаб и единую систему координат, начало которой обычно совмещают с опорной точкой, находящейся на первой стереопаре, например с точкой I (см. рис. 254).

3. Геодезические координаты точек сети получают так:

— определяют масштаб модели и вычисляют фотограмметрические координаты точек сети,

— вычисляют геодезические высоты точек,

— вычисляют геодезические плановые координаты.

Знаменатель горизонтального масштаба модели

$$t_r = \frac{D_r}{D}, \quad (13.80)$$

где D_r — расстояние между опорными точками на местности,

D — расстояние между опорными точками на модели.

При этом

$$D_r = \sqrt{\Delta X_r^2 + \Delta Y_r^2 + \Delta Z_r^2}, \quad (13.81)$$

$$D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \frac{1}{k^2} \Delta Z^2}, \quad (13.82)$$

где $\Delta X_r, \Delta Y_r, \Delta Z_r$ — разности геодезических координат опорных точек,

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ — разности фотограмметрических координат опорных точек,

k — коэффициент преобразования связки.

Фотограмметрические координаты точек сети

$$\left. \begin{aligned} X' &= t_r X \\ Y' &= t_r Y \\ Z' &= Z_{r1} + \frac{1}{k} Z \end{aligned} \right\}, \quad (13.83)$$

где X, Y, Z — координаты точек модели, измеренные на приборе, Z_{r1} — геодезическая высота начала системы координат XYZ .

Для вычисления геодезических высот сначала находят коэффициенты c_i , характеризующие наклон и искажение модели, а затем вычисляют поправки к фотограмметрическим высотам. Коэффициенты c_i определяют по опорным точкам путем составления и решения уравнений (13.73)

$$\delta Z = c_1 X' + c_2 Y' + c_3 X'^2 + c_4 X' Y',$$

где X', Y' и Z' — фотограмметрические координаты опорной точки,

$\delta Z = Z_r - Z'$ — разность геодезической и фотограмметрической высот опорной точки.

Поправки к фотограмметрическим высотам определяемых точек сети получают по формуле (13.73), используя координаты X', Y' и Z' этих точек.

Геодезические высоты

$$Z_r = Z' + \delta Z. \quad (13.84)$$

Вычисление геодезических плановых координат начинают с исправления координат X' и Y' за наклон модели. Как следует из выражений (9.1),

$$\left. \begin{aligned} X'' &= X' - Z' \xi - \frac{1}{2} X' \xi^2 \\ Y'' &= Y' - Z' \eta \end{aligned} \right\}, \quad (13.85)$$

где $\xi = -c_1$ и $\eta = -c_2$ — продольный и поперечный углы наклона модели.

После введения поправок за наклон модели система фотограмметрических координат $X''Y''Z''$ занимает горизонтальное положение. Теперь следует повернуть эту систему вокруг оси Z'' , чтобы ее координатные оси были параллельны соответствующим осям геодезической системы координат. Угол поворота системы $X''Y''Z''$ можно вычислить по двум наиболее удаленным друг от друга опорным точкам (рис. 255)

$$\left. \begin{aligned} \Delta T &= T - T_r \\ \operatorname{tg} T_r &= \frac{\Delta Y_r}{\Delta X_r} \\ \operatorname{tg} T &= -\frac{\Delta Y''}{\Delta X''} \end{aligned} \right\}, \quad (13.86)$$

где T_{r_1} и T — дирекционные углы направления, проходящего через опорные точки, в геодезической и фотограмметрической системах координат,

$\Delta X_r, \Delta Y_r$ — разности геодезических координат опорных точек,

$\Delta X, \Delta Y$ — разности фотограмметрических координат опорных точек.

Новые фотограмметрические координаты точек сети

$$\left. \begin{aligned} X''' &= X'' \cos \Delta T - Y'' \sin \Delta T \\ Y''' &= -X'' \sin \Delta T - Y'' \cos \Delta T \end{aligned} \right\}, \quad (13.87)$$

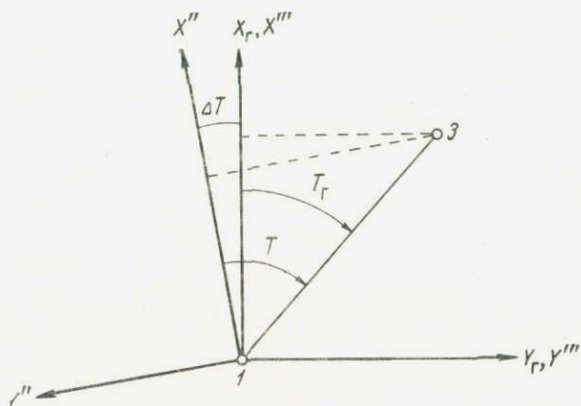


Рис. 255

а геодезические

$$X_r = X_{r1} + X'', \quad Y_r = Y_{r1} - Y'', \quad (13.88)$$

где X_{r1} и Y_{r1} — геодезические координаты начала фотограмметрической системы координат.

С целью сокращения работ в коротких рядах часто не вычисляют координаты X_r и Y_r точек сети, а получают эти точки на планшете графическим способом. В этом случае точки сети наносят по координатам X'' и Y'' на прозрачную основу в том же масштабе, в каком нанесены опорные точки на планшет. Затем прозрачную основу кладут на планшет, ориентируют ее по опорным точкам и накалывают определяемые точки сети.

Внешнее ориентирование длинной маршрутной сети, построенной на стереопроекторе или другом универсальном стереопроборе, можно выполнить и более строгим аналитическим способом, изложенным в § 110.

Точность фототриангуляции на стереопроекторе и других универсальных приборах первого класса в 1,5—2 раза выше, чем на мультиплексе, а скорость построения сети во столько же раз меньше.

§ 113. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ СНИМКОВ

С целью уменьшения количества опорных точек и сокращения полевых геодезических работ в фототриангуляции часто используют элементы внешнего ориентирования снимков, зафиксированные в полете.

Наиболее эффективно использовать эти элементы при картографировании труднодоступных районов, когда выполнение полевых работ связано с большими затратами сил и средств.

Рассмотрим особенности построения фотограмметрических сетей при наличии элементов внешнего ориентирования снимков.

1. Даны геодезические координаты точек фотографирования, вычисленные по результатам радиогеодезических измерений, выполненных в процессе аэрофотосъемки.

В маршрутной фототриангуляции эти данные можно использовать следующим образом.

Уравнения (13.31) составим не только для наземных опорных точек, но и для точек фотографирования. В результате решения полученной таким образом системы уравнений с учетом весов фотограмметрических и радиогеодезических измерений найдем коэффициенты A_i , B_i , C_i , которые используем для вычисления уравненных фотограмметрических координат определяемых точек по формулам (13.30). Затем получим геодезические координаты этих точек по формулам (13.32).

В многомаршрутной фототриангуляции геодезические координаты точек фотографирования можно использовать в качестве начальных значений соответствующих неизвестных, если точность этих данных равна или меньше точности фотограмметрических измерений.

Если же координаты точек фотографирования определены с более высокой точностью, то их можно принять за окончательные (твердые) величины. В этом случае общее количество неизвестных значительно сокращается.

Наконец, геодезические координаты точек фотографирования можно использовать для уравнивания и внешнего ориентирования свободной многомаршрутной сети по формулам (13.30) и (13.32).

2. Даны геодезические координаты X_r и Y_r точек фотографирования, полученные по результатам радиогеодезических измерений, и превышения этих точек h_s , полученные по показаниям статографа. Фототриангуляция развивается по отдельным маршрутам.

Найдем элементы внешнего ориентирования первого и последнего снимков маршрута путем решения обратной фотограмметрической засечки по опорным точкам. По координате Z_0 первой точки фотографирования и превышениям h_s вычислим координаты Z_r остальных точек фотографирования. Вычисленные величины Z_r исправим за наклон барической поверхности, который найдем по разности двух значений Z_r , полученных для последней точки

фотографирования. После этого задачу уравнивания сети решим, как и в первом случае, с учетом весов фотограмметрических, радиогеодезических и барометрических измерений.

Если нет достаточного количества опорных точек для определения элементов внешнего ориентирования крайних снимков, то произведем предварительное построение фотограмметрической сети без использования элементов внешнего ориентирования снимков.

3. Даны превышения точек фотографирования, найденные по показаниям статоскопа.

В этом случае к системе уравнений (13.31), составленных по опорным точкам, добавим уравнения (13.30), содержащие только коэффициенты C_i и составленные для точек фотографирования. Координаты Z_r точек фотографирования, необходимые для составления этих уравнений, получим так же, как и в предыдущем случае.

Если кроме показаний статоскопа даны и показания радиовысотомера, то уравнения (13.31), содержащие коэффициенты C_i , составим и для точек отраженного импульса (ближайших точек). При этом координаты Z_r ближайших точек найдем по координатам Z_r точек фотографирования и показаниям радиовысотомера.

Изложенную здесь методику использования показаний статоскопа и радиовысотомера целесообразно применять, когда точность фотограмметрических измерений выше точности радиолокационных и барометрических измерений. Если же точность физических способов определения элементов внешнего ориентирования равна или выше точности фотограмметрических определений этих величин, то дополнительные данные следует использовать в процессе построения маршрутной сети. Такой способ использования показаний статоскопа и радиовысотомера разработан под руководством М. Д. Коншина и Г. В. Романовского.

4. Даны угловые элементы внешнего ориентирования снимков, полученные по фотографиям звезд с точностью, превышающей точность определения элементов взаимного ориентирования снимков.

В аналитической маршрутной фототриангуляции (первый вариант) эти данные можно использовать для трансформирования снимков, т. е. для приведения измеренных координат точек наклонных снимков к горизонтальным снимкам. Затем следует строить маршрутную сеть по горизонтальным снимкам. Дирекционный угол и угол наклона базиса фотографирования найдем по формулам (8.43)

$$\tau' = -\alpha'_1, \quad \nu' = -\alpha'_1.$$

При этом элементы взаимного ориентирования горизонтальных снимков

$$\alpha'_1 = \alpha'_2, \quad \omega'_2 = 0.$$

В первом варианте многомаршрутной фототриангуляции и в третьем варианте маршрутной аналитической фототриангуляции данные, полученные по фотографиям звезд, можно использовать как окончательные значения угловых элементов внешнего ориентирования снимков, что значительно снижает число неизвестных.

Наконец, в аналоговой фототриангуляции эти данные целесообразно применять для установки снимков в приборе в процессе построения сети.

Если же точность определения угловых элементов внешнего ориентирования недостаточно высокая, а также в случае, когда они получены не для всех снимков, находят значения этих элементов по элементам взаимного ориентирования снимков и по абсолютным угловым элементам внешнего ориентирования одного из снимков маршрута. Затем уравнивают углы α , ω и κ , полученные фотограмметрически и по фотографиям звезд. При этом устраняют систематические ошибки и учитывают веса элементов. Уравненные значения углов α , ω и κ используют для трансформирования измеренных координат точек снимков. Далее сеть развивают по формулам, выведенным для горизонтальных снимков.

Использованию угловых элементов внешнего ориентирования снимков в фототриангуляции посвящены работы И. Д. Каргополова, Р. А. Коршунова, Ш. Е. Кузнецовой, А. А. Михеевой и др.

Рассмотрим вариант уравнивания фототриангуляционной сети с использованием элементов внешнего ориентирования, предложенный И. Д. Каргополовым применительно к случаю, когда для построения сети составляются уравнения (13.34).

Элементы внешнего ориентирования, зафиксированные в поле, разделяются на две группы. К первой группе относятся координаты точек фотографирования, разности высот фотографирования, углы наклона снимков и др., поправки к которым входят непосредственно в уравнения (13.34). Ко второй группе относятся элементы внешнего ориентирования снимков, поправки к которым в этих уравнениях отсутствуют.

Составим нормальные уравнения для первой группы элементов внешнего ориентирования снимков. В этом случае, по крайней мере, часть поправок в уравнениях (13.34) относится к измеренным неизвестным. Обозначим эти поправки буквой δ . Тогда уравнения (13.34) можно записать так:

$$a_i \delta X_1 + b_i \delta X_2 + c_i \delta X_3 + A_i \delta_1 + B_i \delta_2 + l_i = v_i \quad (i=1, 2, 3, \dots, n), \quad (13.89)$$

где δX_1 , δX_2 и δX_3 — поправки к неизвестным, которые не изменялись,

δ_1 и δ_2 — поправки к измеренным неизвестным.

Для простоты здесь представлено только три неизвестных: δX и два δ .

Решим уравнение (13.89) под условием

$$2F = [p_{vv}] + p'_1 \delta_1^2 + p'_2 \delta_2^2 = \min,$$

где p'_1 и p'_2 — веса измеренных неизвестных.

Найдем частные производные функции F по всем неизвестным и приравняем их нулю

$$\frac{\partial F}{\partial X_1} = |p_{av}| = 0,$$

$$\frac{\partial F}{\partial X_2} = |p_{bv}| = 0,$$

$$\frac{\partial F}{\partial X_3} = |p_{cv}| = 0,$$

$$\frac{\partial F}{\partial \delta_1} = |p_{Av}| + p'_1 \delta_1 = 0,$$

$$\frac{\partial F}{\partial \delta_2} = |p_{Bv}| + p'_2 \delta_2 = 0.$$

Это и будут нормальные уравнения. Представим их в развернутом виде

$$\begin{pmatrix} [paa] & [pab] & [pac] & [pAA] & [pAB] \\ [pab] & [pbb] & [pbc] & [pBA] & [pBB] \\ [pac] & [pbc] & [pcc] & [pCA] & [pCB] \\ [pAA] & [pBA] & [pCA] & [pAA] + p'_1 [pAB] \\ [pAB] & [pBB] & [pCB] & [pAB] & [pBB] + p'_2 \end{pmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} \delta X_1 \\ \delta X_2 \\ \delta X_3 \\ \delta_1 \\ \delta_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} [pal] \\ [pbl] \\ [pcl] \\ [pAl] \\ [pBl] \end{pmatrix} = 0. \quad (13.90)$$

Система нормальных уравнений (13.90) отличается от системы, составленной по уравнениям (13.89) под условием только $[p_{vv}] = \min$, тем, что к диагональным коэффициентам при измеренных неизвестных прибавляется соответствующий вес. Тот же результат получится, если к уравнениям (13.89) добавить уравнения погрешностей, соответствующие измеренным неизвестным $\delta_1 = v'_1$, $\delta_2 = v'_2$ с весами p'_1 , p'_2 , и составить нормальные уравнения обычным путем.

Таким образом, при наличии в левых частях уравнений (13.34) измеренных неизвестных нормальные уравнения составляют обычным путем, но только к диагональным коэффициентам прибавляют веса соответствующих измеренных неизвестных. При этом координаты опорных точек можно рассматривать как неизвестные с соответствующими весами. В этом случае с ними поступают так же, как с измеренными неизвестными.

Элементы внешнего ориентирования снимков могут содержать неизвестные систематические погрешности. Например, с помощью статоскопа определяют превышения точек фотографирования над некоторой изобарической поверхностью, высота которой неизвестна. Поэтому поправка δZ_0 в уравнениях погрешностей будет складываться из двух частей: $\delta Z_0'$, обусловленной случайными ошибками статоскопа, и $\delta Z_0''$ — за неточное знание высоты исходной изобарической поверхности

$$\delta Z_0 = \delta Z_0' + \delta Z_0''.$$

Очевидно, поправка $\delta Z_0'$ будет относиться только к высоте данной точки фотографирования, а $\delta Z_0''$ — к высотам всех точек фотографирования. Так же можно выделить систематические погрешности и других элементов внешнего ориентирования снимков, определяемых в полете. Тогда число неизвестных в уравнениях погрешностей, а следовательно, и число нормальных уравнений увеличится на количество определяемых систематических поправок.

Данная методика позволяет определять и такие систематические ошибки элементов внешнего ориентирования снимков, которые закономерно изменяются от снимка к снимку. Для этого необходимо вместо соответствующих дифференциалов подставить в уравнения (13.34) функции, отражающие закономерности изменений данных систематических ошибок.

Теперь составим уравнения погрешностей для второй группы элементов внешнего ориентирования снимков. Применительно к измерениям, выполненным высотомером, эти уравнения получаются на основе равенства

$$D = \sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2},$$

где D — расстояние, измеренное высотомером.

Уравнение погрешностей имеет вид

$$a_D \delta X_0 + b_D \delta Y_0 + c_D \delta Z_0 - a_D \delta X - b_D \delta Y - c_D \delta Z + l_D = v_D. \quad (13.94)$$

Коэффициенты при неизвестных в этих уравнениях вычисляются по формулам

$$a_D = -\frac{X - X_0}{D}; \quad b_D = -\frac{Y - Y_0}{D}; \quad c_D = \frac{Z - Z_0}{D},$$

а свободный член

$$l_D = \sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2} - D',$$

где D' — расстояние, полученное по результатам измерений высотомером.

Уравнение погрешностей измерений высотомером решают совместно с уравнениями погрешностей координат точек снимков

(13.34). При этом веса уравнений погрешностей, а также измеренных величин определяются по известной формуле

$$p = \frac{\mu^2}{m^2}$$

§ 114. ВЛИЯНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК И МЕТОДЫ ИСКЛЮЧЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ МОДЕЛИ

Основными источниками систематических ошибок в фототриангуляции служат дисторсия объектива камеры, атмосферная рефракция и кривизна Земли.

Дисторсия, или искривление изображения, построенного объективом, обусловлена тем, что увеличение оптической системы зависит от угла между лучом связи и осью системы, т. е. меняется от центра изображения к краям. Вследствие этого изображение не подобно предмету.

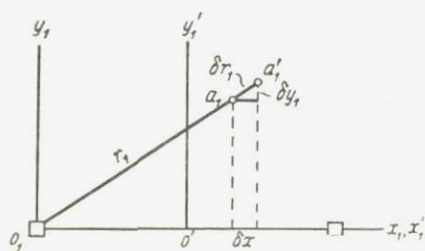


Рис. 256

Смещения точек изображения, вызванные симметричной дисторсией, направлены от центра или к центру изображения и в частном случае определяются приближенной формулой

$$\delta r = \varepsilon r^3, \quad (13.92)$$

где ε — коэффициент,

r — расстояние от центра изображения до точки.

Если смещение δr направлено от центра, то дисторсия положительная, подушкообразная ($\varepsilon > 0$); если же δr направлено к центру, то дисторсия отрицательная, бочкообразная ($\varepsilon < 0$).

Согласно равенству (13.92) и рис. 256 можно написать следующие выражения для смещения δr_1 точки a_1 первого снимка стереопары, а также для проекций этого смещения на координатные оси x и y :

$$\delta r_1 = \varepsilon r_1^3, \quad \delta x_1 = \varepsilon x_1 r_1^2, \quad \delta y_1 = \varepsilon y_1 r_1^2.$$

Аналогично получим для точки a_2 второго снимка стереопары

$$\delta r_2 = \varepsilon r_2^3, \quad \delta x_2 = \varepsilon x_2 r_2^2, \quad \delta y_2 = \varepsilon y_2 r_2^2.$$

Найдем искажения продольных и поперечных параллаксов, вызванные дисторсией. Как известно, $p = x_1 - x_2$, а $q = y_1 - y_2$. Поэтому

$$\delta p = \delta x_1 - \delta x_2, \quad \delta q = \delta y_1 - \delta y_2.$$

Приняв $y_1 = y_2$, получим

$$\delta p = \varepsilon (x_1 r_1^2 - x_2 r_2^2), \quad \delta q = \varepsilon y_1 (r_1^2 - r_2^2).$$

Если начало координат перенести из точки o_1 в центр стереонары o' , то эти формулы можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} \delta p &= \varepsilon p \left(3x'^2 + y'^2 + \frac{1}{4} p^2 \right) \\ \delta q &= 2\varepsilon p x' y' \end{aligned} \right\} \quad (13.93)$$

Подсчитаем ошибку определения высоты точки местности, вызванную дисторсией. Для этого умножим δp на параллактический коэффициент, равный $H : p$. Получим

$$\delta h = H\varepsilon \left(3x'^2 + y'^2 + \frac{1}{4} p^2 \right) \quad (13.94)$$

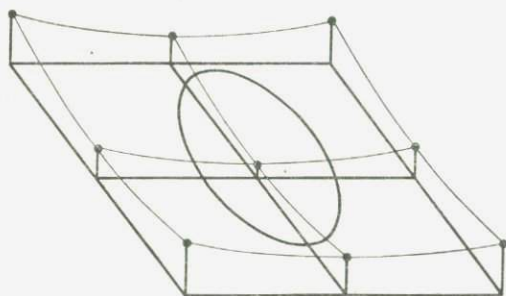


Рис. 257

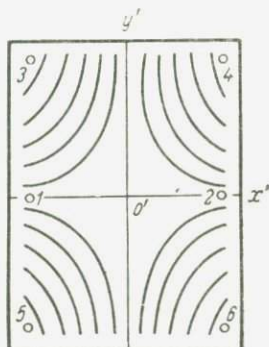


Рис. 258

Это уравнение представляет эллиптический параболоид

$$\frac{X^2}{a} + \frac{Y^2}{b} = 2Z,$$

где

$$a = \frac{1}{3H\varepsilon}, \quad b = \frac{1}{H\varepsilon},$$

$$Z = -\frac{1}{8} p^2 H\varepsilon + \frac{1}{2} \delta h.$$

Итак, под влиянием дисторсии горизонтальная плоскость местности изображается на модели в виде эллиптического параболоида (рис. 257). Сечение этой поверхности плоскостью $Z = c$ дает эллипс

$$\frac{X^2}{2ac} + \frac{Y^2}{2bc} = 1.$$

Это значит, что кривыми равных искажений δh служат эллипсы, центры которых находятся на оси Z .

Уравнение (13.93), связывающее величины δq и ε , представляет равнобочную гиперболу, асимптотами которой являются координатные оси x' и y' (рис. 258). Таким образом, кривыми равных искажений δq поперечных параллаксов, обусловленных дисторсией, служит семейство гипербол.

Наибольшие искажения δq имеют точки стереопары, для которых $[x'y'] = \max$, т. е. точки, находящиеся в углах. К таким точкам относятся стандартно расположенные точки 3—6 (см. рис. 258), используемые для взаимного ориентирования снимков. Искажения поперечных параллаксов этих точек вызывают ошибки взаимного ориентирования.

Для определения влияния дисторсии на точность взаимного ориентирования снимков сначала подсчитаем по формуле (13.93) искажения δq на точках 1—6, приняв $p = b$,

$$\left. \begin{aligned} \delta q_1 = \delta q_2 = 0 \\ \delta q_3 = \delta q_6 = -\varepsilon ab^2 \\ \delta q_4 = \delta q_5 = \varepsilon ab^2 \end{aligned} \right\}. \quad (13.95)$$

Затем подставим в выражения (8.30) полученные значения δq вместо q . Тогда найдем искажения элементов взаимного ориентирования

$$\left. \begin{aligned} \delta \alpha'_1 = -\varepsilon fb \\ \delta \alpha'_2 = \varepsilon fb \\ \delta \omega'_2 = \delta \alpha'_1 = \delta \alpha'_2 = 0 \end{aligned} \right\}. \quad (13.96)$$

Искажение взаимного продольного угла наклона снимков

$$\delta \Delta \alpha = 2\varepsilon fb. \quad (13.97)$$

Итак, симметричная дисторсия вызывает искажения элементов взаимного ориентирования α'_1 , α'_2 и $\Delta \alpha$; на остальные элементы она не влияет.

Пусть дисторсия $\delta r = 0,04$ мм, при $r = 100$ мм. Тогда $\varepsilon = \delta r : r^3 = 4 \cdot 10^{-8}$. Приняв для точек 3—6 (см. рис. 258) $a = b = p = 70$ мм и $f = 100$ мм, получим $[\delta q] = 0,014$ мм, $\delta h = 0,0004H$ и $\delta \alpha'_1 = -\delta \alpha'_2 = 1,0$.

Подсчитаем ошибки координат точки 2 первой модели, обусловленные дисторсией,

$$\left. \begin{aligned} \delta X_1 = m f \delta \Delta \alpha = 2m \varepsilon f^2 b \\ \delta Y_1 = 0 \\ \delta Z_1 = m \frac{f^2}{p} \delta \Delta \alpha = 2m \varepsilon f^3 \end{aligned} \right\}. \quad (13.98)$$

Если маршрутная сеть состоит из n стереопар и строится без использования элементов внешнего ориентирования снимков, то эти ошибки вызовут в конце маршрута погрешности, равные $n \delta X_1$, $n \delta Y_1 = 0$ и $n \delta Z_1$. Ошибки δX_2 , δY_2 , δZ_2 определения координат точки 2 второй модели приведут в конце маршрута к ошибкам $(n-1) \delta X_2$, $(n-1) \delta Y_2 = 0$ и $(n-1) \delta Z_2$.

Таким образом, для конечной точки свободного ряда, расположенной на оси маршрута, можно написать

$$\delta X_n^* = n \delta X_1 + (n-1) \delta X_2 + \dots + 2 \delta X_{n-1} + \delta X_n.$$

Положив $\delta X_1 = \delta X_2 = \dots = \delta X_n$, получим

$$\delta X'_n = [1 + 2 + \dots + (n-1) + n] \delta X_1.$$

Учитывая значение δX_1 , представим это выражение в виде

$$\delta X'_n = m f^2 \varepsilon b (n^2 + n). \quad (13.99)$$

Аналогично найдем

$$\delta Z'_n = m f^3 \varepsilon (n^2 + n). \quad (13.100)$$

Если сеть ориентирована по опорным точкам, расположенным в начале и в конце маршрута, то наибольшее влияние дисторсии будет в середине сети

$$\delta X'_c = \delta X'_{\frac{n}{2}} - \frac{1}{2} \delta X_n.$$

Согласно формуле (13.99) найдем

$$\delta X'_{\frac{n}{2}} = m f^2 \varepsilon b \left(\frac{n^2}{4} + \frac{n}{2} \right).$$

Следовательно,

$$\delta X'_c = -\frac{1}{4} m f^2 \varepsilon b n^2 \quad (13.101)$$

Аналогично получим

$$\delta Z'_c = -\frac{1}{4} m f^3 \varepsilon n^2. \quad (13.102)$$

Пусть определяемые точки местности лежат на прямой, параллельной оси маршрута, и $\varepsilon \neq 0$. Тогда соответствующие точки модели будут находиться на кривой, т. е. ряд будет иметь прогиб. Стрелу прогиба можно найти по формуле (13.102).

Если $f = 100$ мм, $\varepsilon = 4 \cdot 10^{-8}$, $b = 70$ мм и $n = 10$, то $\delta X'_c = -0,7$ мм и $\delta Z'_c = -1,0$ мм в масштабе снимка. Знак минус у $\delta Z'_c$ показывает, что выпуклость кривой обращена вниз.

Исследования, выполненные М. Д. Коншиным и В. Г. Афремовым, показали, что дисторсия в общем случае несимметрична и необходимо определять и учитывать не только радиальную, но и тангенциальную дисторсию.

В аналитической фототриангуляции влияние дисторсии учитывается путем введения поправок в измеренные координаты точек снимков.

В оптических универсальных стереоприборах, например в стереопланиграфе, влияние дисторсии снижается в результате использования для проектирующих камер объективов, имеющих по возможности такую же дисторсию, что и объектив съёмочной камеры. В автографе Вильда дисторсия учитывается механическим приспособлением.

Остаточное влияние дисторсии на координаты точек сети в пространственной фототриангуляции исключается при внешнем ориентировании модели по опорным точкам.

Атмосферная рефракция увеличивает радиус-вектор r точки снимка в соответствии с формулой (1.93)

$$\delta r = 1,51 \cdot 10^{-11} m r \left(f + \frac{r^2}{f} \right) k,$$

где m — знаменатель масштаба снимка,

$$k = 1 - 0,035 (3H_a - H);$$

здесь H_a — абсолютная высота фотографирования,

H — высота фотографирования над данной точкой.

Чтобы получить δr в миллиметрах, нужно величины f и r выразить тоже в миллиметрах, а H_a и H — в километрах.

Найдем искажения продольного и поперечного параллаксов, вызванные рефракцией, для какой-либо стандартно расположенной точки стереопары, например для точки Z (см. рис. 147). Для этой точки

$$\delta x_1 = 0, \quad \delta x_2 = -\frac{b}{c} \delta r_2,$$

$$\delta y_1 = \delta r_1, \quad \delta y_2 = \frac{a}{c} \delta r_2,$$

где

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}.$$

Следовательно,

$$\delta p = \frac{b}{c} \delta r_2, \quad \delta q = \delta r_1 - \frac{a}{c} \delta r_2.$$

Подставим сюда значения δr_1 и δr_2 , которые найдем по формуле (1.93). Получим

$$\left. \begin{aligned} \delta p &= 1,51 \cdot 10^{-11} m b \left(f + \frac{c^2}{f} k \right) \\ \delta q &= 1,51 \cdot 10^{-11} m a \frac{a^2 - c^2}{f} k \end{aligned} \right\} \quad (13.103)$$

Пусть $H_a = H = 3$ км, $f = 100$ мм, $a = b = 70$ мм. Тогда $m = 30\,000$, $c = 100$ мм, $k = 0,790$, и мы найдем:

$$\delta r_1 = 0,0037 \text{ мм}, \quad \delta p = -0,0050 \text{ мм},$$

$$\delta r_2 = 0,0071 \text{ мм}, \quad \delta q = -0,0013 \text{ мм}.$$

Нетрудно получить искажения параллаксов и для других стандартно расположенных точек:

$$\delta p_4 = -\delta p_5 = -\delta p_6 = \delta p_3,$$

$$\delta q_4 = \delta q_5 = -\delta q_6 = -\delta q_3.$$

Таким образом, влияние рефракции на параллаксы аналогично влиянию симметричной дисторсии.

В аналитической фототриангуляции влияние рефракции учитывается путем введения поправок в измеренные координаты точек снимков. При этом используются формулы, полученные в § 16.

Если сеть строится на универсальном приборе, то влияние рефракции учитывается с помощью полиномов в процессе внешнего ориентирования сети по опорным точкам.

Влияние кривизны Земли. В геодезии высоты точек местности определяют относительно уральной поверхности U (рис. 259), а в фотограмметрии — относительно начальной плоскости E , которая в общем случае может занимать произвольное положение.

Так как начальная плоскость никогда не совпадает с уральной поверхностью, то фотограмметрические высоты содержат систематические ошибки, обусловленные кривизной Земли. Очевидно, и плановое положение точек местности, полученное в фотограмметрии в результате ортогонального проектирования на начальную плоскость, отличается от положения их на уральной поверхности.

Пусть начальная плоскость проходит через точку A_0 — проекцию точки A местности на уральной поверхности и перпендикулярна к отвесной прямой AA_0 , т. е. горизонтальна. Примем точку A_0 за начало фотограмметрической системы координат XYZ и направим ось X вдоль маршрута, а ось Z — вверх по прямой A_0A . Фотограмметрическую высоту точки M местности обозначим через Z , а геодезическую — через Z_r . Условимся считать Землю шаром с центром O и радиусом R .

Из рис 259 следует

$$Z_r = M_0M = M_0C + CM.$$

Но

$$M_0C = \frac{R}{\cos \theta} - R, \quad CM = \frac{Z}{\cos \theta}$$

где θ — центральный угол при точке O между направлениями на точки A и M . Так как этот угол мал, то

$$M_0C = \frac{1}{2} R \theta^2, \quad CM = Z \left(1 + \frac{1}{2} \theta^2 \right)$$

Таким образом,

$$Z_r = Z + \frac{1}{2} (R + Z) \theta^2.$$

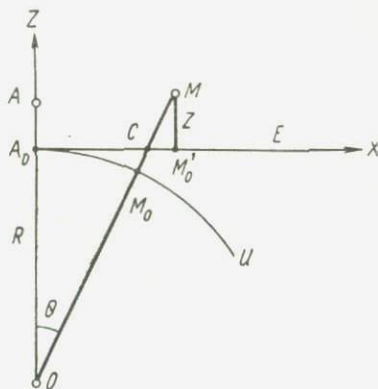


Рис. 259

При $X = 10$ км и $Z = 0$ величина $\delta X = 0,008$ м. Если $X = 100$ км и $Z = 0$, то $\delta X = 8,3$ м.

Рассмотрим другой случай, когда маршрутная сеть ориентирована по опорным точкам, расположенным на концах маршрута (рис. 260). Начало фотограмметрической системы координат находится в точке A_0 — проекции опорной точки A на уровенную поверхность, а плоскость XU проходит через проекцию N_0 другой опорной точки N перпендикулярно к отвесной линии, проведенной через центр маршрута. В этом случае

$$Z_r = Z - \frac{(X_N^2 - X)X}{R} \quad (13.107)$$

$$\delta X = -\frac{X_N^3}{48R^2} - \frac{(X - 0.5X_N)^3}{6R^2} \quad (13.108)$$

где Z — геодезическая высота точки сети, например точки K ,
 Z — фотограмметрическая высота той же точки,
 X и X_N — абсциссы точек K и N ,
 δX — разность величин X и $s = A_0K_0$,
 $R = 6370$ км — радиус Земли.

Если $X_N = 10$ км, то для средней точки ряда поправка к высоте равна 3,9 м, а величина $\delta X = -0,0003$ м. При длине ряда в 100 км соответственно получим $\delta Z = -392$ м и $\delta X = -0,6$ м.

Таким образом, кривизна Земли сильно влияет на определение высот точек местности. Чтобы исключить это влияние необходимо при внешнем ориентировании фотограмметрической сети вводить поправки в полученные по снимкам высоты или использовать геоцентрическую систему координат.

§ 115. ТОЧНОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ

Построение фотограмметрической сети сопровождается случайными и систематическими ошибками.

1. Рассмотрим сначала ошибки, возникающие при построении одиночной модели. Для этого воспользуемся формулами (7.8)

$$X = B \frac{x_1^0}{p^0} \quad Y = B \frac{y_1^0}{p^0} \quad Z = -B \frac{f}{p^0}$$

Прологарифмируем эти выражения

$$\ln X = \ln B + \ln x_1^0 - \ln p^0,$$

$$\ln Y = \ln B + \ln y_1^0 - \ln p^0,$$

$$\ln Z = \ln B + \ln f - \ln p^0.$$

После дифференцирования этих равенств получим

$$\left. \begin{aligned} \frac{dX}{X} &= \frac{dB}{B} + \frac{dx_1^0}{x_1^0} - \frac{dp^0}{p^0} \\ \frac{dY}{Y} &= \frac{dB}{B} + \frac{dy_1^0}{y_1^0} - \frac{dp^0}{p^0} \\ \frac{dZ}{Z} &= \frac{dB}{B} + \frac{df}{f} - \frac{dp^0}{p^0} \end{aligned} \right\} \quad (a)$$

Согласно выражениям (1.36) и (1.37) можно написать

$$dx_1^0 = dx_1 + \left(f + \frac{x^2}{f}\right) d\alpha_1 + \frac{[x_1 y_1]}{f} d\omega_1 - y_1 d\kappa_1,$$

$$dy_1^0 = dy_1 + \frac{x_1 y_1}{f} d\alpha_1 + \left(f + \frac{y_1^2}{f}\right) d\omega_1 + x_1 d\kappa_1.$$

Аналогично найдем dp^0 , применив формулу (7.19) и приняв

$$\Delta H = Bv' = \frac{H}{f} bv',$$

причем будем учитывать влияние только погрешностей элементов взаимного ориентирования. Получим

$$dp^0 = dp - fd\alpha + \frac{p}{f} b dv' - \frac{x_1^2}{f} d\alpha - \frac{x_1 y_1}{f} d\omega - y_1 d\kappa - \frac{x_1}{f} b dv'.$$

Подставив значения dx^0 , dy^0 и dp^0 в равенства (a), будем иметь

$$\left. \begin{aligned} dX &= mx_1 \left(\frac{dB}{B} + \frac{dx_1}{x_1} - \frac{dp}{p} + \frac{f^2 + x_1^2}{x_1 f} d\alpha_1 + \frac{y_1}{f} d\omega_1 - \right. \\ &\quad \left. - \frac{y_1}{x_1} d\kappa_1 + \frac{f}{p} d\Delta\alpha - \frac{b}{p} dv' + \frac{x_1^2}{fp} d\Delta\alpha + \frac{x_1 y_1}{fp} d\Delta\omega + \right. \\ &\quad \left. + \frac{y_1}{p} d\Delta\kappa + \frac{x_1}{f} dv' \right) \\ dY &= my_1 \left(\frac{dB}{B} + \frac{dy_1}{y_1} - \frac{dp}{p} + \frac{x_1}{f} d\alpha_1 + \frac{f^2 + y_1^2}{y_1 f} d\omega_1 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{x_1}{y_1} d\kappa_1 + \frac{f}{p} d\Delta\alpha - \frac{b}{f} dv' + \frac{x_1^2}{fp} d\Delta\alpha + \frac{x_1 y_1}{fp} d\Delta\omega + \right. \\ &\quad \left. + \frac{y_1}{p} d\Delta\kappa + \frac{x_1}{f} dv' \right) \\ dZ &= mf \left(\frac{dB}{B} + \frac{df}{f} - \frac{dp}{p} + \frac{f}{p} d\Delta\alpha - \frac{b}{f} dv' + \right. \\ &\quad \left. + \frac{x_1^2}{fp} d\Delta\alpha + \frac{x_1 y_1}{fp} d\Delta\omega + \frac{y_1}{p} d\Delta\kappa + \frac{x_1}{f} dv' \right) \end{aligned} \right\} \quad (13.109)$$

где m — знаменатель масштаба снимка.

Из формул (13.109) следует, что погрешности определения фотограмметрических координат точек местности зависят от погрешностей построения и измерения снимков, погрешностей их ориентирования, а также от положения изображений этих точек на снимках.

После внешнего ориентирования модели по опорным точкам часть погрешностей будет исключена и вместо (13.109) получим

$$\left. \begin{aligned} dX &= mx_1 \left(\frac{dx_1}{x_1} - \frac{dp}{p} + \frac{x_1^2}{fp} d\Delta\alpha + \frac{x_1 y_1}{fp} d\Delta\omega + \frac{y_1}{p} d\Delta\kappa + \right. \\ &\quad \left. + \frac{x_1}{f} dv' \right) \\ dY &= my_1 \left(\frac{dy_1}{y_1} - \frac{dp}{p} + \frac{x_1^2}{fp} d\Delta\alpha + \frac{x_1 y_1}{fp} d\Delta\omega + \right. \\ &\quad \left. + \frac{y_1}{p} d\Delta\kappa + \frac{x_1}{f} dv' \right) \\ dZ &= mf \left(-\frac{dp}{p} + \frac{x_1^2}{fp} d\Delta\alpha + \frac{x_1 y_1}{fp} d\Delta\omega + \frac{y_1}{p} d\Delta\kappa + \right. \\ &\quad \left. + \frac{x_1}{f} dv' \right) \end{aligned} \right\} \quad (13.110)$$

Считая, что эти погрешности случайные и независимые, найдем средние квадратические погрешности определения координат X, Y и Z ¹

$$\left. \begin{aligned} m_X &= mx_1 \left[\left(\frac{m_{x_1}}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{m_p}{p} \right)^2 + \left(\frac{x_1^2}{fp} m_{\Delta\alpha} \right)^2 + \left(\frac{x_1 y_1}{fp} m_{\Delta\omega} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{y_1}{p} m_{\Delta\kappa} \right)^2 + \left(\frac{x_1}{f} m_{v'} \right)^2 \right]^{1/2} \\ m_Y &= my_1 \left[\left(\frac{m_{y_1}}{y_1} \right)^2 + \left(\frac{m_p}{p} \right)^2 + \left(\frac{x_1^2}{fp} m_{\Delta\alpha} \right)^2 + \left(\frac{x_1 y_1}{fp} m_{\Delta\omega} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{y_1}{p} m_{\Delta\kappa} \right)^2 + \left(\frac{x_1}{f} m_{v'} \right)^2 \right]^{1/2} \\ m_Z &= mf \left[\left(\frac{m_p}{p} \right)^2 + \left(\frac{x_1^2}{fp} m_{\Delta\alpha} \right)^2 + \left(\frac{x_1 y_1}{fp} m_{\Delta\omega} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{y_1}{p} m_{\Delta\kappa} \right)^2 + \left(\frac{x_1}{f} m_{v'} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (13.111)$$

¹ На самом деле эти погрешности являются зависимыми, но в данном случае учет их зависимости существенно не влияет на конечные формулы.

где m_{x_1} , m_{y_1} , m_p — погрешности построения и измерения снимков, $m_{\Delta x}$, $m_{\Delta y}$, $m_{\Delta z}$, $m_{\Delta \omega}$ — погрешности взаимного ориентирования снимков.

Подсчитаем по формулам (13.111) ошибки определения координат какой-либо точки местности, например боковой точки 4 (см. рис. 147, $x_1 = b$, $y_1 = a$). Для подсчета воспользуемся значениями ошибок элементов взаимного ориентирования, определяемыми равенствами (8.44). Кроме того, будем полагать, что $m_{x_1} = m_{y_1} = m_p = m_q$, $a = b = p$. Тогда получим

$$\left. \begin{aligned} m_X &= m_Y = 2,5 m m_q \\ m_Z &= 2,3 m \frac{f}{b} m_q \end{aligned} \right\} \quad (13.112)$$

Если $f = 100$ мм, $b = 70$ мм и $m_q = \pm 0,01$ мм, то

$$m_X = m_Y = \pm 0,025 \text{ мм}, \quad m_Z = \pm 0,033 \text{ мм}$$

в масштабе снимка.

Для точки на оси маршрута, например для точки 2 (см. рис. 147), аналогично получим

$$\left. \begin{aligned} m_X &= 1,9 m m_q \\ m_Y &= m m_q \\ m_Z &= 1,6 m \frac{f}{q} m_q \end{aligned} \right\} \quad (13.113)$$

2. Рассмотрим накопление погрешностей в пространственной сети, построенной без использования полученных в полете элементов внешнего ориентирования и состоящей из n стереопар.

Пусть при построении первой модели в точке 2 допущена погрешность dX_1 . Эта ошибка вызовет погрешность в точке 2 n -й модели, равную $n dX_1$. Погрешность определения точки 2 второй модели, равная dX_2 , вызывает погрешность в n -й модели, равную $(n-1) dX_2$. Таким образом, можно написать

$$\begin{array}{ll} dX_1 & n dX_1 \\ dX_2 & (n-1) dX_2, \\ dX_3 & (n-2) dX_3, \\ \dots & \dots \dots \dots \\ dX_{n-1} & 2 dX_{n-1} \\ dX_n & dX_n. \end{array}$$

Приняв, что эти погрешности случайные, причем $dX_1 = dX_2 = \dots = dX_n = m_X$, найдем для конечной точки маршрута

$$m_{X_n} = m_X \sqrt{1^2 + 2^2 + \dots + n^2}$$

или приближенно

$$m_{X_n} = m_X \sqrt{\frac{1}{6} (2n^3 + 3n^2 + n)} \approx 0,58n^{3/2} m_X$$

(для случая, когда $n \geq 5$).

Подставим сюда значение m_X из равенств (13.113). Аналогично найдем средние квадратические погрешности определения координат Y и Z крайней точки свободной маршрутной сети. В результате получим

$$\left. \begin{aligned} m_{X_n} &= 1,1mm_q n^{3/2} \\ m_{Y_n} &= 0,57mm_q n^{3/2} \\ m_{Z_n} &= 0,93m \frac{f}{b} m_q n^{3/2} \end{aligned} \right\} \quad (13.114)$$

Пусть $n = 10$, $m_q = \pm 0,01$ мм, $f = b = 70$ мм. Тогда $m_{X_n} = \pm 0,35$ мм, $m_{Y_n} = \pm 0,18$ мм, $m_{Z_n} = \pm 0,30$ мм в масштабе снимка.

Если пространственная сеть ориентирована по опорным точкам, расположенным на концах маршрута, то наибольшие погрешности следует ожидать в середине сети. Их можно подсчитать по формулам (13.114), если подставить в эти выражения $\frac{n}{2}$ вместо n и результат разделить на $\sqrt{2}$.

$$\left. \begin{aligned} m_{X_c} &= 0,27mm_q n^{3/2} \\ m_{Y_c} &= 0,14mm_q n^{3/2} \\ m_{Z_c} &= 0,23m \frac{f}{b} m_q n^{3/2} \end{aligned} \right\} \quad (13.115)$$

Для тех же данных ($n = 10$) получим: $m_{X_c} = \pm 0,08$ мм; $m_{Y_c} = \pm 0,05$ мм; $m_{Z_c} = \pm 0,08$ мм в масштабе снимка.

3. Если при построении маршрутной сети величины b_Z устанавливаются по показаниям статоскопа, то ошибки m_X и m_Y можно найти по выведенным выше формулам, так как передача масштаба сети в этом случае, как и в предыдущем, осуществляется по связующим точкам.

Закон накопления высотных погрешностей m_Z при использовании показаний статоскопа изменяется по сравнению с выражениями (13.115), так как элемент b_Z устанавливается независимо для каждой модели.

Путем преобразования третьего равенства (13.111) можно получить следующую формулу для подсчета погрешности m_Z точки 2 одиночной модели

$$m_Z = m \frac{f}{b} \left[2m_q^2 + \left(b \frac{m_{bZ}}{f} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (13.116)$$

где m_{b_z} — погрешность определения и установки величины b_z^2 , выраженная в масштабе снимка.

Если сеть свободная и состоит из n моделей, то в конце сети

$$m_{z_n} = m_z \sqrt{n}. \quad (13.117)$$

Если сеть ориентирована по опорным точкам, находящимся на концах, то в середине сети

$$m_{z_c} = 0,50 m_z \sqrt{n}. \quad (13.118)$$

Пусть $n = 10$. $m_{\Delta} = \pm 0,01$ мм, $m_{b_z} = \pm 0,04$ мм, $f = b$. Тогда $m_z = \pm 0,04$ мм, $m_{z_n} = \pm 0,13$ мм и $m_{z_c} = \pm 0,06$ мм

Сравнивая эти результаты с полученными выше, видим, что использование показаний статоскопа позволяет повысить точность определения высот, особенно при построении длинных маршрутных сетей.

4. Если при построении маршрутной сети используются показания статоскопа и радиовысотомера, то для каждой модели независимо устанавливают величину b_s и масштаб.

Положив $dB : B = dH : H$, путем преобразования формул (13.111) применительно к этому случаю получим следующие значения погрешности определения положения точки 2 одиночной модели:

$$\left. \begin{aligned} m_X &= m \left[3m_q^2 + \frac{b^2}{f^2} (m_H^2 + m_{b_z}^2) \right]^{1/2} \\ m_Y &= mm_q \\ m_Z &= m \frac{f}{b} \left[2m_q^2 + \frac{b^2}{f^2} (m_H^2 + m_{b_z}^2) \right]^{1/2} \end{aligned} \right\}, \quad (13.119)$$

где m_H и m_{b_z} — погрешности определения и установки высоты фотографирования по показаниям радиовысотомера и разности высот фотографирования по показаниям статоскопа, выраженные в масштабе снимка.

В конце свободной сети

$$\left. \begin{aligned} m_{X_n} &= m_X \sqrt{n} \\ m_{Y_n} &= m_Y \sqrt{n} \\ m_{Z_n} &= m_Z \sqrt{n} \end{aligned} \right\}. \quad (13.120)$$

Если сеть опирается по концам на геодезические точки, то в середине сети

$$\left. \begin{aligned} m_{X_c} &= 0,50 m_X \sqrt{n} \\ m_{Y_c} &= 0,50 m_Y \sqrt{n} \\ m_{Z_c} &= 0,50 m_Z \sqrt{n} \end{aligned} \right\}. \quad (13.121)$$

Пусть $n = 10$, $f = b$, $m_q = \pm 0,01$ мм, $m_H = m_{bZ} = \pm 0,04$ мм. Тогда $m_X = \pm 0,06$ мм, $m_Y = \pm 0,01$ мм, $m_Z = \pm 0,06$ мм, $m_{X_n} = \pm 0,18$ мм, $m_{Y_n} = \pm 0,03$ мм, $m_{Z_n} = \pm 0,18$ мм, $m_{X_c} = \pm 0,09$ мм, $m_{Y_c} = \pm 0,02$ мм, $m_{Z_c} = \pm 0,09$ мм в масштабе снимка.

5 Допустим, что при построении маршрутной сети используются угловые элементы внешнего ориентирования снимков и показания высотомера.

В этом случае независимо устанавливаются углы наклона и поворота снимков, а также масштаб каждой модели. Поэтому ошибки определения координат точки 2 одиночной модели можно представить в соответствии с формулами (13.111) в таком виде:

$$\left. \begin{aligned} m_X &= m \left[2m_q^2 + \left(\frac{b^2}{f} m_{\Delta\alpha} \right)^2 + \left(b \frac{m_H}{f} \right)^2 \right]^{1/2} \\ m_Y &= m m_q \\ m_Z &= m \left[\left(\frac{f}{b} m_q \right)^2 + (b m_{\Delta\alpha})^2 + m_H^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \right\}, \quad (13.122)$$

а ожидаемую точность сети подсчитать по формулам (13.120) и (13.121).

Пусть $n = 10$, $f = b = 70$ мм, $m_q = \pm 0,01$ мм, $m_{\Delta\alpha} = \pm 0,5'$, $m_{\Delta H} = \pm 0,01$ мм в масштабе снимка. Тогда $m_X = \pm 0,020$ мм, $m_Y = \pm 0,010$ мм, $m_Z = \pm 0,017$ мм, $m_{X_c} = \pm 0,032$ мм, $m_{Y_c} = \pm 0,015$ мм, $m_{Z_c} = \pm 0,027$ мм в масштабе снимка.

Чтобы сократить полевые работы при съемке труднодоступных районов, прокладывают каркасные маршруты, перпендикулярные к заполняющим маршрутам. В этом случае опорные точки для каркасных маршрутов определяют на местности, а опорные точки для заполняющих маршрутов получают в результате пространственной фоториангуляции по каркасным маршрутам. В данном случае наибольшие ошибки определения координат точек местности следует ожидать на заполняющем маршруте. Эти ошибки можно найти по формулам

$$\left. \begin{aligned} m_{X_c} &= (m'^2_{X_c} + m''^2_{X_c})^{1/2} \\ m_{Y_c} &= (m'^2_{Y_c} + m''^2_{Y_c})^{1/2} \\ m_{Z_c} &= (m'^2_{Z_c} + m''^2_{Z_c})^{1/2} \end{aligned} \right\}, \quad (13.123)$$

где индекс ' имеют ошибки, возникшие при построении ряда фототриангуляции по каркасному маршруту, а индекс '' — ошибки, возникшие при построении ряда по заполняющему маршруту. Эти ошибки находятся по выведенным выше формулам.

Исследованию точности построения пространственных фотограмметрических сетей посвящены работы М. Д. Коншина, Г. В. Романовского, Р. П. Овсянникова, В. И. Павлова, В. В. Вайнаускаса и др.

§ 116. ВЫСОКОТОЧНЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СТЕРЕОКОМПАРАТОРЫ

Для аналитической фототриангуляции изготовлены специальные стереокомпараторы. По сравнению со стереокомпаратором, описанным в гл. 2, они имеют следующие основные особенности:

1. Точность измерений на один порядок выше: 1—2 мкм вместо 10—20 мкм.

2. Результаты измерений фиксируются автоматически открытым текстом с помощью машинки и в закодированном виде на перфоленте с помощью перфоратора. Кроме того, результаты измерений выводятся на табло или наблюдаются на счетчике.

3. Увеличение наблюдательной системы переменное. В различных приборах оно изменяется в пределах от 5 до $40\times$.

4. Приборы снабжены фоторегистраторами для изготовления фотоабриса с изображением наблюдаемой точки снимка и марки. Фотоабрис проектируется в левый или правый окуляр наблюдательной системы и используется для точной идентификации связующих точек смежных маршрутов.

5. Для повышения точности идентификации точек в маршруте в двухкареточных стереокомпараторах применен метод восстановления при обработке последующей стереопары отсчетов, зафиксированных открытым текстом во время наблюдения предыдущей стереопары. Для осуществления этого метода служит устройство для переключения осей визирования, а также независимые измерительные движения кареток.

Кроме двухкареточных стереокомпараторов, создан трехкареточный, позволяющий одновременно наблюдать идентичные точки трех снимков. Этот прибор позволяет точно идентифицировать связующие точки в маршруте без восстановления отсчетов, но устройство его более сложное по сравнению с двухкареточным стереокомпаратором.

Эти особенности новых стереокомпараторов обеспечили повышение точности измерения снимков и производительности работ.

В Советском Союзе созданы высокоточные автоматизированные стереокомпараторы СКА-18 и СКВ.

Механическая система стереокомпаратора СКА-18¹ (рис. 261) включает две каретки, на которые устанавливается стереопара, и четыре винта для перемещения и измерения снимков. Движения кареток могут быть совместными или отдельными. Винты сочленены с датчиками «угол — код».

Каретки перемещаются с помощью штурвалов или электропривода. Передача движений от штурвалов и электропривода осуществлена механическим способом. Для управления электро-

¹ В разработке прибора участвовали И. Л. Андреев, Л. А. Иоаниспани, Е. И. Калантаров, М. М. Кауфман, В. И. Кораблев, В. Д. Минкевич, Г. В. Романовский, Е. В. Филимонов и др.

приводом служит рукоятка; при этом скорость перемещения регулируется.

В прибор входит фотоаппарат с постоянной выдержкой 0,01 с. Регулировка экспозиции производится путем изменения освещенности снимков. Фотоабрисы можно получать с двух снимков. Формат фотоабриса 18×18 мм, число кадров в кассете 400. На фотоабрисе регистрируется и номер точки, который передается с клавишного устройства при регистрации результатов измерения.

С помощью проекторов изображение фотоабриса можно ввести в левый или правый окуляры наблюдательной системы.

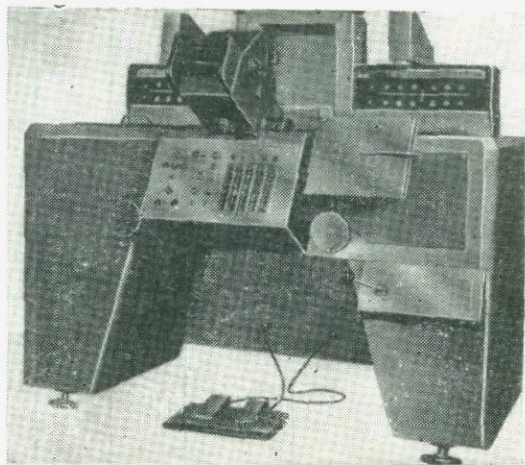


Рис. 261

Прибор имеет устройство для установки дополнительного снимка формата 30×30 см. Специальная ветвь наблюдательной системы проектирует дополнительный снимок в левый окуляр. При этом масштаб дополнительного снимка может быть крупнее масштаба основного снимка в 3—50 раз. Использование дополнительного снимка позволяет повысить достоверность и точность опознавания точек.

Для преобразования линейных перемещений в цифровой код и регистрации результатов измерений применен датчик позиционного кодирования угла в V коде. Он состоит из восьмиразрядного датчика точного отсчета и двух пятиразрядных датчиков грубого отсчета. Датчики соединены редукторами. Чувствительными элементами служат специальные трансформаторы. Электронная система считывает значения угла поворота и производит дальнейшие преобразования отсчетов. Выходным устройством для регистрации результатов измерений является телеграфный аппарат с перфорирующей приставкой.

Стереоскоп-паратор, страна	Формат снимков, см	Измеряемые величины	Увеличение наблюдательной системы	Фоторегистратор	Проектор	Тип преобразователя
СКА-18, СССР	18×18	x_1, y_1, x_2, y_2	5—20	Есть	Есть	Угол — код, бесконтактный
СКВ-1, СССР	18×18	x_1, y_1, x_2, y_2	8, 16, 20	»	»	Линия — код, бесконтактный, отражательные дифракционные решетки
«Стекометр», ГДР	23×23	x_1, y_1, p, q	6, 9, 12, 18	»	Нет	Угол — код контактный
ТА-3, Италия	30×30	$x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$	8—12	»	Есть	То же
СОМ, Франция	23×23	x_1, y_1, x_2, y_2	4, 7, 12	»	»	Линия — код, бесконтактный, прозрачные дифракционные решетки
«Рекординг», Англия	23×23	x_1, y_1, x_2, y_2	5—20	Нет	Нет	Угол — код, контактный
СТК-1, Швейцария	23×23	x_1, y_1, p, q	6, 11, 20, 40	»	»	То же
ПСК, ФРГ	23×23	x_1, y_1, p, q	8, 12, 16	»	»	»

Управление		Выходные устройства		
механическое	электроприводом	для кодированной записи	для открытого текста	для отображения
2 педали, 2 штурвала, 4 штурвала	1 рукоятка, 2 головки	Телеграфный аппарат с перфорирующим устройством Перфоратор ленточный		Десятичное табло, 6 разрядов То же
4 штурвала, 2 ножных диска, 6 штурвалов	2 штурвала, 2 кнопки, 4 клавиши трехпозиционные, 2 головки	То же	Печатная машинка То же	Механический счетчик, 6 разрядов Десятичное табло, 6 разрядов
2 штурвала, 2 ножных диска	2 головки	»	»	То же
4 штурвала	Нет	»	»	Десятичное табло, 5 разрядов
»	»	»	»	Механический счетчик, 6 разрядов
8 штурвалов	»	»	»	Механический счетчик

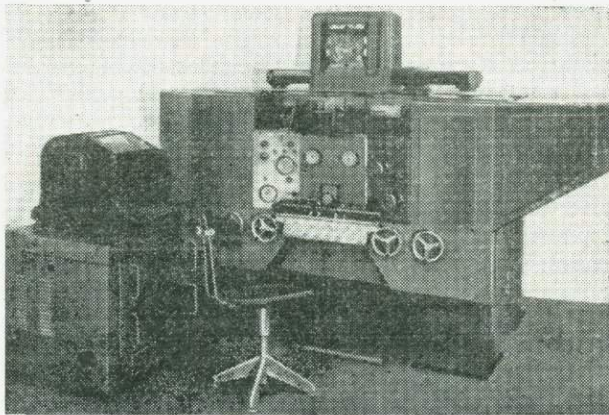


Рис. 262

Стереоскоп-паратор СКВ-1 — двухкадеточный (рис. 262), разработан под руководством М. Д. Коншина в ЦНИИГАиК.

Устройство этого прибора существенно отличается от стереоскоп-паратора СКА-18.

Системы для перемещения и измерения снимков выполнены раздельно. Каретки перемещаются при помощи сельсинов и ленточных передач. Управление движениями кареток происходит от четырех штурвалов. Из них два штурвала приводят в движение дифференциальные сельсины. Дифференциальными движениями можно пользоваться отдельно от основных или одновременно с ними. Управление электроприводами осуществлено от двух головок с регулировкой скорости перемещения в двух диапазонах.

Перемещения кареток измеряются при помощи пар метрологических дифракционных решеток. Длинные отражательные решетки этих пар находятся в плоскости снимков на продолжении

их координатных осей x и y . Это обеспечило достаточно строгое соблюдение основного принципа точных измерений (принципа Аббе).

Наблюдательная система имеет переменное увеличение. Изменение увеличения производится сменой окуляров. Система снабжена дополнительными измерительными марками в виде двух пар угловых биссекторов, расположенных под углом 90° друг к другу. Эти марки применяются для повышения точности визирования на изображения крестов контрольной сетки на снимках и для других монокулярных измерений.

Для фоторегистрации применен серийный малоформатный фотоаппарат «Киев-2» с широким диапазоном выдержек. Диаметр фотоабриса 22 мм. Запас пленки в кассете на 36 кадров. На фотоабрисе, кроме наблюдаемой точки и марки, изображается номер точки, который передается с клавишного устройства при регистрации результатов измерений. Специальные проекторы вводят изображение фотоабриса в правый или левый окуляры наблюдательной системы.

Прибор снабжен устройством для указания на снимке (отпечатке) точки, на которую наведена марка. Отпечаток прикрепляется к экрану. На отпечаток проектируется круг с точкой в центре, указывающей место наведения. Это позволяет быстро выполнить приближенную наводку на точку без использования наблюдательной системы.

Система преобразования линейных перемещений в цифровой код включает метрологические дифракционные датчики линейных перемещений высокой точности. В датчике создается параллельный пучок лучей, который проходит через прозрачную малую решетку, отражается от большой решетки и попадает на четыре фотоэлемента.

Малая прозрачная решетка имеет четыре поля штрихов, сдвинутых по фазе на 90° . Система обеспечивает постоянство разности фаз световых потоков и постоянную амплитуду, мало изменяющуюся от угла разворота решеток при ходе кареток. Электронная система ведет алгебраический счет квантов, поступающих при движении кареток.

Выходным устройством с открытым текстом служит телетайп. Для непосредственного ввода в ЭЦВМ отсчеты регистрируются карточным или ленточным перфораторами. Кроме того, отсчеты выводятся на табло.

Между одноименными строками текущих координат на табло находятся строки памяти, на которых фиксируются значения координат связующих точек для установки каретки по отсчетам в целях идентификации этих точек.

В табл. 17 приведены основные характеристики советских и иностранных автоматизированных высокоточных стереокомпараторов.

§ 117. ВЫСОКОТОЧНЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ
МОНОКОМПАРАТОРЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ МАРКИРОВКИ
ТОЧЕК НА СНИМКАХ

В аналитической фототриангуляции для измерения снимков иногда применяют монокомпараторы вместо стереокомпараторов.

На рис. 263 представлен монокомпаратор МК-1 Керна (Швейцария).

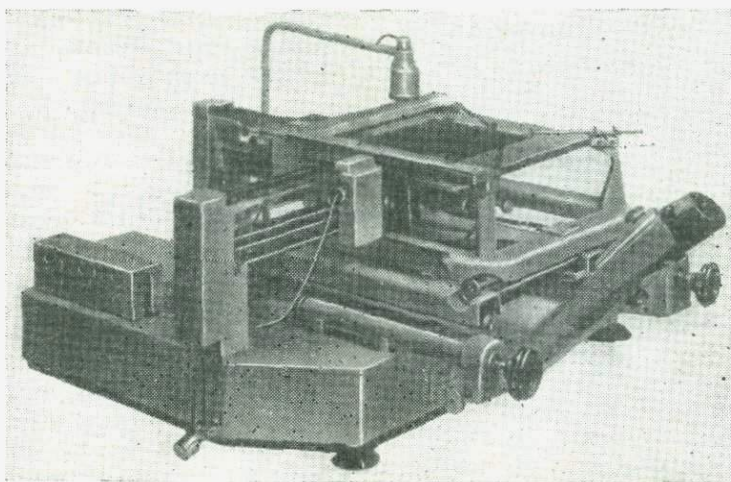


Рис. 263

В этом приборе снимок P прилегает к стеклянной пластине 1 , на которой нанесены координатные оси x и y (рис. 264). Светящаяся измерительная марка 2 проецируется на снимок и может быть наведена на любую его точку. С маркой связаны шкалы x' и y' , награвированные на стеклянных пластинках 3 и 4 и установленные параллельно осям x и y соответственно. Эти шкалы служат для измерения координат точек снимка в системе xu .

Снимок и измерительная марка рассматриваются с помощью наблюдательной бинокулярной системы с переменным увеличением. При этом малое увеличение используется для грубой установки, а большое — для точного наведения марки.

Измерительная марка состоит из трех концентрических колец, которые при визировании совмещаются с соответствующими кольцами замаркированной точки снимка.

Устройство для автоматической регистрации координат x и y основано на электронном сканировании оптического микрометра.

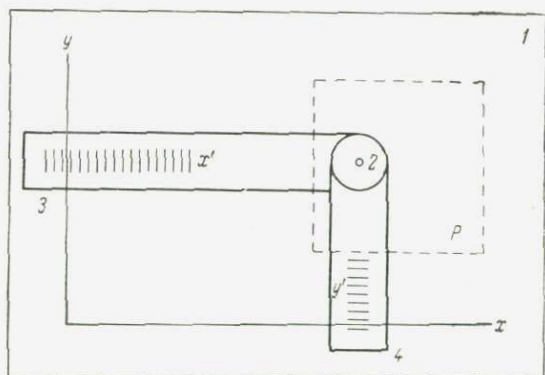


Рис. 264

Основные характеристики монокомпаратора МК-1:

Формат снимков	до 30×30 см
Увеличение наблюдательной системы	2,5—12,5 и 12—60×
Диаметр кольца марки:	
внешнего	0,16 мм
внутреннего	0,08 мм
Быстрое и медленное перемещение марки, точность отсчета координат x и y	± 1 мкм
Результаты измерений фиксируются перфоратором и печатной машинкой	

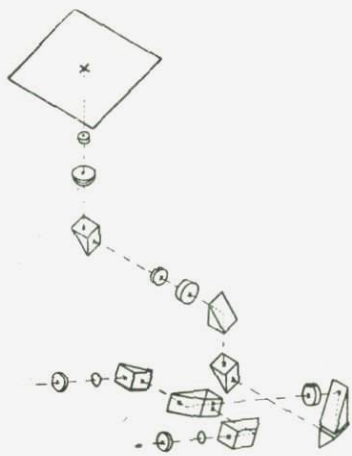


Рис. 265

Монокомпараторы изготовлены и в других странах. Фирма ОМИ (Италия) разработала монокомпаратор ТА-1/Р, позволяющий измерять координаты точек на снимках формата до 23×23 см с точностью 1 мкм. Увеличение наблюдательной системы (рис. 265) 10, 20 и 40×, диаметр измерительной марки в плоскости снимка 25 мкм. Результаты измерений регистрируются автоматически при помощи перфоратора и пишущей машинки.

Автоматизированный монокомпаратор «Аскорекорд» фирмы Цейсс (ГДР) предназначен для измерения координат точек на

снимках формата до 30×30 см. Точность отсчета координат в этом приборе 0,1 мкм.

До измерения на монокомпараторе на снимках маркируются все точки, включенные в фотограмметрическую сеть. Для этого созданы специальные приборы, позволяющие стереоскопически опознать идентичные точки на смежных снимках и обозначить их.

К таким приборам относится «Трансмарк», разработанный фирмой Цейсс (ГДР) и впервые показанный в 1968 г. в Лозанне на выставке, посвященной XI конгрессу Международного фотограмметрического общества (рис. 266).

Маркировка точек в этом приборе выполняется бесконтактным способом при помощи лазерных лучей. Кратковременное воздействие лазерного пучка на снимок образует белую окружность с черным кольцом. Благодаря этому замаркированная точка хорошо различается на участках снимка различной плотности.

«Трансмарк» состоит из станины, двух кареток для снимков, неподвижной наблюдательной системы и лазерной головки. Окуляры наблюдательной системы сменные, что позволяет изменять

увеличение. Поперечные параллаксы можно преобразовать в продольные с помощью призм Шмидта, которые поворачивают изображения на 90° . Кроме того, они служат для получения обратного стереоэффекта путем поворота изображений на 180° . Измерительная марка представляет собой светящуюся точку. Снимки закрепляются на каретках с помощью стеклянных покровных пластин или стальных линеек. Приближенное визирование выполняется перемещением снимков от руки, а точное — движение кареток в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В момент маркировки точек глаза оператора автоматически защищаются от воздействия отраженных лазерных лучей.

Основные характеристики прибора «Трансмарк»:

Формат снимков	до 23×23 см
Размеры кареток	34×45 см
Перемещения кареток:	
вдоль осей x и y	± 5 мм
вдоль оси Z (для фокусировки)	10 мм
Увеличение наблюдательной системы	7, 10, 13, 20^\times

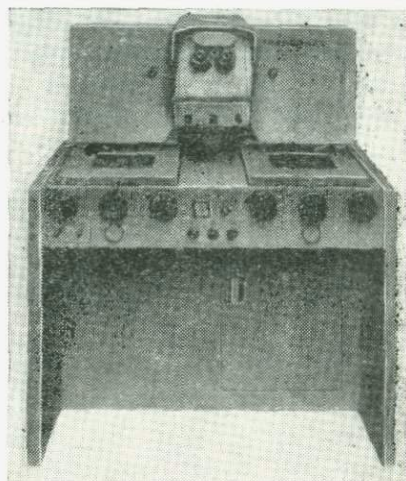


Рис. 266

Диаметр поля зрения (в зависимости от увеличения)	от 16 до 25 мм
Диаметр измерительной марки в плоскости снимка	0,066 мм
Скорость маркирования	60 точек в ч на обоих снимках
Точность маркировки	± 1 мкм
Размеры прибора	$102 \times 70 \times 122$ см
Масса	130 кг

Кроме «Трансмарка» Цейсса для маркировки точек на снимках служат приборы РИГ-4 Вильда (двухкареточный) и ПМГ-1 Керна (трехкареточный). Маркировка в этих приборах выполняется контактным механическим способом с точностью 3—5 мкм.

ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЕ СПОСОБЫ СГУЩЕНИЯ
ОПОРНОЙ СЕТИ

§ 118. СПОСОБ НЕИСКАЖЕННОЙ МОДЕЛИ

Способ неискаженной модели предложили М. Д. Коншин и Г. В. Романовский. Сущность способа заключается в приведении результатов измерений стереопары к нормальному случаю съемки. При этом левый снимок условно считается горизонтальным (рис. 267). Благодаря этому отпадает необходимость в исправле-

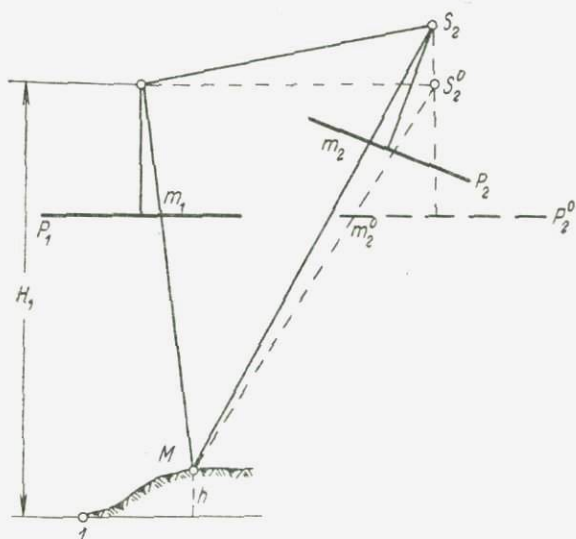


Рис. 267

нии координат точек левого снимка и поправки к продольным параллаксам определяются проще, чем в дифференцированном способе пространственной фототриангуляции. По координатам точек левого снимка и исправленным параллаксам вычисляют координаты точек модели, применяя известные формулы нормального случая съемки. Полученная таким образом модель подобна местности, но имеет наклон, равный углу наклона первого снимка. Геодезическое ориентирование модели производят по спорным точкам.

Пусть точка I — данная, а M — определяемая. Установим снимки в стереоскопическом аппарате по начальным направлениям и изме-

рим продольные параллаксы p_1 и p этих точек, а также координаты x_1 и y_1 точки m_1 .

Приведем измеренные параллаксы к нормальному случаю съемки, т. е. к горизонтальным снимкам P_1 и P_1^0 . Затем вычислим координаты точки M по формулам (7.8) и (7.13)

$$X = B \frac{x_1}{p^0}, \quad Y = B \frac{y_1}{p^0}, \quad Z = Z_1 + H_1 \frac{\Delta p^0}{p^0},$$

где B — базис фотографирования,

H_1 — высота фотографирования относительно опорной точки I ,

Δp^0 — разность исправленных продольных параллаксов p^0 и p_1^0 .

При этом

$$\Delta p^0 = \Delta p + \delta p - \delta p_1,$$

где Δp — измеренная разность продольных параллаксов точек M и I ,

δp и δp_1 — поправки к продольным параллаксам этих точек.

Так как в нашем случае левый снимок горизонтальный и $\Delta \alpha = 0$, то согласно (12.4)

$$\delta p = x_2 \frac{\Delta H}{H} - \frac{x_2^2}{f} \Delta \alpha - \frac{x_2 y_2}{f} \Delta \omega.$$

Множитель

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta H \cdot B f}{B H f} = v' \frac{p}{f},$$

где v' — угол между базисом фотографирования и левым снимком. Следовательно,

$$\delta p = -x_2 \frac{p}{f} v' - \frac{x_2^2}{f} \Delta \alpha - \frac{x_2 y_2}{f} \Delta \omega. \quad (14.1)$$

Теперь используем уравнение взаимного ориентирования снимков (8.16). Полагая $\Delta \alpha = 0$, $\tau' = -\frac{f}{p} \Delta \omega$ (согласно 8.39), $v = 0$, $b = p$ и $y_1 = y_2$, получим

$$q = y_2 \frac{p}{f} v' + \frac{x_2 y_2}{f} \Delta \alpha + \frac{y_2^2}{f} \Delta \omega \quad (14.2)$$

или

$$\frac{x_2}{y_2} q = x_2 \frac{p}{f} v' + \frac{x_2^2}{f} \Delta \alpha + \frac{x_2 y_2}{f} \Delta \omega. \quad (14.3)$$

Из равенств (14.1) и (14.3) найдем основную формулу данного способа

$$\delta p = -x_2 \frac{q}{y_2} = -\varphi x_2, \quad (14.4)$$

где

$$\varphi = \frac{q}{y_2}. \quad (14.5)$$

Для точек, расположенных на начальном направлении и близко к нему, определять величину φ по формуле (14.5) невозможно, так как поперечные параллаксы и ординаты этих точек равны или близки к нулю. В этом случае значения φ находят так. На стереопаре выбирают несколько точек, например четыре точки, расположенные по углам стереопары, и измеряют их координаты и поперечные параллаксы. Вычисляют величины φ для каждой точки и путем интерполирования этих величин проводят на правом снимке или на восковке линии равных значений φ . Таким образом получают график, с помощью которого можно найти значения φ для любых точек стереопары. Линии равных значений φ должны быть в виде прямых, отстоящих друг от друга на равных расстояниях.

Согласно формуле (7.18)

$$p^0 = p - f \Delta\alpha + \delta p = p - f \Delta\alpha - \varphi x_2, \quad (14.6)$$

так как $\alpha_1 = \omega_1 = 0$.

Равенство (14.6) можно привести к виду

$$p^0 = p_{0_2} + \Delta p - \frac{f^2}{p_{0_1}} (\varphi_{0_2} - \varphi_{0_1}) - \varphi x_2, \quad (14.7)$$

где p_{0_2} — продольный параллакс главной точки правого снимка, Δp — разность продольных параллаксов определяемой точки и главной точки правого снимка, $\varphi_{0_1}, \varphi_{0_2}$ — величины φ , полученные для главных точек левого и правого снимков.

Координаты X и Y определяемых точек, вычисленные по формулам (7.8), получаются в произвольном масштабе, так как длину базиса фотографирования выбирают произвольно. Плановое положение точек сети можно найти и графически, если в положение точек на левом снимке ввести поправки в соответствии с формулами (7.15)

$$x_1^0 = x_1 - x_1 \frac{\Delta p^0}{p^0}, \quad y_1^0 = y_1 - y_1 \frac{\Delta p^0}{p^0}. \quad (14.8)$$

Для определения масштаба построенной таким образом плановой сети необходимо иметь не менее двух опорных точек.

От фотограмметрических высот точек местности, вычисленных по формуле (7.13), переходят к геодезическим с помощью графика высотных поправок.

Способ неискаженной модели позволяет сгущать высотную опорную сеть и в пределах маршрута, если в начале и в конце маршрута имеются по две опорные точки и известны продольные углы наклона снимков, а также в пределах блока, если на границах блока определены 2—3 точки на каждую стереопару. В этом случае плановое положение точек сети получают путем соединения по связующим точкам звеньев, созданных в результате обработки

отдельных стереопар, и редуцирования их по опорным точкам или методом графической фототриангуляции.

Процесс вычисления поправок в измеряемые продольные параллаксы можно исключить, если использовать стереокомпаратор СК-3, снабженный коррекционным механизмом. Этот механизм решает уравнение (14.4).

§ 119. ФОТОПОЛИГОНОМЕТРИЯ

Фотополигонометрия служит для определения планового положения точек местности и представляет собой полигонометрический ход, проложенный по снимкам.

Координаты вершин полигонометрического хода получают аналитически, а боковые точки — графически.

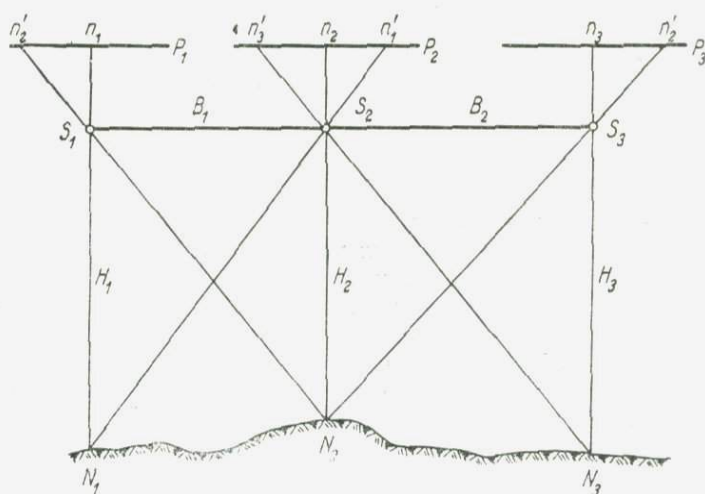


Рис. 267

Пусть снимки P_1, P_2, P_3, \dots горизонтальные и получены с одной и той же высоты с перекрытием более 50% (рис. 268). Выберем в качестве вершин полигонометрического хода точки местности N_1, N_2, N_3, \dots , соответствующие точкам надира n_1, n_2, n_3, \dots . Сторонами хода будут базисы фотографирования B_1, B_2, B_3, \dots . Любой горизонтальный угол между соседними базисами фотографирования измерим на соответствующем снимке как угол надира этого снимка между направлениями на точки надира смежных снимков. Длины базисов фотографирования вычислим по формуле, вытекающей из выражений (7.8),

$$B = H \frac{p^0}{f}, \quad (14.9)$$

где H — высота фотографирования над какой-либо точкой местности, изобразившейся на данной стереопаре,
 p^0 — продольный параллакс этой точки,
 f — фокусное расстояние снимка.

Высоту фотографирования можно измерить в полете с помощью радиовысотомера. Если высоты фотографирования неизвестны, то находят относительные величины базисов фотографирования. Для этого пользуются связующими точками. Например, для точки N_2 можно написать согласно формуле (14.9)

$$H_2 = B_1 \frac{f}{p_1^0} = B_2 \frac{f}{p_2^0},$$

где p_1^0 и p_2^0 — продольные параллаксы точки N_2 , измеренные на первой и второй стереопарах.

Следовательно,

$$B_2 = B_1 \frac{p_2^0}{p_1^0}$$

или в общем виде

$$B_{i+1} = B_i \frac{p_{i+1}^0}{p_i^0}. \quad (14.10)$$

Выбрав произвольно длину первого базиса и измерив продольные параллаксы связующих точек, найдем по этой формуле остальные базисы.

Таким образом, по снимкам можно получить все элементы, необходимые для вычисления полигонометрического хода в условной системе координат. При этом вычисленные длины сторон хода будут равны действительным, если высоты фотографирования измерены в полете. Если же эти измерения не производились, то ход получится в произвольном масштабе.

Вычислим условные координаты вершин полигонометрического хода и по этим координатам нанесем ход на основу. Затем графически прямой засечкой найдем на основе положение боковых точек — связующих, трансформационных и опорных. Для этого используем воскровки направлений, которые предварительно изготовим по снимкам. В результате этого построим сеть. Затем ориентируем ее относительно геодезической системы координат по опорным точкам.

В действительности фотополигонометрия несколько усложняется, так как она прокладывается не по горизонтальным, а по плановым снимкам. Вместо абсолютных точек надира используют обычно условные, которые получают по условным углам наклона снимков. В этом случае результатом фотополигонометрии является ортогональная проекция определяемых точек местности не на горизонтальную, а на наклонную плоскость, относительно которой

определены условные точки надира. Однако угол наклона этой плоскости обычно мал и почти не влияет на точность определения планового положения точек.

Условные углы наклона снимков находят по элементам взаимного ориентирования в соответствии с формулами (13.12)

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= \alpha_1 + \Delta\alpha, \\ \omega_2 &= \omega_1 + \Delta\omega.\end{aligned}\quad (14.11)$$

При этом углы наклона первого снимка маршрута считаются равными нулю.

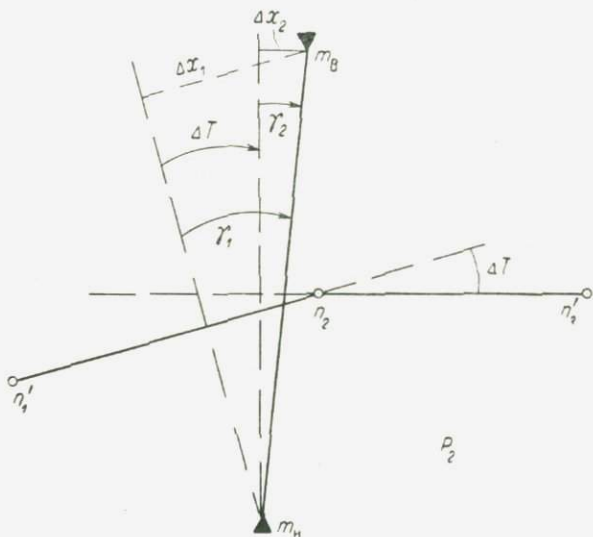


Рис. 269

Координаты условной точки надира

$$x_n = -f\alpha, \quad y_n = -f\omega. \quad (14.12)$$

На рис. 269 представлен снимок P_2 , на котором показана условная точка надира n_2 , а также точки n_1' и n_3' , соответствующие условным точкам надира соседних снимков. Для определения горизонтального угла ΔT между базами фотографирования находят углы γ , составленные прямой, проходящей через координатные метки m_B и m_H , с перпендикулярами к направлениям, соединяющим точки надира. При этом снимки в стереоскопическом аппарате устанавливают так, чтобы эти направления были параллельны оси X прибора. При обработке первой пары измеряют величину Δx_1 как разность отсчетов по шкале x , полученных после наведения правой измерительной марки на метки m_B и m_H . Обработывая вторую пару, находят Δx_2 как разность отсчетов

по шкале x , полученных после наведения левой измерительной марки на те же метки. Затем вычисляют

$$\sin \gamma_1 = \frac{\Delta x_1}{l}, \quad \sin \gamma_2 = \frac{\Delta x_2}{l} \quad (14.13)$$

и

$$\Delta T = \gamma_1 - \gamma_2, \quad (14.14)$$

здесь l — расстояние между координатными метками m_a и m_n .

Аналогично находят углы между другими базисами фотографирования.

Согласно (7.19) приведенные параллаксы условных точек надира n_1 и n_2

$$\left. \begin{aligned} p_1^0 &= p_1 - f \Delta \alpha - \frac{p_1^2}{f} \alpha_2 + p_1 \frac{\Delta H}{H} \\ p_2^0 &= p_2 - f \Delta \alpha + \frac{p_2^2}{f} \alpha_1 \end{aligned} \right\}. \quad (14.15)$$

Остальные поправочные члены в данном случае можно не учитывать, так как координаты точек надира — величины малые.

Выразим параллаксы p_1 и p_2 через измеренные на снимках расстояния b_1 и b_2 между точками надира

$$\begin{aligned} p_1 &= x_1 - x_2 = -f \alpha_1 + b_2 + f \alpha_2 = b_2 + f \Delta \alpha, \\ p_2 &= x_1 - x_2 = b_1 - f \alpha_1 + f \alpha_2 = b_1 + f \Delta \alpha. \end{aligned}$$

Подставив эти значения p_1 и p_2 в равенства (14.15), найдем

$$\left. \begin{aligned} p_1^0 &= b_2 - \frac{b_2^2}{f} \alpha_2 + b_2 \frac{\Delta H}{H} \\ p_2^0 &= b_1 + \frac{b_1^2}{f} \alpha_1 \end{aligned} \right\}. \quad (14.16)$$

Продольные параллаксы условных точек надира, вычисленные по этим формулам, относятся к плоскости трансформирования, параллельной условно горизонтальной плоскости. Для определения базиса фотографирования по формуле (14.9) плоскость трансформирования должна быть параллельна базису. В этом случае $\Delta H = 0$, $\alpha_1 = \alpha'_1$, $\alpha_2 = \alpha'_2$, и формулы приведенных параллаксов принимают вид

$$\left. \begin{aligned} p_1^0 &= b_2 - \frac{b_2^2}{f} \alpha'_2 \\ p_2^0 &= b_1 + \frac{b_1^2}{f} \alpha'_1 \end{aligned} \right\}. \quad (14.17)$$

Если известны высоты фотографирования, то каждый базис фотографирования находят дважды

$$B = H_1 \frac{p_1^0}{f} = H_2 \frac{p_2^0}{f},$$

где H_1 и H_2 — высоты фотографирования над точками надира N_1 и N_2 . В случае когда высота фотографирования получена не над точкой надира, а над какой-либо другой, учитывают превышение этой точки над точкой надира. Это превышение определяют стереофотограмметрическим методом.

Координаты вершин хода вычисляют по формулам

$$\left. \begin{aligned} X_{i+1} &= X_i + \Delta X \\ Y_{i+1} &= Y_i + \Delta Y \end{aligned} \right\}, \quad (14.18)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= B_k \cos T_k \\ \Delta Y &= B_k \sin T_k \end{aligned} \right\}. \quad (14.19)$$

Дирекционный угол базиса

$$T_k = T_{k-1} + \Delta T. \quad (14.20)$$

Фотополигонометрию предложил Ф. В. Дробышев в 1930 г. В то время ход строили графически. Сторонами хода служили расстояния, измеренные между центральными точками на снимках. При этом влияние углов наклона снимков не учитывалось. С 1939 г. по предложению Г. В. Романовского стороны хода стали измерять между условными точками надира. В 1948 г. Л. И. Перкис начал исправлять измеренные стороны хода за наклоны снимков и приводить их к одному масштабу. В 1949 г. Н. П. Кожевников под руководством М. Д. Коншина разработал методику использования в фотополигонометрии показаний радиовысотомера. Эта методика позволяет независимо определять абсолютные значения сторон хода, что повышает точность фотополигонометрии по сравнению с графической фототриангуляцией.

§ 120. АЭРОРАДИОНИВЕЛИРОВАНИЕ

Высоты фотографирования, измеренные радиовысотомером, и разности высот полета относительно уровенной поверхности, полученные по показаниям статоскопа, позволяют найти высоты точек местности, от которых радиовысотомер зафиксировал отраженные импульсы. Для этого достаточно знать высоту одной из точек отраженного импульса, например точки M_1 (рис. 270).

Как следует из рисунка, высота точки местности M_i

$$Z_i = Z_1 + H_1 + \Delta H_i - \Delta H_1 - H_i. \quad (14.21)$$

При этом предполагается, что барическая поверхность параллельна уровенной. В действительности же барическая поверхность наклонена относительно уровенной. Поправки к вычисленным по формуле (14.21) высотам за наклон барической поверхности можно найти, если известна геодезическая высота еще одной точки, например точки M_n в конце маршрута. Разность вычисленной и данной высот этой точки равна невязке высотного хода.

Невязку распределяют на все точки хода пропорционально удалению их от начальной.

Радиовысотомером с широким углом излучения измеряется не высота фотографирования, а расстояние от самолета до ближайшей точки местности. В этом случае для определения высоты фотографирования по показаниям радиовысотомера необходимо найти на снимке точку m_i , соответствующую точке местности M_i , до которой измерено расстояние от самолета.

Эта задача решается с помощью параллактических сеток, предложенных М. Д. Коншиным. Сетки устанавливаются на левый

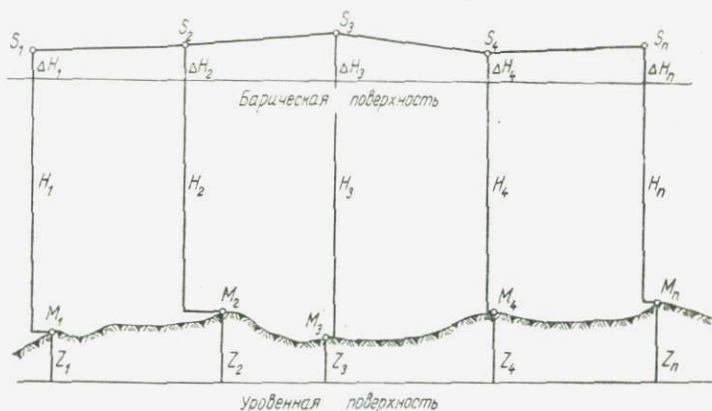


Рис. 270

и правый снимки стереопары. Рассматривая снимки и сетки стереоскопически, наблюдатель видит модель местности и сферу. Перемещением одной из сеток вдоль начального направления сфера приводится в соприкосновение с моделью. Точка, в которой сфера коснулась модели, отмечается на снимке и принимается за точку m_i .

Исследования, выполненные в ЦНИИГАиК и ВТС, показали, что благодаря независимому определению высот фотографирования и их разностей точность данного способа почти не зависит от длины хода. Эта особенность является существенным достоинством аэrorадионивелирования.

За разработку аэrorадионивелирования и внедрение его в аэрофотогеодезическое производство М. Д. Коншину, Г. В. Романовскому, Н. П. Кожевникову, Н. А. Соколовой, Л. А. Лукашевичу присуждена Государственная премия.

Аэrorадионивелирование применяется при создании карт всхолмленных и песчаных районов. В закрытых и горных районах этот способ не используется вследствие отсутствия большого числа отраженных импульсов в показаниях радиовысотомера и недостаточной точности.

§ 121. СПОСОБ ПРЯМОЙ ЛИНИИ

Способ прямой линии, предложенный Г. В. Романовским в 1937 г., позволяет определять по снимкам высоты точек местности.

Способ основан на двух свойствах снимков: 1) прямая линия на местности изображается на снимках всегда прямой и 2) искажения разности продольных параллаксов двух точек местности малы, если эти точки расположены близко друг к другу.

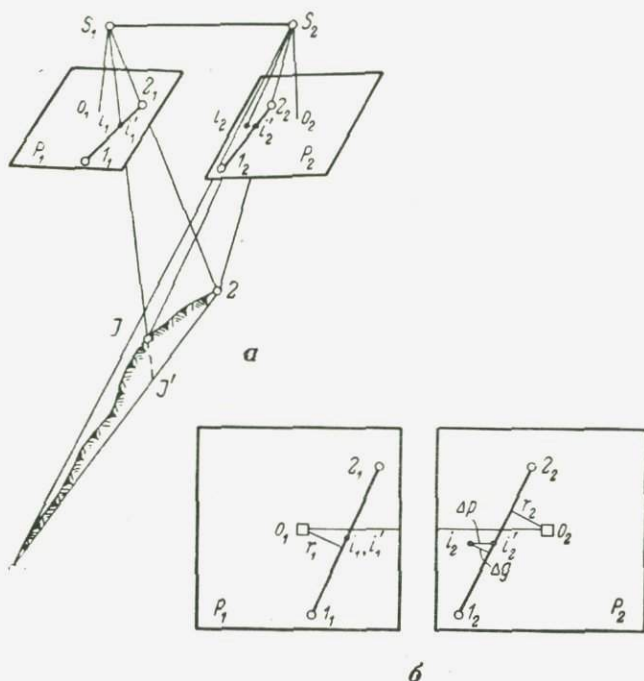


Рис. 271

Пусть 1 и 2 — точки местности, высоты которых известны (рис. 271, а). Выберем на левом снимке точку i_1 на прямой, проходящей через изображения данных точек, и найдем высоту соответствующей точки J местности.

Для этого продолжим луч SJ до пересечения с прямой 1—2. В результате получим фиктивную точку J' . На снимках фиктивной точке соответствуют точки i'_1 и i'_2 , лежащие на прямых, проходящих через изображения данных точек.

Очевидно, что высота определяемой точки

$$Z_J = Z_1 + h_{J'} + h_J, \quad (14.22)$$

где Z_1 — высота данной точки 1,

$h_{J'}$ — превышение фиктивной точки над точкой I ,
 h_J — превышение определяемой точки над фиктивной.
 Из рисунка следует

$$h_{J'} = \frac{D_{J'}}{D_2} (Z_2 - Z_1) \approx \frac{d_{i_1}}{d_2} (Z_2 - Z_1); \quad (14.23)$$

здесь $D_{J'}$ и D_2 — расстояния на местности от точки I до точек J' и 2 , а

d_{i_1} и d_2 — соответствующие расстояния на левом снимке.

Для определения величины h_J используем формулу (7.12), полагая, что снимки горизонтальные,

$$h_J = H_{J'} \frac{\Delta p}{p_{J'} + \Delta p}, \quad (14.24)$$

где $H_{J'}$ — высота фотографирования над фиктивной точкой,

$$H_{J'} = H_{\text{абс}} - Z_1 - h_{J'}, \quad (14.25)$$

$H_{\text{абс}}$ — абсолютная высота фотографирования,

$p_{J'}$ — продольный параллакс фиктивной точки,

Δp — разность продольных параллаксов определяемой и фиктивной точек.

Вместо величин $p_{J'}$ и Δp обычно измеряют расстояния r_1 и r_2 на снимках от главных точек до прямых, соединяющих данные точки, и *параллактическое смещение* Δg (рис. 271, б). Поэтому формулу для вычисления h_J можно привести к виду

$$h_J = H_{J'} \frac{\Delta g_i}{r_1 + r_2 + \Delta g}. \quad (14.26)$$

Для измерения параллактических смещений каждый снимок устанавливают в стереокомпараторе так, чтобы прямая, проходящая через данные точки, была перпендикулярна к оси X прибора. Величины r_1 и r_2 измеряют с помощью циркуля и масштабной линейки.

МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ КАРТ
ПО АЭРОСНИМКАМ§ 122. КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ И МЕТОДОВ
ФОТОТОПОГРАФИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

В зависимости от технических средств, применяемых для фотографирования местности, различают три вида фототопографической съемки:

- аэрофототопографическую,
- наземную фототопографическую,
- комбинированную.

При *аэрофототопографической съемке* местность фотографируется аэрофотоаппаратом, установленным на самолете или на каком-либо другом летательном аппарате.

Наземная фототопографическая съемка основана на фотографировании местности с точек земной поверхности при помощи фототеодолита. Этот вид съемки часто называется фототеодолитной, или наземной стереофотограмметрической съемкой.

Комбинированная фототопографическая съемка представляет собой сочетание фототеодолитной съемки и аэрофототопографической. При этом местность фотографируется дважды: фототеодолитом с наземных станций и аэрофотоаппаратом с самолета. По наземным снимкам обычно гущается опорная сеть, а по аэроснимкам составляется топографическая карта.

Наземная фототопографическая съемка широко применялась для картографирования горных районов: В настоящее время при изучении больших территорий она менее эффективна, чем аэрофототопографическая съемка, и рекомендуется для создания карт и планов только небольших участков, когда аэрофотосъемка нерентабельна. Кроме того, методы наземной фотограмметрии часто используются для решения многих нетопографических задач, например, для определения деформаций инженерных сооружений, составления планов архитектурных памятников, изучения траектории и скорости летящих объектов и др.

В данной главе рассматриваются методы аэрофототопографической съемки. Наземной фототопографической съемке и сочетанию ее с аэрофототопографической съемкой посвящены специальные курсы.

В аэрофототопографической съемке применяются два метода — комбинированный и стереотопографический.

Комбинированный метод позволяет получить контурную часть карты в камеральных условиях в результате фотограмметрической

обработки снимков, а рельеф зарисовать в поле приемами мензульной съемки.

Комбинированный метод широко применялся для картографирования равнинных и плоскоравнинных районов. По мере развития стереотопографического метода и особенно после создания сверхширокоугольной аэросъемочной оптики роль комбинированного метода уменьшалась. В настоящее время он используется для съемки плоскоравнинных районов.

Стереотопографический метод является наиболее совершенным, так как позволяет изобразить по снимкам на оригинале карты не только контуры, но и рельеф местности.

Следует отметить и другие достоинства этого метода:

— высокое качество топографических карт при минимальных затратах времени, сил и средств,

— возможность детального изучения территории по снимкам в лабораторных условиях в любое время и независимо от погоды, в том числе труднодоступных и вовсе недоступных районов (тундры, пустыни, горные хребты, территорию противника и т. д.),

— возможность механизации и автоматизации всех производственных процессов.

Стереотопографический метод широко применяется на практике как основной метод создания карт различных масштабов.

§ 123. КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД

Сущность комбинированного метода аэрофототопографической съемки, как изложено выше, состоит в том, что контуры на карте получаются в камеральных условиях по снимкам, а рельеф изображается в поле приемами мензульной съемки.

Рельеф снимается обычно на репродукции фотоплана. Для составления фотопланов производят фотограмметрическое сгущение опорной сети и трансформирование снимков.

Одновременно со съемкой рельефа дешифрируют контуры на фотоплане.

Следовательно, основными процессами комбинированного метода являются:

- 1) аэрофотосъемка,
- 2) определение опорных точек на местности,
- 3) фотограмметрическое сгущение опорной сети,
- 4) трансформирование снимков и составление фотоплана,
- 5) съемка рельефа и дешифрирование контуров на фотоплане.

Аэрофотосъемка выполняется нормальноугольными или узкоугольными аэрофотоаппаратами с фокусными расстояниями 200—350 мм. Фокусное расстояние аэрофотоаппарата выбирается так, чтобы смещения точек на фотоплане, вызванные рельефом, были бы допустимыми.

Масштаб снимков зависит от масштаба составляемой карты и физико-географических особенностей местности. Обычно он

в 2—3 раза мельче масштаба карты. Продольное перекрытие снимков 60%, поперечное — 30%. Уменьшение масштаба снимков позволяет сократить объем аэрофотосъемочных, геодезических и фотограмметрических работ. Однако чрезмерное уменьшение масштаба снимков приводит к значительной потере резкости изображения на трансформированных снимках и затрудняет дешифрирование контуров.

Опорные точки, определяемые в результате геодезических работ на местности, необходимы для ориентирования фотограмметрических сетей относительно системы координат, принятой в геодезии. В качестве таких точек выбирают контурные точки, хорошо опознаваемые на снимках. В поле отмечают эти точки на снимках и определяют их положение относительно геодезической основы, построенной на данной территории. Кроме того, для каждой точки составляют абрис, показывающий ее положение относительно ближайших контуров.

Полученные таким образом опорные точки называются точками полевой подготовки снимков, или опознаками.

Если на местности нет естественных контуров, которые уверенно опознаются на снимках, то опознаки выбирают и маркируют до выполнения аэрофотосъемки.

Расстояние между точками полевой подготовки снимков зависит от масштаба создаваемой карты и точности способа фотограмметрического сгущения опорной сети. Оно рассчитывается при составлении проекта полевой подготовки снимков по формулам, характеризующим накопление ошибок в фотограмметрической сети.

Фотограмметрическое сгущение опорной сети выполняют аналитическим способом или на универсальных стереоприборах. В отдельных случаях применяют графическую фототриангуляцию, или фотополигонометрию. В результате фотограмметрического сгущения опорной сети получают опорные точки, необходимые для трансформирования снимков.

Снимки трансформируют на фототрансформаторе обычно на одну плоскость. По трансформированным снимкам составляют фотоплан.

Для съемки рельефа и дешифрирования контуров используются репродукция фотоплана и полный комплект снимков. Снимки рассматриваются стереоскопически при опознавании объектов местности и проведении горизонталей.

Съемка рельефа начинается с прокладки основных и съемочных высотных ходов. Основные ходы прокладывают с помощью технического нивелира между пунктами главной геодезической основы — триангуляции и полигонометрии и реперами. Точки основных ходов, как правило, закрепляются на местности и опознаются на фотоплане. Съемочные ходы прокладываются с помощью кипрегеля и опираются на точки основных высотных ходов и пункты геодезической основы. В качестве точек высотных ходов

выбирают четкие, хорошо опознаваемые контурные точки, обеспечивающие хороший обзор местности.

Если инструмент установлен не на контуре, то положение точки стояния на фотоплане определяется одним из следующих способов:

- 1) обратной засечкой по опорным геодезическим пунктам с предварительным ориентированием планшета по буссоли;
- 2) промерами от трех опознанных контуров и более;
- 3) опознаванием линии, на которой расположена точка, и промером расстояний от этой точки до концов линии;
- 4) ориентированием планшета по прочерченному с предыдущей точки направлению и откладыванием измеренного расстояния от предыдущей точки с проверкой обратными засечками по пунктам геодезической сети и по вехам, выставленным на опознанных контурах.

Точки съемочной сети размещают равномерно, чтобы обеспечить возможность съемки рельефа в пределах всей трапеции. Количество их определяется характером местности и масштабом создаваемой карты.

С точек съемочной сети определяют пикетные точки, необходимые для изображения рельефа. К ним относятся точки, расположенные на характерных формах рельефа — вершинах, котловинах, седловинах, тальвегах, бровках и т. п. Кроме того, находят высоты урезов вод, пересечений дорог и просек, отдельно стоящих предметов местности и других ориентиров, отметки которых должны быть подписаны на карте.

Чтобы облегчить выбор пикетных точек, изучают стереоскопическую модель местности.

Работа на точке съемочной сети состоит из следующих процессов:

- 1) установки мензулы,
- 2) ориентирования планшета,
- 3) выбора пикетных точек и определения их высот,
- 4) интерполирования отметок и проведения горизонталей,
- 5) дешифрирования.

После установки мензулы планшет ориентируют по геодезическим пунктам или по четким контурным точкам, если местность открытая, и по буссоли, если местность закрытая.

В качестве пикетных точек берут по возможности контурные точки, расстояния до которых измеряют на фотоплане измерителем, а углы наклона — кипрегелем при визировании на эти точки. Если пикетная точка не совпадает с контуром, то расстояние до нее определяют с помощью кипрегеля и рейки.

Высоты пикетных точек подписывают на фотоплане.

Отметки интерполируют между пикетными точками, расположенными в местах перегиба рельефа. Не рекомендуется сразу набирать много пикетных точек. Достаточно 3—4 отметок, чтобы изобразить рельеф на небольшом участке. Сначала проводят

горизонталь, наиболее полно отображающую характер рельефа, а затем — смежные, учитывая при этом геоморфологические особенности.

Фотоплан помогает топографу правильнее и точнее изобразить рельеф при меньшем количестве шкетов по сравнению с мензульной съемкой. На фотоплане хорошо изображаются многие формы рельефа — овраги, промоины, обрывы и др.

Результаты съемки рельефа и дешифрирования оформляются на фотоплане карандашом, а затем вычерчиваются тушью.

Комбинированный метод применяется, как отмечено выше, для съемки плоскоравнинных районов, например при создании топографических карт масштаба 1 : 10 000 с сечением рельефа через 1 м для ирригационного и мелиоративного строительства. В этом случае аэрофотосъемка производится в масштабе около 1 : 20 000 аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 140 или 200 мм.

С целью сокращения срока создания карты иногда съемку рельефа и дешифрирование выполняют на фотосхемах или на отдельных снимках одновременно с полевыми работами по привязке снимков. При этом масштаб каждого снимка определяют не менее двух раз по симметричным отрезкам, проходящим через его центральную часть. В камеральных условиях горизонтали и результаты дешифрирования переносят с фотосхем или снимков на фотоплан или на планшет. Однако такая технология усложняет полевые работы и увеличивает объем камеральных.

Полевые работы можно сократить, если вместо сплошного полевого дешифрирования применить камеральное с проверкой его результатов в полевой период.

Следует отметить, что в последние годы для съемки равнинных районов получает широкое применение стереотопографический метод.

§ 124. СТЕРЕОТОПОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД

Стереотопографический метод в отличие от комбинированного позволяет получить в камеральных условиях по снимкам не только контурную часть карты, но и изображение рельефа. Полевые работы в этом случае включают лишь определение опорных точек для внешнего ориентирования фотограмметрических сетей и дешифрирование или проверку камерального дешифрирования снимков.

Для составления карты по снимкам используются обычно универсальные стереопроборы, а в отдельных случаях — дифференцированные. В соответствии с этим в стереотопографическом методе различают два способа составления карты — универсальный и дифференцированный.

К основным процессам стереотопографического метода относятся:

- 1) аэрофотосъемка,

2) определение опорных точек и дешифрирование снимков в поле,

3) фотограмметрическое сгущение опорной сети,

4) съемка контуров и рельефа по снимкам с применением способов камерального дешифрирования.

Масштаб снимков выбирается в зависимости от масштаба создаваемой карты и физико-географических условий района картографирования.

Фокусное расстояние съемочной камеры, масштаб снимков и их качество должны обеспечивать возможность создания достаточно подробной и точной карты при наименьшем объеме полевых и камеральных работ.

Из выражения (7.12) следует

$$\delta h = H \frac{\delta \Delta p}{p}, \quad (15.1)$$

т. е. точность определения высот точек местности по снимкам тем выше, чем меньше высота фотографирования. Последняя будет меньше, если меньше фокусное расстояние съемочной камеры. Поэтому для стереотопографического метода создания карт применяют короткофокусные аэрофотоаппараты. Однако не во всех случаях можно использовать короткофокусную оптику. Например, при съемке горных и высокогорных районов нельзя применять фотокамеры с очень коротким фокусным расстоянием, так как получаются слишком большие разности продольных параллаксов и затрудняется, а в некоторых случаях и вовсе исключается стереоскопическое изучение снимков. Опытным путем установлено, что разности продольных параллаксов не должны превышать 15 мм.

Для определения зависимости между фокусным расстоянием фотокамеры и разностью продольных параллаксов подставим в равенство (7.12) значение $H = fm$, где m — знаменатель масштаба снимка. Получим

$$f = \frac{h}{m} \frac{p}{\Delta p}. \quad (15.2)$$

Пусть $h = 1000$ м, $m = 40\,000$, $p = 60$ мм и $\Delta p = 15$ мм. Тогда $f = 100$ мм. Таким образом, в данном случае не следует пользоваться аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием меньше 100 мм.

Из выражения (15.1) следует, что высоту фотографирования, соответствующую заданной точности определения высот точек местности δh , можно получить по формуле

$$H = \frac{p}{\delta \Delta p} \delta h, \quad (15.3)$$

где p — продольный параллакс; δh — средняя ошибка, допустимая при определении высот точек, подписываемых на карте;

$\delta \Delta p$ — средняя ошибка определения разности продольных параллаксов.

Ошибка $\delta \Delta p = 0,04$ мм, если снимки обрабатываются на стереопроекторе; $\delta \Delta p = 0,07$ мм, если применяется стереометр, и $\delta \Delta p = 0,09$ мм, если используется мультиплекс. Подставим эти значения $\delta \Delta p$ в формулу (15.3), полагая, что $p = 70$ мм. Тогда

$$H = 1800\delta h \quad (15.4)$$

для стереопроектора,

$$H = 1000\delta h \quad (15.5)$$

для стереометра и

$$H = 800\delta h \quad (15.6)$$

для мультиплекса.

Пусть требуется составить на стереопроекторе карту масштаба 1 : 25 000 горного района. Согласно наставлениям по топографической съемке в данном случае средняя погрешность высот, подписываемых на карте, не должна превышать 2,5 м. Таким образом, высота фотогафрирования, как следует из равенства (15.4), может быть 4500 м, а масштаб снимков при $f = 100$ мм будет равен 1 : 45 000.

Для фотогафрирования местности применяются аэрофотоаппараты с фокусными расстояниями от 50 до 200 мм. Равнинные и холмистые районы фотогафрируются короткофокусными аэрофотоаппаратами с большим полем зрения, чтобы обеспечить необходимую точность определения высот. Горные и высокогорные районы фотогафрируются аэрофотоаппаратами с фокусными расстояниями 100—200 мм.

Перекрытие снимков в равнинных и холмистых районах 60 × 30%, а в горных и высокогорных увеличивается в соответствии с рельефом местности. Часто и в равнинных или холмистых районах увеличивают продольное перекрытие снимков до 80%, чтобы обеспечить возможность двукратного независимого построения фотограмметрических сетей (по четным и нечетным снимкам).

Аэрофотосъемка производится с применением гиросtabilизированной установки. В процессе фотогафрирования местности фиксируются показания статоскопа и радиовысотомера. Кроме того, при картогафрировании недоступной и труднодоступной местности в полете регистрируются показания радиогодезической системы, позволяющие определить плановые координаты точек фотогафрирования. В этом случае точки фотогафрирования служат плановым обоснованием съемки.

Вместо черно-белой аэропленки часто используются спектрально-зональная или цветная, значительно расширяющие возможности дешифрирования снимков.

Отдельные районы фотогафрируют двумя фотокамерами с различными фокусными расстояниями. В результате получают основ-

ные снимки в масштабе, равном или в 1,5—2,0 раза мельче масштаба составляемой карты, и дополнительные в масштабе в 2—3 раза крупнее масштаба карты. Основные снимки используют для построения фотограмметрических сетей и для составления карты, а дополнительные — для дешифрирования.

Точки полевой подготовки снимков (опознаки) могут быть плано-высотными, плановыми и высотными. В качестве таких точек выбирают резко очерченные контурные точки, уверенно опознаваемые на снимках. Опорные точки отмечаются на снимках. Кроме того, для каждого опознака составляется абрис, показывающий его положение относительно ближайших контуров. Если на местности нет естественных контуров, уверенно опознаваемых на снимках, то опознаки маркируются. Эта работа выполняется до аэрофотосъемки. Для маркировки опорных точек применяют различные знаки, учитывая при этом масштаб снимков и условия местности. Например, в сплошном лесу или кустарнике вырубает площадки в виде квадрата. Пункты триангуляции и реперы, если они не могут быть опознаны на снимках, также маркируются.

Для определения геодезических координат опознаков применяют аналитические геодезические способы и методы фототеодолитной съемки (в высокогорных районах).

Количество опознаков и их расположение зависят от применяемого способа фотограмметрического сгущения и масштаба карты; их рассчитывают при составлении проекта полевой подготовки снимков по формулам, характеризующим накопление ошибок в фотограмметрических сетях.

Обозначим через m_L среднюю квадратическую погрешность определения планового положения точки фотограмметрической сети. Очевидно,

$$m_L = \sqrt{m_{X_c}^2 + m_{Y_c}^2},$$

где m_{X_c} и m_{Y_c} — составляющие погрешности m_L по осям координат X и Y .

Пусть опорная сеть сгущается способом маршрутной пространственной фототриангуляции без использования элементов внешнего ориентирования снимков. Тогда составляющие погрешности m_L можно найти по формулам (13.115). В результате получим

$$m_L = 0,30 m m_q n^{3/2}. \quad (15.7)$$

где m — знаменатель масштаба снимка, m_q — средняя квадратическая погрешность измерения поперечного параллакса; n — число стереопар между плановыми опознаками.

Величина

$$m_L = M m_l,$$

где m_l — допустимая средняя квадратическая погрешность определения планового положения точки сети на карте, а M — знаменатель масштаба карты. Подставим это значение m_L в выражение (15.7) и найдем n . Получим

$$n = 2.22 \sqrt[3]{\left(\frac{M}{m} \frac{m_l}{m_q}\right)^2}. \quad (15.8)$$

Наставления по топографическим работам требуют, чтобы средняя погрешность δl определения на карте планового положения точки фотограмметрической сети не превышала 0,35 мм. Следовательно, $m_l = \pm 1,25 \delta l = \pm 0,44$ мм.

Пусть для аналитического способа пространственной фототриангуляции $m_q = \pm 0,02$ мм, а для фототриангуляции на универсальном стереопроборе $m_q = \pm 0,04$ мм. Тогда по формуле (15.8) найдем

$$n_a = 17.4 \sqrt[3]{\left(\frac{M}{m}\right)^2} \quad (15.9)$$

для аналитического способа маршрутной фототриангуляции и

$$n_n = 11.0 \sqrt[3]{\left(\frac{M}{m}\right)^2} \quad (15.10)$$

для фототриангуляции на универсальном стереопроборе.

Если $M = 25\ 000$, а $m = 40\ 000$, то $n_a = 13$, а $n_n = 8$.

Теперь найдем число стереопар между высотными опознаками, полагая, что маршрутные пространственные фотограмметрические сети создаются без использования элементов внешнего ориентирования снимков. Для этого применим формулу (13.115), из которой следует

$$n = 2.08 \sqrt[3]{\left(\frac{b m_{z_c}}{f m m_q}\right)^2}. \quad (15.11)$$

где m_{z_c} — средняя квадратическая погрешность определения высоты точки фотограмметрической сети, f — фокусное расстояние фотокамеры, b — базис фотографирования в масштабе снимка, m_q — средняя квадратическая погрешность измерения поперечного параллакса, m — знаменатель масштаба снимка, n — число стереопар между высотными опознаками.

В качестве величины m_{z_c} следует выбирать допустимую среднюю квадратическую погрешность определения высоты, подписываемой на карте.

Пусть $m = 40\ 000$, $f = 0,1$ м, $b = 70$ мм, $m_q = \pm 0,02$ мм и $m_{z_c} = \pm 2,0$ м (район холмистый, масштаб карты 1 : 25 000). Тогда по формуле (15.11) получим $n = 3$.

Зная число стереопар между опознаками, можно подсчитать допустимое расстояние между ними

$$L = Bn = bmn, \quad (15.12)$$

где $B = bm$ — базис фотогафирования.

Дешифрирование выполняется на снимках, фотосхемах или фотопланах. Силовое полевое дешифрирование производят на местности с большим количеством объектов, имеющих особо важное хозяйственное и оборонное значение. К таким объектам относятся населенные пункты, промышленные и гидротехнические сооружения, крупные узлы дорог и др. В других районах выполняют маршрутное полевое дешифрирование, а затем камеральное.

Для дешифрирования городов и крупных населенных пунктов используют увеличенные снимки и материалы крупномасштабных съемок.

Опорную сеть сгущают обычно аналитическим способом пространственной фототриангуляции или на универсальных стереоприборах. В результате сгущения сети каждую пару обеспечивают 4—6 опорными точками, которые используются для ориентирования снимков при составлении топографической карты.

Карту составляют, как правило, на универсальных стереоприборах — на стереопроекторе Г. В. Романовского, стереографе Ф. В. Дробышева и др. В отдельных случаях для составления карты применяют дифференцированные приборы — стереометр Ф. В. Дробышева и трансформатор или проектор.

На универсальном стереоприборе снимают контуры и рельеф и выполняют камеральное дешифрирование. Если на местности много контуров, то в качестве основы для составления карты используют не чистый планшет, а фотоплан или ортофотоплан. Это освобождает оператора от трудоемкой работы по съемке контурной части карты.

Теперь кратко рассмотрим технологию создания карт масштаба 1 : 25 000 стереотопографическим методом на различные районы.

Плоскоравнинные районы. В открытых районах при сечении рельефа 2,5 м аэрофотосъемка выполняется аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 70 или 55 мм в масштабе 1 : 20 000 с перекрытиями снимков $80 \times 30\%$. Залесенные доступные для стереотопографической съемки районы фотографируют аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 100 мм в масштабе 1 : 18 000 с перекрытиями снимков $80 \times 30\%$.

Плановые опознаки располагают рядами поперек аэрофотосъемочных маршрутов на расстоянии, не превышающем восьми базисов фотогафирования. Высотные опознаки размещают по углам секций маршрута, состоящих не более чем из четырех базисов фотогафирования.

Сгущение опорной сети производят аналитическим способом при помощи стереокомпаратора и ЭЦВМ или на стереопроекторе и стереографе.

Контурные на карте получают при помощи фотоплана. Рельеф снимают на стереографе или стереопроекторе или на топографическом стереометре.

Равнинно-пересеченные и всхолмленные районы. Для создания карты открытых районов с сечением рельефа 5 м аэрофотосъемка выполняется аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 70 мм в масштабе 1 : 30 000 с перекрытиями снимков 80 × 30%. В залесенных доступных для стереотопографической съемки районах применяют аэрофотоаппарат с фокусным расстоянием 100 мм; снимки получают в масштабе 1 : 28 000 с перекрытиями 80 × 30%. Тундровые и северные лесотундровые районы фотографируют аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 70 мм в масштабе 1 : 35 000 с перекрытием снимков 80 × 30%.

Плановые и высотные опознаки располагаются рядами поперек аэрофотосъемочных маршрутов на расстоянии восьми базисов фотографирования, а в тундровых и северных лесотундровых районах — на расстоянии десяти базисов фотографирования.

Опорную сеть сгущают аналитическим способом или на стереографе и стереопроекторе. В открытых районах используют показания радиовысотомера и статоскопа, а в залесенных — только показания статоскопа. Для получения контурной части карты составляют фотоплан. Рельеф снимают на стереографах или на топографических стереометрах.

Районы песчаных пустынь. Для создания карты этих районов с сечением рельефа 5 м аэрофотосъемку производят аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 70 или 100 мм в масштабе 1 : 30 000—1 : 34 000 с перекрытиями снимков 80 × 30%.

Точки плановой и высотной привязки снимков размещают рядами поперек аэрофотосъемочных маршрутов на расстоянии восьми базисов фотографирования, по одному планово-высотному опознаку на поперечных перекрытиях маршрутов.

На отдельных участках, где отсутствуют уверенно опознаваемые контуры, дополнительно к основной аэрофотосъемке в том же масштабе прокладывают каркасные маршруты вдоль рядов планово-высотных опознаков (через один ряд). На концах каркасных маршрутов и через каждые 20 км определяют по два высотных опознака, располагаемых по обе стороны от оси маршрута. Опознаки для привязки каркасных маршрутов, как правило, маркируют.

Опорную сеть сгущают аналитическим способом пространственной фототриангуляции или на стереографах и стереопроекторах с использованием показаний статоскопа и радиовысотомера.

Для составления контурной части карты используют фотоплан. Съемку рельефа производят на стереографах, стереопроекторах и топографических стереометрах.

Районы плоскогорий, низких и средних гор. Эти районы фотографируют дважды:

— в масштабе 1 : 25 000—1 : 30 000 аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 100 или 140 мм с перекрытием снимков 60 × 30% (для дешифрирования и редакционных работ);

— в масштабе 1 : 50 000 (для долин) аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 70 мм в открытых районах и 100 мм в зеленых районах с перекрытиями снимков 80 × 30% (для сгущения опорной сети и составления карты).

Аэрофотосъемку в масштабе 1 : 50 000 выполняют после маркировки пунктов государственной геодезической сети и точек съемочной сети или после выбора на местности естественных опознаков.

Планово-высотную подготовку снимков выполняют по одному из двух вариантов:

1. Планово-высотные опознаки размещают на каждом маршруте не реже чем через восемь базисов фотографирования, а в тундровых и лесотундровых районах — не реже чем через десять базисов фотографирования. Крайние стереопары секций обеспечивают двумя планово-высотными опознаками.

2. Планово-высотные опознаки размещают рядами поперек аэрофотосъемочных маршрутов на расстоянии между опознаками в ряду 5—8 км, а между рядами — семь базисов фотографирования. Опознаки размещают по обе стороны оси каркасного маршрута. Через каждые 30 км каркасного маршрута по углам стереопары определяют по три планово-высотных опознака.

В случае применения второго варианта планово-высотной подготовки снимков одновременно с аэрофотосъемкой в масштабе 1 : 50 000 прокладывают каркасные маршруты примерно в том же масштабе с продольным перекрытием 90%. Расстояние между осями каркасных маршрутов — не более семи базисов фотографирования.

Опорную сеть сгущают аналитическим способом пространственной фототриангуляции или на стереографе и стереопроекторе. Оригиналы карт составляют на стереографах и стереопроекторах.

Районы высоких гор. В районах высоких гор аэрофотосъемку и плановую привязку снимков выполняют, как и в районах средних гор (второй вариант). Плановые опознаки определяют геодезическими или фототеодолитными способами.

Опорную сеть сгущают аналитическим способом пространственной фототриангуляции или на универсальных стереоприборах. Оригинал карты составляют на универсальных стереоприборах.

Топографические карты масштаба 1 : 10 000 создают обычно на плоскоравнинные, равнинно-пересеченные и всхолмленные районы. Для картографирования в этом масштабе открытых районов с сечением рельефа 2,5 м аэрофотосъемку выполняют аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 70 или 55 мм в масштабе 1 : 14 000 с перекрытиями снимков 60 × 30%. Зеленые районы, доступные для стереотопографической съемки, фотографируют

аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 100 мм в том же масштабе с перекрытиями снимков $60 \times 30\%$.

Плановые опознаки размещают рядами поперек аэрофото-съемочных маршрутов на расстоянии, не превышающем восьми базисов фотографирования, чтобы на каждом маршруте было по одному опознаку каждого ряда.

Высотные опознаки располагают по углам секций маршрута, состоящих не более чем из четырех стереопар.

Сгущение опорной сети производят аналитическим способом пространственной фототриангуляции или на стереографе и стереопроекторе.

При съемке в масштабе $1 : 10\,000$ с сечением рельефа 1 м в равнинной открытой местности аэрофотосъемка выполняется аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием 70 или 55 мм в масштабе $1 : 12\,000$ с перекрытиями снимков $60 \times 30\%$.

Высотная привязка снимков заключается в определении для каждой стереопары девяти высотных опознаков. Эти опознаки используются для ориентирования стереопар при съемке рельефа на стереографах или стереопроекторах.

При создании карт крупных масштабов точки плановой съемочной сети определяют преимущественно аналитическим методом — прямыми, обратными и комбинированными (боковыми) засечками.

Предельная погрешность координат точки плановой съемочной сети не допускается более 3,5 м при съемке в масштабе $1 : 25\,000$ и 1,4 м при съемке в масштабе $1 : 10\,000$.

Для построения высотного съемочного обоснования применяются методы геодезического и геометрического нивелирования.

В ЦНИИГАиК разработаны технологические схемы аэрофото-топографической съемки в масштабах $1 : 5000$ — $1 : 500$. Целесообразность применения этих схем зависит от района работ, наличия кадров и оборудования, а также от технико-экономических показателей.

Схема № 1 рекомендуется для съемки незастроенных плоско-равнинных, а также для съемки в масштабе $1 : 5000$ и $1 : 2000$ равнинной территории с малоэтажной застройкой.

Аэрофотосъемка выполняется сверхширокоугольным или широкоугольным аэрофотоаппаратом. Для полевого или камерального дешифрирования, а также для планово-высотной подготовки изготавлиются увеличенные снимки. С помощью обычного или щелевого фототрансформатора изготавливается фотоплан. Результаты дешифрирования переносятся с увеличенных снимков на фотоплан. Съемка рельефа и камеральное дешифрирование выполняются на фотоплане с помощью универсальных стереоприборов. Результаты камерального дешифрирования проверяются в поле. Одновременно производится съемка объектов, не изобразившихся на снимках.

Схема № 2 применяется для съемки равнинных и всхолмленных районов.

Аэрофотосъемка производится дважды: сверхширокоугольным или широкоугольным аэрофотоаппаратом для сгущения опорной сети и стереоскопической рисовки рельефа и нормальноугольным или узкоугольным аэрофотоаппаратом — для составления фотоплана. Масштаб снимков для сгущения опорной сети и стереоскопической рисовки рельефа должен быть возможно мелким. В этом случае выполняют сплошную высотную подготовку, а фотограмметрическое сгущение состоит в построении плановых опорных сетей. Масштаб снимков для составления фотоплана в 4—5 раз мельче масштаба плана. Рекомендуется 80- и 90-процентное перекрытие этих снимков, позволяющее готовить фотопланы по принципу «снимок-планшет».

Рисовка рельефа и камеральное дешифрирование выполняются на универсальных стереоприборах. Результаты камеральной обработки снимков проверяются в поле.

Схема № 3 рассчитана на съемку застроенных и незастроенных территорий со значительным расчленением рельефа (исключая съемку в масштабе 1 : 5000 территорий с мелкой малоэтажной застройкой).

Аэрофотосъемка выполняется широкоугольным ($f = 100$ или 140 мм) или нормальноугольным аэрофотоаппаратом (при съемках в масштабах 1 : 1000 и 1 : 500). Выбор типа аэрофотоаппарата зависит от степени расчленения рельефа, заданной высоты сечения его и от плотности и этажности застройки.

Съемка контуров и рельефа производится на универсальных стереоприборах с составлением графического плана.

Схема № 4 рекомендуется для съемки местности с малыми высотами сечения рельефа, покрытой высокой растительностью, а также для съемки территорий со сплошной многоэтажной застройкой в масштабах 1 : 2000—1 : 500.

Фокусное расстояние аэрофотоаппарата может быть от 140 до 500 мм и зависит от масштаба плана, этажности застройки и степени расчленения рельефа. Масштаб снимков в 4—5 раз мельче масштаба плана.

Снимки используются для получения контурной части плана в виде фотоплана или графического плана. Фотоплан составляется на равнинные и всхолмленные районы, покрытые растительностью, и на равнинные районы с мелкой малоэтажной застройкой. Графический план составляется на застроенные территории с сильно расчлененным рельефом и на участки с крупными многоэтажными строениями.

Фотограмметрическое сгущение выполняется аналитическим методом. Составление графического плана и камеральное дешифрирование производятся на универсальных стереоприборах.

Съемка рельефа и объектов, не изобразившихся на снимках, а также контроль дешифрирования выполняются в поле.

Схема № 5 предназначена для съемки горных районов в масштабе 1 : 5000 с высотой сечения рельефа 5 м.

Аэрофотосъемка выполняется одновременно двумя аэрофотоаппаратами, например, с фокусными расстояниями 200 и 100 мм. Мелкомасштабные снимки используются для построения фотограмметрических сетей, а крупномасштабные — для стереоскопической рисовки и дешифрирования. Масштаб снимков для фотограмметрического сгущения может быть в 8—10 раз мельче масштаба создаваемой карты.

ЦНИИГАиК разработал математическую модель задачи технического проектирования и составил программу для ЭВМ, позволяющую выбирать оптимальные варианты съемок в масштабах 1 : 25 000—1 : 2000, выполняемых стереофототопографическим методом.

Для счета на ЭВМ составляется информация:

- 1) общая — масштаб съемки, высота сечения рельефа, требуемая точность определения положения точек местности, критерии оптимизации, характеристика района съемки, размеры участков;
- 2) об используемых технических средствах;
- 3) технологическая — схема и методы съемочного обоснования, методы фотограмметрической обработки и т. д.

На печать выдаются результаты расчетов по оптимальному варианту.

1) сводная смета затрат по всем процессам работ, включающая объемы работ, затраты труда и денежных средств, транспортные расходы (может быть выдана также смета затрат по любому из рассмотренных вариантов проекта);

2) параметры аэрофотосъемки;

3) показатели оптимальности всех вариантов технического проекта.

Карта масштаба 1 : 100 000 создается главным образом на районы, имеющие разреженное геодезическое обоснование. Поэтому в данном случае для сокращения полевых работ по привязке снимков широко применяют показания радиогеодезических станций, радиовысотомера и статоскопа. Местность фотографируют одновременно двумя аэрофотоаппаратами: с фокусным расстоянием 70 мм в масштабе, близком к 1 : 100 000 (формат снимков 18 × 18 см), и с фокусным расстоянием 200 мм в масштабе около 1 : 35 000 (формат снимков 30 × 30 см). Таким образом получают мелкомасштабные снимки для фотограмметрического сгущения опорной сети и составления карты и крупномасштабные снимки для камерального дешифрирования. Продольное перекрытие снимков не меньше 60%, поперечное перекрытие мелкомасштабных снимков не меньше 30%. В процессе аэрофотосъемки фиксируются показания статоскопа и радиовысотомера. Отдельные участки местности, для дешифрирования которых необходимы снимки более крупного масштаба, фотографируются дополнительно с меньших высот. Кроме основных маршрутов аэрофотосъемки, прокладывают каркасные с фиксацией показаний статоскопа, радиовысотомера и радиогеодезических станций. Каркасные мар-

шруты прокладывают перпендикулярно к основным через 40—60 км и параллельно основным через 60—80 км. Эти маршруты образуют радиогодезические полигоны. Для определения координат радиогодезических станций строится радиогодезическая сеть, в которую включаются, кроме этих станций, геодезические пункты.

Полевые работы включают:

— определение координат опорных точек или привязку площадок для определения координат точек фотографирования исходных снимков и вычисления коэффициента перехода от числа циклов к приращением расстояний,

— определение высот четырех точек для стереопар каждого каркасного маршрута, удаленных друг от друга на 40—50 км,

— прокладку маршрутов дешифрирования с созданием эталонов для камерального дешифрирования снимков,

— определение координат астрономических пунктов, если нет геодезической сети.

Камеральные работы начинаются с обработки каркасных маршрутов и дешифрирования снимков по эталонам. По радиогодезическим данным вычисляют плановые координаты точек фотографирования. В результате пространственной фототриангуляции по каркасным маршрутам определяют опорные точки для основных маршрутов. Затем развивают фотограмметрические сети по основным маршрутам. Фотограмметрические сети создаются аналитическим способом или на универсальных стереоприборах. Для составления оригинала карты применяют мультиплекс в горных районах и топографический стереометр в равнинных.

Приведенные выше технологические схемы непрерывно совершенствуются в связи с повышением точности стереофотограмметрических способов. Поэтому возникает возможность дальнейшего сокращения объема геодезического обоснования и применения новых способов фиксации в полете элементов внешнего ориентирования снимков.

ОБНОВЛЕНИЕ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ КАРТ

§ 125. СТАРЕНИЕ КАРТ И НЕОБХОДИМОСТЬ
ИХ ОБНОВЛЕНИЯ

С течением времени на местности происходят изменения: возникают новые населенные пункты, растут старые, появляются новые дороги и лесонасаждения, изменяются рельеф и гидрография.

Особенно значительные изменения на местности бывают в связи со строительством крупных гидротехнических сооружений. Например, в результате строительства канала им. Москвы создано 7 крупных водохранилищ и 8 гидростанций. За годы существования канала совершенно изменился вид районов, прилегающих к его трассе: на месте лесов и болот возникли новые населенные пункты и промышленные предприятия. Природа, преобразованная водными просторами канала им. Москвы, и красивые архитектурные сооружения превратили эту часть Подмосковья в место излюбленного отдыха и массовых экскурсий.

В результате изменений на местности карта постепенно стареет. Пользоваться такой картой затруднительно, а иногда и невозможно.

Таким образом, топографические карты необходимо систематически обновлять.

Процесс старения карты не является одинаковым для различных районов. Местность изменяется быстрее, если она больше осваивается человеком. Соответственно и старение карты такой местности происходит быстрее. Наоборот, в слабо освоенных и мало обжитых районах на местности в течение десятилетий не возникает существенных изменений. Карты таких районов стареют медленно. Опыт показал, что карты наиболее важных для развития производительных сил и обороны страны обжитых районов следует обновлять через 6—10 лет, а карты других районов — через 10—15 лет и более.

Независимо от этой периодичности карты обновляют при наличии на местности следующих происшедших с момента съемки существенных изменений:

— изменений сети магистральных и кольцевых железных и шоссейных дорог,

— крупных изменений населенных пунктов, а также появления новых крупных промышленных и сельскохозяйственных предприятий, расположенных вне населенных пунктов,

— изменений в гидрографии, вызванных строительством крупных гидротехнических, ирригационных и мелиоративных сооружений,

— крупных изменений в растительном покрове, затрудняющих ориентирование на местности по карте.

Однако не только изменения на местности вызывают необходимость обновления карт. Переход к новой системе геодезических координат, изменение начала отсчета высот точек местности, переименование населенных пунктов, изменение методики транскрипции географических названий, введение новых условных знаков — все это также является причиной обновления карт.

Топографические карты обновляются с целью приведения их содержания в соответствие с современным состоянием местности и переиздания карт в принятой системе координат и высот и в действующих условных знаках.

Содержание, точность и оформление обновленной карты должны удовлетворять всем требованиям, предъявляемым к карте данного масштаба наставлениями и руководствами по топографическим работам.

§ 126. МЕТОДЫ ОБНОВЛЕНИЯ КАРТ

Информация об изменениях на местности, происшедших после создания обновляемой карты, получается путем аэрофотосъемки местности, по новым картографическим материалам или непосредственно на местности в процессе ее рекогносцировки.

В зависимости от вида используемой информации об изменениях на местности различают три метода обновления карт:

— по снимкам с последующим полевым обследованием или без него;

— по современным топографическим картам, как правило, более крупного масштаба по сравнению с масштабом обновляемой карты;

— приемами инструментальной мензульной съемки на местности.

Основным методом является метод обновления карт по снимкам. Он применяется для обновления карт различных масштабов — от 1 : 10 000 до 1 : 100 000, необходимых для нужд народного хозяйства и обороны страны.

Карты, масштаб которых меньше 1 : 100 000, обновляются или пересоставляются по картам более крупных масштабов. Этот метод обновления карт рассматривается в картографии.

Обновление карт приемами мензульной съемки выполняют в редких случаях, на участках, не покрытых аэрофотосъемкой.

Обновление карт по снимкам включает следующие основные процессы:

- 1) аэрофотосъемку,
- 2) подготовительные работы,
- 3) камеральное дешифрирование снимков и исправление карты,
- 4) полевое обследование обновленной карты.

Плановым обоснованием при обновлении карт служат пункты государственной триангуляции, полигонометрии, точки съёмочной сети и полевой подготовки снимков, как использованные при создании обновляемой карты, так и полученные после ее создания. Кроме того, при обновлении карт масштабов 1 : 50 000 и 1 : 100 000 в качестве планового обоснования используются надежно опознаваемые на новых снимках четкие контуры, выбранные на обновляемой карте.

Высотным обоснованием служат реперы и марки нивелирования, пункты триангуляции и полигонометрии, точки съёмочной сети и полевой подготовки снимков, а также отметки высот на обновляемой карте, опознанные на новых снимках.

Плановое и высотное обоснование используется как опора для переноса со снимков на карту изменений местности и для геодезического ориентирования фотограмметрических сетей.

Фотограмметрические сети строятся для решения следующих задач:

1) определение дополнительных опорных точек, необходимых для исправления карты по снимкам или для составления отдельных ее частей заново, а также для составления фотопланов;

2) проверка точности карт, подлежащих обновлению.

Фотограмметрические сети строятся, как правило, аналитическим способом или на универсальных стереоприборах.

Аэрофотосъемку производят не ранее чем за один год до начала камеральных работ по обновлению карты.

С целью сокращения полевых работ в отдельных случаях выполняют одновременное двухмасштабное фотографирование местности основным и вспомогательным аэрофотоаппаратами. При этом основной аэрофотоаппарат снабжается гиросtabilизирующей установкой и радиовысотомером.

Снимки, полученные основным аэрофотоаппаратом, используются для построения фотограмметрических сетей и исправления карты, а снимки, полученные вспомогательным аэрофотоаппаратом, — для более уверенного дешифрирования контуров и предметов местности.

В зависимости от физико-географических условий местности, масштаба обновляемой карты и принятой технологии камерального исправления ее содержания для производства аэрофотосъемки применяются различные варианты (табл. 18).

В остальном требования к аэрофотосъемке не отличаются от тех, которые предъявляются при составлении топографических карт.

При обновлении карты масштаба 1 : 100 000, а также карт на труднодоступные районы аэрофотосъемка и другие процессы выполняются по особым указаниям.

Для получения оригинала обновленной карты используются различные основы:

— фотопланы, составленные по новым снимкам;

Масштаб обновляемой карты	Основная аэрофотосъемка		Вспомогательная аэрофото- съемка	
	масштаб	фокусное расстоя- ние АФА, мм	масштаб	фокусное расстоя- ние АФА, мм
1 : 10 000	1 : 14 000—1 : 18 000	200	—	—
1 : 25 000	1 : 14 000—1 : 18 000	100	1 : 7000—1 : 9000	200
	1 : 20 000—1 : 25 000	200		—
1 : 50 000	1 : 40 000	100	1 : 20 000	200
	1 : 25 000	200	—	—
	1 : 35 000	100—140	—	—
	1 : 50 000	100	1 : 25 000 (формат снимка 30 × 30 см)	200

— абрисные копии, изготовленные с издательских оригиналов обновляемой карты на прозрачном пластике;

— абрисные копии, изготовленные с издательских оригиналов обновляемых карт на чертежной бумаге или фотобумаге, наклеенной на жесткую основу;

— издательские оригиналы обновляемой карты.

Выбор основы зависит от количества изменений, происшедших на местности со времени создания карты, характера контуров и рельефа и точности их изображения на карте.

Фотопланы используются при обновлении карт равнинных районов с большим количеством контуров, когда изменения на местности превышают 40%.

Абрисные копии на прозрачных пластиках применяются при обновлении карт на равнинные и всхолмленные районы, где рельеф позволяет трансформировать снимки на 1—2 плоскости, а изменения на местности составляют не более 40%. В этом случае кроме абрисных копий можно использовать и фотопланы.

Абрисные копии на бумаге изготавливаются коричневыми, черными, голубыми и двухцветными. Коричневые и черные копии применяются для обновления карт любых районов, когда изменения в контурах небольшие — до 30% и нет необходимости исправлять рельеф на обновляемой карте. Голубые копии используются для обновления карт любых районов при большом количестве изменений в контурах и рельефе. На двухцветных копиях контуры изображаются голубым цветом, а рельеф — коричневым. Они рекомендуются при больших изменениях в контурах и незначительных изменениях в рельефе.

Издательские оригиналы применяются при исправлении карт мало контурной местности, когда количество изменений на местности небольшое.

Технологию и организацию работ по обновлению карт устанавливают после изучения и анализа планово-высотной основы обновляемой карты, характера местности и происшедших на ней изменений со времени создания карты, а также аэросъемочных и других материалов, которые должны быть использованы при обновлении карт.

§ 127. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Подготовительные работы содержат:

- сбор и систематизацию материалов, необходимых для обновления карт, и определение степени и порядка их использования;
- проверку точности обновляемой карты и определение количества и характера изменений, происшедших на местности;
- разработку технического проекта обновления карт;
- изготовление основ для обновления карт.

Собирают и систематизируют следующие материалы:

- издательские или составительские оригиналы обновляемой карты и формуляры;
- каталоги координат геодезических пунктов, пунктов нивелирования и точек съемочной сети;
- материалы аэрофотосъемки, выполненной для обновления карт;
- тиражные оттиски обновляемой карты и карт более крупных масштабов;
- снимки с точками полевой подготовки, полученными для создания обновляемой карты или карт других масштабов, а также эталоны дешифрирования;
- кальки высот, если обновляемая карта создана по материалам мензульной съемки или комбинированным методом аэрофото топографической съемки;
- дежурные карты с данными об изменениях на местности;
- технические отчеты и проекты ранее выполненных в данном районе топогеодезических работ;
- специальные карты и планы — морские карты, планы городов и др.;
- литературно-справочные материалы — справочники административно-территориального деления СССР, топографические и географические описания и др.

Основными материалами из названных выше служат материалы аэрофотосъемки, полученные для обновления карт, и новые топографические карты, созданные после издания обновляемой карты. Все остальные материалы — вспомогательные.

Наличие основных и вспомогательных материалов показывается на схемах. Кроме того, на схемах приводится характеристика материалов и отмечается порядок их использования.

Точность обновляемой карты определяется в результате изучения и анализа собранных материалов или путем построения фотограмметрических сетей по новым снимкам.

Пригодными для обновления без дополнительной проверки точности карты по снимкам, как правило, являются следующие карты:

— карты, созданные в соответствии с действующими наставлениями и руководствами по производству топографических работ;

— карты, созданные комбинированным методом аэрофототопографической съемки;

— карты, созданные стереотопографическим методом аэрофототопографической съемки;

— карты, составленные по материалам крупномасштабных топографических съемок.

В необходимых случаях точность карт проверяется дополнительно путем построения фотограмметрических сетей, путем проектирования отдельных снимков на карту с помощью проектора и на стереофотограмметрических приборах.

В качестве точек фотограмметрических сетей выбирают геодезические пункты, точки съемочной сети и полевой подготовки снимков, а также контурные точки и характерные точки рельефа, камерально опознанные на снимках и карте. Эти же точки используют для геодезического ориентирования фотограмметрических сетей.

Карта считается пригодной для обновления, если предельные отклонения точек карты от соответствующих точек фотограмметрической сети не больше 0,6 мм в плане (для горных, высокогорных и пустынных районов — 1,0 мм), а по высоте для точек, высоты которых подписаны на карте, — не больше величин в метрах, указанных в табл. 19.

Т а б л и ц а 19

Районы	Масштаб обновляемой карты		
	1 : 10 000	1 : 25 000	1 : 50 000
Равнинные, пересеченные и всхолмленные с преобладающими углами наклона до 6°	1,2	2,4	4,5
Горные, предгорные и песчаные пустыни	3,8	3,8	6,5
Высокогорные	—	7,5	13,0

Изображение рельефа на обновляемой карте проверяется путем сопоставления его форм, отображенных на карте, с формами, наблюдаемыми при стереоскопическом рассматривании новых снимков.

Если ошибки положения точек карты в плане и по высоте больше допустимых, то соответствующие участки карты должны быть сняты вновь в процессе обновления карты.

Технический проект составляется на карте (схеме). К проекту прилагается пояснительная записка.

На карте показываются разграфка листов обновляемой карты, границы района работ, намеченные методы обновления карт и другие данные.

В пояснительной записке излагаются:

— краткая характеристика физико-географических условий района работ и их влияние на выбор метода обновления карт;

— характеристика обновляемой карты;

— наличие и порядок использования плано-высотной основы;

— методы и технология обновления карты с указанием допусков для отдельных процессов;

— характеристика основных и вспомогательных материалов и порядок их использования при обновлении карты;

— перечень материалов, подлежащих сдаче после выполнения камеральных и полевых работ;

— организация контроля и приемки работ.

В отдельных случаях вместо технического проекта составляются редакционно-технические указания по камеральному исправлению карты. В этих указаниях отражаются организация и технология камеральных работ и приводится перечень материалов, подлежащих сдаче для полевых работ.

Абрисные копии изготавливаются с издательских оригиналов карт или их дубликатов. Дубликатные оттиски, полученные на бумаге, предварительно наклеиваются на жесткую основу. При этом если оттиск имеет значительную деформацию, то для изготовления копии он монтируется на жесткую основу по геодезическим пунктам и координатной сетке.

В качестве жесткой основы абрисных копий служат алюминиевые листы, обклеенные с обеих сторон плотной бумагой. Кроме того, на лицевую сторону листа наклеивают чертежную бумагу для изготовления коричневых, голубых и двухцветных копий или матовую фотобумагу для изготовления черных фотокопий.

Прозрачной основой абрисных копий служат малодеформирующиеся пластики.

Фотопланы составляются обычно в масштабе обновляемой карты. При обновлении карт масштаба 1 : 100 000 фотопланы могут создаваться в более крупном масштабе — 1 : 75 000 или 1 : 50 000.

Плановой основой для составления фотопланов служат все точки геодезического обоснования съемки и контурные точки обновляемой карты, уверенно опознанные на новых снимках. Если этих точек недостаточно для трансформирования снимков, то строятся фотограмметрические сети.

При достаточном количестве опознанных контурных точек монтаж трансформированных снимков можно производить по этим точкам на копии карты или старого фотоплана, изготовленных на жесткой основе.

На фотоплан переносят рельеф с обновляемой карты с помощью проектора, пантографа или фотомеханическим способом в процессе изготовления репродукций с фотоплана.

§ 128. КАМЕРАЛЬНОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ СНИМКОВ И ИСПРАВЛЕНИЕ КАРТЫ

К выполнению этих процессов исполнители приступают после изучения технического проекта обновления карты или редакционно-технических указаний.

Для камерального дешифрирования используют основные снимки, предназначенные для исправления карты. Если карта обновляется на фотопланах, то и дешифрирование производится непосредственно на фотопланах.

Кроме основных снимков или фотопланов, при дешифрировании используются цветные тиражные оттиски обновляемой карты, вспомогательные крупномасштабные снимки и другие материалы, собранные для обновления карты.

Чтобы уверенно распознать объекты местности, подлежащие отображению на карте, снимки рассматривают стереоскопически с помощью стереоскопа, интерпретоскопа и других стереоприборов. Если для исправления карты применяются универсальные стереоприборы, то и дешифрирование снимков выполняется с помощью этих приборов.

При дешифрировании проверяют полноту и правильность изображения на карте контуров, местных предметов и их взаимное положение, а также определяют характеристики объектов. Одновременно проверяют изображение на карте форм рельефа, наблюдаемых по снимкам стереоскопически. Участки карты, подлежащие исправлению, отмечают.

При обновлении карты на фотопланах, а также в случае составления отдельных участков карты дешифрируют все объекты, изобразившиеся на снимках и подлежащие нанесению на карту. В остальных случаях дешифрируются только изменившиеся и появившиеся объекты местности, которые должны быть показаны на обновляемой карте.

Как правило, по снимкам дешифрируются следующие основные объекты:

— все новые населенные пункты, промышленные и сельскохозяйственные предприятия, расположенные вне населенных пунктов, а также изменения в планировке и застройке населенных пунктов;

— вновь построенные и строящиеся железные, шоссейные, улучшенные и проселочные грунтовые автомобильные дороги, насыпи и выемки на дорогах и другие изменения дорожной сети;

— вновь построенные и строящиеся плотины, каналы и другие гидротехнические сооружения, а также связанные с ними изменения на местности — появление водохранилищ, мостов и т. д.;

— изменения в начертании контуров растительности;

— изменения в рельефе местности — новые очертания обрывов, осыпей, карьеров, оврагов и промоин.

При обновлении карт без полевого обследования названия новых населенных пунктов, классификация и характеристика дорожной сети и других объектов определяются по вспомогательным материалам. Количественная характеристика дорог, просек и некоторых других элементов местности может быть получена по снимкам.

Результаты дешифрирования вычерчиваются на фотоплане или на снимках в соответствии с принятыми условными знаками.

Способ исправления карты выбирается в зависимости от основы, на которой должны быть отображены изменения, возникшие на местности, а также от количества и характера этих изменений и качества обновляемой карты.

В качестве планового и высотного обоснования для исправления карты служат опорные точки, использованные при составлении обновляемой карты, контурные точки карты, опознанные на снимках, и точки фотограмметрических сетей, построенных по новым снимкам.

Если для обновления карты используется прозрачная абрисная копия, то изменения со снимков на эту копию переносят путем копирования. Для этого снимки трансформируют в масштабе обновляемой карты по опорным точкам или по контурам карты. Трансформированные снимки получают на полутоновой фотопленке или фотобумаге. Абрисная копия размещается на монтажном столе. Правый снимок стереопары кладут под копию и совмещают его точки с соответствующими точками копии. Левый снимок накладывают на копию. Стереоскопически рассматривая снимки и копию, выявляют изменения контуров и рельефа. Исчезнувшие объекты удаляют с копии, а появившиеся вычерчивают. Исправляют и изображение рельефа. Участки с грубыми ошибками в изображении рельефа отмечают и исправляют с помощью стереофотограмметрических приборов.

При обновлении карт на издательских оригиналах или абрисных копиях с них, изготовленных на бумаге или фотобумаге, изменения со снимков переносятся с помощью универсальных стереоприборов, оптических проекторов и рычажных пантографов.

Универсальные стереоприборы применяются, как правило, при обновлении карт горных, предгорных и высокогорных районов, когда изменения в контурах значительны, а также в случаях, когда необходимо исправить рельеф или пересоставить отдельные участки карты.

Оптические проекторы применяются при обновлении карт равнинных и всхолмленных районов при значительных изменениях в контурах.

Рычажные пантографы используются при обновлении карт равнинных и всхолмленных районов, когда масштаб снимков крупнее масштаба карты и углы наклона их не превышают 2° .

Если район равнинный, то отдельные объекты можно переносить со снимков на карту пропорциональным циркулем. В этом случае положение объекта на карте определяется засечками по расстояниям, измеренным от трех ближайших контурных точек, а если объект расположен на прямолинейном контуре, то по расстояниям от двух точек, находящихся на этом контуре.

При обновлении карты на фотоплане или голубой абрисной копии на них вычерчиваются в условных знаках все элементы содержания карты, а при обновлении карты на коричневой (черной) копии или издательском оригинале вычерчиваются только изменения.

Если предусмотрено полевое обследование обновляемой карты, то тушью вычерчивают только те элементы, правильность изображения которых на карте не вызывает сомнения. Остальные оставляют вычерченными в карандаше для проверки их в поле.

В результате камерального дешифрирования и исправления карты на каждый лист обновляемой карты получают следующие материалы:

- исправленный и вычерченный оригинал карты;
- комплект снимков для полевого обследования карты;
- тиражный оттиск карты или восковку с отмеченными элементами, подлежащими проверке на местности.

В формуляре кроме сведений о методике и технологии создания карты приводятся данные о выполненных работах по камеральному исправлению оригинала карты: результаты проверки точности карты; планово-высотная основа; характеристика основных и вспомогательных материалов, использованных при исправлении карты; способ и точность нанесения новых контуров и объектов местности; результаты проверки и оценки качества камеральных работ и сводок по рамкам оригинала карты; заключение о пригодности оригинала карты для издания или необходимости полевого обследования.

В случае когда полевое обследование исправленного в камеральных условиях оригинала карты не требуется, его передают для издания.

§ 129. ПОЛЕВОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ОБНОВЛЕННОЙ КАРТЫ

Полевое обследование исправленных в камеральных условиях оригиналов обновляемой карты выполняется путем сличения их с местностью и включает:

- проверку исправленных оригиналов карты и нанесение на него объектов, появившихся после аэрофотосъемки, а также объектов, не изобразившихся на снимках;
- проверку имеющихся и сбор недостающих на карте географических названий, пояснительных подписей, количественных и качественных характеристик объектов местности;
- обследование пунктов геодезической сети.

В зависимости от количества и характера изменений,

перенесенных на оригинал карты, и физико-географических особенностей местности производят полное полевое обследование или частичное — по отдельным маршрутам.

При полном полевом обследовании проверяются все элементы содержания карты. Маршрутное полевое обследование выполняется по дорогам, населенным пунктам, рекам и другим важным направлениям, где необходимо проверить наличие и правильность изображения на карте объектов местности и собрать их недостающие характеристики.

Если изменений в контурах много, то их сначала дешифрируют на снимках, а затем переносят на оригинал карты способами, изложенными выше. Отдельные объекты местности, не изобразившиеся на снимках, наносят на оригинал карты инструментально приемами мензульной съемки с точек съемочной сети или с переходных точек, специально определенных для этой цели.

Точность исправленного оригинала карты проверяется, как правило, на участках полного полевого обследования обновляемой карты. Проверка выполняется инструментально с точек планово-высотной основы карты.

На этих же точках проверяется или определяется склонение магнитной стрелки. Количество точек, на которых определено склонение магнитной стрелки, должно быть не менее четырех. Среднее значение склонения подписывается на оригинале карты.

Собранные в процессе полевого обследования названия населенных пунктов и других объектов местности подписываются на оригинале обновляемой карты.

При определении недостающих и проверке показанных на карте количественных и качественных характеристик объектов местности особое внимание обращается на объекты, характеризующие проходимость, защитные и маскировочные свойства местности (дороги, мосты, переправы, реки, болота, гидротехнические сооружения, овраги, древесная растительность, подземные сооружения и т. п.).

На местности обследуются пункты государственной геодезической сети, отображенные на обновляемой карте и появившиеся после ее создания. При этом устанавливаются сохранность наружного знака, верхнего центра, окошки и ориентирных пунктов и пригодность знака для наблюдений.

Пункты, на которых не сохранился наружный знак и верхний центр, потеряли значение ориентиров на местности. Они показываются на оригиналах обновляемой карты своим условным знаком.

Результаты обследования пунктов геодезической сети отражаются в формулярах.

На основании результатов полевого обследования оригиналов карты делается вывод о качестве ее обновления и пригодности оригиналов для подготовки к изданию. Этот вывод записывается в каждом формуляре.

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПЛАНЕТ
И ИХ СПУТНИКОВ

§ 130. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Новые перспективы развития фотограмметрии открылись в связи с созданием искусственных спутников Земли и автоматических межпланетных станций.

4 октября 1957 г. в Советском Союзе был запущен первый искусственный спутник Земли.

Выдающимся достижением советских ученых являются фотографии обратной стороны Луны, впервые полученные в октябре 1959 г. с автоматической межпланетной станции. Станция прошла на близком расстоянии от Луны, обогнула ее и по заданной программе произвела фотографирование диска Луны, не видимого с Земли.

Снимки Луны, полученные с автоматических станций «Луна-3» и «Зонд-3» использованы для картографирования нашего естественного спутника (см. «Атлас обратной стороны Луны», изд-во «Наука», 1967).

На станциях «Луна-3» и «Зонд-3» действовали фототелевизионные системы, представляющие собой соединение фотоаппарата, проявочного устройства, телевизионной камеры и радиопередатчика. Изображение Луны экспонировалось на фотопленке и проявлялось на борту станции, затем просматривалось телекамерой и передавалось на Землю в виде электрических сигналов. На Земле эти сигналы принимались и с помощью фототелеграфного аппарата снова преобразовывались в фотографическое изображение.

Космическая станция «Зонд-6» сфотографировала Луну с близкого расстояния и доставила заснятую пленку на Землю. На рис. 272 представлена фотография обратной стороны Луны (восточный сектор) и нашей планеты, сделанная в ноябре 1968 г. автоматической станцией «Зонд-6», находившейся на расстоянии 3,3 тыс. км от края Луны и около 388 тыс. км от Земли.

Фотоаппарат, установленный на станции «Зонд-6», имеет объектив с фокусным расстоянием 400 мм и относительным отверстием 1 : 6,3. Формат снимка 13 × 18 см.

Фототелевизионная система, примененная на «Зонде-3», характеризуется информативной емкостью $1100 \times 1100 = 1210$ тыс. черных и белых элементов. На снимке, полученном со станции «Зонд-6», таких элементов 134 млн.

Таким образом, существенным преимуществом фотографической системы перед фототелевизионной является значительное

повышение разрешающей способности изображения. Кроме того, фотоснимки воспроизводят больше градаций яркости, а искажения их меньше по сравнению с фототелевизионными снимками.

Успешный полет космической станции «Венера-4» в 1967 г. сделал возможным проведение первых прямых измерений в атмосфере этой загадочной планеты на расстоянии свыше 70 млн. км от Земли. В мае 1969 г. совершили мягкую посадку на Венеру



Рис. 272

наши автоматические станции «Венера-5» и «Венера-6», которые продолжили исследования, начатые станцией «Венера-4», и дали выдающиеся научные результаты.

Снимки планет и их спутников, полученные с космических станций, можно успешно использовать при решении картографических задач. Для этого необходимо знать геометрические свойства этих снимков.

§ 131. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СНИМКОВ ПЛАНЕТ И ИХ СПУТНИКОВ

Пусть планета или спутник представляет собой шар с радиусом R (рис. 273). Этот рисунок сделан в плоскости, проходящей через центр планеты Q и точку фотографирования S .

Для высоты фотографирования 200 км $2r = 3120$ км, $P = 7762$ тыс. км, для высоты 500 км $2r = 4772$ км, $P = 18\,563$ тыс. км², для 1000 км — $2r = 6408$ км, $P = 34\,600$ тыс. км.

В табл. 20 приведены значения величин r' и P'' для различных высот фотографирования H и углов поля зрения камер 2β ($R = 6371,1$ км).

Таблица 20

$2\beta^\circ$	$H, \text{ км}$					
	200		500		1000	
	$2r', \text{ км}$	$P'', \text{ тыс. км}^2$	$2r', \text{ км}$	$P'', \text{ тыс. км}^2$	$2r', \text{ км}$	$P'', \text{ тыс. км}^2$
60	232	53	585	342	1186	1 406
90	406	164	1043	1087	2190	4 796
120	729	531	2007	4028	6408	34 600

Из табл. 20 следует, что, если угол поля зрения фотокамеры не превышает 120° , то при фотографировании с высот меньше 1000 км на одном снимке изобразится только часть наблюдаемой поверхности планеты, радиус которой равен 6371,1 км. Фотокамера с полем зрения 120° позволяет получить на одном снимке изображение всей видимой с точки фотографирования поверхности данной планеты при высоте полета около 1000 км.

Принимая поверхность планеты за горизонтальную плоскость, касательную в точке N , можно найти по снимку расстояние между точками N и B

$$D = NE'' = H \operatorname{tg} \beta. \quad (17.8)$$

В действительности это расстояние определяется дугой

$$s = \overset{\frown}{NB} = R\theta'. \quad (17.9)$$

Таким образом, влияние кривизны планеты

$$\delta D = D - s = H \operatorname{tg} \beta - R\theta'. \quad (17.10)$$

Это влияние можно уменьшить, если при определении расстояния D по снимку увеличить высоту H , например, на величину

$$h' = R(1 - \cos \theta'). \quad (17.11)$$

В результате фотографирования планеты получают обычно не горизонтальный снимок, представленный на рис. 273, а наклонный. Но наклонный снимок можно преобразовать в горизонтальный.

С целью уменьшения влияния кривизны планеты наклонные снимки следует трансформировать не на плоскость, касательную в точке N , а на плоскость, расположенную ниже точки N , например на плоскость BB' .

Если поставить условие, чтобы изображение точки B на трансформированном снимке не имело искажений за кривизну планеты, то удаление плоскости трансформирования от точки S можно найти по формуле

$$H' = R\theta' \operatorname{ctg} \beta, \quad (17.12)$$

где θ' — центральный угол, стягивающий дугу NB .

Снимок, изображающий значительную часть планеты, может быть трансформирован не только на плоскость, но и на поверхность касательного или секущего конуса, а также на поверхность шара соответствующего радиуса.

Пусть элементы ориентирования снимка P известны (рис. 274). Точка A , находящаяся на поверхности планеты, изображается в точке a . Обозначим плоские координаты точки a через x и y . По формулам (1.6) найдем пространственные координаты этой точки X', Y', Z' . Зная эти координаты, получим горизонтальный и вертикальный углы γ и β , определяющие направление с точки фотографирования S на точку A планеты,

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{X'}{Y'}, \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{\sqrt{X'^2 + Y'^2}}{Z'}. \quad (17.13)$$

Из треугольника SAO следует, что расстояние от точки S до точки A можно вычислить по формуле

$$D' = (R+H) \frac{\sin \beta}{\sin(\beta+\theta)} = R \frac{\sin \theta}{\sin \beta}, \quad (17.14)$$

где θ — центральный угол, стягивающий дугу NA . Для определения этого угла служит формула (17.6).

Теперь найдем по снимку расстояние на планете между точками A и B (рис. 275).

Сначала измерим координаты x и y изображений этих точек на снимке. Затем по формулам (1.6) вычислим пространственные координаты изображений точек A и B , а по формулам (17.13) — горизонтальные и вертикальные углы направлений из точки фотографирования S на точки A и B . Применяя равенство (17.6), получим углы θ_1 и θ_2 . Из сферического треугольника NAB следует

$$\cos \theta_3 = \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos(\gamma_2 - \gamma_1), \quad (17.15)$$

$$D_3 = \sphericalangle AB = R\theta_3. \quad (17.16)$$

Вообразим на планете сеть условных меридианов и параллелей, приняв за полюс точку надира N (см. рис. 273).

На горизонтальном снимке условные меридианы, т. е. дуги больших кругов, проходящих через точку надира N , изображаются в виде прямых, сходящихся в главной точке снимка o (рис. 276). При этом углы между меридианами на снимке равны соответствующим горизонтальным углам на планете. Условные

параллели изображаются в виде концентрических окружностей с центром в главной точке снимка. Радиус окружности, изображающей параллель на снимке, найдем по формуле (см. рис. 273)

$$r'' = r' \frac{f}{H+h'} = \frac{f}{1 + \frac{H}{R} - \cos \theta'} \sin \theta'. \quad (17.17)$$

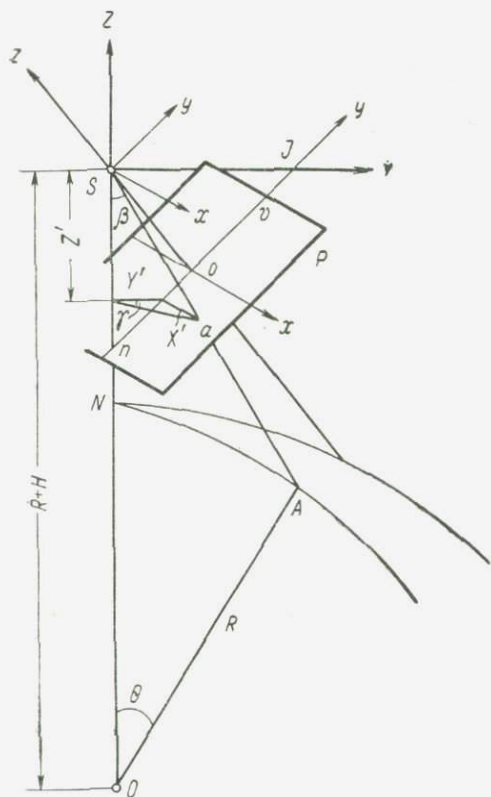


Рис. 275

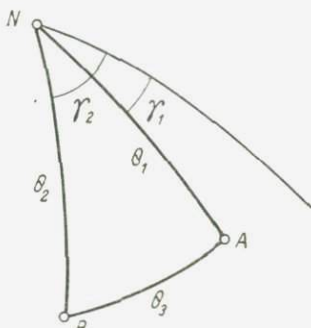


Рис. 274

Расстояния на снимке между соседними параллелями убывают при удалении от центра снимка.

Таким образом, масштаб горизонтального снимка планеты — величина переменная. Максимальное значение, равное $f : H$, он имеет в центре снимка и минимальное — в углах.

На наклонном снимке условные меридианы изображаются прямыми, проходящими через точку надир n (рис. 277). Угол φ между изображением меридиана и горизонталью, проведенной через точку n , связан с соответствующим углом ψ на планете выражением (1.51)

$$\operatorname{tg} \psi = \cos \varepsilon \operatorname{tg} \varphi.$$

Рис. 276

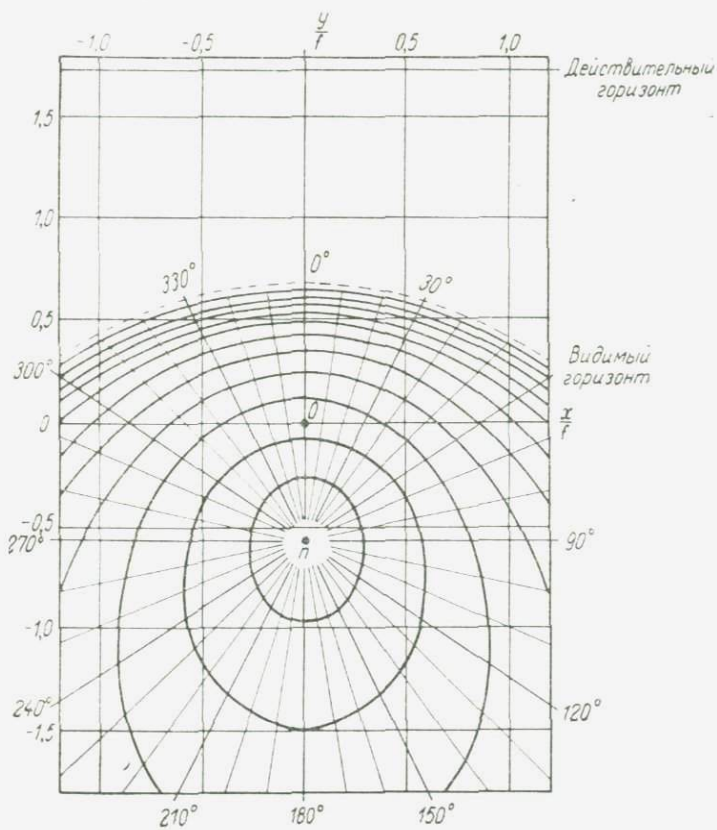
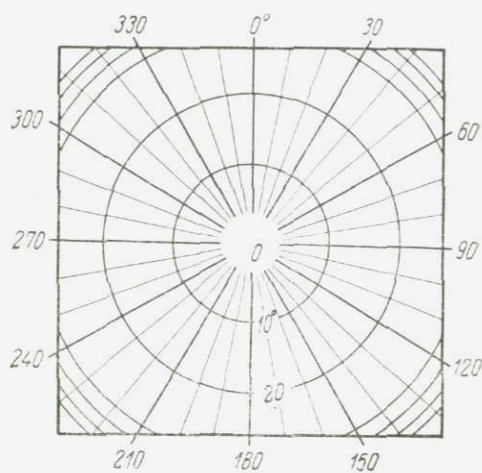


Рис. 277

Уравнение условной параллели представляет собой уравнение окружности с центром в точке N (см. рис. 273)

$$X^2 + Y^2 = r^2.$$

Чтобы найти кривую, изображающую условную параллель на снимке, подставим в это уравнение значения X и Y из равенств (1.23). После преобразований получим

$$H^2 x^2 + (H^2 \cos^2 \varepsilon - r^2 \sin^2 \varepsilon) y^2 + 2f(H^2 + r^2) y \sin \varepsilon \cos \varepsilon + f^2 (H^2 \sin^2 \varepsilon - r^2 \cos^2 \varepsilon) = 0 \quad (17.18)$$

— уравнение эллипса или гиперболы с координатами центра

$$x_0 = 0, \\ y_0 = -\frac{2f(H^2 + r^2) \sin \varepsilon \cos \varepsilon}{H^2 \cos^2 \varepsilon - r^2 \sin^2 \varepsilon}. \quad (17.19)$$

Взаимно перспективные сетки условных меридианов и параллелей (см. рис. 277) можно использовать для переноса объектов со снимка на карту.

Выше предполагалось, что поверхность планеты шаровая. В действительности она может быть более сложной. Изобразить рельеф планеты можно путем построения модели по паре снимков и проектирования этой модели на планшет.

Влияние кривизны планеты на определение высот в этом случае можно найти по формуле (13.101)

$$\delta Z = Z_r - Z = -\frac{X^2}{2R},$$

где X — расстояние от точки надира N до точки планеты, высота которой определяется, например, до точки B (см. рис. 273, $X = NB$).

Пусть задана величина допустимой ошибки, вызванной влиянием кривизны планеты. Тогда участок, в пределах которого можно производить съемку рельефа, имеет вид круга с центром в точке надира N и радиусом

$$X = \sqrt{2R\delta Z}. \quad (17.20)$$

При съемке рельефа за пределами этого круга необходимо вводить поправки за кривизну планеты с помощью специального приспособления. Если в стереопроборе такого приспособления нет, то съемка рельефа может быть произведена по зонам.

§ 132. ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В настоящее время большое внимание уделяется развитию дистанционных методов изучения земной поверхности, которые основаны на использовании искусственных спутников Земли, снабженных специальной аппаратурой.

Разработка этих методов объясняется необходимостью разведки природных ресурсов в глобальном масштабе.

Основными преимуществами дистанционных методов изучения поверхности Земли по сравнению с обычной аэрофотосъемкой являются:

1. Возможность получения информации о любом районе земного шара, а также о всей поверхности Земли в мирное и военное время.

2. Возможность получения глобальной информации в короткие сроки. Спутник, летящий со скоростью 28 000 км/ч, совершает один оборот вокруг Земли за 1,5 ч (высота орбиты 300 км). Самолет это расстояние может преодолеть за 42 ч при условии непрерывного полета.

При полете на полярной орбите высотой около 500 км спутник, оснащенный соответствующей аппаратурой, способен заснять всю поверхность земного шара за 4 суток.

Оперативность получения глобальной информации имеет большое значение для метеослужбы, для оценки размера ущерба от различных стихийных бедствий и особенно для военной разведки.

3. Экономическая эффективность. Подсчитано, что при картографировании всей территории земного шара по космическим снимкам экономия составит 175 млн. долларов.

Оптимальной высотой орбиты считается 320 км. В качестве бортовой аппаратуры для изучения земной поверхности с такой высоты рекомендуется:

- фотокамеры,
- инфракрасная аппаратура,
- радиолокационные системы,
- устройства метода сравнения спектров.

Фотокамеры являются наиболее простыми по принципу действия и устройству, а также по надежности в работе. Они выделяются и по своим информационным возможностям.

С помощью фотокамер получают изображения объектов местности, привычные для глаза человека и дешифрируемые без особых трудностей. Демаскирующими признаками при этом служат форма, размер, тон изображения и его контраст с окружающим фоном.

Фотоснимки отличаются наибольшей разрешающей способностью (до 0,6 м на местности) по сравнению с изображениями, получаемыми в инфракрасной (тепловой), радиолокационной и других частях спектра. Однако крупномасштабное фотографирование, обеспечивающее получение снимков с высокой разрешающей способностью, рекомендуется использовать умеренно: только для изучения отдельных участков местности. Эту рекомендацию подтверждает табл. 21, в которой приведено количество пленки, необходимой для фотосъемки территории США и всего земного шара из космоса при различных масштабах снимков.

Необходимо учитывать и требования к автоматической системе передачи данных фотографирования земной поверхности. Так, при разрешающей способности снимка, равной 0,6 м на местности. время, необходимое для передачи информации о территории США, составляет 121 сутки (ширина полосы 10 МГц, охват территории 0,75 км²/с, ширина местности при передаче в реальном масштабе времени 0,1 км). При разрешающей способности, равной 30,5 м на местности, эта информация может быть передана за 1,16 ч (ширина полосы 10 МГц, охват территории 1885 км²/с, ширина местности при передаче в реальном масштабе времени 250 км).

Таблица 21

	Масштаб снимков		
	1 : 60 000	1 : 800 000	1 : 2 400 000
Площадь земной поверхности (км ²), отображаемая на снимке формата 23 × 23 см	189	33 800	301 600
Количество снимков формата 23 × 23 см (без перекрытия), требуемое для отображения:			
— континентальной части США (7 857 200 км ²)	41 500	232	26
— всей поверхности земного шара (512 200 000 км ²)	2 700 000	15 200	1700
— океанов и морей (359 400 000 км ²)	1 900 000	10 700	1200
— суши (152 800 000 км ²)	800 000	4 500	500
Количество пленки (масса в кг), требуемое для фотографирования:			
— континентальной части США	1 162	6	0,7
— всей поверхности Земли	75 818	427	48
— океанов и морей	53 118	310	34
— суши	22 700	127	14

Для фотографирования с больших высот предназначаются три типа фотокамер:

- обычные,
- панорамные,
- многодиапазонные.

Стандартный формат снимков, получаемых обычными фотокамерами, 23 × 23 см. В фотокамере применяется рулонная пленка шириной 24 см и длиной около 60 м (250 кадров). Существуют камеры со сменными конусами, приспособленные для объективов с различными фокусными расстояниями: 15, 21 и 28 см. В этих камерах используются совершенные, хорошо откорректированные объективы, обеспечивающие высокое качество изображения.

Панорамная фотокамера применяется в целях большого захвата площади по ширине маршрута при высоком разрешении

по всему кадру. Пленке в этой камере придается цилиндрическая поверхность. Изображение местности строится объективом через узкую щель, которая в момент выдержки поворачивается вместе с объективом. Щель параллельна направлению движения спутника. Масштаб панорамного снимка значительно уменьшается от центра к краям, что существенно снижает преимущество большого захвата площади и ставит под сомнение целесообразность использования такой камеры. Следует отметить также, что вследствие поворота щели и большого смещения носителя в момент выдержки панорамный снимок не имеет единого центра проекции.

Многодиапазонная камера служит для одновременного фотографирования в нескольких зонах спектра. Она имеет несколько объективов и ряд сочетаний «светофильтр — пленка», обеспечивающих получение максимального объема информации.

Один из вариантов многодиапазонной фотокамеры, применявшейся на самолетах и космических аппаратах, имеет 9 объективов и позволяет получить одновременно 9 снимков в видимой и близкой инфракрасной области спектра в диапазоне длин волн от 0,4 до 0,9 мкм. Фотокамера использует 9 комбинаций «светофильтр — пленка». Работа всех девяти затворов синхронизирована.

Изучение характерных передач тона изображения на девяти фотоснимках дает возможность дешифровщику определить тоновые признаки различных элементов местности.

Такой комплекс зональных снимков, получаемых с помощью многодиапазонной фотокамеры, обеспечивает дешифровщика большим объемом информации о природных ресурсах изучаемого района, чем один зональный снимок.

Недостатком аппаратуры, предназначенной для фотографирования местности, является зависимость ее от времени суток и метеорологических условий.

И н ф р а к р а с н а я а п п а р а т у р а. Современный уровень развития инфракрасной техники обеспечивает создание бортовой аппаратуры, позволяющей получать изображения в тепловой области спектра из космоса с разрешением, достаточным для опознавания контуров многих объектов. На таких изображениях объекты местности обнаруживаются по контрастным различиям в тоне изображения объекта и окружающего его фона. Эти различия обусловлены разностью температур или разностью излучательной способности объекта и фона.

Инфракрасная аппаратура, применяемая на космических аппаратах, дает изображения либо с ограниченным охватом земной поверхности, либо с ограниченной разрешающей способностью.

Р а д и о л о к а ц и о н н ы е с и с т е м ы обладают весьма важным достоинством — независимостью от времени суток и метеорологических условий. Кроме того, эти системы имеют способность проникать через некоторые покровы земной поверхности и изучать подстилающие породы (подпочвенный покров).

Однако достаточную разрешающую способность изображений в бортовых радиолокационных системах можно получить только с применением больших антенн и (или) при жестких требованиях к обработке сложных сигналов. Кроме того, требуется мощный источник электропитания.

Устройства для метода сравнения спектров. Метод сравнения спектров наиболее эффективен в случае, когда изучаемые объекты имеют характерные спектры излучения или отражения. Этот метод основан на дешифрировании объектов не по форме деталей изображения, а по спектральным характеристикам. Он рекомендуется для применения при геологическом и гидрологическом изучении местности, а также для определения степени загрязнения воздуха и в интересах сельского хозяйства.

На обычной черно-белой фото пленке зеленая растительность передается серым тоном, соответствующим интегральному коэффициенту отражения растительности в видимой области спектра около 10%. Так как таким же тоном передается и ряд других естественных и искусственных объектов, то в данном случае метод фотографиярования не позволяет уверенно отличить растительный покров от других объектов, и он имеет ограниченное применение.

Использование для фотографиярования ближней инфракрасной области спектра дает возможность увеличить различия между изображениями растительности и других объектов, так как характерной особенностью кривой спектрального отражения любой растительности является высокая отражательная способность ее в этой области спектра. Применяя цветную пленку, можно получить больше информации, чем при использовании пленки, чувствленной только к одной зоне спектра.

Для выявления растительности фирма Кодак рекомендует цветную инфрахроматическую пленку «Эктахром». Эта пленка, как и обычная цветная, является трехслойной, чувствленной к трем зонам спектра. Но в отличие от обычной в «Эктахроме» один слой с введением в него красным красителем чувствлен к ближней инфракрасной области спектра. Растительность на такой пленке изображается красными тонами и хорошо отличается от других объектов.

В некоторых случаях возможности дешифрирования объектов расширить способом сравнения спектров. Этот способ оценивает спектральные характеристики отражения или излучения объектов не по изображениям, а по их спектрам в большом диапазоне длин волн. Для решения этой задачи предполагается применить специальную многоканальную спектральную аппаратуру. Приемные элементы в каждом канале этой аппаратуры выдают информацию в виде электрических сигналов. С помощью бортовой аппаратуры обработки сигналов в реальном масштабе времени можно определить, в какой степени спектр наблюдаемого объекта

соответствует спектру эталона. Применяя оптико-механическое сканирующее устройство, такие сравнения спектров можно производить и за пределами фотографической области спектра. В этом случае используются характеристики излучения объектов в тепловой части спектра. Достоинство применения оптико-механического устройства в аппаратуре сравнения спектров состоит в том, что оно выдает сигналы в электрической форме, которые можно обрабатывать и передавать в реальном масштабе времени по телеметрическим каналам.

Основными задачами, которые можно решать дистанционными методами изучения земной поверхности, являются:

1. Составление географической карты на территорию земного шара (географические исследования, обновление и составление карты, региональное и национальное планирование, определение месторождений нефти и др.). Для решения этой задачи рекомендуется различная бортовая аппаратура: фотокамеры (с разрешающей способностью 0,6—3 м на местности), радиолокационная система (от 7,6 до 365 м), лазерный высотомер и аппаратура сравнения спектров (60—120 м).

Обработка фотоснимков и другой информации при составлении карт выполняется с помощью автоматизированных стереокомпараторов, электронных вычислительных машин, аналитических универсальных стереоприборов и автоматизированных систем.

2. Составление карты растительного покрова земного шара (учет лесных массивов и энергетического баланса). Рекомендуемая бортовая аппаратура — фотокамеры и аппаратура сравнения спектров.

3. Составление тепловой карты океанов (океанографические исследования, размещение рыбных промыслов, изучение флоры и фауны морей, исследование ледового покрова). Эта задача решается при помощи инфракрасной аппаратуры и пассивного микроволнового радиометра.

4. Обследование сельскохозяйственных угодий (опись сельскохозяйственных культур, сельскохозяйственная статистика, оценка необжитых районов и др.). Бортовая аппаратура: фотокамеры, радиолокационная система, аппаратура сравнения спектров.

5. Исследования по землепользованию (охрана природных ресурсов и региональное планирование). Бортовая аппаратура: фотокамеры, инфракрасная аппаратура (с разрешением 18—60 м), радиолокационная система (7,6—15,2 м) и аппаратура сравнения спектров.

6. Оценка состояния поверхности океанов (прогнозирование погоды, оказание помощи судоходству). Бортовая аппаратура: фотокамеры (с разрешением 6—30 м), радиолокационная система (7,6—365 м) и лазерные высотомеры.

7. Получение данных о водных ресурсах (улучшение водного режима, прогнозирование урожайности, прогнозирование

наводнений). Бортовая аппаратура: фотокамеры (с разрешением 0,6—30 м), инфракрасная (60 м—30 км), радиолокационная система (7,6—15,2 м) и пассивный микроволновый радиометр (365 м).

§ 133. КАЛИБРОВКА ФОТОТЕЛЕВИЗИОННЫХ СНИМКОВ

В космических исследованиях планет и их спутников большую роль играют телевизионные системы. Например, снимки Марса с советских межпланетных кораблей получены с помощью фототелевизионных устройств.

Фототелевизионные снимки имеют оптическую и электронную дисторсии, которые необходимо учитывать при использовании этих снимков для картографических целей.

Совместное влияние этих ошибок можно определить путем калибровки снимков по опорным точкам. Однако оптическая дисторсия мала по сравнению с электронной и может быть определена известными лабораторными и полевыми способами. Часто оптической дисторсией можно пренебречь и калибровку фототелевизионных снимков выполнять не по опорным точкам, а по перекрестиям контрольной сетки, нанесенной на стеклянной пластинке, в плоскости которой получается изображение на борту носителя.

Сущность калибровки снимка по контрольной сетке заключается в сравнении измеренных на снимке координат перекрестий с их теоретическими значениями. Если x, y — измеренные координаты перекрестия, а x', y' — их теоретические значения, то разности

$$\Delta x = x - x'; \quad \Delta y = y - y' \quad (17.21)$$

характеризуют искажения снимка, вызванные передачей и приемом изображения, полученного на борту носителя. Эти разности содержат систематические погрешности, обусловленные в основном электронной дисторсией, и случайные погрешности, например, измерений и случайную деформацию материала, на котором зафиксировано переданное с борта носителя изображение.

С целью выявления и учета систематических погрешностей произведем аналитическое трансформирование фототелевизионных снимков по полиномам различных степеней.

1. Конформное трансформирование по полиномам первой степени

$$\left. \begin{aligned} x' &= x + a_0 + a_1x + a_2y \\ y' &= y + b_0 + a_1y - a_2x \end{aligned} \right\} \quad (17.22)$$

Эти уравнения содержат четыре параметра преобразования, для определения которых требуется не менее двух перекрестий контрольной сетки.

2. Аффинное трансформирование по полиномам первой степени

$$\left. \begin{aligned} x' &= x + a_0 + a_1x + a_2y \\ y' &= y + b_0 + b_1x + b_2y \end{aligned} \right\} \quad (17.23)$$

В этих уравнениях имеется шесть параметров преобразования, для нахождения которых необходимо не менее трех перекрестий контрольной сетки.

3. Трансформирование по полиномам второй степени

$$\left. \begin{aligned} x' &= x + a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \\ y' &= y + b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 \end{aligned} \right\} \cdot \quad (17.24)$$

Здесь 12 неизвестных, которые можно найти по шести или более перекрестиям контрольной сетки.

4. Трансформирование по полиномам третьей степени

$$\left. \begin{aligned} x' &= x + a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^3 + a_7x^2y + \\ &\quad + a_8xy^2 + a_9y^3 \\ y' &= y + b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 + b_6x^3 + b_7x^2y + \\ &\quad + b_8xy^2 + b_9y^3 \end{aligned} \right\}, \quad (17.25)$$

содержащим 20 параметров, для определения которых необходимо использовать не менее 10 перекрестий контрольной сетки.

Для исследования изложенных выше четырех способов трансформирования фототелевизионных снимков выбрано 25 перекрестий и задача калибровки решена по способу наименьших квадратов с оценкой точности трансформирования.

Теоретические значения x' и y' координат перекрестий вычислены так

$$x' = Wx_k; \quad y' = Wy_k, \quad (17.26)$$

где x_k и y_k — координаты соответствующего перекрестия на стеклянной пластинке (на борту); W — увеличение фототелевизионного снимка по сравнению с изображением, полученным на борту посетителя,

$$W = \frac{1}{2} (W_x + W_y), \quad (17.27)$$

где

$$W_x = \frac{l_x}{l_{xk}}, \quad W_y = \frac{l_y}{l_{yk}}. \quad (17.28)$$

Здесь l_x и l_y — расстояния между угловыми перекрестиями, измеренные вдоль осей x и y на фототелевизионном снимке, а l_{xk} и l_{yk} — расстояния на контрольной сетке, соответствующие величинам l_x и l_y .

Очевидно, что l_x и l_y определяют размеры эквивалентного или трансформированного снимка, к которому приводится данный фототелевизионный снимок. Фокусное расстояние эквивалентного снимка

$$f' = Wf, \quad (17.29)$$

где f — фокусное расстояние изображения, полученного на борту посетителя.

В результате калибровки для каждого фототелевизионного снимка получены средние квадратические значения искажений Δ_x и Δ_y и остаточные искажения v_x и v_y эквивалентных снимков, полученных после трансформирования различными способами. Искажения Δ_x и Δ_y найдены по формулам (17.21). Для определения остаточных искажений использованы формулы (17.22)—(17.25), причем предварительно были составлены уравнения поправок и нормальные уравнения, в результате решения которых получены параметры преобразования снимков.

Анализ результатов калибровки (по данным Е. А. Мелиной) позволил сделать следующие выводы.

1. Искажения фототелевизионных снимков, вызванные передачей и приемом изображения, значительны и достигают 1,9 мм.

2. Искажения вдоль оси y , как правило, в два раза больше, чем вдоль оси x .

3. Искажения изменяются от снимка к снимку в значительных пределах, что вызывает необходимость калибровки каждого снимка.

4. Наименее эффективным является конформное трансформирование фототелевизионных снимков, так как оно не приводит к значительному снижению остаточных искажений.

5. Аффинное трансформирование позволяет почти в шесть раз уменьшить искажения фототелевизионных снимков по сравнению с исходными снимками и свести их до 0,2 мм.

6. Наиболее эффективными являются преобразования по полиномам второго и третьего порядков. Остаточные искажения эквивалентных снимков, полученных после трансформирования по полиномам третьей степени, около 0,05 мм, что в большей степени, чем на других эквивалентных снимках, приближается к средним квадратическим погрешностям измерения координат точек фототелевизионных снимков.

Эти выводы необходимо учитывать при фотограмметрической обработке фототелевизионных снимков.

§ 134. СКАНИРОВАНИЕ СНИМКОВ И КОРРЕЛЯЦИЯ СИГНАЛОВ

Технико-экономический анализ камеральных фотограмметрических работ показывает, что наибольшее количество рабочего времени и средств расходуется на съемку контуров и рельефа, дешифрирование снимков и подготовку составительного оригинала к изданию. Поэтому автоматизация данных процессов представляет собой наиболее актуальную задачу.

Производительность труда при съемке контуров и рельефа на обычных универсальных стереоприборах ограничена возможностями зрительного аппарата человека. Предельная скорость движения измерительной марки по снимку в процессе вычерчивания контура или горизонтали для среднего наблюдателя колеблется от 2 до 10 мм/с, в зависимости от характера местности и качества снимков. Автоматизация процесса стереоизмерений позволяет создать новые приборы, отличающиеся большим быстродействием.

Первые исследования в области автоматизации стереоизмерений были выполнены А. С. Скиридовым в 1924—1932 гг.¹ Полагая, что изображения достаточно малых идентичных участков стереопары подобны, он предложил преобразовать фотографические в электрические сигналы и анализировать эти сигналы для ряда точек, равномерно расположенных в пределах данных участков.

В 1937 г. А. С. Скиридов писал: «Мы должны призвать на помощь фотоэлектрический эффект и им заменить человеческий глаз с его стереоскопией при рисовке рельефа; тогда и только тогда мы будем иметь в геодезии впервые дело с машиной»².

Однако в то время это предложение не получило развития главным образом из-за отсутствия технических средств для его реализации.

В 1960 г. А. С. Скиридов возобновил свои исследования и вместе с Г. Д. Федоруком приступил к созданию изогипсографа — прибора для автоматического проведения горизонталей по снимкам. К этому времени за рубежом появились опытные приборы, фактически развивающие и реализующие принцип, предложенный А. С. Скиридовым, на основе достижений

¹ Скиридов А. С. Прибор для печатания карт местности. Авторское свидетельство № 4173, 31.3. 1932 г. Заявка № 78198 от 23.4. 1924 г.

Скиридов А. С. Прибор для печатания карт местности с выраженным рельефом по парным аэроснимкам. Авторское свидетельство № 10971, 28.2. 1933 г. Заявка № 7730 от 21.1. 1926 г.

² Скиридов А. С. Высотная аэросъемка. ОНТИ, М.—Л., 1937. 343 с.

в области электронной техники. Некоторые из этих приборов выпускаются серийно. Во всех автоматических стереоприборах идентификация соответственных точек стереопары выполняется без участия оператора. При автоматическом измерении высот по стереопаре определяется величина продольного параллакса.

В основу определения продольного параллакса положена динамическая теория стереозрения, изложенная в гл. 2. Согласно этой теории изображения объекта, полученные на сетчатках, сканируются в результате малых произвольных движений глаз. Раздражения колбочек, возникшие в процессе сканирования изображений, поступают в мозг в виде сигналов. Движения глаз согласованы и синхронизированы. Если два сигнала, поступившие в мозг от пары соответственных точек, совпадают по времени, то наблюдаемая точка объекта находится в начальной плоскости. Наоборот, при несовпадении τ соответственных сигналов по времени наблюдаемая точка объекта не лежит в начальной плоскости. Таким образом, величина несовпадения τ (задержка) соответственных сигналов служит критерием оценки пространственного положения наблюдаемых объектов.

Для совмещения измерительной марки с поверхностью модели в универсальном стереоприборе, например в двойном проекторе или в мультиплексе, достаточно определить величину взаимного смещения идентичных точек на экране измерительного столика и устранить это смещение. Чтобы автоматизировать решение такой задачи, сначала преобразуют стереопару в электрические сигналы. Это осуществляется путем одновременного сканирования левого и правого снимков световым пятном электроннолучевой трубки. При этом пятно имеет одинаковую интенсивность, а интенсивность света, прошедшего через снимок, зависит от плотности изображения сканируемых точек. Пройдя снимок, световые лучи попадают на фотоэлемент, преобразующий световую энергию в электрические сигналы (видеосигналы). Интенсивность видеосигналов зависит также от плотности фотографического изображения. Затем с помощью коррелятора видеосигналы, идущие от левого и правого снимков, анализируются. В результате анализа вырабатывается новый сигнал, который приводит в движение мотор, перемещающий экран измерительного столика до тех пор, пока смещение соответственных точек на экране не будет устранено.

Пусть A_1 и A_2 — сигналы, поступившие в коррелятор от пары соответственных точек. Сдвиг τ одного сигнала относительно другого можно найти путем вычисления значений функций, связывающих эти сигналы. Для решения этой задачи можно использовать различные функции, например, среднее за некоторый период времени значение разности сигналов

$$D(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} |A_1(t) - A_2(t + \tau)| dt, \quad (18.1)$$

или квадрата разности

$$S(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} [A_1(t) - A_2(t+\tau)]^2 dt, \quad (18.2)$$

или произведения

$$C(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} A_1(t) A_2(t+\tau) dt, \quad (18.3)$$

или частного

$$Q(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} \frac{A_2(t+\tau)}{A_1(t)} dt. \quad (18.4)$$

При $\tau = 0$ эти функции принимают предельное значение. Следовательно, фиксируя предельное значение какой-либо из этих функций, можно определить положение, при котором соответственные точки совмещены.

Кроме сигнала о степени совмещения пары соответственных точек коррелятор может вырабатывать и другие сигналы, указывающие на направление ошибки совмещения или на направление наклона местности, что необходимо для проведения горизонталей. Для этого видеосигнал сначала проходит через четвертьфазную задерживающую цепь, которая сдвигает один сигнал относительно другого на 90° при всех частотах. Сдвинутые по фазе сигналы затем перемножаются, их произведение сопоставляется с направлением сканирования в тот же момент времени и усредняется так, что в результате вырабатываются сигналы ошибок продольных и поперечных параллаксов. Если соответственные точки совмещены, то произведение сдвинутых на четверть фазы видеосигналов равно нулю. Сигнал ошибки продольного параллакса характеризует высотную ошибку и подвергается дальнейшему анализу для измерения высот точек модели в пределах сканируемой области. В результате этого анализа вырабатываются два дополнительных сигнала, которые определяют составляющие наклона местности на данном участке вдоль взаимно перпендикулярных осей.

Полный математический анализ, осуществляемый в корреляторе, можно представить в таком виде:

$$C(\Delta x) = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left[\frac{1}{\sigma_1 \sigma_2} \int_{-\infty}^{+\infty} |H_1(j\omega)|^2 g_{xy} \omega \cos \frac{\omega \Delta x}{|v|} d\omega \right], \quad (18.5)$$

$\Delta y = 0$

где $C(\Delta x)$ — средняя взаимная корреляция для относительного смещения соответственных точек вдоль оси x ,

$H_1(j\omega)$ — передаточная функция электронно-оптической системы,

$g_{xy}(\omega)$ — ширина спектра плотностей фотографического изображения,

$$\sigma_i = [S^2 + \sigma_{ni}^2]^{1/2}, \quad i = 1, 2,$$

S^2 — среднее квадратическое значение сигнала,

σ_{ni}^2 — среднее квадратическое значение шума в видео-канале,

v — скорость сканирующего луча¹.

Если $\Delta x = 0$, что соответствует совмещению изображений, то интеграл в уравнении (18.5) равен S^2 , а член, заключенный в скобки, равен $S^2/\sigma_1\sigma_2$, т. е. простой функции соотношения сигнала и шума. Следовательно, величина $C(\Delta x)$ является мерой качества совмещения изображений в данной точке стереомодели.

Аналогично анализируется в корреляторе и параллакс

$$p(\Delta x) = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left[\frac{1}{\sigma_1\sigma_2} \int_{-\infty}^{+\infty} |H_1(j\omega)|^2 g_{xy}(\omega) \sin \frac{\omega \Delta x}{v_x} d\omega \right], \quad (18.6)$$

$$\Delta y = 0$$

где $p(\Delta x)$ — среднее значение продольного параллакса для относительного смещения изображений вдоль оси x .

Основное различие уравнений (18.5) и (18.6) состоит в том, что уравнение (18.5) содержит косинусный член, а уравнение (18.6) — синусный. Это различие вызвано наличием цепи четвертьфазовой задержки, в результате чего $C(\Delta x)$ является четной функцией, а $p(\Delta x)$ — нечетной (рис. 278).

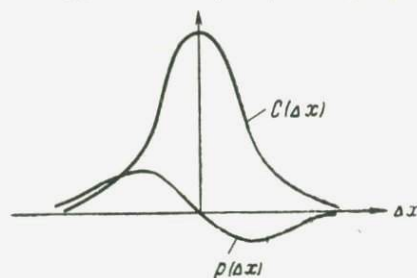


Рис. 278

Сканирующая и корреляционная системы автоматических стереоприборов определяют высоту точек местности и ее наклон с помощью заложенных в вычислительное устройство программ управления. Эти про-

граммы объединяют в единую замкнутую систему все четыре устройства: наблюдательное, вычислительное, сканирующее и корреляционное.

Эти же устройства служат основой автоматизации процессов составления по снимкам топографической карты. Добавляются только программы, управляющие автоматическим вычерчиванием. При этом вычислительное устройство осуществляет две допол-

¹ Chapelle W. E., Whiteside A. E., Bybee I. E. Automation in Photogrammetric Compilation, Bendix Technical Journal. Detroit, Summer, 1968.

нительные функции: 1) вырабатывает движения, необходимые для нанесения горизонтали или профиля местности, и 2) управляет вычерчиванием горизонталей и профилей на столе координатографа.

Выработка движений для нанесения горизонталей и управление рисовкой рельефа — задачи более трудные, чем составление профилей. Поэтому ряд автоматических стереопроборов позволяет строить только профили и не может проводить горизонталей. В этом случае горизонталей наносят вручную путем обработки профилей, вследствие чего процесс занимает много времени.

Движения, необходимые для нанесения горизонталей и профилей, имеют две составляющие: скорость вычерчивания и поправку к продольному параллаксу. Первая составляющая обеспечивает нанесение соответствующей линии, а вторая непрерывно исключает высотную ошибку. Скорость вычерчивания прикладывается к точке модели в направлении, перпендикулярном к наклону местности, а поправка к параллаксу вводится в направлении наклона местности.

Скорость вычерчивания вырабатывается как произведение функции измеренной корреляции $V(C)$ и функции средней величины погрешности измеренного продольного параллакса $V(p)$. Плохое качество корреляции указывает на ухудшение способности прибора определять высоты точек местности или ее наклон. Если корреляция ниже установленного предела, то вычерчивание прекращается. Скорость вычерчивания снижается и в случае, когда появляется значительная погрешность в определении продольного параллакса, т. е. высоты точки местности.

Наиболее трудной задачей при автоматическом вычерчивании горизонталей, как и при вычерчивании их от руки, является управление движениями на участках с малыми наклонами местности.

Угол наклона местности i определяется выражением

$$i = \arctg \frac{S_Y}{S_X}, \quad (18.7)$$

где S_X и S_Y — составляющие наклона местности вдоль осей X и Y . Когда эти составляющие близки к нулю, угол i становится неопределенным. Кроме того, небольшие погрешности определения величин S_X и S_Y приводят к значительным погрешностям определения угла наклона i . Эта трудность разрешается путем проложения курса по интегралу параллакса. В этом случае угол

$$i = \arctg \frac{S_Y}{S_X} + i', \quad (18.8)$$

где

$$i' = K \int p dt. \quad (18.9)$$

Если угол наклона i ошибочен вследствие ошибок в величинах S_x и S_y , то это приведет к ошибке продольного параллакса в течение времени, когда марка будет стремиться сойти с горизонтали. Ошибка продольного параллакса вызывает погрешность величины i' , пропорциональную интегралу ошибки продольного параллакса. Погрешность величины i' такова, что сумма, определяющая направление, будет правильной. Константа времени, связанная с поправкой i' , характеризуется тем, что при малых наклонах преобладает второй член суммы (18.8), а при больших наклонах — первый.

Аналогично, но несколько проще вырабатываются движения каретки координатографа для профилирования.

Кроме выработки движений каретки координатографа процесс картографирования требует выполнения ряда других промежуточных действий. К ним относятся управление работой карандаша координатографа; определение конца вычерчиваемой линии и переход к следующей линии; определение условий, когда автоматическое вычерчивание становится невозможным, и переход к соответствующим корректирующим операциям. Эти действия выполняются вычислительным устройством.

Автоматическое вычерчивание продолжается до тех пор, пока изображение местности достаточно хорошее. Если же изображение на каком-либо участке плохое, то поверхность модели может быть потеряна стереовоспринимающей системой. В этом случае система останавливается. Момент потери поверхности определяется главным образом по признаку малой измеренной корреляции. Потеря поверхности происходит главным образом на участках, где отсутствуют детали изображения, например на озерах или крупных однообразных полях, острых гребнях и в узких ущельях.

Вычислительное устройство запрограммировано так, что прибор пытается выйти из условий потери поверхности путем систематического поиска.

§ 135. ИЗОГИПСОГРАФ

Изогипсограф разрабатывался в МИИГАиК по предложению А. С. Скиридова для автоматического проведения горизонталей по снимкам.

Рассмотрим узел изогипсографа, созданный для нахождения идентичных точек стереопары. На рис. 279 представлены основные части этого узла: электроннолучевая трубка 1, блок управления трубками 2, оптический расщепитель 3, фотоумножители 4, блок регулировки яркости 5, усилители 6, схема обработки сигналов 7, блок сравнения сигналов 8, индикатор наличия сигнала 9, схема совпадений 10, печатающее устройство 11.

Формирование видеосигналов производится электроннолучевой трубкой и фотоумножителями. В приборе применена схема оптического расщепления и проектирования раstra одной элек-

троннолучевой трубки на снимки P_1 и P_2 . Блок регулировки яркости служит для автоматического поддержания определенного уровня сигнала путем изменения яркости экрана электроннолучевой трубки. Увеличенные усилителями и нормализованные по величине сигналы поступают в блок обработки и блок сравнения сигналов. Сигналы сравниваются по их мгновенным значениям. Если они идентичны, то выделяется импульс на схему совпадений. Схема совпадений служит датчиком для запуска печатающего устройства 11. Разрешение на печать дается лишь в том случае, если в схему совпадений, кроме сигнала, поступающего из схемы сравнений, подается сигнал 9 о наличии изобра-

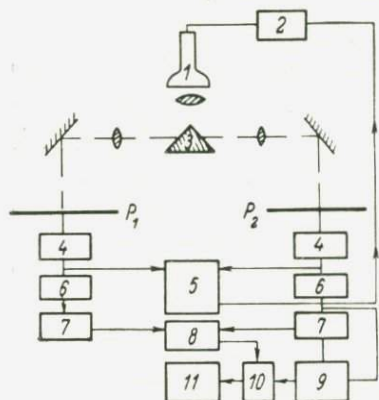


Рис. 279

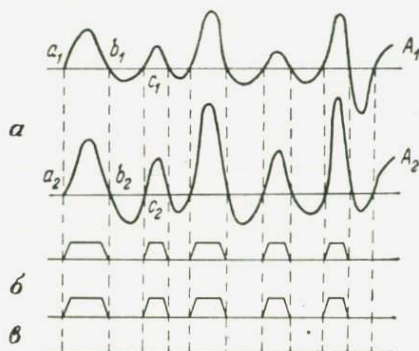


Рис. 280

жений в пределах проектируемого участка снимка в одной из ветвей оптической системы.

Автоматическое сравнение видеосигналов, поступающих от точек левого и правого снимков, выполняется двумя методами.

Первый метод называется *амплитудным* и позволяет сравнивать сигналы по их мгновенным значениям в течение каждой строки. Сигналы воспринимаются как одинаковые в том случае, если их мгновенные значения не превышают заданной величины ΔA . В противном случае сигнал совпадения не выдается. Для сравнения сигналов, полученных от отдельных участков на снимках, используется принцип накопления расхождений в течение строки (кадра). При этом отдельные расхождения фиксируются, накапливаются блоком образования интегральной функции и анализируются схемой совпадения. Сравнимые сигналы подводятся к паре отклоняющих пластин электроннолучевой трубки. Когда сигналы неодинаковы, светящееся пятно, находившееся в центре экрана трубки, отклоняется вверх или вниз. Центральная часть трубки закрыта непрозрачной пластинкой. При выходе светового пятна за пределы пластинки срабатывает фотоэлектронный умножитель, установленный перед экраном трубки, и

подается сигнал в схему совпадения о наличии рассогласования. Данный метод позволяет сравнивать сигналы в весьма широком диапазоне частот.

Второй метод основан на применении схемы сравнения сигналов по времени и может быть использован самостоятельно или совместно с амплитудным методом. Обычно сигналы A_1 и A_2 , полученные от соответственных участков левого и правого снимков, различаются по амплитуде (рис. 280, а). Однако в пределах малых участков взаимные соотношения плотностей отдельных деталей не нарушаются. Поэтому отрезки, образованные пересечением кривых A_1 и A_2 и прямых среднего уровня для каждого сигнала, будут равны:

$$a_1 b_1 = a_2 b_2, \quad b_1 c_1 = b_2 c_2 \text{ и т. д.}$$

Исходя из этого, сигналы, поступающие с фотоэлектронного умножителя, усиливаются и ограничиваются сверху и снизу, в результате чего образуются П-образные импульсы длительностью среднего уровня (рис. 280, б). Полученные таким образом сигналы поступают в схему сравнения, где производится вычитание одного сигнала из другого. При идеальном соотношении плотностей изображений на снимках в результате сравнения получается ноль (рис. 280, в).

§ 136. БЛОК-СХЕМА СТЕРЕОМАТА

С целью автоматизации фотограмметрических процессов за рубежом разработано несколько моделей стереомата. Наиболее совершенными из них являются модели В-8 и А-2000, описанные кратко в гл. 11. Основным отличием этих моделей от предыдущих является наличие устройств для получения ортофотоснимков.

На рис. 281 показана блок-схема сканирующего и корреляционного устройств стереомата В-8. Выходы генераторов шумов 1 и 3 и синусоидального генератора 2 поступают в схемы формирования развертки 4 и 5, где их амплитуды управляются сигналом, исходящим от дискриминатора 12.

В корректорах сканирования 6 и 7 сигналы развертки преобразуются с учетом сигналов за наклон снимков от корректирующего вычислительного устройства 13 и сигналов за наклон местности от дискриминатора. Скорректированные сигналы развертки через усилители 8—11 поступают на отклоняющие системы каждой электроннолучевой трубки. Сканирующие лучи с экранов электроннолучевых трубок при помощи оптических систем фокусируются на диапозитивах, и модулируемые по плотности фотоизображения попадают на фотоумножители, где преобразуются в электрические сигналы, модулированные по амплитуде и поступающие в дискриминатор.

Использование двух сканирующих устройств позволяет получить модулированные выходные сигналы от каждого снимка,

приведенные к одному изображению, и тем самым создает возможность их точного сравнения. При наличии одного сканирующего устройства выходные сигналы различаются тем сильнее, чем больше наклон местности, поскольку один и тот же участок наклонной местности имеет различные перспективные искажения на левом и правом снимках стереопары. Этим и объясняется более надежная работа стереомата В-8 по сравнению с предыдущими моделями, особенно на участках с большой крутизной. Однако применение двух сканирующих устройств предъявляет более жесткие требования к идентичности работы обоих каналов.

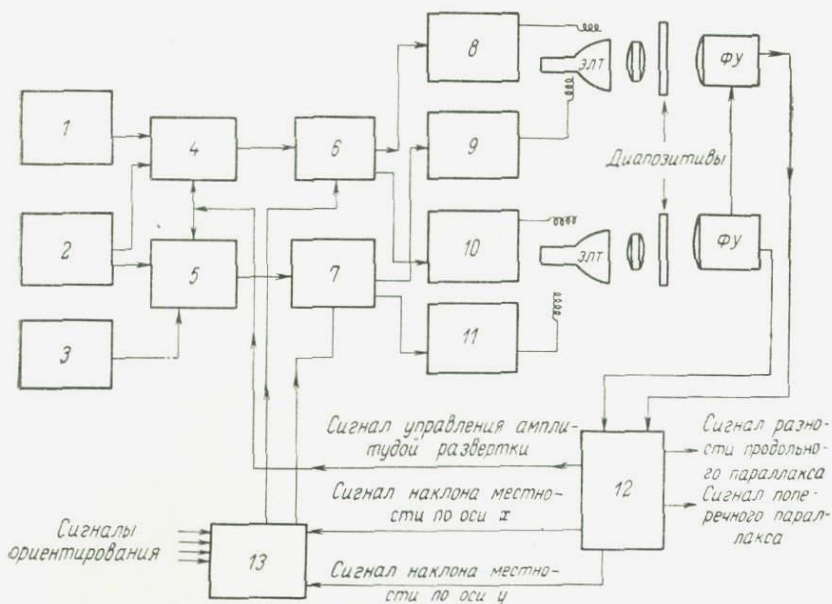


Рис. 281

Дискриминатор 12 преобразует сигналы, поступающие от электроннолучевых трубок, управляет разверткой сигналов параллакса и наклона местности.

Коррекционный сигнал достигает максимума, когда сигналы от фотоумножителей одинаковы, что соответствует моменту наведения оптических центров обеих сканирующих разверток электроннолучевых трубок на идентичные точки снимков. При этом разности фаз двух электрических сигналов равны нулю в любой момент времени. Поскольку сравниваются разности фаз, а не амплитуды сигналов, то различие в общей плотности снимков значения не имеет.

Блоки формирования развертки 4 и 5 связаны с дискриминатором обратной отрицательной связью. Поэтому увеличение

управляющего сигнала дискриминатора приводит к уменьшению амплитуды развертки, что уменьшает сканируемую площадь и повышает разрешающую способность системы.

Сигналы параллакса возникают в случае, когда сканирующие лучи электроннолучевых трубок проходят соответственные точки в разное время, что вызывает сдвиг фаз между выходными сигналами фотоумножителей. Этот сдвиг фаз преобразуется в дискриминаторе в сигналы продольного и поперечного параллакса.

Сигнал поперечного параллакса служит для управления исполнительными двигателями следящих систем α , ω , κ , которые устраняют поперечные параллаксы при автоматическом взаимном ориентировании снимков.

Сигнал продольного параллакса служит для управления исполнительными двигателями, перемещающими каретку высот в вертикальном направлении при ручном управлении и автоматическом профилировании или в горизонтальном направлении при автоматической рисовке горизонталей. Сигналы продольного параллакса используются в вычислительном устройстве 13 для коррекции в каждой сканирующей развертке разности масштабов снимков по линиям сканирования. Затем выходной сигнал одного из фотоумножителей используется для модулирования светового потока третьей электроннолучевой трубки, на экране которой получается трансформированное изображение, соответствующее ортофотоснимку.

На стереомате В-8 можно работать вручную, как на обычном авиографе В-8, или автоматически выполнять взаимное ориентирование, печатать ортофотоснимки, проводить горизонталы, получать цифровую модель местности.

При взаимном ориентировании оператор устанавливает снимки по начальным направлениям, а затем включает автоматическую систему. Сканирующая головка автоматически в соответствии с программой последовательно обходит стандартно расположенные точки, при этом непрерывно устраняется поперечный параллакс. Взаимное ориентирование снимков выполняется за 5 мин (6 приближений).

Внешнее ориентирование модели производится вручную. Однако схемы корреляции постоянно держат измерительную марку в контакте с поверхностью модели местности.

Чтобы напечатать ортофотоснимок, помещают фотопленку в ортофотоприставку стереомата и включают печатающую электроннолучевую трубку. Сканирующая головка перемещается по параллельным направлениям, выполняя профилирование. В результате этого на фотопленке получается трансформированное изображение. Средняя скорость сканирования 7 мм/с. На изготовление ортофотоснимка требуется около 2 ч.

При проведении горизонталей сканирующая головка с чертежным приспособлением автоматически перемещается в направлении, соответствующем нулевому сигналу поперечного парал-

лакса. Чертежное приспособление поднимается, когда сигналы продольного параллакса становятся ненадежными.

Для получения цифровой модели местности на приборе можно автоматически считывать и записывать координаты точек модели на перфокартах, перфоленте или магнитной ленте.

Недостатком стереомата является ненадежная работа по проведению горизонталей при съемке плоских мест, обрывистых участков и т. д.

Кроме стереомата, за рубежом созданы и другие автоматизированные стереоприборы, основанные на использовании сканирующих и корреляционных систем, например стереоплоттер AP-14¹, аналитический стереоплоттер AS-11 B-1 (Италия, США) и планимат (ФРГ).

§ 137. ЦИФРОВАЯ АВТОМАТИЧЕСКАЯ КАРТОСОСТАВИТЕЛЬСКАЯ СИСТЕМА

В цифровой автоматической картосоставительской системе (США) электронная вычислительная машина служит для обработки всей информации, получаемой от снимков и из геодезических измерений. В этой системе фотографическое изображение преобразуется в цифровую форму и вводится в вычислительную машину.

Система состоит из электронной цифровой вычислительной машины IBM-7094, стереокомпаратора STK-1 Вильда и фотоцифрового устройства. Имеются системы двух типов: система с последовательным программированием, отличающаяся большой точностью, и система с предварительным программированием, имеющая меньшую точность, но обеспечивающая более высокую скорость работы.

Фотоцифровое устройство состоит из блока магнитных лент и сканирующего печатного устройства.

Блок магнитных лент используется в качестве запоминающих устройств для входных и выходных данных вычислительного устройства и выдает синхронизирующие импульсы для всей системы.

Сканирующее печатное устройство в сочетании со стереокомпаратором выполняет две функции: 1) сканирует снимки, преобразуя фотоизображение в цифровую форму, и вводит полученные данные в вычислительную машину, 2) преобразует цифровые данные, записанные на магнитной ленте, в фотографическое изображение, т. е. производит печать. Разрешающая способность сканирующего устройства 16 или 32 точки на 1 мм. Для кодирования плотностей фотоизображения используются три шкалы — 8, 16 и 32 ступени.

¹ Панкратьев Ю. Н. и др.. Электроника в фотограмметрии. Львов, 1968, с. 213—217.

Система с последовательным программированием, блок-схема которой показана на рис. 282, имеет замкнутый цикл и включает пять программ: 1) ориентирования, 2) трансформирования, 3) сравнения цифровых изображений снимков, 4) получения ортофотоснимков и вычерчивания горизонталей, 5) нанесения километровой сетки.

Программа ориентирования служит для вычисления элементов внешнего ориентирования снимков по опорным точкам. Геодезические координаты этих точек, координаты их изображений на снимке и элементы внутреннего ориентирования снимка вво-

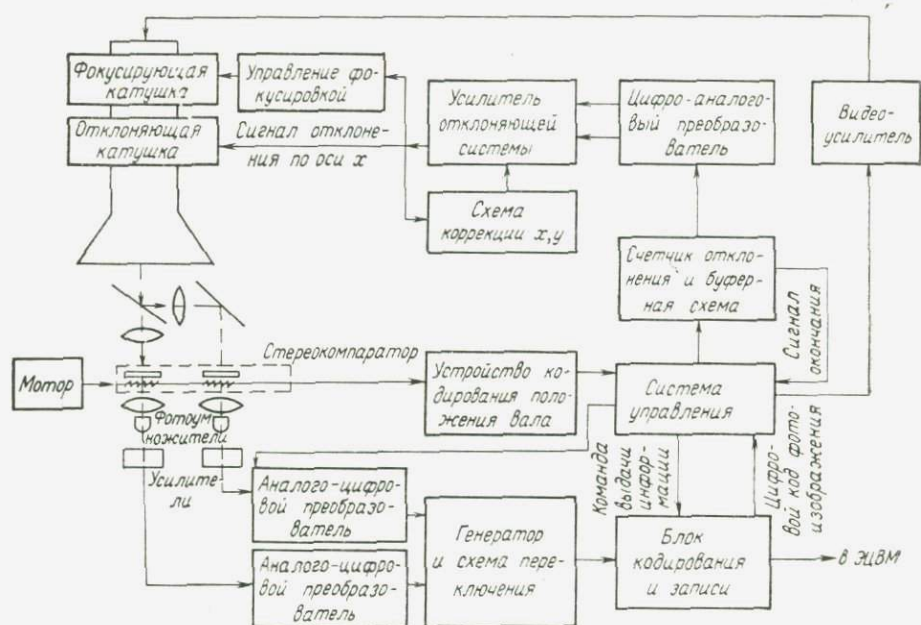


Рис. 282

дятся в вычислительную машину. Элементы внешнего ориентирования снимков используются при сканировании и являются исходными для трансформирования стереопары. Кроме того, для трансформирования необходимы результаты измерения снимков, полученные при сканировании их на стереоскопическом аппарате.

Программа трансформирования вычисляет поправки в координаты точек стереопары и исправленные значения этих координат. Эти данные используются для коррекции сканирования и служат исходными для программы сравнения и отождествления (корреляции) цифрового изображения стереопары, а также для определения продольных параллаксов.

В программе сравнения цифровых изображений стереопары использован метод статистической корреляции для определения

соответственных точек. Участок левого снимка сравнивается с несколькими участками правого снимка и вычисляется коэффициент корреляции (совпадения). Самый большой коэффициент корреляции служит признаком идентичности изображений. Затем участки сравнения уменьшаются с целью повышения точности идентификации точек.

Программа получения ортофотоснимков позволяет вносить поправки в положение точек на снимках за влияние рельефа и тем самым приводить центральную проекцию к ортогональной. Кроме того, эта программа по исправленным параллаксам определяет отметки точек, соответствующие заданному сечению рельефа. Выходные данные используются для получения ортофотоснимков и нанесения горизонталей.

Программа нанесения километровой сетки вычисляет координаты пересечений линий этой сетки по геодезическим координатам опорных точек.

Система с предварительным программированием позволяет выбирать различные режимы работы в зависимости от заданной точности и быстродействия. Она имеет три основные программы обработки цифровых данных: 1) управления системой, 2) нанесения горизонталей, 3) составления ортофотоснимков.

Картосоставительская система, изложенная в этом параграфе, позволяет обработать стереопару с выдачей ортофотоснимка и горизонталей в среднем за 1 ч (формат снимка 23×46 см).

Кроме этой системы, в США разработана универсальная автоматическая картосоставительская система, основанная также на цифровом методе обработки стереопар.

Аналитические методы обработки снимков сравнительно легко учитывают и исключают различные систематические ошибки. Однако выходные данные цифровых систем требуют дальнейшей ручной обработки: вычерчивания контуров, укладки и вычерчивания горизонталей и др.

§ 138. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ФОТОКАРТОГРАФ

Аналитический фотокартограф, предложенный А. Н. Лобановым и И. Г. Журкиным¹, осуществляет автоматическую цифровую обработку стереопар с целью получения ортофотоснимков с изображением рельефа местности.

На рис. 283 представлена блок-схема аналитического фотокартографа. Он состоит из: двух передающих фотоэлектрических узлов *ПУ*, двух узлов формирования раstra *ФР*, двух узлов преобразования информации снимка в код ЭЦВМ *И*, блока корреляции *БК*, местного устройства управления *МУУ*, узла предварительного накопления информации *ПН*, узла обработки информации, считанной со стереопары ЭЦВМ, приемного фотоэлектрического узла *ПРУ*.

¹ Авторское свидетельство № 241710. Заявка от 4.1. 1968 г

Существенной особенностью автоматического фотокартографа является полное отсутствие механических связей, благодаря чему уменьшается инерционность прибора в целом. Это обеспечивается узлами формирования раstra и программным управлением разверткой, что дает возможность непосредственно со снимка вводить в машину информацию о любых его точках, координаты которых задаются машиной. Программное управление разверткой кроме указанного обладает еще и тем преимуществом, что при таком способе считывания память машины не загружается лишней информацией, так как сам снимок служит запоминающим устрой-

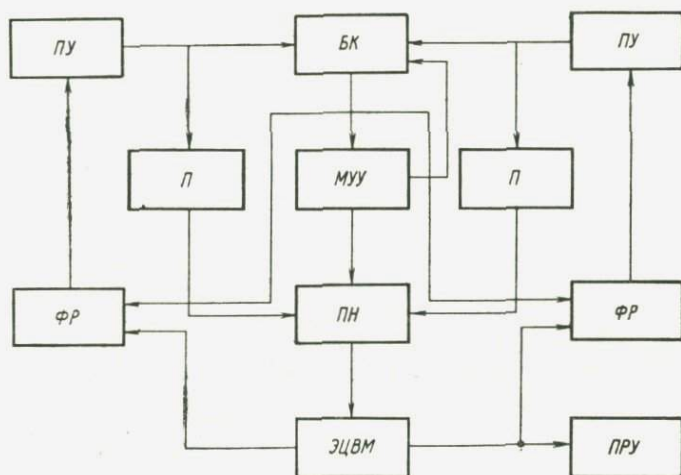


Рис. 283

ством, к которому можно обращаться в любое время в соответствии с программой, реализующей заложенный в машину алгоритм обработки стереопары.

Конечный результат обработки стереопары получается также без применения механических устройств: он изображается на экране электроннолучевой трубки и фиксируется фотографическим способом.

С целью повышения скорости стереоизмерений процесс идентификации соответственных точек стереопары разбит на два этапа: 1) идентификация соответственных участков стереопары с помощью быстродействующего коррелятора и 2) идентификация соответственных точек с помощью ЭЦВМ.

Кроме повышения скорости стереоизмерений такой метод идентификации точек имеет еще одно существенное достоинство: уменьшается объем информации, необходимой для ввода в ЭЦВМ, что значительно снижает требования к машине.

В аналитическом фотокартографе задача идентификации точек на стереопаре рассматривается как статистическая задача по рас-

познаванию образов при наличии случайных искажений или помех.

Под образом на снимке понимается отдельная область снимка со всей информацией, которая заключена в эту область, причем размеры и конфигурация образа могут быть самыми различными.

Следовательно, снимок рассматривается как совокупность отдельных образов, каждый отдельный образ — как совокупность новых образов, более элементарных.

Совокупность элементарных образов, составляющих другой, более общий образ R , будем рассматривать как векторное поле образа \bar{R} , а каждый элементарный образ в отдельности примем за единичный вектор этого поля $\bar{\rho}$.

Используя эти понятия, задачу идентификации точек стереопары можно представить как нахождение на левом и правом снимках двух образов, расстояние между которыми минимально, т. е. отыскание

$$\min |\bar{R}_л - \bar{R}_п|, \quad (18.10)$$

где $\bar{R}_л$ — образ вокруг точки левого снимка, $\bar{R}_п$ — образ вокруг точки правого снимка. Причем образ $\bar{R}_л$ задан в поле $\bar{\rho}_{л}$, а образ $R_п$ — в поле $\bar{\rho}_{п}$. В этом случае $\rho_{л}$ — единичные векторы образа $\bar{R}_л$, а $\bar{\rho}_{п}$ — единичные векторы образа $\bar{R}_п$.

Итак, если на левом снимке стереопары точка выбрана, то задача нахождения идентичной ей точки на правом снимке сводится к определению кратчайшего расстояния между неизвестным образом на правом снимке и заданным образом на левом снимке. Известно, что данный критерий является оптимальным при шумах, обладающих следующими характеристиками:

1) плотность вероятности для шума есть некоторая монотонно убывающая функция суммы квадратов его компонент

$$\rho(r) = f(r^2), \quad (18.11)$$

где

$$r^2 = \sum r_i^2, \quad (18.12)$$

а r_i — компоненты вектора шума;

2) плотность шума не зависит от параметров самого изображения объекта.

Таковыми свойствами обладает, например, гауссов шум с независимыми компонентами и равными для всех компонент дисперсиями.

Кроме того, можно показать, что при любом законе распределения шумов вероятность ошибочного распознавания на основе данного критерия стремится к нулю, когда отношение дисперсии шума к квадрату минимального расстояния между двумя любыми образами, взятыми на правом снимке, неограниченно убывает.

В качестве простого способа для определения функционала (18.10) применительно к оптическому изображению использован известный метод скалярного перемножения двух образов, т. е. вычисление коэффициента

$$k = \frac{(\bar{R}_л \bar{R}_п)}{|\bar{R}_л| |\bar{R}_п|}, \quad (18.13)$$

где $\bar{R}_л$ — образ на левом снимке, а $\bar{R}_п$ — образ на правом снимке.

После преобразований можно получить следующее выражение, описывающее нахождение идентичных образов на стереопаре:

$$k = \frac{\sum (\rho_{i л} - \rho_{п}^*) (\rho_{i п} - \rho_{п}^*)}{V \sum (\rho_{i л} - \rho_{п}^*)^2 V \sum (\rho_{i п} - \rho_{п}^*)^2}, \quad (18.14)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \rho_{л}^* &= \frac{1}{N} \sum \rho_{i л} \\ \rho_{п}^* &= \frac{1}{N} \sum \rho_{i п} \end{aligned} \right\}, \quad (18.15)$$

N — размерность образа.

Таким образом, нахождение идентичных точек сводится к определению максимального коэффициента k при сравнении заданного образа на левом снимке со всем разнообразием образов правого снимка.

Для сужения области поиска идентичных точек накладываются дополнительные условия (трансформирование снимков, предельные значения продольных параллаксов). Благодаря этому уменьшается число образов на правом снимке, которые непосредственно должны участвовать в процессе идентификации точек, и резко возрастает эффективность метода.

§ 139. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СТЕРЕОИЗМЕРЕНИЙ

В предыдущих параграфах показано, что в течение последних десяти лет достигнуты существенные успехи в области автоматизации процессов стереовосприятия и составления топографических карт на универсальных стереоприборах. Современные сканирующие и корреляционные устройства, а также программы вычислительных устройств позволяют получать ортофотоснимки и проводить горизонталы без участия оператора. Однако в отдельных случаях возможности автоматического прибора оказываются недостаточными и требуется помощь оператора. Автоматическая система в этих случаях останавливается, так как сканирование и корреляция не обеспечивают возможности получения от стереопары достаточной информации для выработки направляющего сигнала.

Рассмотрим основные направления совершенствования автоматических стереопроборов.

1. Усовершенствование процесса корреляции. Автоматическое устройство, дублируя функции оператора, сопоставляет детали изображения только вблизи измерительной марки. Однако этот способ, основанный на изучении небольших участков снимков, имеет существенные недостатки. Информация о наклоне поверхности и о параллаксе, по которой вычислительное устройство вырабатывает направляющие сигналы, засоряется шумами, вызванными микрорельефом, и не включает данных о важных деталях местности, если они не находятся вблизи измерительной марки. Поэтому весьма желательно расширить область сканирования для получения большей информации о местности. Однако при обработке снимков пересеченной местности площадь сканирования ограничивается главным образом плоскостной аппроксимацией поверхности. Чтобы снять это ограничение, необходимо приспособить процесс сканирования к кривизне поверхности, выполняя его по законам второго и высших порядков. Это не только улучшит информацию о направлении движения, но и повысит чувствительность и точность сканирования и корреляции.

Такое регулирование формы площади сканирования можно осуществить в сканирующих устройствах с бегающим пятном. Но это требует значительного совершенствования коррелятора, чтобы он воспринимал дополнительные параметры, относящиеся к кривизне и степени пересеченности местности. Кроме того, необходимы программы для расчета информации о дополнительном регулировании формы площади сканирования. Потребуется усовершенствовать и генератор развертки, который должен генерировать сигналы более сложной развертки. Например, если учитывать поправки второго порядка, то коррелятор должен иметь 6 выходов.

При наличии на стереопаре деталей с высокой оптической плотностью и малым контрастом сканирующее устройство с бегающим лучом имеет малую чувствительность. Это устройство может быть заменено когерентным оптическим коррелятором. Он обладает способностью одновременно обрабатывать большие площади изображений и исключает процесс сканирования изображения, превращая его во временные сигналы. Необходимое отношение сигнала к шуму в оптическом корреляторе обеспечивается применением мощных лазеров.

2. Развитие методов, позволяющих воспринять и передать вычислительному устройству дополнительную информацию. Особый интерес представляют методы распознавания образов, так как они способствуют идентификации точек и автоматизации дешифрирования снимков. В настоящее время разрабатываются системы по распознаванию образов с применением статистического анализа сигналов сканирующего устройства или выходных сигналов коррелятора. Система распознавания образов в сочетании с авто-

матическим стереоприбором может выполнять несколько дополнительных функций. Одна из них — автоматическое распознавание деревьев и зданий, вызывающих значительные ошибки определения высот точек местности. Другой дополнительной функцией может быть автоматическое определение этих ошибок с целью исключения их влияния.

Система распознавания образов может дать вычислительному устройству информацию, способствующую управлению автоматическим вычерчиванием горизонталей и профилей. Например, автоматическое распознавание открытых пространств или водных поверхностей можно использовать для более эффективной обработки таких участков, а распознавание районов со сложным рельефом — для более тщательного вычерчивания деталей.

3. Расширение роли вычислительного устройства. В существующих автоматических стереоприборах вычислительное устройство осуществляет главные функции при выработке движений для вычерчивания. Однако значительная часть возможностей вычислителя остается неиспользованной. К ним относятся:

более детальная обработка основных данных, поступающих для автоматического вычерчивания;

усложнение программ управления вычерчиванием с целью более эффективной обработки снимков горной местности;

повторная обработка для исключения сомнительной информации, а также для корректуры и генерализации результатов первичной обработки.

4. Применение телеметрических методов, позволяющих использовать в автоматических системах вместо снимков информацию, получаемую непосредственно с самолета, искусственного спутника Земли или с межпланетного космического корабля. Эти методы обеспечат значительное сокращение сроков картографирования.

В заключение можно отметить, что сочетание метода корреляции изображений и управления вычислительным устройством с набором программ, осуществленное в автоматических стереоприборах, является мощным средством автоматизации фотограмметрических процессов, выполняемых при составлении карт. Современные автоматизированные стереоприборы в значительной степени освобождают оператора от стереоизмерений и вычерчивания. Дальнейшее усовершенствование этих приборов может расширить их возможности до такой степени, что они позволят обрабатывать различные снимки любых районов без помощи оператора и обеспечить повышение эффективности картографирования.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АЭРОФОТОТОПОГРАФИИ

Советские ученые выполнили крупные теоретические исследования в области фотограмметрии и аэрофототопографии, на основе которых созданы оригинальные методы и приборы для фотографирования местности и составления топографических карт по аэроснимкам.

Наиболее значительными научными и практическими достижениями отечественной фотограмметрии являются сверхширокоугольная аэрофотосъемочная аппаратура, теория и методы стереофотограмметрической обработки снимков с преобразованными связками, определение элементов внешнего ориентирования снимков в полете, аналитическая пространственная фототриангуляция с применением автоматизированного высокоточного стереокомпаратора и электронной вычислительной машины, оригинальные универсальные стереоприборы и др.

За рубежом сверхширокоугольные аэрофотосъемочные объективы появились значительно позже, чем в Советском Союзе. Советские универсальные стереофотограмметрические приборы — стереографы и стереопроекторы — отличаются простой конструкцией и невысокой стоимостью по сравнению с иностранными универсальными стереоприборами.

В развитии советской фотограмметрии участвует большой коллектив ученых научно-исследовательских институтов (ЦНИИГАиК, Лаборатория аэрометодов, ЦНИИ транспортного строительства и др.), высших учебных заведений (МИИГАиК, НИИГАиК, МГУ, МИИЗ, Львовский политехнический институт и др.), а также высококвалифицированные специалисты производственных предприятий.

В связи с быстрыми темпами развития производительных сил СССР и необходимостью дальнейшего укрепления обороноспособности страны требования к картографированию территории непрерывно возрастают.

Большая роль в решении новых задач, поставленных перед государственной топографо-геодезической службой, принадлежит аэрофотографии. Для успешного решения этих задач необходимо повысить эффективность научных исследований и ускорить использование в народном хозяйстве достижений науки и техники.

Дальнейшее развитие аэрофототопографии должно идти по следующим основным направлениям:

1. Повышение измерительных и изобразительных свойств снимков:

создание более совершенных аэрофотоаппаратов с объективами, отличающимися большой разрешающей силой и возможно малой дисторсией;

— применение не только черно-белой, но и цветной или спектральнональной аэропленки с высокой разрешающей способностью и практически недеформирующейся основой;

— более точное выравнивание фотоземлемости слоя в плоскость;

— разработка эффективных методов оценки качества изображения.

Улучшение измерительных и изобразительных свойств снимков позволит повысить точность стереофотограмметрических работ и сократить объем полевых работ по геодезическому обоснованию съемки и дешифрированию снимков.

2. Совершенствование и применение радиолокационных и других средств, позволяющих получать информацию о местности в любое время суток и независимо от метеорологических условий.

3. Определение элементов внешнего ориентирования снимков в полете. Повышение точности применяемых способов и разработка новых методов определения этих элементов приведет к значительному снижению объема полевых работ.

4. Совершенствование и широкое применение аналитической фототриангуляции, основанной на использовании автоматизированных высокоточных стереокомпараторов и электронных вычислительных машин. Сюда относятся:

— повышение эффективности методов построения и уравнивания маршрутных и блочных сетей,

— совершенствование способов определения и учета ошибок снимка,

— разработка методики более точной идентификации соответственных точек на снимках,

— оптимальное использование элементов внешнего ориентирования снимков, зафиксированных в полете.

5. Автоматизация процессов составления топографических карт и фотокарт путем создания приборов и систем, позволяющих значительно поднять производительность труда и освободить оператора от выполнения однообразной и утомительной работы.

6. Развитие методов аэросъемки и фотограмметрии применительно к решению нетопографических задач с целью удовлетворения запросов различных отраслей науки и народного хозяйства.

7. Исследование космического пространства по снимкам планет и их спутников, полученным с космических кораблей.

В нашей стране имеются все условия для успешного научного решения этих задач и применения новых достижений фотограмметрии в народном хозяйстве.

- Бобир Н. Я., Лобанов А. Н., Федорук Г. Д.* Фотограмметрия. М., «Недра», 1974. 472 с.
- Богомолов Л. А.* Дешифрирование аэроснимков. М., «Недра», 1976. 145 с.
- Большаков В. Д.* Теория ошибок наблюдений с основами теории вероятностей. М., «Недра», 1965. 183 с.
- Дейнеко В. Ф.* Аэрофотогеодезия. М., «Недра», 1968. 328 с.
- Дробышев Ф. В.* Исследования в стереофотограмметрии. М., «Недра», 1972. 121 с.
- Дробышев Ф. В.* Основы аэрофотосъемки и фотограмметрии. М., «Недра», 1973. 287 с.
- Исследования природной среды космическими средствами.* М., АН СССР, 1975. 244 с.
- Коншин М. Д.* Аэрофотограмметрия. М., «Недра», 1967. 388 с.
- Космическая иконика.* М., «Наука», 1973. 240 с.
- Космическая фотосъемка и геологические исследования.* Под ред. Г. Б. Гонина и С. И. Стрельникова. Л., «Недра», 1975. 416 с.
- Крупномасштабные топографические съемки.* М., ОНТИ ЦНИИГАиК, 1974. 228 с.
- Лобанов А. Н.* Аэрофототопография. М., «Недра», 1971. 560 с.
- Лобанов А. Н.* Аналитическая фотограмметрия. М., «Недра», 1972. 224 с.
- Пособие по фотограмметрии.* Сокращенный перевод под ред. В. И. Кораблева. М., «Недра», 1970. 216 с. и 1971. 168 с.
- Прикладная фотограмметрия.* Л., «Наука», 1969. 256 с.
- Русинов М. М.* Инженерная фотограмметрия. М., «Недра», 1966. 248 с.
- Сердюков В. М.* Фотограмметрия в инженерно-строительном деле. М., «Недра», 1970. 136 с.
- Создание топографических фотокарт.* Труды ЦНИИГАиК, вып. 194, 1972. 80 с.
- Соколова Н. А.* Технология крупномасштабных аэротопографических съемок. М., «Недра», 1973. 184 с.
- Финаревский И. И.* Методика уравнивания аналитических сетей пространственной фототриангуляции. Л., ВНИИМ, 1970. 176 с.
- Финковский В. Я.* Теория коллинеарной геометрической модели местности. М., «Недра», 1967. 128 с.
- Фототриангуляция с применением электронной цифровой вычислительной машины.* М., «Недра», 1975. 264 с.
- Хайдушкин П., Станоев В.* Фотография и фотограмметрия. София, 1969. 312 с.

- Абрис 509
 Абрисные копии 524
 Авнографы Вильда 340
 Автографы Вильда 331
 Автоматизация стереоизмерений 545
 Аккомодация глаза 70
 Анаглиф 99
 Анаглифические очки 97
 Анаглифические фильтры 97
 Анаглифический способ 97
 Анализатор 100
 Аналитический способ
 — взаимного ориентирования пары снимков 237, 245
 — внешнего ориентирования модели 265
 — внешнего ориентирования снимка 195, 200
 — плоскостной фототриангуляции 123
 — пространственной фототриангуляции 425, 445
 — составления карты 370, 557
 — трансформирования снимка 40, 136, 169
 — трансформирования стереопары 275, 557
 Аналитический стереопробир 370, 557
 Аналитический фотокартограф А. Н. Лобанова и И. Г. Журкина 557
 Аналитический фототрансформатор 169
 Анизэйкония 73
 Астигматизм 73
 Аэронегатив 16
 Аэропроектор 117
 Аэрорадиовелирование 498
 Аэроснимок 4
 Аэрофотоаппарат 503
 Аэросъемочная камера 507
 Аэрофотосъемка 503, 507
 Аэрофототопографическая съемка 502
 Аэрофототопография 4
 Базис
 — глазной 75
 — проектирования 211
 — стереоскопа 86
 — фотографирования 209
 Базисная плоскость 210
 Базисная точка 210
 Базисные движения 118, 306
 Базисные каретки 118, 306
 Базисные линии 210
 Базисный луч 210
 Базисный мостик 301
 Бинокулярное зрение 75
 Бинокулярный микроскоп 108
 Бленды 101
 Ближайшая точка 497
 Взаимное ориентирование моделей 434
 Взаимное ориентирование снимков 6, 237, 245, 254
 — с подобными связками 254
 — с преобразованными связками 282
 Влияние дисторсии объектива 468
 — кривизны Земли 64, 473
 — ошибок измерения модели 475
 — ошибок измерения снимков 478
 — ошибок установочных элементов 180
 — ошибок элементов ориентирования снимков 180, 475
 — рельефа местности 54
 — рефракции 56
 — стеклянных пластин 183
 — угла наклона снимка 50
 Внешнее ориентирование модели
 — подобной 6, 264, 268
 — преобразованной 286
 Внешнее ориентирование снимков 195
 Внешние координаты точки снимка 29
 Внутреннее ориентирование снимка 211
 Внутренние координаты точки снимка 19
 Восприятие цветов 71
 Время зрительного ощущения 71
 Высота полета 16
 — сечения рельефа 498
 Высотная сеть 504
 Высотные опорные точки 509
 Высотмер 498
 Геодезическая основа 504
 Геометрические условия трансформирования снимка 137
 Геодезические координаты точки местности 18
 Главная вертикаль 17
 Главная горизонталь 17
 Главная зрительная плоскость 76
 Главная точка снимка 16
 Главная точка схода 17
 Главное расстояние стереоскопа 85
 Глаз 68

- Глазной базис 75
 Глубина фокуса 294
 Горизонталь 409
 Гороштер 77
 График величин φ 493
 — высотных поправок 493
 — горизонтирования модели 493
 Графическая фототриангуляция 129
 Графо-аналитический способ редуцирования фототриангуляции 131
- Двойная децентрация 288
 Двойная обратная засечка 225
 Двойной проектор 286, 292
 Действительные марки 106
 Деформация модели 468, 475
 — фототриангуляция 457, 478
 — фотоматериалов 65, 175
 Децентрационный инверсор 165
 Децентрация снимка 142, 278
 — трансформированного изображения 278
 Дешифрирование снимков 5, 503, 507, 525
 Динамическая теория остроты зрения 81
 Дистанционный метод изучения земной поверхности 536
 Дисторсия объектива 468
 Дифракционные решетки 486
 Дифракция света 71
 Дифференциальный фототрансформатор 326
 Дифференцированный способ пространственной фототриангуляции 13
 Дифференцированный способ составления карты 7, 387
 Длина аккомодации 70
 Дополнительная проектирующая система 360
- Желтое пятно 68
 Журнал измерений 460
- Засечка 27, 225
 Звено 126
 Зеркально-линзовый стереоскоп 86
 Зеркальный стереоскоп 84
 Зона трансформирования снимка 177
 Зрачок 68
 Зрительная ось глаза 70
 Зрительное ощущение 71
 Зрительные иллюзии 72
 Зрительные раздражения 70
 Зрительный нерв 68
- Идеальный случай съемки 217
 Измерение координат точек модели 92, 291
- Измерение координат точек модели — координат точек снимка 92, 107, 482
 — поперечных параллаксов 107
 — продольных параллаксов 107
 Измерительные марки 106
 Измерительный столик 119
 Изогипсограф А. С. Скиридова 550
 Инварианты трансформирования снимка 140
 Инверсор Карпантье 151
 — ленточный 148
 — ромбический 150
 — тангенциальный 153
 — угловой 148
 Инверсоры масштабные 147
 — перспективные 151
 Индикатриса масштабных искажений 43
 — угловых искажений 47
 Интерпретоскоп Цейсса 90
 Инфракрасная аппаратура 537
 Иррадиация 72
 Искажения модели 468, 475
 — снимка 56, 65
 — фототриангуляции 475
 Искусственный спутник Земли 529
 Исследование стереокомпаратора 112
 Исправление карты 525
- Калибровка фототелевизионных снимков 542
 Камеральное дешифрирование снимка 5, 503, 507
 Камеральные работы 503, 506, 525
 Камеры 503, 507
 Каретки параллаксов 107
 — снимков 305
 — фокусных расстояний 305
 Карта 414
 Картографирование планет 529
 Кассета 483
 Каталог координат пунктов 522
 Колбочки 68
 Комбинированный метод 4, 503
 Компенсационная пластинка 337
 Компоненты базиса 117
 Конструктивная ось фототрансформатора 141
 Контактные отпечатки 16
 Контрольная сетка 111
 Координметр Цейсса 356
 Координатограф 315
 Координаты точки местности 18
 — геодезические 18
 — геоцентрические 18, 431
 — фотограмметрические 18
 Координаты точки снимка 18
 — плоские 18
 — пространственные 29

- Координаты точки фотографирования
 — геодезические 20
 — фотограмметрические 36
 Коррекционный механизм стереокомпаратора 110
 — стереометра 391
 — стереопроектора 303
 Косвенные признаки восприятия рельефа 75
 Коэффициент взаимного ориентирования снимков 259
 — преобразования связки 274
 — редуцирования фототриангуляции 131
 — систематической деформации фотобумаги 176
 — трансформирования снимка 143
 — уменьшения снимков 119
 Кривизна Земли 64, 473
 Кривые высотных поправок 457, 493
 Критерий взаимного ориентирования снимков 255
 Критическая частота мельканий 71
 Крупномасштабные снимки 509, 520
 Кручение модели 457

 Линейные элементы внешнего ориентирования снимка 20
 Линии базисные 210
 — главные базисные 210
 — надирные базисные 210
 — равных высотных поправок 457
 Линия действительного горизонта 17
 — направления съемки 17
 — основания картины 16
 Лучи базисные 210
 — главные 210
 — надирные 210
 — проектирующие 210
 — соответственные 76, 210

 Макетные снимки Г. А. Ошуркова 322
 Марки измерительные 106
 Маркировка опорных точек 509
 Маршрутный стереоскоп 193
 Масштаб карты 511
 — модели 211
 — снимка 42
 — съемки 502
 — фототриангуляции 425
 — фотосхемы 190
 Масштабные инверсоры 147
 Масштабный коэффициент 430
 Мелкомасштабные снимки 509, 520, 537
 Меняющийся рельеф 72
 Метод комбинированный 4, 503
 — сложенный плоскостей 25

 Метод комбинированный
 — сравнения спектров 537
 — стереотопографический 506
 Методы создания карт 502
 — обновления карт 518
 Механизм поперечной коррекции 393
 — продольной коррекции 391
 Мешающее изображение 99
 Мешающий фактор 99
 Минимальная разность высот, оцениваемая стереоскопически 89
 Мнимая марка 92
 Модель местности 211
 Монокулярное зрение 73
 Монокомпаратор Аскорекорд Цейсса 487
 — МК-1 Керна 487
 — ТА-1/Р ОМИ 487
 Монокулярный способ измерения снимков 92
 Монтаж фотоплана 187
 — фотосхемы 190
 Мультиплекс 117

 Наблюдательная система 108, 306, 363
 Надирскоп 289
 Наземная фототопографическая съемка 502
 Накладной монтаж снимков 191
 Накладной уровень 162
 Накопление ошибок в фототриангуляции 475
 Направляющие косинусы 31
 Начальное направление 123
 Начальный отсчет 111
 Негатив 16
 Неопределенность взаимного ориентирования снимков 252
 Несимметричные точки 76
 Нить визирная 107
 Нормальный случай съемки 217
 Нулевой стереоэффект 87
 Нульпункты шкал 111

 Область аккомодации 70
 — отчетливого бинокулярного зрения 78
 Обновление карт 518
 Обработка снимков на мультиплексе 119, 452
 — на стереографе 322
 — на стереокомпараторе 111
 — на стереометре 398, 405, 409
 — стереопланиграфе 254, 268, 286, 452
 — стереопроекторе 312
 — целевом фототрансформаторе 328
 Обратный стереоскопический эффект 87

- Общая пластичность 81
 Опасное место 252
 Опознавание точек 505, 509
 Опознак 509
 Опорная точка 509
 Оптическая ось глаза 70
 Оптическая ось камеры 16
 Оптические условия трансформирования снимка 137
 Оптический редуктор Ф. В. Дробышева 130
 — Н. А. Попова 130
 Оптический проектор 120, 414
 Оригинал карты 420
 Ориентирование снимков на мультиплексе 119, 452
 — стереографе 322
 — стереомере 398, 405
 — стереопроекторе 312
 Ориентирование модели подобной — преобразованной 268, 286
 Ортогональная проекция 15
 Ортофотоскоп 350
 Ортофотоснимок 324
 Осветительное устройство 161, 328
 Освещенность 162
 Остаточный поперечный параллакс 238
 Острота бинокулярного зрения 79
 — монокулярного зрения 74
 Относительное отверстие объектива 158, 162, 167
 Отрицательный базис 458

 Палетка для введения децентрации снимков 289
 Палочки 68
 Панорамный снимок 65, 224
 Пара 209
 Параллакс зрительный 78
 — остаточный 238
 — поперечный 214
 — продольный 214
 — физиологический 78
 Параллаксометр 86
 Параллактические сетки М. Д. Коншина 497
 Параллактический винт 108
 Параллактический коэффициент 218
 Параллактический угол 76
 Параллактическое смещение 501
 Перекрытие снимков 504, 508
 Перспективная сетка 25
 Перспективные инверсоры 151
 План 15
 Плановые снимки 41
 Планшет 6
 Пластичность стереомодели 81
 Плоскопараллельная стеклянная
 пластинка 183
 Плоскостная фототриангуляция 122
 Плоскость базисная 210
 — главная базисная 210
 — главная зрительная 76
 — главного вертикала 17
 — горизонта 17
 — горизонтальная 17
 — действительного горизонта τ 17
 — зрительная 76
 — надирная базисная 210
 — основания 16
 — поляризация 100
 — снимка 16
 — средняя 172
 — трансформирования 172
 Поверки стереокомпаратора 110
 — стереографа 322
 — стереометра 399
 — стереопроектора 310
 — фототрансформатора ФТБ 158
 — фототрансформатора ФТМ 162
 Подобные связи 211
 Позитив 16
 Полевое дешифрирование снимков 5, 503
 Полевое обследование карты 527
 Полевой стереопланиграф А. Н. Лобанова 301
 Полевые работы 503, 506, 527
 Поле зрения 73
 Полярноид 100
 Поперечное перекрытие снимков 504, 508
 Поперечный параллакс на снимках 214
 — на модели 254
 Поперечный угол наклона модели 265
 — снимка 21
 Построение изображений прямых 21
 — точек 21
 Превышение 218
 Преобразование координат 31
 — связок проектирующих лучей 272
 Преобразованная децентрация 288
 Преобразованная модель 273
 Прецизионные рычаги 305
 Прибор для маркировки точек на снимках ПМГ-1 Керна 487
 — ПУГ-4 Вильда 487
 — Трансмарк Цейсса 487
 Прибор А. Н. Лобанова для проведения начальных направлений 132
 Приборы дифференцированные 387
 — универсальные 291
 Приведение центральной проекции к ортогональной 324
 Продольное перекрытие снимков 504, 508
 Продольный параллакс 214

- Продольный угол наклона модели 264
 — снимка 21
 Проектирующая система 360
 Проектирующий луч 15
 Проект полевой подготовки снимков 503, 506
 Проектор 414
 Пространственная фототриангуляция 423
 — аналитическая 425, 445
 — аналоговая 452
 Прямая засечка 27, 215
 Прямая проективная засечка 27
 Прямой стереоэффект 87
 Прямоугольные координаты точки местности 18, 431
 — точки снимка 18
- Рабочие поверки стереокомпаратора** 110
 — стереометра 399
 — стереопроектора 310
 Радиальная фототриангуляция 122
 Радиовысотомер 498
 Радиогеодезическая система 463
 Радиолокационная система 463
 Радионивелирование 498
 Радиус бинокулярного зрения 80
 Разность высот фотографирования 463
 Разность масштабов изображений на сетчатках глаз 78
 Разность продольных параллаксов 218
 Разрешающая сила объектива 112
 Разрешающая способность снимка 295
 — аэропленки 295
 Расстояние наилучшего зрения 70
 Расчет геодезического обоснования съемки 509
 Редуцирование фототриангуляции 129
 Резкость изображения 293
 Рекогносцировка 527
 Рельефная модель 83, 211
 Рефракция атмосферная 56
 Рисовка контуров и рельефа 213
- Сверхширокоугольный мультиплекс** 117
 Светофильтры 97
 Светящаяся марка 106
 Связка 210
 Связующая точка 123
 Сгущение опорной сети 123, 423
 Сетчатка 68
 Симметричные точки 76
- Система координат геодезических 18
 — фотограмметрических 18
 — на снимке 18
 Сканирование 81, 545
 Склера 68
 Слепое пятно 69
 Случайная деформация фотоматериала 65
 Снимок местности 15, 65
 — звезд 200
 Соответственные точки 76, 210
 Способ анаглифов 97
 — бленд 101
 — действительной марки 96
 — дифференцированный 7, 387
 — миганий 101
 — мнимой марки 92
 — неискаженной модели 491
 — прямой линии 500
 — поляризованных 100
 — электронный 102
 Стандартное положение точек 240
 Старение карт 518
 Статическая теория остроты зрения 81
 Статоскоп 463
 Стереоавтограф 299
 Стереограф Ф. В. Дробышева 316
 Стереокартограф Галилео 374
 Стереокомпаратор АСК-18 487
 — 1818 Цейсса 115
 — СКВ ЦНИИГАиК 482
 — СК-3 108
 Стереомат Вильда 343
 Стереометр Ф. В. Дробышева 387
 Стереомодель 211
 Стереометрограф Цейсса 353
 Стереопреобразователь В. Я. Финковского 273
 Стереопара 209
 Стереопланиграф полевой А. Н. Лобанова 301
 Стереопланиграф Цейсса 359
 Стереопланиграф С-8 366
 Стереопроектор Г. В. Романовского 303
 Стереоскопический рисовальный прибор М. Д. Коншина 297
 Стереоэффект нулевой 87
 — обратный 87
 — прямой 87
 Стереоскопические сетки М. Д. Коншина 497
 Стереотопографический метод 5, 506
 Стереотригонометрия Цейсса 347
 Съемка аэрофотопографическая 502
 — наземная фотопографическая 502

- Съемка аэрофототопографическая
 — комбинированная фототопографическая 503
 — мензульная 503
- Съемка контуров и рельефа 7, 409, 503
- Теория коррекционного механизма стереографа 316
 — коррекционных механизмов стереометра 391
 — коррекционного механизма стереопроектора 303
 — обработки снимков с преобразованием связками 272
 — одиночного снимка 15
 — пары снимков 209
 — трансформирования одиночного снимка 135
 — трансформирования пары снимков 275
 — фототриангуляции 122, 423
- Топографический проектор 420
- Топокарт Цейсса 378
- Топофлекс Цейсса 383
- Точка главная 16
 — надира 17
 — нулевых искажений 17
 — опорная 509
 — связующая 123
 — схода изображений прямых (главная) 17
 — фиксации бинокулярного взора 75
 — фиксации монокулярного взора 73
 — фиктивная 500
 — фотографирования 15
 — центральная 50
- Точки базисные 210
 — ориентирующие 172
 — симметричные 76
 — соответственные 76
 — стандартно расположенные 240
- Точность измерения координат точек модели 104, 475
 — координат точек снимка 104
 — параллакс 104
 — наведения измерительной марки 104
 — определения площади по фото-схеме 190
 — определения расстояния по фото-схеме 190
 — плоскостной фототриангуляции 133
 — пространственной фототриангуляции 475
 — трансформирования снимков 180
- Трансмарк Цейсса 487
- Трансформирование снимков 135
 — на наклонную плоскость 179
 — по зонам 177
 — по опорным точкам 170
 — по установочным элементам 170
- Увеличение наблюдательной системы 85
- Угловые элементы внешнего ориентирования снимка 20
- Угол конвергенции 76
 — отчетливого поля зрения 73
 — параллактический 76
 — поля зрения объектива 120
- Угол наклона снимка 20
 — продольный 21
 — поперечный 21
- Универсальные стереопроборы 291
 — аналитические 370, 555, 557
 — механические 299
 — оптико-механические 300
 — оптические 292
- Универсальный способ составления карты 5, 506
- Уравнение взаимного ориентирования снимков 229
 — внешнего ориентирования модели 265
 — внешнего ориентирования снимка 195
 — ориентирования снимков на стереометре 389
- Уравнивание фототриангуляции 123, 425, 445
- Условие пересечения пары соответственных лучей 229
- Установочные элементы 141
- Фокусное расстояние камеры аэрофотоаппарата 20
 — объектива 121
 — проектирующей камеры 121
 — снимка 18, 158, 210
- Формат снимка 120, 315
- Фотоабрис 482
- Фотовысотомер А. Н. Лобанова и И. И. Шелягина 219
- Фотоплан 187
- Фотополлигонометрия 494
- Фотоприставка к стереографу 324
- Фоторегистратор 482
- Фотостереограф Нистри 368
- Фототелевизионные снимки 542
- Фототеодолит 502
- Фотосхема маршрутная 190
 — многомаршрутная 194
- Фототрансформатор аналитический 169
 — большой 155
 — Е-4 Вильда 167

- Фототрансформатор аналитический
— малый 159
— Seg-V Цейсса 163
— Ректимат Цейсса 166
- Фототриангуляция аналитическая
123, 425, 445
— аналоговая 452
— графическая 129
- Хрусталик 70
- Цветная марка 106
Центральная проекция 15
Центральная точка 50
Центральная ямка 68
Центр проекции 16
Цифровая автоматическая картосо-
ставительская система 555
- Щелевой фототрансформатор Е. И.
Калантарова и Г. П. Жукова 326
- Электронный картографический
трансформатор М. П. Бордюков
103
- Элементы взаимного ориентирования
пары снимков 226
— взаимного ориентирования моде-
лей 425
— внешнего ориентирования модели
264
— внешнего ориентирования снимка
20, 195
— внешнего ориентирования стерео-
пары 214
— внутреннего ориентирования
снимка 20
— трансформирования снимка 141
- Эллипс масштабных искажений 44

	С.
исловие	3
вне	4
в а 1. Теория одиночного снимка	15
1. Снимок — центральная проекция	15
2. Элементы центральной проекции	16
3. Координаты точек местности и снимка	18
4. Элементы ориентирования снимка	20
5. Построение на снимке изображений точек и прямых	21
6. Метод сложения плоскостей	25
7. Прямая проективная засечка	27
8. Пространственные координаты точек снимка	29
9. Определение направляющих косинусов	31
10. Зависимость между координатами точек местности и снимка	36
11. Зависимость между координатами соответственных точек горизонтального и наклонного снимков	40
12. Масштаб снимка	42
13. Зависимость между углами на местности и на снимке	46
14. Липнейные искажения	50
15. Влияние рельефа	54
16. Влияние рефракции и кривизны Земли	56
17. Основные формулы для панорамного снимка	65
в а 2. Наблюдение и измерение снимков	68
18. Глаз и зрительные ощущения	68
19. Монокулярное зрение	73
20. Бинокулярное зрение	75
21. Стереоскопическое наблюдение снимков	83
22. Способы измерения снимков	92
23. Стереоскомпараторы	107
24. Мультиплексы	117
в а 3. Плоскостная фототриангуляция	122
25. Общие сведения	122
26. Аналитическая радиальная фототриангуляция	123
27. Графическая радиальная фототриангуляция	129
28. Точность радиальной фототриангуляции	133
в а 4. Трансформирование снимков	135
29. Назначение и сущность способов трансформирования снимков	135
30. Аналитический способ	136
31. Геометрические и оптические условия фотомеханического трансформирования снимков	137
32. Элементы трансформирования снимка	141
33. Масштабные инверсоры	147
34. Перспективные инверсоры	151
35. Большой фототрансформатор (ФТБ, Seg-I)	155
36. Малый фототрансформатор (ФТМ, Seg-IV)	159
37. Фототрансформатор Seg-V	163
38. Фототрансформатор «Ректимат»	166
39. Фототрансформатор Е-4	167
40. Аналитический фототрансформатор	169
41. Трансформирование снимков по установочным элементам и по опорным точкам	170

	С.
42. Влияние деформации фотобумаги	175
43. Трансформирование снимков по зонам	177
44. Трансформирование снимков на наклонную плоскость	179
45. Влияние ошибок элементов ориентирования снимка и установочных элементов	180
46. Влияние плоскопараллельных стеклянных пластин	183
Глава 5. Фотопланы и фотосхемы	186
47. Общие сведения	186
48. Составление фотопланов	187
49. Составление фотосхемы	190
Глава 6. Определение элементов внешнего ориентирования снимка	195
50. Общие сведения	195
51. Определение элементов внешнего ориентирования снимка по опорным точкам	200
52. Определение элементов ориентирования снимка по звездам	204
53. Геоцентрические координаты точек местности	209
Глава 7. Теория пары снимков	209
54. Элементы пары снимков и модель местности	209
55. Координаты и параллаксы точек стереопары	213
56. Элементы ориентирования пары снимков	214
57. Зависимость между координатами точки местности и ее изображений на паре снимков	215
58. Основные формулы для пары горизонтальных снимков	217
59. Связь между продольными параллаксами на горизонтальных и плановых снимках	220
60. Поперечный параллакс	222
61. Основные формулы для пары панорамных снимков	224
Глава 8. Взаимное ориентирование пары снимков	225
62. Взаимное ориентирование как этап двойной обратной засечки	225
63. Элементы взаимного ориентирования	226
64. Условие пересечения пары соответственных лучей	229
65. Уравнения взаимного ориентирования	229
66. Определение элементов взаимного ориентирования ($\alpha'_1, \kappa'_1, \alpha'_2, \omega'_2, \kappa'_2$)	237
67. Определение элементов взаимного ориентирования ($\tau', \nu', \Delta\alpha, \Delta\omega, \Delta\kappa$)	245
68. Зависимость между двумя системами элементов взаимного ориентирования	249
69. Неопределенность взаимного ориентирования	252
70. Взаимное ориентирование снимков на приборе	254
Глава 9. Внешнее ориентирование модели	264
71. Элементы внешнего ориентирования модели	264
72. Аналитический способ внешнего ориентирования модели	265
73. Внешнее ориентирование модели на приборе	268
Глава 10. Ориентирование снимков с преобразованными связками	272
74. Общие сведения	272
75. Построение модели по горизонтальным снимкам	273
76. Теория трансформирования пары снимков	275
77. Взаимное ориентирование снимков с преобразованными связками	282
78. Построение и внешнее ориентирование модели	286

	С.
Глава 11. Универсальные стереоприборы	291
§ 79. Назначение и классификация универсальных стереоприборов	291
§ 80. Принципиальные схемы оптических универсальных стереоприборов	292
§ 81. Принципиальные схемы механических универсальных стереоприборов	298
§ 82. Принципиальные схемы оптико-механических универсальных стереоприборов	300
§ 83. Принципиальная схема аналитических универсальных стереоприборов	302
§ 84. Стереопроектор Г. В. Романовского	303
§ 85. Стереограф Ф. В. Дробышева	316
§ 86. Целевой фототрансформатор ФТЩ-2	326
§ 87. Автографы Вильда	331
§ 88. Авиографы Вильда	340
§ 89. Стереоматы Вильда	343
§ 90. Стереотриголат Цейсса	347
§ 91. Стереометрограф Цейсса	353
§ 92. Стереопланиграф Цейсса	359
§ 93. Фотостереограф Нистри	368
§ 94. Аналитический стереоприбор АР	370
§ 95. Стереокартограф Галилео	374
§ 96. Топокарт Цейсса	378
§ 97. Топофлекс Цейсса	383
§ 98. Основные направления развития универсальных стереоприборов	385
Глава 12. Стереометр и создание карты дифференцированным способом	387
§ 99. Общие сведения	387
§ 100. Уравнение ориентирования снимков на стереометре	389
§ 101. Теория коррекционных механизмов	391
§ 102. Ориентирование снимков по установочным величинам	398
§ 103. Ориентирование снимков по шести точкам	399
§ 104. Ориентирование снимков по четырем точкам	405
§ 105. Определение высот точек и проведение горизонталей	409
§ 106. Трансформирование продольного параллакса начальной точки	411
§ 107. Определение высоты фотографирования	413
§ 108. Составление карты	414
Глава 13. Пространственная фототриангуляция	423
§ 109. Назначение и классификация пространственной фототриангуляции	423
§ 110. Аналитическая маршрутная фототриангуляция	425
§ 111. Аналитическая многомаршрутная фототриангуляция	445
§ 112. Фототриангуляция на универсальных стереоприборах	452
§ 113. Использование элементов внешнего ориентирования снимков	463
§ 114. Влияние систематических ошибок и методы исключения деформации модели	468
§ 115. Точность пространственной фототриангуляции	475
§ 116. Высокоточные автоматизированные стереокомпараторы	482
§ 117. Высокоточные автоматизированные монокомпараторы и приборы для маркировки точек на снимках	487

	С.
Глава 14. Дифференцированные способы сгущения опорной сети	491
§ 118. Способ неискаженной модели	491
§ 119. Фотополигонометрия	494
§ 120. Аэрорадионивелирование	498
§ 121. Способ прямой линии	500
Глава 15. Методы создания топографических карт по аэроснимкам	502
§ 122. Классификация видов и методов фототопографической съемки	502
§ 123. Комбинированный метод	503
§ 124. Стереотопографический метод	506
Глава 16. Обновление топографических карт	518
§ 125. Старение карт и необходимость их обновления	518
§ 126. Методы обновления карт	519
§ 127. Подготовительные работы	522
§ 128. Камеральное дешифрирование снимков и исправление карты	525
§ 129. Полевое обследование обновленной карты	527
Глава 17. Картографирование планет и их спутников	529
§ 130. Общие сведения	529
§ 131. Геометрические свойства снимков планет и их спутников	530
§ 132. Дистанционные методы изучения земной поверхности	536
§ 133. Калибровка фототелевизионных снимков	542
Глава 18. Автоматизация стереоизмерений	545
§ 134. Сканирование снимков и корреляция сигналов	545
§ 135. Изогипсограф	550
§ 136. Блок-схема стереомата	552
§ 137. Цифровая автоматическая картосоставительская система	555
§ 138. Аналитический фотокартограф	557
§ 139. Перспективы развития автоматизации стереоизмерений	560
Заключение. Перспективы развития аэрофототопографии	563
Список литературы	565
Предметный указатель	566

ИБ № 2478

Алексей Николаевич Лобанов

АЭРОФОТОТОПОГРАФИЯ

Издание второе, дополненное

Редактор издательства Л. Г. Иванова
 Переплет художника А. Толмачева
 Художественный редактор В. В. Евдокимов
 Технический редактор В. В. Соколова
 Корректоры В. И. Ионкина, И. Н. Таранева

Сдано в набор 20/V 1977 г. Подписано в печать 28/X 1977 г. Т-18363. Формат 60 × 90^{1/16}
 Бумага № 1. Печ. л. 36,0. Уч.-изд. л. 35,31. Тираж 5200 экз. Заказ 227/5667—15
 Цена 3 р. 40 к.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.
 Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете
 Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
 196006, Ленинград, Московский пр., 91.

SP. 407.

2339

TEMPA