

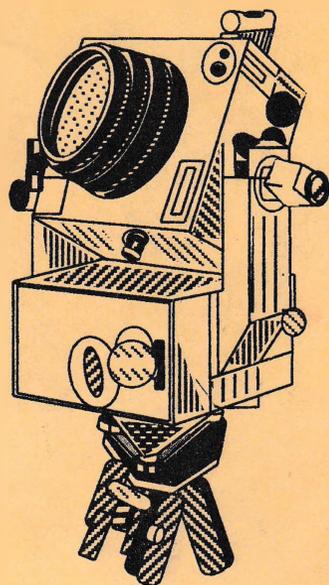
В.И.ПАВЛОВ

ФОТОГРАММЕТРИЯ

**НАЗЕМНАЯ
СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ
СЪЕМКА**



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2006**



Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В.Плеханова
(технический университет)

В.И.ПАВЛОВ

ФОТОГРАММЕТРИЯ

НАЗЕМНАЯ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

*Допущено Учебно-методическим объединением по геодезии
и фотограмметрии в качестве учебного пособия
для студентов, обучающихся по специальности 120101
«Прикладная геодезия»*

Издание второе, исправленное

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2006

УДК 528.7(075.80)

ББК 26.12

П12

Изложены теоретические основы наземной стереофотограмметрической съемки и ее применение для создания топографических планов и решения инженерных задач.

Описаны технические средства наземной съемки и измерения полученных снимков. Рассмотрены методы обработки наземных снимков. Приведены особенности производства наземной съемки при решении различных инженерных задач.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальностям 120101 «Прикладная геодезия» и 120303 «Городской кадастр».

Рецензенты: кафедра фотограмметрии факультета Военно-инженерного ун-та (Санкт-Петербург); генеральный директор ~~каф. техн. наук~~ **А.В. Юськевич** (ФГУП «Аэрогеодезия»).

Павлов В.И.

П12. Фотограмметрия. Наземная стереофотограмметрическая съемка: Учеб. пособие / Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). 2-е изд., исправл. СПб, 2006. 112 с.

ISBN 5-94211-218-5

УДК 528.7(075.80)

ББК 26.12

ISBN 5-94211-218-5

С Санкт-Петербургский горный институт им. Г.В.Плещинского, 2004

С Санкт-Петербургский горный институт им. Г.В.Плещинского, 2006, с исправлениями

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее пособие посвящено второй части учебного курса «Фотограмметрия» и рассматривает наземную стереофотограмметрическую съемку. В нем не обсуждаются такие общие вопросы, как история развития фотограмметрии, оптические и геометрические основы фотограмметрии, поскольку они детально освещены в предыдущем пособии по фотограмметрии [8]. В книге рассматривается теория наземной фотограмметрии и особенности ее применения при решении отдельных инженерных задач.

Наземную фототеодолитную съемку применяют при топографической съемке преимущественно горных открытых районов, маркшейдерской съемке открытых горных разработок (карьеров); контроле качества монтажа инженерных сооружений в процессе их строительства и эксплуатации; обмере зданий, сооружений и исторических памятников архитектуры; исследовании деформации инженерных сооружений и различного рода моделей изучаемых явлений; съемке ледников, склоновых процессов и многих других нетопографических задач.

Материал изложен в соответствии с программой курса «Фотограмметрия» для студентов специальностей 120101 «Прикладная геодезия» и 120303 «Городской кадастр».

Основой пособия явились лекции, которые автор читает в СПГИ студентам 3-4-го курсов более 20 лет. При подготовке использованы также опубликованные труды А.Н.Лобанова, В.М.Сердюкова, А.П.Трунина, П.Н.Бруевича, Ю.Н.Корнилова, Г.А.Лыскова, а также результаты собственных исследований. Параграфы 17 и 18 пособия написаны кандидатом технических наук доцентом Ю.Н.Корниловым.

Автор считает приятным долгом выразить признательность рецензентам – кандидатам технических наук П.И.Дуде и А.В.Юськевичу, преподавателям кафедры инженерной геодезии СПГИ за замечания и пожелания, сделанные ими при обсуждении книги, а также В.В.Бурнейко за помощь при подготовке пособия к изданию.

Глава 1

ФОТОТЕОДОЛИТНАЯ СЪЕМКА

§ 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Фотографирование объекта производится, как правило, с точек земной поверхности (фотостанций). В качестве съемочной камеры используется фототеодолит, который представляет собой сочетание фотографической камеры и теодолита (ориентирующего устройства). Поэтому наземную фототопографическую съемку часто называют *фототеодолитной*.

Снимок, полученный с помощью фотокамеры, является центральной проекцией фотографируемого объекта (местности).

В наземной фотограмметрии изучение объекта можно производить по измерениям одиночных снимков или по результатам измерений пар снимков – снимков с изображениями одного и того же участка объекта (местности), полученных с разных точек пространства.

Если по снимкам решается задача определения координат точек объекта, расположенного в плоскости, параллельной плоскости изображения, то съемку выполняют с одной фотостанции. Такую съемку называют *фотограмметрической*.

Если по снимкам необходимо определять пространственное положение точек объекта, то съемку выполняют с концов базиса. Эту съемку называют *стереофотограмметрической*.

Элементами стереоскопической пары наземных снимков являются (рис.1): левый P_1 и правый P_2 снимки; центры проекций левого S_1 и правого S_2 снимков; соответственные (одноименные) точки a_1 и a_2 , c_1 и c_2 – изображения точек A и C на снимках стереопары P_1 и P_2 ; связки лучей AS_1 и S_1a_1 , CS_1 и S_1c_1 , AS_2 и S_2a_2 , CS_2 и S_2c_2 , проектирующие точки местности на плоскость изображения; главные лучи S_1o_1 и S_2o_2 ; главные точки o_1 и o_2 снимков P_1 и P_2 ; соответственные (одноименные) проектирующие лучи – S_1a_1 и S_2a_2 , S_1c_1 и S_2c_2 ; фокусные расстояния $f_1 = o_1S_1$ и $f_2 = o_2S_2$ снимков; базисные плоскости S_1AS_2 , S_1CS_2 и т.д.

Наземная стереофотограмметрическая съемка (НСС) включает полевые и камеральные работы. Задачей полевых работ является фотографирование местности, производство геодезических измерений с целью определения координат пунктов съемочного обоснования и полевое дешифрирование снимков.

При аэрофото съемке земной поверхности фотографирование осуществляется с движущегося летательного аппарата, поэтому положение снимков в принятой системе координат (элементы внешнего ориентирования) известно с недостаточной точностью.

При производстве фототеодолитной съемки плоскость изображения фотокамеры может быть установлена в вертикальное положение, координатная ось x – в горизонтальное положение, а оптическая ось ориентирована относительно базиса. По данным геодезических измерений определяют координаты левого конца базиса фотографирования, его длину и превышение правого конца базиса относительно левого. Таким образом, в отличие от аэроснимков, элементы внешнего ориентирования наземных снимков представляют собой величины, известные с достаточно высокой точностью, что существенно упрощает проведение камеральных работ при их инструментальной обработке.

Камеральную обработку наземных снимков выполняют аналитическим, графическим или графомеханическим методами.

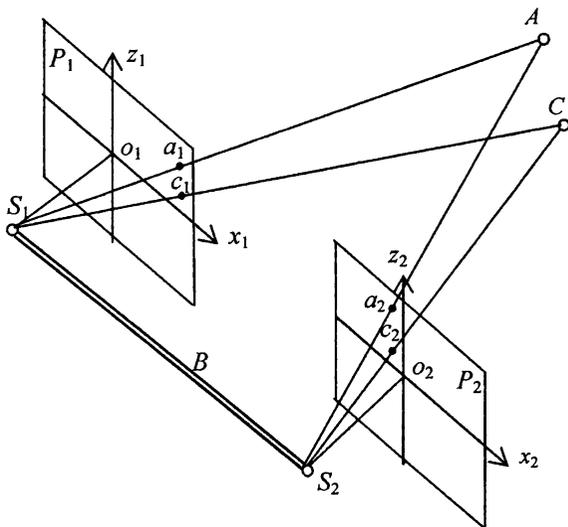


Рис. 1. Элементы стереопары наземных снимков

§ 2. ВИДЫ ФОТОТЕОДОЛИТНОЙ СЪЕМКИ

При фототеодолитной съемке оптическую ось фотокамеры можно устанавливать в различное положение относительно горизонтальной плоскости и линии базиса.

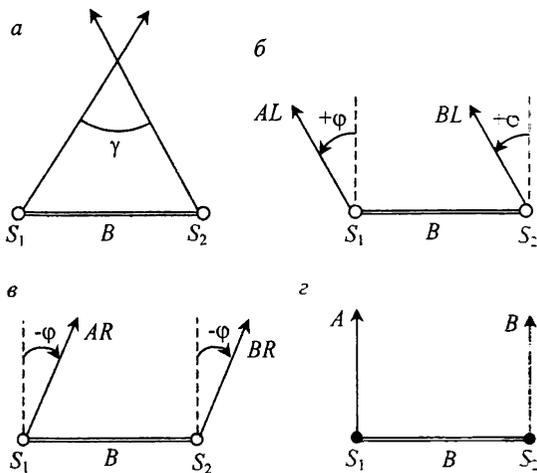
В зависимости от положения главных лучей снимков стереопары в момент фотографирования различают пять основных видов (случаев) наземной съемки: общий, конвергентный, равноотклоненный (скошенный), нормальный и равнонаклоненный.

В *общем* виде съемки главные лучи снимков стереопары занимают произвольное положение относительно горизонтальной плоскости и базиса фотографирования.

При *конвергентном* виде съемки (рис.2, а) главные лучи снимков стереопары горизонтальны и составляют с нормалью к базису фотографирования углы φ_1 и φ_2 , а оси x снимков горизонтальны.

В *равноотклоненном* виде съемки (рис.2, б и в) главные лучи снимков горизонтальны, параллельны между собой и составляют с нормалью к базису фотографирования заданный угол ω , а оси x снимков горизонтальны. Знаки угла φ показаны на рис.2, б и в.

При *нормальном* виде съемки (рис.2, г) главные лучи обо-



их снимков горизонтальны и перпендикулярны ($\omega = 0$) к базису фотографирования, а оси x снимков горизонтальны.

В *равнонаклоненном* виде съемки главные лучи перпендикулярны к базису фотографирования, но наклонены к горизонтальной плоскости на один и тот же угол ω , а оси x снимков горизонтальны.

Рис.2. Виды фототеодолитной съемки: а – конвергентный; б, в – равноотклоненный; г – нормальный

Наибольшее применение на практике нашли нормальный и равноотклоненный виды съемок (фотосъемка с параллельными оптическими осями). Равнонаклоненный вид съемки используется довольно редко из-за отсутствия приборов, предназначенных для камеральной обработки таких снимков. Общий вид съемки имеет теоретическое значение и на производстве используется крайне редко.

§ 3. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ФОТОТЕОДОЛИТНОЙ СЪЕМКИ

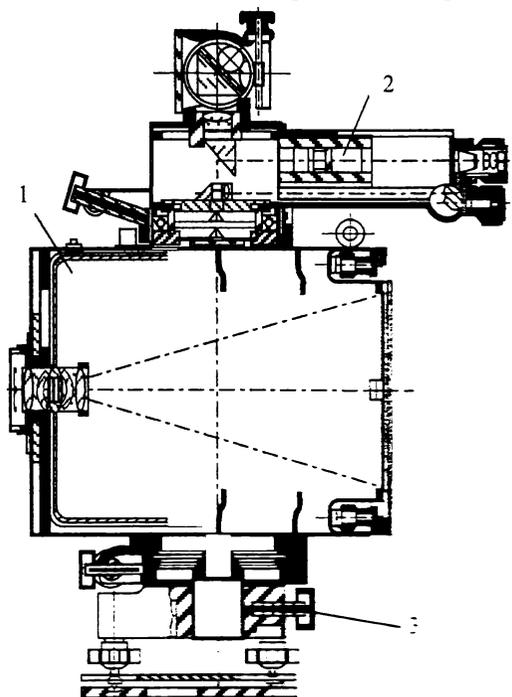
В процессе съемки фотографирование местности (объекта) выполняют с помощью фототеодолита. Этот прибор используется для измерительной фотосъемки горной местности, карьеров, архитектурных сооружений, памятников, ледников, а также быстро протекающих процессов (оползней, селей, снежных лавин и др.).

Фототеодолит представляет собой измерительную фотокамеру, снабженную ориентирующими и регистрирующими устройствами и приспособленную для съемки в статических положениях. Измерительная фотокамера имеет объектив с высокой разрешающей способностью и незначительной дисторсией. Стабильность элементов внутреннего ориентирования камеры обеспечивается жесткой конструкцией ее корпуса, изготовленного из легкого сплава с малым температурным коэффициентом линейного расширения. На одной стороне корпуса укреплен объектив, а на противоположной – прикладная рамка с координатными метками, в плоскости которой расположен светочувствительный слой. Элементы внутреннего ориентирования камеры определены с высокой точностью. Ориентирующее устройство фототеодолита позволяет устанавливать в камере заданные значения элементов внешнего ориентирования. В отдельных приборах можно устанавливать заданные значения фокусного расстояния фотокамеры и положение главной точки в плоскости прикладной рамки. Наклон визирного луча в вертикальной плоскости осуществляют вращением призмы вокруг горизонтальной оси с помощью тангенциального винта. Установку центра фотографирования камеры по осям X и Y на заданные размеры осуществляют с

помощью штатива, подставки и отвеса. Регистрирующие устройства фототеодолита на краю поля зрения фотоснимка фиксируют: координатные метки; фокусное расстояние фотокамеры, отфокусированной на бесконечность; изменение фокусного расстояния камеры; двухразрядный номер базиса фотографирования; буквенные обозначения вида съемки с базиса и метку оптического горизонта.

Рассмотрим технические характеристики фототеодолитов фирмы «Карл Цейсс», используемых в нашей стране (табл.1).

Фототеодолит Photo 19/1318. Данный теодолит (рис.3) предназначен для фотографирования удаленных статических объектов на вертикально расположенную фотопластинку



при любых углах скоса ϕ (угол между главным оптическим лучом и нормалью к базису фотографирования) и при горизонтальном положении главного луча. В фототеодолитный комплект кроме фототеодолита входит теодолит-тахеометр Тхео-020, базисная рейка Вайв-2т, 24 кассеты, три подставки, три марки, три штатива, три шнуровых отвеса, юстировочный накладной уровень и полевое юстировочное устройство.

Вертикальный угол поля зрения объектива камеры меньше горизонтального, однако объект с шагом 5 мм может

Рис.3. Фототеодолит Photo 19/1318
1 — фотокамера, 2 — зрительная труба,
3 — подставка

Таблица 1

Фотогеологиты фирмы «Карл Цейсс»

Модель фотогеологита	Формат снимка, мм	Название объекта	f, мм; относительный размер отверстия	Угол поля зрения по осям x, z и по диагонали	Носитель эмульсии	Отстояние до объекта, м	Радиальная дисторсия, мкм	Выдержка затвора, с
Photheo 9/1318 (Фотео)	110×160	Ортопротар	195; 1/22	450° 32 53	Стекло-пластичные	От 40 до ∞	6	—
УМК 65/1318	120×166	Ламегон	64; 1/5,6	410 86 112	Стекло-пластичные, рулонная пленка	От 2 до ∞	От 1 до 10	От 1 до 1/400
УМК 10/1318	120×166	"	99; 1/8	79 61 87	То же	От 1 до ∞	От 1 до 10	От 1 до 1/400
УМК 20/1318	120×166	Ламегар	200; 1/8	45 33 51	"	От 4 до ∞	4	От 1 до 1/400
УМК 30/1318	120×166	"	300; 1/11	31 22 35	"	От 50 до ∞	2	От 1 до 1/400
SMK 5.5/0808/40	80×80	Ламегон	56; 1/5,6	71 71 90	Стекло-пластичные, листовая пленка	4	—	От 1 до 1/500
SMK 5.5/0808/120	80×80	"	56; 1/5,6	71 71 90	То же	8	—	От 1 до 1/500

смещаться вверх до 30 мм и вниз до 40 мм. Положение главной точки при этом фиксируется на краю снимка меткой оптического горизонта. Зрительная труба с осями вращения и отсчетными устройствами расположена в верхней части корпуса камеры. Это обеспечивает установку визирной оси трубы под заданным углом к координатной системе камеры.

С помощью барабанчиков, расположенных на боковой поверхности фотокамеры, можно установить номер фотоснимка от 0 до 99 и вид съемки.

Указатель вида съемки имеет шесть положений:

- А – нормальный вид съемки с левой точки базиса фотографирования ($\varphi = 0^\circ$);
- AL – отклоненный влево;
- AR – отклоненный вправо;
- В, BL, BR – те же варианты съемки, но с правой точки базиса фотографирования.

Три стереопары, полученные с одного базиса фотографирования при углах φ , равных нулю, $-31,5^\circ$ и $+31,5^\circ$, обеспечивают составление плана участка местности без разрывов и при минимальном перекрытии, поэтому угол скоса $\varphi = 31,5^\circ$ называют стандартным.

Оптический теодолит-тахеометр Theo-020, подставки, марки и штативы предназначены для выполнения геодезических работ, связанных со сгущением высотного и планового обоснования съемки, привязкой станций фотографирования и измерением длин базисов.

Универсальные измерительные камеры (УМК). Данные камеры (рис.4) совместно с ориентирующей системой обладают более широкими возможностями фотографирования различных объектов по масштабу изображения и отстояниям, по углам поля зрения и их ориентации. Фотокамеры 1 (рис.4) имеют различные фокусные расстояния (табл.1), снабжены крестовиной полуосей, с помощью которых их могут устанавливать в лагеры 2 ориентирующей системы. При этом имеется возможность выбора ориентации (вертикальной или горизонтальной) длинной стороны снимка. Во второй и третьей моделях камеры можно изменять ее фокусное расстояние. Кроме традиционных регистрирующих устройств камеры снабжены устройством фиксации изменения фокусного расстояния. Объективы

камер имеют центральный затвор. Ориентирующая система с вертикальной осью вращения, уровнями и лагерами для камер содержит зрительную трубу с горизонтальным кругом, отсчетным микроскопом и призменную поворотную систему с тангенциальным микрометрическим винтом. Визирная ось зрительной трубы и главный луч камеры всегда расположены в одной плоскости. На камерах около полуосей закреплены секторы с пазами, а на лагере имеется фиксатор паза, что позволяет наклонять камеру на угол ω от -30 до $+90^\circ$ с дискретностью 15° . Камеры приспособлены для пластиночных и пленочной кассет. Последняя работает синхронно с затвором объектива от командного прибора. Данный прибор позволяет управлять синхронной работой двух камер, что необходимо при съемке подвижных объектов. Интервалы между экспозициями могут устанавливаться от 3 до 30 с. Комплект снабжен аккумуляторным блоком электропитания.

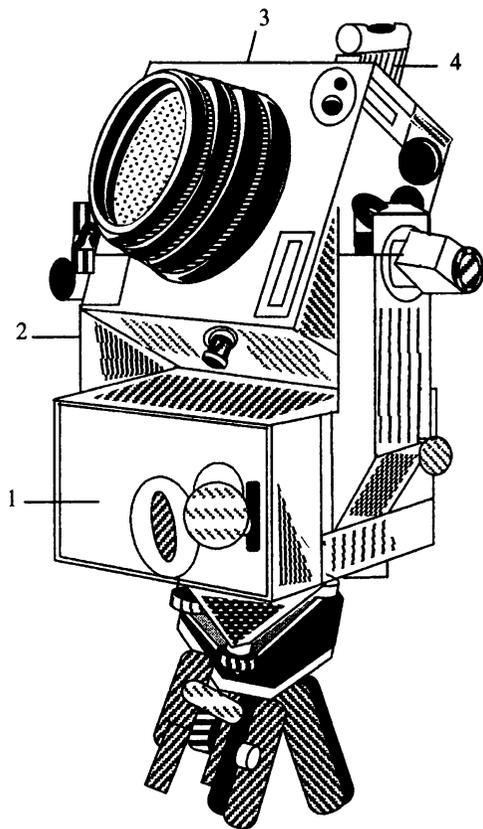


Рис.4. Фототеодолит UMK 10/1318
 1 – ориентирующая система; 2 – лагера; 3 – фотокамера; 4 – накладной цилиндрический уровень

Стереоизмерительные камеры (SMK). Фототеодолит SMK (рис.5) предназначен для оперативной съемки небольших объектов. Фотокамеры закрепляют на концах цилиндрической штанги, которую

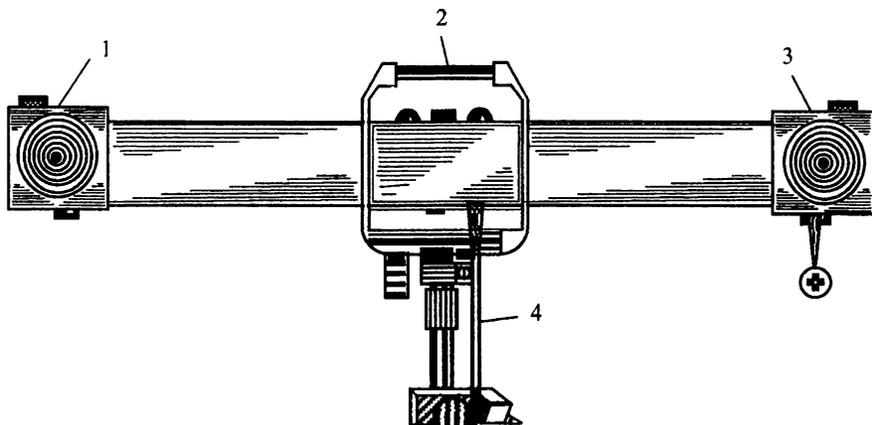


Рис.5. Фототеодолит SMK 5.5/0808
1, 3 – фотокамеры; 2 – уровень; 4 – подъемник

с помощью штатива длиной от 1,3 до 2,5 м с подъемным механизмом можно устанавливать в горизонтальное и вертикальное положение. Жесткая фиксация камер на заданном расстоянии с параллельной между собой и нормальной к базису ориентацией главных лучей обеспечивает стереосъемку с элементами относительного ориентирования снимков, позволяющими определять координаты точек объекта по простым формулам нормального вида съемки. Выпускают две разновидности стереокамер (табл.1) – с базисом 400 и 1200 мм. Среднее отстояние снимаемого объекта равно восьми базисам фотографирования. Электрическое управление камерами обеспечивает синхронную съемку, которая необходима при фотографировании подвижных объектов. Камеры снабжены съемным оптическим видоискателем. На краях поля зрения снимка впечатываются светящиеся координатные метки, фокусное расстояние, базис фотографирования и изображение информационного экранчика, на который перед экспонированием записывают необходимые сведения.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАЗЕМНОГО СНИМКА И СНИМКОВ СТЕРЕОПАРЫ

§ 4. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ФОТОТЕОДОЛИТНОЙ СЪЕМКЕ

При производстве фототеодолитной съемки для установления связей между точками объекта (местности) и их фотографическим изображением используют пространственные и плоские системы координат.

Результаты выполненных по снимкам определений положения точек местности обычно представляют геодезическими координатами. При этом плановое положение точек определяют в прямоугольной системе координат на плоскости в проекции Гаусса, а высоты отсчитывают от уроченной поверхности (Балтийская система высот). В фотограмметрии такие координаты принято называть пространственными прямоугольными геодезическими координатами и обозначать X_r, Y_r, Z_r , а систему координат $OX_rY_rZ_r$ – геодезической (рис.6).

Координаты точек местности по измерениям наземных снимков часто определяются в пространственной фотограмметрической системе координат $SXYZ$ (рис.6). Ее используют при определении взаимного положения точек объекта. Начало и направления координатных осей этой системы могут быть выбраны произвольно.

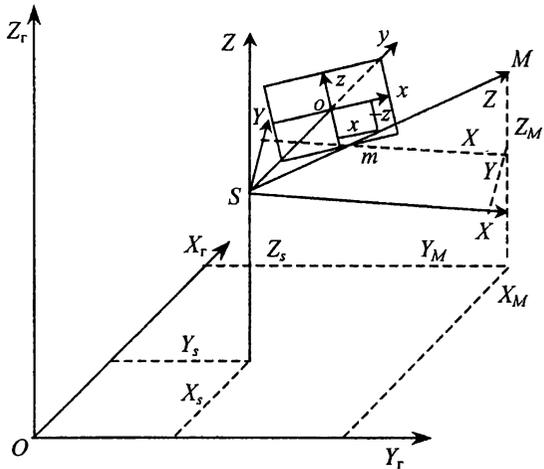


Рис.6. Геодезическая $OX_rY_rZ_r$ и фотограмметрическая $SXYZ$ пространственные системы координат

В частном случае за начало координат принимают переднюю узловую точку объектива S при установке фототеодолита на левом конце базиса. Ось Z занимает обычно вертикальное положение, а оси X, Y – различное горизонтальное положение, которое зависит от постановки задачи и удобства выполнения математической обработки результатов измерений. Ось Y может совпадать с направлением оптической оси левой фотокамеры. Система координат правая.

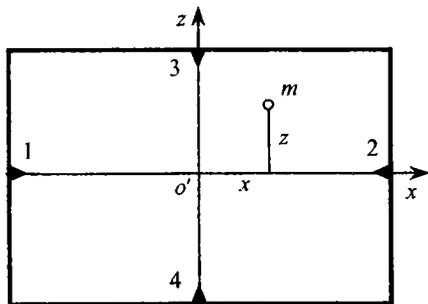


Рис.7. Система плоских координат наземного снимка

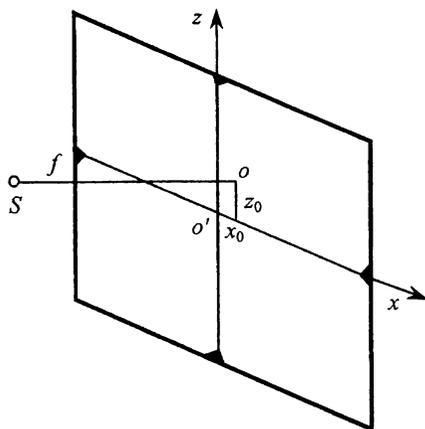


Рис.8. Элементы внутреннего ориентирования наземного снимка

Плоская прямоугольная система координат снимка $o'xz$ при наличии на нем четырех координатных меток 1, 2, 3, 4 показана на рис.7. Начало координат находится в точке o' пересечения прямых 1-2 и 3-4. Ось x совмещена с прямой 1-2, а ось z – с перпендикуляром к оси x в точке o' . Положение точки m на снимке задано координатами x_m, z_m в системе координат $o'xz$.

Координатные метки на снимке являются изображением координатных меток, установленных в плоскости прикладной рамки фотокамеры.

Вследствие погрешностей изготовления и юстировки фотокамеры начало координат o' чаще всего не совпадает с главной точкой снимка o , а ось z не проходит через координатные метки 3 и 4. Положение главной точки o на фотоснимке определяется координатами x_0 и z_0 в системе координат $o'xz$ (рис.8).

§ 5. ЭЛЕМЕНТЫ ОРИЕНТИРОВАНИЯ НАЗЕМНОГО СНИМКА И ПАРЫ НАЗЕМНЫХ СНИМКОВ

Для определения пространственных координат точек объекта (местности) по наземным снимкам и восстановления положения снимков в пространстве в момент фотографирования относительно принятой системы координат необходимо знать элементы ориентирования снимков. Наземный снимок, так же как и аэроснимок, имеет три элемента внутреннего и шесть элементов внешнего ориентирования.

Элементами внутреннего ориентирования (ЭВнО) являются фокусное расстояние фотокамеры $f = So$ и координаты x_0, z_0 главной точки снимка o в системе координат $o'xz$ (рис.8). Они позволяют определить положение центра проекции S относительно плоскости снимка и восстановить связку проектирующих лучей, существовавшую в момент фотографирования.

Элементы внешнего ориентирования (ЭВО) позволяют установить положение связки лучей относительно заданной пространственной прямоугольной системы координат в момент фотографирования.

Система элементов внешнего ориентирования одиночного снимка (рис.9) содержит: X_S, Y_S, Z_S – координаты центра проекции S

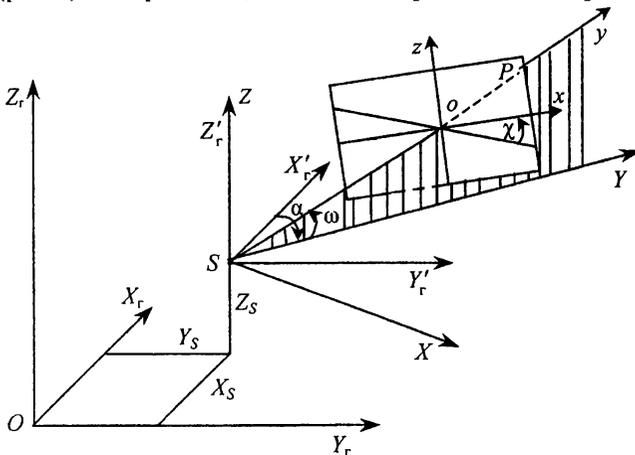


Рис.9. Элементы внешнего ориентирования наземного снимка

в принятой системе координат; α – дирекционный угол главного луча So ; ω – угол наклона главного луча к горизонтальной плоскости; χ – угол поворота снимка в своей плоскости (угол между осью x снимка и линией горизонта) вокруг главного луча.

На практике для пары наземных снимков используют систему элементов внешнего ориентирования, которая исключает необходимость определения координат правого конца базиса. Эта система включает (рис.10): X_S, Y_S, Z_S – геодезические координаты левого конца базиса фотографирования; B – проекцию базиса фотографирования на горизонтальную плоскость XY ; B_Z – превышение правого конца базиса относительно левого; α_B – дирекционный угол базиса S_1S_2 ; ω_1 и ω_2 – углы наклона оптических осей фотокамеры в левой и правой точках фотографирования; χ_1 и χ_2 – углы поворота (крена) левого и правого снимков в своей плоскости; φ_1 – угол скоса – горизонтальный угол в левой точке фотографирования между нормалью к базису и направлением оптической оси фотокамеры; γ – угол между проекциями главных лучей снимков на плоскость XY , равный разности углов скоса правого и левого снимков ($\gamma = \varphi_2 - \varphi_1$).

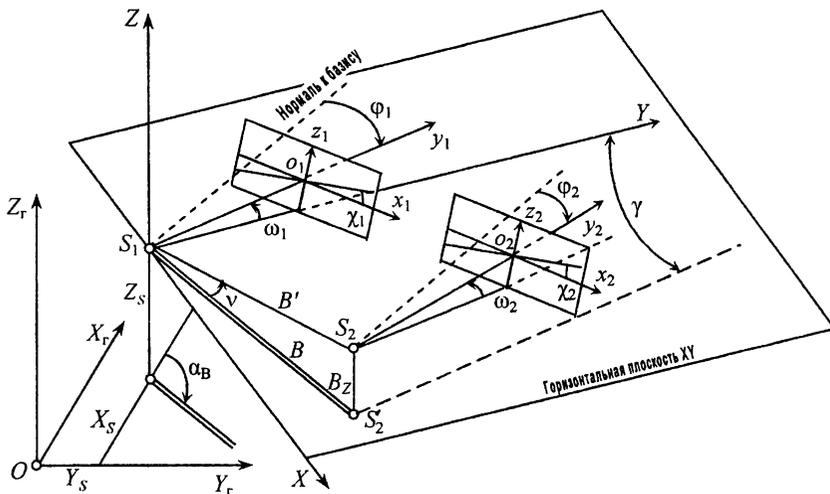


Рис.10. Система элементов внешнего ориентирования стереопары наземных снимков

Если главные лучи сходятся, то значение угла γ положительное и его называют углом *конвергенции*. Если главные лучи расходятся, то значение γ отрицательное и угол называется углом *дивергенции*.

Выбор такой системы элементов внешнего ориентирования снимков стереопары обусловлен тем, что эти величины можно определить непосредственно при производстве фототеодолитной съемки. Координаты X_{S_1} , Y_{S_1} , Z_{S_1} точки S_1 , а также величины α_B , B и B_Z находят геодезическим путем. Заданные углы скоса ϕ_1 и ϕ_2 устанавливают при помощи ориентирного устройства фотокамеры. Углы ω и χ приводят при помощи уровней камеры к значениям, практически равным нулю. Поэтому после установки фототеодолита в рабочее положение плоскость изображения займет вертикальное положение, а ее ось x – горизонтальное.

Элементы взаимного ориентирования пары наземных снимков при графомеханическом способе их обработки, как правило, не определяют, поскольку с достаточно высокой точностью известны элементы внешнего ориентирования.

Для восстановления пространственного положения снимков стереопары, полученных с помощью одного и того же фототеодолита, необходимо знать три элемента внутреннего и 12 элементов внешнего ориентирования снимков.

§ 6. ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ И ПЛОСКИМИ КООРДИНАТАМИ ТОЧКИ НАЗЕМНОГО СНИМКА

Положение точки m на снимке может быть задано координатами x , z в плоской системе координат oxz или координатами X' , Y' , Z' в пространственной системе координат $SX'Y'Z'$ (см. рис.6). Координаты x , z обычно определяют по результатам измерений снимка на фотограмметрическом приборе, а координаты X' , Y' , Z' вычисляют по уравнениям их связи с координатами x , z через его элементы внутреннего и угловые элементы внешнего ориентирования. Получим эти зависимости.

Примем, что угловые элементы внешнего ориентирования снимка α , ω , и χ заданы в системе координат $SX'Y'Z'$ (рис.11). Для получения искомых зависимостей введем дополнительную систему координат $Sxyz$ (рис.11) с началом также в точке S . Оси x и z этой системы параллельны осям x, z на снимке, а ось y совпадает с направлением главного луча So . Координаты x, z любой точки на снимке в системе $Sxyz$ равны координатам x, z точки на снимке, а ордината $y = +f$.

Для преобразования координат x, z в координаты X', Y', Z' необходимо выполнить повороты координатной системы $Sxyz$ на углы χ , ω и α вокруг осей y, x', Z' (рис.11). Первый поворот выполняют вокруг оси y на угол χ . Тогда ось x займет положение оси x' , а ось z – оси z' . Второй поворот осуществляют вокруг оси x' на угол ω .

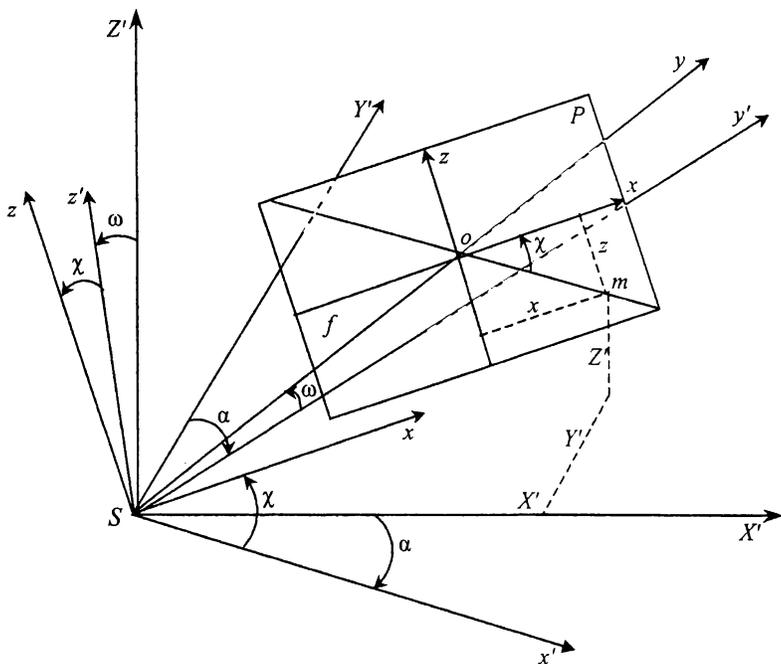


Рис.11. Связь между плоскими x, z и пространственными X', Y', Z' координатами точки снимка

В результате ось u совпадает с осью y' , а ось z' займет положение оси Z' . Третий поворот выполняют вокруг оси Z' на угол α . Тогда ось y' совместится с осью Y' , а ось x' – с осью X' .

Результаты этих преобразований на плоскостях описываются уравнениями

$$\begin{pmatrix} x' \\ y \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \chi & 0 & -\sin \chi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \chi & 0 & \cos \chi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = A_\chi \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y \\ z' \end{pmatrix} = A_\omega \begin{pmatrix} x' \\ y \\ z' \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ Z' \end{pmatrix} = A_\alpha \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ Z' \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где A_χ , A_ω , A_α – матрицы поворота координатной системы $Sxyz$ на углы χ , ω и α .

Зависимости между координатами x, y, z и X', Y', Z' получим, если в уравнения (3) последовательно подставим уравнения (2) и (1):

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = A_\alpha A_\omega A_\chi \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$A = A_\alpha A_\omega A_\chi, \quad (5)$$

где $y = f$.

Матрица A называется *матрицей преобразования координат*.

Перемножив матрицы поворота, уравнения (4) представим в виде

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Направляющие косинусы a , b и c зависят от угловых элементов внешнего ориентирования наземного снимка α , ω , χ и определяются из уравнений

$$\begin{aligned} a_1 &= \cos \alpha \cos \chi - \sin \alpha \sin \omega \sin \chi; & a_2 &= \sin \alpha \cos \omega; \\ a_3 &= -\cos \alpha \sin \chi - \sin \alpha \sin \omega \cos \chi; \\ b_1 &= -\sin \alpha \cos \chi - \cos \alpha \sin \omega \sin \chi; & b_2 &= \cos \alpha \cos \chi; \\ b_3 &= \sin \alpha \sin \chi - \cos \alpha \sin \omega \cos \chi; \\ c_1 &= \cos \omega \sin \chi; & c_2 &= \sin \omega; & c_3 &= \cos \omega \cos \chi. \end{aligned} \quad (7)$$

Формулы (6) записаны при условии, что начало координат системы координат $oxyz$ совмещено с главной точкой снимка o . При $x_0 \neq 0$ и $z_0 \neq 0$

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y \\ z - z_0 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Если $\alpha = \omega = \chi = 0$, матрица A становится единичной:

$$\begin{aligned} a_1 &= b_2 = c_3 = 1; \\ a_2 &= a_3 = b_1 = b_3 = c_1 = c_2 = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда

$$X' = x - x_0, \quad Y' = y - f, \quad Z' = z - z_0. \quad (10)$$

Если угловые элементы ориентирования α , ω , χ малы, то

$$\begin{aligned} a_1 &= b_2 = c_3 = 1, \\ a_2 &= -b_1 = \alpha; & a_3 &= -c_1 = -\chi; & b_3 &= -c_2 = -\omega \end{aligned} \quad (11)$$

и

$$\begin{aligned} X' &= (x - x_0) + f\alpha - (z - z_0)\chi; \\ Y' &= -(x - x_0)\alpha + f - (z - z_0)\omega; \\ Z' &= (x - x_0)\chi + f\omega + (z - z_0). \end{aligned} \quad (12)$$

§ 7. ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ КООРДИНАТАМИ ТОЧКИ МЕСТНОСТИ И КООРДИНАТАМИ ЕЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА НАЗЕМНОМ СНИМКЕ

Пусть из точки S получен снимок P (рис.12), а точка местности M изобразилась на снимке в точке m . Установим зависимости между координатами этих точек в системе координат $AXYZ$, параллельной системе координат $SX'Y'Z'$.

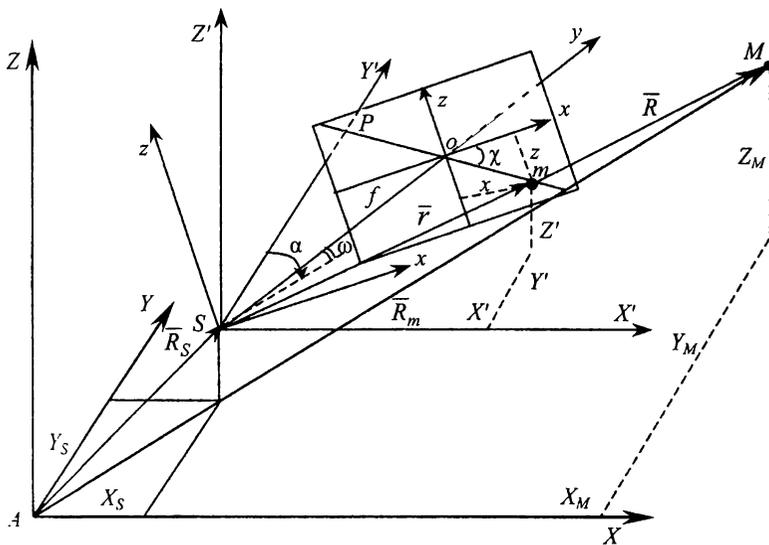


Рис.12. К определению координат точки местности по одиночному наземному снимку

Положение точек S и M относительно начала системы координат $AXYZ$ определяется векторами \bar{R}_S и \bar{R}_M . Положение точек m и M в системе координат $SX'Y'Z'$ определяется векторами \bar{r} и \bar{R} .

Векторы \bar{r} и \bar{R} коллинеарны, поэтому

$$\bar{R} = \lambda \bar{r}, \tag{13}$$

где λ – скаляр.

Спроектируем векторы \bar{r} и \bar{R} уравнения (13) на координатные оси X, Y, Z системы координат $AXYZ$, тогда

$$R_X = \lambda r_X; \quad R_Y = \lambda r_Y; \quad R_Z = \lambda r_Z. \quad (14)$$

Найдем λ из второго уравнения равенств (14) и подставим его в первое и третье, тогда

$$R_X = R_Y \frac{r_X}{r_Y}; \quad R_Z = R_Y \frac{r_Z}{r_Y}. \quad (15)$$

Поскольку в системе координат $AXYZ$ проекции вектора $R_X = X - X_S$, $R_Y = Y - Y_S$, $R_Z = Z - Z_S$, а в системе координат $SX'Y'Z'$ проекции вектора $r_X = X'$, $r_Y = Y'$, $r_Z = Z'$,

$$X = X_S + (Y - Y_S) \frac{X'}{Y'}; \quad Z = Z_S + (Y - Y_S) \frac{Z'}{Y'} \quad (16)$$

или, с учетом выражений (8),

$$X = X_S + (Y - Y_S) \frac{a_1(x - x_0) + a_2y + a_3(z - z_0)}{b_1(x - x_0) + b_2y + b_3(z - z_0)}; \quad (17)$$

$$Z = Z_S + (Y - Y_S) \frac{c_1(x - x_0) + c_2y + c_3(z - z_0)}{b_1(x - x_0) + b_2y + b_3(z - z_0)};$$

Если начало координат совмещено с главной точкой снимка, то

$$X = X_S + (Y - Y_S) \frac{a_1x + a_2y + a_3z}{b_1x + b_2y + b_3z}; \quad (18)$$

$$Z = Z_S + (Y - Y_S) \frac{c_1x + c_2y + c_3z}{b_1x + b_2y + b_3z}.$$

Формулы (17) и (18) показывают, что по одиночному наземному снимку можно определить лишь координаты X , Z точек местности при условии, что известны элементы ориентирования и отстояние $Y - Y_S$ от точки фотографирования S до точки местности.

Получим формулы соотношения координат точек снимка и местности. Для этого спроектируем векторы \vec{R} и \vec{r} равенств (15) на координатные оси системы координат $Sxyz$ (система координат $Sxyz$

показана на рис.12, а ее построение описано в § 6). Тогда $R_x = \lambda r_x$; $R_y = \lambda r_y$; $R_z = \lambda r_z$. Подставив выражение λ из второго уравнения в первое и третье, получим

$$r_x = r_y \frac{R_x}{R_y}; \quad r_z = r_y \frac{R_z}{R_y}. \quad (19)$$

Проекции векторов \bar{r} и \bar{R} на координатные оси x, y, z системы координат $Sxyz$ находят из равенств

$$\begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x-x_0 \\ f \\ z-z_0 \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{pmatrix} = A^T \begin{pmatrix} X-X_S \\ Y-Y_S \\ Z-Z_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X-X_S \\ Y-Y_S \\ Z-Z_S \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Тогда равенства (19) с учетом (20) запишем в виде

$$\begin{aligned} x-x_0 &= f \frac{a_1(X-X_S) + b_1(Y-Y_S) + c_1(Z-Z_S)}{a_2(X-X_S) + b_2(Y-Y_S) + c_2(Z-Z_S)} = f \frac{X^*}{Y^*}; \\ z-z_0 &= f \frac{a_3(X-X_S) + b_3(Y-Y_S) + c_3(Z-Z_S)}{a_2(X-X_S) + b_2(Y-Y_S) + c_2(Z-Z_S)} = f \frac{Z^*}{Y^*}. \end{aligned} \quad (21)$$

При совмещении начала системы координат снимка с его главной точкой

$$\begin{aligned} x &= f \frac{a_1(X-X_S) + b_1(Y-Y_S) + c_1(Z-Z_S)}{a_2(X-X_S) + b_2(Y-Y_S) + c_2(Z-Z_S)}; \\ z &= f \frac{a_3(X-X_S) + b_3(Y-Y_S) + c_3(Z-Z_S)}{a_2(X-X_S) + b_2(Y-Y_S) + c_2(Z-Z_S)}. \end{aligned} \quad (22)$$

Формулы (17) и (21), (18) и (22) выражают прямую и обратную связь между координатами x, z и X, Y, Z при любых значениях элементов ориентирования.

Рассмотрим частный случай. Примем, что $x_0 = z_0 = 0$, $\alpha = \omega = \chi = 0$. Тогда с учетом равенств (9) запишем

$$X = X_S + (Y - Y_S) \frac{x^0}{f}; \quad Z = Z_S + (Y - Y_S) \frac{z^0}{f}; \quad (23)$$

$$x^0 = f \frac{X - X_S}{Y - Y_S}; \quad z^0 = f \frac{Z - Z_S}{Y - Y_S}, \quad (24)$$

где x^0, z^0 – координаты точки на вертикальном снимке.

Равенства (18) и (23) позволяют установить связь между координатами точки, изобразившейся на наклонном и вертикальном снимках, полученных одним и тем же фототеодолитом с одной точки местности при сохранении угловых элементов внешнего ориентирования.

Поскольку координаты X и Z относятся к одной и той же точке местности, а координаты X_S, Y_S, Z_S – к одной и той же точке фотографирования, решая совместно первые и совместно вторые уравнения относительно x^0 и z^0 , получим

$$x^0 = f \frac{a_1 x + a_2 y + a_3 z}{b_1 x + b_2 y + b_3 z}; \quad z^0 = f \frac{c_1 x + c_2 y + c_3 z}{b_1 x + b_2 y + b_3 z}. \quad (25)$$

При малых значениях α, ω, χ и $y = f$

$$x^0 = f \frac{x + \alpha f - z\chi}{-x\alpha + f - z\omega}; \quad z^0 = f \frac{x\kappa + f\omega + z}{-x\alpha + f - z\omega}.$$

После преобразований этих уравнений с учетом членов первого порядка малости, запишем

$$x^0 = x + \left(f + \frac{x^2}{f} \right) \alpha + \frac{xz}{f} \omega - z\chi; \quad (26)$$

$$z^0 = z + \frac{xz}{f} \alpha + \left(f + \frac{x^2}{f} \right) \omega + x\chi.$$

§ 8. ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ КООРДИНАТАМИ ТОЧКИ МЕСТНОСТИ И КООРДИНАТАМИ ЕЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ПАРЕ НАЗЕМНЫХ СНИМКОВ

По стереоскопической паре наземных снимков определяют все три координаты (X, Y, Z) точки объекта. Получим уравнения связи между координатами точки объекта и координатами ее изображений на стереопаре применительно к различным видам стереосъемки, рассмотренным в § 2.

Общий вид съемки. Рассмотрим пару наземных снимков P_1 и P_2 , полученных с концов базиса S_1 и S_2 (рис.13). Здесь M – точка объекта, а точки m_1 и m_2 – изображения точки объекта на снимках P_1 и P_2 . Найдем координаты точки M исходя из предположения, что элементы ориентирования пары снимков известны.

Для определения положения точки объекта используем в качестве исходной систему координат XYZ с началом в точке фотографирования S_1 левого снимка стереопары (рис.13). В этой системе вектор \bar{R}_0 определяет положение точки фотографирования S_2 правого снимка, вектор \bar{r}_1 – соответственной точки m_1 на левом снимке, вектор \bar{R}_1 – точки M местности. Положение соответственной точки m_2 на правом снимке и точки объекта M в системе координат S_2XYZ с началом в точке S_2 , параллельной системе координат S_1XYZ , определяется векторами \bar{r}_2 и \bar{R}_2 .

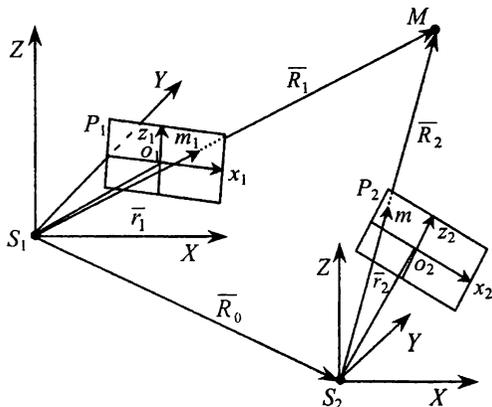


Рис.13. К определению координат точки местности по стереопаре наземных снимков

Векторы \bar{R}_0 , \bar{r}_1 и \bar{r}_2 известны, поскольку принято, что элементы ориентирования снимков даны. Искомым является вектор \bar{R}_1 .

Векторы \bar{R}_1 и \bar{r}_1 коллинеарны, поэтому

$$\bar{R}_1 = N\bar{r}_1, \quad (27)$$

где N – скалярный множитель.

Выразим скаляр N через известные векторы \bar{R}_0 , \bar{r}_1 и \bar{r}_2 . Векторы \bar{r}_2 и \bar{R}_2 также коллинеарны, поэтому $\bar{R}_2 \times \bar{r}_2 = 0$. Из рис.13 следует, что $\bar{R}_2 = \bar{R}_1 - \bar{R}_0$. Учитывая условие коллинеарности векторов \bar{R}_1 и \bar{r}_1 , запишем: $(N\bar{r}_1 - \bar{R}_0) \times \bar{r}_2 = 0$, или $N\bar{r}_1 \times \bar{r}_2 = \bar{R}_0 \times \bar{r}_2$. Решая это равенство относительно N , получим

$$N = \frac{\bar{R}_0 \times \bar{r}_2}{\bar{r}_1 \times \bar{r}_2}. \quad (28)$$

Подставив значение N из (28) в (27), будем иметь

$$\bar{R}_1 = \frac{\bar{R}_0 \times \bar{r}_2}{\bar{r}_1 \times \bar{r}_2} \bar{r}_1. \quad (29)$$

Уравнение (29) выражает в векторной форме строгую математическую зависимость между координатами точки объекта и ее изображением на паре наземных снимков.

Получим эти зависимости в координатной форме. Векторные произведения $\bar{R}_0 \times \bar{r}_2$ и $\bar{r}_1 \times \bar{r}_2$ можно представить в виде определителей третьего порядка:

$$\bar{R}_0 \times \bar{r}_2 = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ B_x & B_y & B_z \\ X'_2 & Y'_2 & Z'_2 \end{vmatrix}; \quad \bar{r}_1 \times \bar{r}_2 = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ X'_1 & Y'_1 & Z'_1 \\ X'_2 & Y'_2 & Z'_2 \end{vmatrix},$$

где $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ – единичные векторы координатных осей; B_x, B_y, B_z – координаты вектора \bar{R}_0 , определяющие положение точки фотографирования S_2 в системе координат S_1XYZ ; X'_1, Y'_1, Z'_1 и X'_2, Y'_2, Z'_2 – пространст-

венные координаты соответственных точек m_1 (вектора \bar{r}_1) и m_2 (вектора \bar{r}_2) на левом и правом снимках.

Разложив определители по элементам первых строк, запишем

$$\begin{aligned}\bar{R}_0 \times \bar{r}_2 &= \bar{R}' = (B_Y Z'_2 - B_Z Y'_2) \bar{i} + (B_Z X'_2 - B_X Z'_2) \bar{j} + (B_X Y'_2 - B_Y X'_2) \bar{k}; \\ \bar{r}_1 \times \bar{r}_2 &= \bar{r}' = (X'_1 Z'_2 - Y'_2 Z'_1) \bar{i} + (X'_2 Z'_1 - X_1 Z'_2) \bar{j} + (X'_1 Y'_2 - X'_2 Y'_1) \bar{k}.\end{aligned}$$

Векторные произведения $\bar{r}_1 \times \bar{r}_2$ и $\bar{R}_0 \times \bar{r}_2$ есть векторы \bar{r}' и \bar{R}' , направленные перпендикулярно базисной плоскости W_M , поэтому они коллинеарны. На основании коллинеарности векторов \bar{r}' и \bar{R}' уравнение (29) можно представить в виде трех отношений:

$$N = \frac{B_Y Z'_2 - B_Z Y'_2}{Y'_1 Z'_2 - Y'_2 Z'_1} = \frac{B_Z X'_2 - B_X Z'_2}{X'_2 Z'_1 - X'_1 Z'_2} = \frac{B_X Y'_2 - B_Y X'_2}{X'_1 Y'_2 - X'_2 Y'_1}. \quad (30)$$

Пространственные координаты X', Y', Z' отношений (30) вычисляются по формулам (6) или (8). Составляющие базиса фотографирования определяют через линейные элементы ориентирования пары снимков.

Из трех выражений, полученных для определения множителя N в наземной фототеодолитной съемке используется третье. Для обработки аэроснимков применяется, как правило, второе отношение.

Спроектируем векторы \bar{r}_1 и \bar{R}_1 на координатные оси X, Y, Z . Тогда в соответствии с равенством (29)

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = N \begin{pmatrix} X'_1 \\ Y'_1 \\ Z'_1 \end{pmatrix}. \quad (31)$$

Уравнения (31) выражают связь между координатами точки объекта и координатами ее изображения на паре наземных снимков в системе координат S_1XYZ . По общему виду они ничем не отличаются от уравнений связи между координатами точки местности и координатами ее изображений на паре аэроснимков. Различие имеется лишь в содержании их составляющих N, X', Y', Z . Оно вызвано неодинаковыми координатными системами снимков и их положением в пространственной системе координат XYZ (рис. 14). Переход от координат x, y и z ,

X' , Y' и Z' , X , Y и Z и базисных составляющих B_X, B_Y, B_Z наземных снимков к соответствующим системам координат и базисным составляющим

аэроснимков осуществляется через матрицу $\Pi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$, учиты-

вающую изменение координатных систем, и матрицу A [8] преобразования плоских координат точек аэроснимка в пространственные. Эти преобразования выполняют по формулам

$$\begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} = -f \end{pmatrix} = \Pi \begin{pmatrix} x \\ y = f \\ z \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{pmatrix} = \Pi \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} \bar{B}_X \\ \bar{B}_Y \\ \bar{B}_Z \end{pmatrix} = \Pi \begin{pmatrix} B_X \\ B_Y \\ B_Z \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} \bar{X}' \\ \bar{Y}' \\ \bar{Z}' \end{pmatrix} = \Pi^T A \Pi \begin{pmatrix} x \\ y = f \\ z \end{pmatrix}.$$

Поскольку координаты точек местности определяют в пространственной системе XYZ с началом в точке S_1 , при вычислении на-

правляющих косинусов часто вместо дирекционного угла α используют угол α скоса φ .

При выводе зависимостей (31) принималось, что элементы ориентирования снимков стереопары известны. Тогда координаты точки местности, изображившейся на паре снимков, можно найти в геодезической системе координат $X_r Y_r Z_r$ по формулам

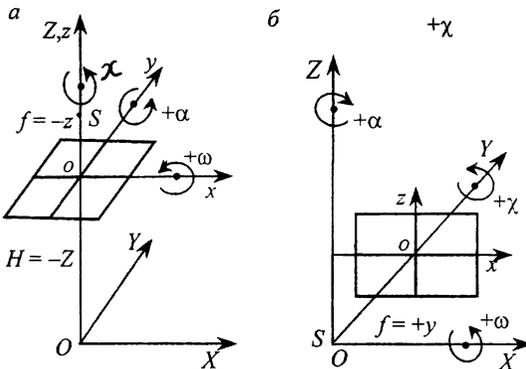


Рис. 14. Координатные системы для аэроснимка (а) и фототеодолитного снимка (б)

$$\begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{S_1} \\ Y_{S_1} \\ Z_{S_1} \end{pmatrix} + N \begin{pmatrix} X'_1 \\ Y'_1 \\ Z'_1 \end{pmatrix} \quad (32)$$

Определение координат точек местности по измерениям снимков и их элементам ориентирования называется *прямой пространственной фотограмметрической засечкой*.

Конвергентный вид съемки. Угловые элементы внешнего ориентирования для рассматриваемого вида съемки определяются зависимостями

$$\begin{aligned} \varphi_1 &\neq \varphi_2; \quad (\gamma \neq 0); \\ \omega_1 &= \omega_2 = \chi_1 = \chi_2 = 0. \end{aligned}$$

Выберем фотограмметрическую систему координат левого снимка так, чтобы ось Y совпала с его главным лучом, а плоскость XY была горизонтальна (рис.15). Тогда

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \omega_2 = \chi_1 = \omega_2 = \chi_2 = 0; \\ \alpha_1 &= \varphi_2 - \varphi_1; \quad \alpha_2 = -\gamma. \end{aligned}$$

Направляющие косинусы для левого снимка будем вычислять из выражений (9), а для правого снимка — из выражений

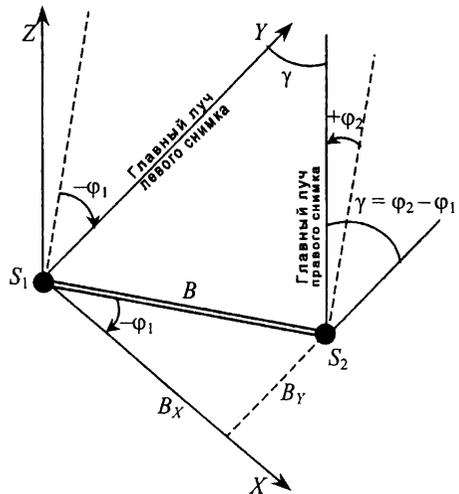


Рис.15. К выводу уравнений координат конвергентного вида фотосъемки

$$\begin{aligned} a_1 &= \cos \gamma; \quad a_2 = -\sin \gamma; \quad b_1 = \sin \gamma; \quad b_2 = \cos \gamma; \\ c_3 &= 1; \quad c_1 = c_2 = a_3 = b_3 = 0. \end{aligned} \quad (33)$$

Подставив значения направляющих косинусов в уравнения (7) с учетом (7) и приняв $x_0 = z_0 = 0$, получим

$$\begin{aligned} X'_1 &= x_1; \quad Y'_1 = f; \quad Z'_1 = z_1; \\ X'_2 &= x_2 \cos \gamma - f \sin \gamma; \quad Y'_2 = x_2 \sin \gamma + f \cos \gamma; \quad Z'_2 = z_2. \end{aligned} \quad (34)$$

Из рис. 15 следует

$$B_X = B \cos \varphi; \quad B_Y = -B \sin \varphi; \quad B_Z = 0. \quad (35)$$

Скаляр N согласно третьему отношению (30) с учетом (34) и (35) найдем из выражения

$$N = \frac{B[x_2 \sin(\varphi_1 + \gamma) + f \cos(\varphi_1 + \gamma)]}{(x_1 x_2 + f^2) \sin \gamma + f(x_1 - x_2) \cos \gamma}, \quad (36)$$

где $x_1 - x_2$ — продольный параллакс p .

Подставив в формулу (31) значения пространственных координат X', Y', Z' из уравнений (34), будем иметь

$$X = Nx_1 = \frac{Y}{f} x_1; \quad Y = Nf; \quad Z = Nz_1 = \frac{Y}{f} z_1. \quad (37)$$

Равноотклоненный вид съемки. Угловые ЭВО пары наземных снимков имеют следующие значения:

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi \neq 0; \quad \gamma = 0;$$

$$\omega_1 = \omega_2 = \chi_1 = \chi_2 = 0.$$

Подставив в формулы (37) значение N из уравнения (36) с учетом $\gamma = 0$, после преобразований запишем:

$$\begin{aligned} X &= \frac{B}{p} x_1; \quad Y = \frac{Y}{f} x_1; \\ Y &= \frac{B}{p} p; \end{aligned} \quad (38)$$

$$Z = \frac{B}{f} z_1; \quad Y = \frac{Y}{f} z_1.$$

Коэффициент

$$t = \cos \varphi = \frac{x_2}{f} \sin \varphi \quad (39)$$

Знак минус перед вторым слагаемым выражения (39) относится к случаю схода оптических осей вправо от нормали к базису фотографирования.

Нормальный вид съемки. Угловые ЭВО пары снимков равны нулю, т.е. $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi = \omega_1 = \omega_2 = \chi_1 = \chi_2 = 0$. Коэффициент t при $\varphi = 0$ равен единице. Тогда уравнения (38) приводятся к виду

$$X = \frac{B}{p} x_1 = \frac{Y}{f} x_1; \quad Y = \frac{B}{p} f; \quad Z = \frac{B}{p} z_1 = \frac{Y}{f} z_1. \quad (40)$$

Нормальный вид съемки с равнонаклоненными осями. Рассматриваемый вид съемки выполняют фототеодолитом, имеющим устройство для наклона камеры на заданный угол ω . Элементы ориентирования $\varphi_1 = \varphi_2 = \chi_1 = \chi_2 = 0$, $\omega_1 = \omega_2 = \omega \neq 0$.

По заданным элементам ориентирования сначала находят координаты $X_\omega, Y_\omega, Z_\omega$, отнесенные к плоскости, наклоненной на угол ω , затем переходят к пространственным координатам X, Y, Z :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = A_\omega \begin{pmatrix} X_\omega \\ Y_\omega \\ Z_\omega \end{pmatrix}, \quad (41)$$

где A_ω – матрица поворота системы координат $X_\omega, Y_\omega, Z_\omega$ на угол ω . Матрица A_ω представлена в формулах (2)).

По уравнениям (31) и их производным (37), (38), (40) и (41) вычисляют координаты точек местности в пространственной фотограмметрической системе координат XYZ с началом в левой точке фотографирования S_1 .

Для перехода от фотограмметрической к геодезической системе координат по данным полевых работ определяют геодезические координаты левого центра проектирования $X_{S_1}, Y_{S_1}, Z_{S_1}$ и дирекционный угол α_1 оптической оси S_1O_1 фотокамеры, установленной на левом конце базиса фотографирования.

Геодезические координаты точек сфотографированного объекта вычисляют по формулам

$$\begin{aligned} X_r &= X_{S_1} + Y \cos \alpha_1 - X \sin \alpha_1; \\ Y_r &= Y_{S_1} + Y \sin \alpha_1 + X \cos \alpha_1; \\ Z_r &= Z_{S_1} + Z + \delta Z_{KR}, \end{aligned} \quad (42)$$

где δZ_{KR} – поправка за кривизну поверхности Земли и рефракцию.

Дирекционный угол главного луча S_1O левого снимка

$$\alpha_1 = \alpha_B - \varphi_1 - 90^\circ,$$

где α_B – дирекционный угол базиса фотографирования; φ_1 – угол скоса оптической оси камеры при ее установке на левом конце базиса фотографирования.

Поправка за кривизну Земли и рефракцию вычисляется по приближенной формуле

$$\delta Z_{KR} = \frac{1-K}{2R} L^2, \quad (43)$$

где L – расстояние от центра проекции S_1 до точки объекта местности; R – радиус Земли; K – коэффициент рефракции, принимаемый равным примерно 0,14.

Формулы (42) не учитывают горизонтальное расстояние от оси вращения фотокамеры до центра проекции S_1 , равное половине фокусного расстояния.

§ 9. ПРОДОЛЬНЫЙ И ПОПЕРЕЧНЫЙ ПАРАЛЛАКСЫ ТОЧЕК СТЕРЕОПАРЫ

Продольный p и поперечный q параллаксы представляют собой разности координат соответственных точек стереопары, их находят по формулам: $p = x_1 - x_2$, $q = z_1 - z_2$.

Плоские координаты x_1 и z_1 , x_2 и z_2 соответственных точек левого и правого снимков стереопары определяют по формулам (21) или, если начало системы координат снимка совмещено с его главной точкой, – по формулам (22).

При конвергентном виде съемки направляющие косинусы для левого снимка выражаются уравнениями (9), а для правого снимка – уравнениями (33). Учитывая это и принимая $x_0 = z_0 = 0$, запишем:

$$p = x_1 - x_2 = f \left(\frac{X}{Y} + \frac{(X - B_X) \cos \gamma + (Y - B_Y) \sin \gamma}{(X - B_X) \sin \gamma - (Y - B_Y) \cos \gamma} \right);$$

$$q = z_1 - z_2 = f \left(\frac{Z}{Y} + \frac{Z - B_Z}{(X - B_X) \sin \gamma - (Y - B_Y) \cos \gamma} \right).$$
(44)

Для равноотклоненного вида съемки ($\gamma = 0$)

$$p = f \left(\frac{X}{Y} - \frac{X - B_X}{Y - B_Y} \right); \quad q = f \left(\frac{Z}{Y} - \frac{Z - B_Z}{Y - B_Y} \right).$$

для нормального ($B_X = B, B_Y = 0$)

$$p = B \frac{f}{Y}; \quad q = B_Z \frac{f}{Y} = B_Z \frac{p}{B} = p \operatorname{tg} \nu,$$
T

где ν – угол наклона базиса фотографирования.

Из полученных зависимостей для нормального вида съемки следует, что:

- продольный параллакс соответственных точек стереопары равен базису фотографирования в масштабе его изображения;
- поперечные параллаксы в точках стереопары отсутствуют, если концы базиса фотографирования находятся на одной высоте.

§ 10. ТОЧНОСТЬ НАЗЕМНОЙ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Точность определения пространственных координат точек сфотографированного объекта по измерениям стереопары наземных аэрофотоснимков зависит от ряда источников погрешностей, которые можно разделить на следующие группы:

1) погрешности построения фотоизображений (физические погрешности фотоснимков) вследствие дисторсии объектива съемочной камеры и деформации фотоэмульсионного слоя при фотолабораторной обработке;

2) погрешности определения элементов внутреннего ориентирования фотокамеры и влияние неприжима фотоэмульсионного слоя к плоскости прикладной рамки фотокамеры в момент фотографирования;

3) погрешности измерения координат фотоизображений точек сфотографированного объекта на обрабатывающих стереофотограмметрических приборах;

4) погрешности установки и измерений в процессе съемки заданных элементов внешнего ориентирования фотоснимков.

При наземной стереофотограмметрической съемке используют объективы и фотопластинки, физические погрешности которых достаточно малы и существенно не влияют на точность результатов съемки. Дисторсия объектива камеры фототеодолита приводит к смещению изображения точек на 0,002-0,003 мм. Съемка осуществляется на фотопластинки, поэтому деформацией негативов обычно пренебрегают.

Ошибки измерений фотоснимков сведены к возможному минимуму благодаря высокой разрешающей способности снимка (до 100 линий на миллиметр) и использованию высокоточных фотограмметрических приборов.

Элементы внутреннего ориентирования на практике должны определяться со следующими предельными ошибками:

$$\Delta f \leq 0,025 \text{ мм}; \quad \Delta x_0 \leq 0,06 \text{ мм}; \quad \Delta z_0 \leq 0,02 \text{ мм}.$$

Если это условие выполнено, то влияние ошибок не выходит за пределы точности измерений фотоснимков.

Ошибки угловых элементов ориентирования φ , ω , χ и γ не влияют на измеренные координаты точек при аналитическом методе обработки, если их значения не выходят за следующие пределы:

$$\Delta\varphi \leq 10''; \quad \Delta\omega \leq 10''; \quad \Delta\chi \leq 10''; \quad \Delta\gamma \leq 5''.$$

Если погрешности ЭВО больше допустимых значений, то их влияние

может быть легко учтено введением поправок в измеренные величины с использованием приближенных зависимостей

$$\Delta x = f\Delta\varphi; \quad \Delta z = f\Delta\omega; \quad \Delta p = f\Delta\gamma.$$

Таким образом, погрешности m_x , m_y , m_z определения пространственных координат X , Y , Z точки местности при аналитическом способе обработки будут зависеть главным образом от погрешностей m_x , m_z измерения координат x_1 , z_1 точек на левом снимке, погрешности измерения m_p продольного параллакса p и погрешности m_B определения длины базиса B .

Получим формулы расчета средних квадратических ошибок m_x , m_y , m_z . Для равноотклоненного вида съемки зависимости между координатами точки местности и координатами ее изображения на паре наземных снимков описываются уравнениями (38).

При $\varphi = 31,5^\circ$ (стандартный угол скоса для фототеодолита Фототео 19/1318) $\cos\varphi = 0,85$, а член $x_2 \sin\varphi/f$ при $x_2 = 80$ мм и $f = 195$ мм равен 0,2. При подсчете погрешностей этот член можно пренебречь и формулы (38) представить в таком виде:

$$X = \frac{B}{p} x_1 \cos\varphi; \quad Y = \frac{B}{p} f \cos\varphi; \quad Z = \frac{B}{p} z_1 \cos\varphi. \quad (45)$$

На основании выражений (45) запишем

$$\begin{aligned} m_x^2 &= \left(\frac{\partial X}{\partial B} m_B\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial p} m_p\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial x_1} m_x\right)^2; \\ m_y^2 &= \left(\frac{\partial Y}{\partial B} m_B\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial p} m_p\right)^2; \\ m_z^2 &= \left(\frac{\partial Z}{\partial B} m_B\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial p} m_p\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial z_1} m_z\right)^2. \end{aligned} \quad (46)$$

После вычисления частных производных и подстановки их значений в выражения средних квадратических ошибок (46), получим

$$m_X^2 = \left(\frac{x_1 m_B}{Bf} \right)^2 Y^2 + \left(\frac{x_1 m_p}{Bf^2} \right)^2 \frac{Y^4}{\cos^2 \varphi} + \left(\frac{m_x}{f} \right)^2 Y^2;$$

$$m_Y^2 = \left(\frac{m_B}{B} \right)^2 Y^2 + \left(\frac{m_p}{Bf} \right)^2 \frac{Y^4}{\cos^2 \varphi}; \quad (47)$$

$$m_Z^2 = \left(\frac{z_1 m_B}{Bf} \right)^2 Y^2 + \left(\frac{z_1 m_p}{Bf^2} \right)^2 \frac{Y^4}{\cos^2 \varphi} + \left(\frac{m_{z_1}}{f} \right)^2 Y^2.$$

Из формул (47) видно, что погрешности измерений базиса и координат точки фотоснимка пропорциональны отстояниям Y , а погрешности измерения продольного параллакса – квадрату отстояния.

При нормальном случае съемки $\varphi = 0$, тогда

$$m_X^2 = \left(\frac{x_1 m_B}{Bf} \right)^2 Y^2 + \left(\frac{x_1 m_p}{Bf^2} \right)^2 Y^4 + \left(\frac{m_{x_1}}{f} \right)^2 Y^2;$$

$$m_Y^2 = \left(\frac{m_B}{B} \right)^2 Y^2 + \left(\frac{m_p}{Bf} \right)^2 Y^4; \quad (48)$$

$$m_Z^2 = \left(\frac{z_1 m_B}{Bf} \right)^2 Y^2 + \left(\frac{z_1 m_p}{Bf^2} \right)^2 Y^4 + \left(\frac{m_z}{f} \right)^2 Y^2.$$

Из формул (47) и (48) следует, что при съемке с равноотклоненными осями погрешности продольного параллакса влияют в $\sec \varphi$ раз больше, чем при нормальном способе съемки. При угле скоса $\varphi = 31,5^\circ$ точность определения фотограмметрических координат снижается примерно на 20 % по сравнению с точностью их определения при нормальном виде съемки.

Ошибка m_p измерения продольного параллакса в большей степени влияет на точность определения отстояний Y . Погрешности отстояний Y больше погрешностей координат X и Z соответственно в f/x_1 и f/z_1 раз (табл.2). При $f = 195$ мм, $x_{\max} = 80$ мм и $z_{\max} = 40$ мм погрешности $m_X = 0,4m_Y$ и $m_Z = 0,2m_Y$, поэтому ошибку положения

точки в плане при $m_B : B \leq 1:2000$ в соответствии со вторым уравнением (38) вычисляют по формуле

$$m_Y = \frac{Y^2 m_p}{B f t_{\min}} \quad (49)$$

Коэффициент

$$t_{\min} = \cos \varphi - \left| \frac{x_2}{f} \sin \varphi \right| \quad (50)$$

где x_2 – наибольшее значение абсциссы точки на правом снимке стереопары.

Формулу (49) используют в процессе проектирования съемочных работ (съемка с параллельными осями) при выборе длины базиса и отстояний.

Указанные в табл.2 точности можно достигнуть лишь при использовании аналитического метода обработки наземных снимков. Поэтому их можно считать максимальными для данных отстояний и базисов.

Таблица 2

Погрешности m_x, m_y, m_z в метрах при $f = 195$ мм, $m_p = 0,01$ мм,
 $x_2 = 80$ мм, $z_1 = 40$ мм

B, м	B, м	Вид съемки					
		нормальный			равноотклоненный при $\varphi = 31,5^\circ$		
		m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
250	30	0,04	0,11	0,02	0,05	0,13	0,03
500	60	0,08	0,21	0,04	0,10	0,26	0,05
1000	120	0,17	0,42	0,08	0,21	0,52	0,10
1500	180	0,25	0,62	0,12	0,30	0,77	0,15
2000	240	0,33	0,83	0,17	0,42	1,07	0,21

Графомеханический (универсальный) метод обработки фотографий при тех же параметрах съемки дает меньшую точность. Это связано с появлением дополнительных источников ошибок вследствие погрешностей графических построений и неточной работы узлов стереофотограмметрического прибора.

§ 11. РАСЧЕТ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФОТОТЕОДОЛИТНОЙ СЪЕМКИ

К техническим параметрам фототеодолитной съемки относят базис фотографирования B , отстояние до ближней границы съемки Y_{\min} , отстояние до дальней границы съемки Y_{\max} , глубину обрабатываемого участка ΔY .

Выполним расчет перечисленных параметров для фототеодолитной съемки с параллельными осями. Примем, что известными величинами являются: f – фокусное расстояние камеры фототеодолита; m_p – средняя квадратическая ошибка измерения продольного параллакса; m_Y – средняя квадратическая ошибка положения точки на местности.

Отстояние Y_{\max} и Y_{\min} определяют в процессе изучения имеющихся картографических документов. Отстояние Y_{\max} зависит от погрешности положения точки на плане (погрешности определения отстояния) и применяемого обрабатывающего фотограмметрического прибора. Оно не должно превышать некоторого предельного значения.

Для фотокамер с фокусным расстоянием $f = 195$ мм (фототеодолит Photheo 19/1318) допустимые максимальные расстояния фотографирования в масштабе создаваемого плана приведены в табл.3.

Таблица 3

**Максимальные отстояния фотографирования
приборов фирмы «Карл Цейсс»**

Название прибора	Максимальный формат снимков, см × см	Фокусное расстояние камер, мм	Относительная инструментальная ошибка по отстоянию	Отстояние Y_{\max} на плане (см) при средней ошибке нанесения контура	
				±0,5 мм	±0,7 мм
Стереоавтограф 1318	13×18	От 157 до 198	1:8000	80	80
Стереоавтограф 1318 EL	13×18	От 157 до 198	1:8000	100	160
Технокарт	23×23	От 50 до 215	1:10000	100	160
Стереометрограф	23×23	От 85 до 310	1:8000	100	160

Минимально допустимую длину базиса фотографирования на основании равенства (49) найдем по формуле

$$B_{\min} = \frac{Y_{\max}^2 m_p}{m_Y f t}. \quad (51)$$

Для фототеодолитной съемки с параллельными осями рассчитывают два значения базиса фотографирования (при $\varphi = 0^\circ$, $t = 1$ и $\varphi = 31,5^\circ$, $t = 0,7$). На практике из двух вычисленных значений выбирают, как правило, одно, максимальное.

Отстояние до ближней границы съемки определяют из выражения

$$Y_{\min} = \kappa B, \quad (52)$$

где κ – коэффициент, учитывающий свойство перспективных искажений; практика показывает, что при обработке наземных снимков на универсальных стереограмметрических приборах устойчивый стереоэффект наступает на ближней границе съемки, если $\kappa = 3,5 \div 4,0$.

По формуле (52) с учетом значения коэффициента κ вычисляют Y_{\min} . Если полученное отстояние больше отстояния Y_{\min} до ближней границы съемки, найденного на основе изучения картографического документа, то длину базиса B' , которая обеспечивала бы обработку наземных снимков на нужном отстоянии, определяют по формуле

$$B' = \frac{1}{\kappa} Y_{\min}. \quad (53)$$

Базисы B и B' размещают так, чтобы у них была одна общая точка, а направления совпадали. Глубина съемки определяется как разность отстояний (рис.16):

$$\Delta Y = Y_{\max} - Y_{\min}. \quad (54)$$

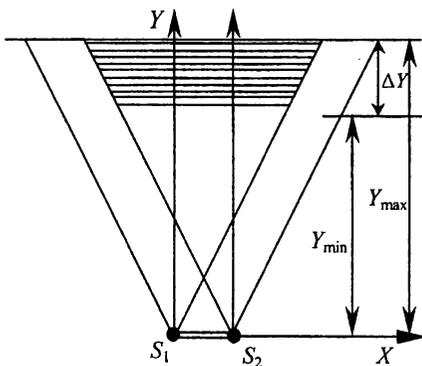


Рис.16. Связь между отстояниями Y_{\min} , Y_{\max} и глубиной обработки ΔY

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАЗЕМНЫХ СНИМКОВ

§ 12. СТЕРЕОКОМПАРАТОРЫ

В качестве исходных величин в основные уравнения одностороннего снимка и пары наземных снимков входят координаты x , z изображений точек местности в системе координат снимка.

Плоские координаты точек снимков обычно измеряют на моно- или стереокомпараторе.

Наиболее широкое распространение имеют стереокомпараторы, так как, во-первых, острота стереоскопического зрения выше монокулярного; во-вторых, стереокомпараторы позволяют отождествлять и измерять не только четкие контурные точки, но и любые точки, если имеется хороший стереоэффект; в-третьих, одновременно измеряют координаты точек пары снимков.

Стереокомпаратор имеет две каретки со снимкодержателями, бинокулярную наблюдательную систему для стереоскопического рассматривания снимков и устройства регистрации результатов измерений.

В классической конструкции стереокомпаратора (рис.17) на общей каретке 1 расположены каретка 2 для установки левого снимка и параллактические каретки 4 и 5 правого снимка. Измерительная

марка совмещается с одноименными точками снимков перемещением общей каретки по оси X , наблюдательной системы 3 по оси Z и параллактических кареток по направлениям, параллельным осям X и Z прибора. При такой схеме прибора будут измерены значения x_1 ,

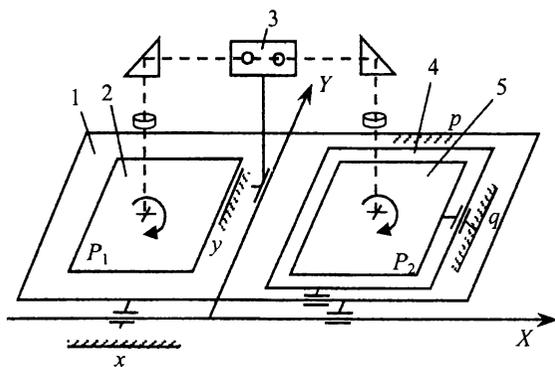


Рис.17. Функциональная схема стереокомпаратора

з точек левого снимка и параллаксы p и q , а координаты соответственных точек правого снимка находят по формулам

$$x_2 = x_1 - p; \quad z_2 = z_1 - q. \quad (55)$$

Имеется несколько моделей стереокомпараторов, отличающихся друг от друга и от классической схемы некоторыми конструктивными особенностями. В России практическое применение имеют стереокомпараторы СК-1818 фирмы «Карл Цейсс» (Германия), стереокомпараторы СКА-18 и СКВ-1 (Россия), стекометр, диалометр («Карл Цейсс»).

Стереокомпаратор СК-1818. Данный стереокомпаратор (рис.18) предназначен для измерения координат x_1, z_1 и параллакса p и q точек снимков формата 18×18 см.

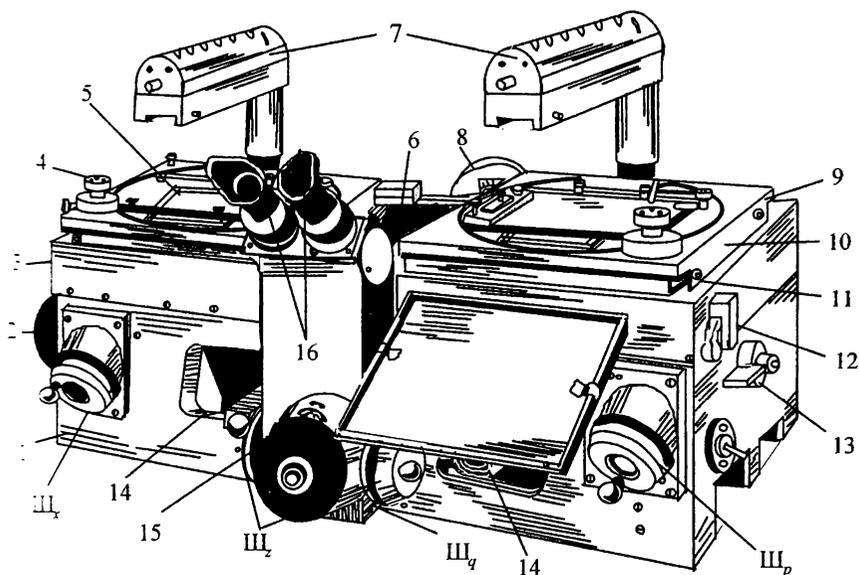


Рис.18. Стереокомпаратор СК-1818

- 1 – станина; 2, 6, 8, 15 – шкалы, связанные с измерительными винтами и штурвалами $\text{Ш}_x, \text{Ш}_p, \text{Ш}_q, \text{Ш}_z$; 3 – общая каретка; 4 – гайки поворота снимкодержателей; 5, 9 – каретки снимкодержателей; 7 – верхние осветители;
- 10 – параллактическая каретка; 11 – цилиндрические направляющие;
- 12, 13 – рычажки крепления при транспортировании; 14 – окна;
- 16 – бинокулярная система

точек левого снимка и параллаксы p и q , а координаты соответственных точек правого снимка находят по формулам

$$x_2 = x_1 - p; \quad z_2 = z_1 - q. \quad (55)$$

Имеется несколько моделей стереокомпараторов, отличающихся друг от друга и от классической схемы некоторыми конструктивными особенностями. В России практическое применение имеют стереокомпараторы СК-1818 фирмы «Карл Цейсс» (Германия), стереокомпараторы СКА-18 и СКВ-1 (Россия), стекочет, диаметр («Карл Цейсс»).

Стереокомпаратор СК-1818. Данный стереокомпаратор (рис.18) предназначен для измерения координат x_1, z_1 и параллакса p точек снимков формата 18×18 см.

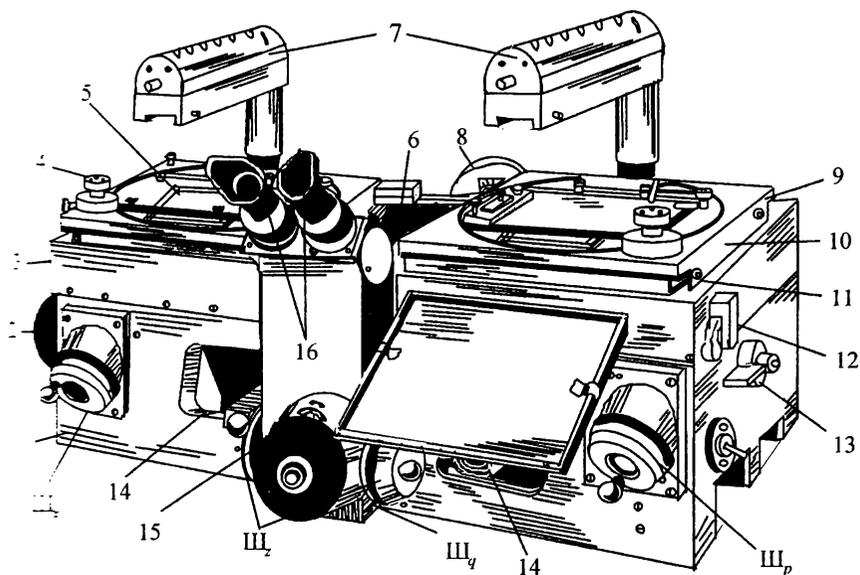


Рис.18. Стереокомпаратор СК-1818

- 1 – станина; 2, 6, 8, 15 – шкалы, связанные с измерительными винтами
- штурвалами Ш₁, Ш_п, Ш_р, Ш₂; 3 – общая каретка; 4 – гайки поворота снимкодержателей;
- 5, 9 – каретки снимкодержателей; 7 – верхние осветители;
- 10 – параллактическая каретка; 11 – цилиндрические направляющие;
- 12, 13 – рычажки крепления при транспортировании; 14 – окна;
- 16 – бинокулярная система

Он состоит из измерительной и наблюдательной систем и устройств освещения.

Измерительная система размещена на чугунной станине 1, являющейся основанием прибора, и включает:

общую каретку 3, перемещающуюся по плоским направляющим и несущую цилиндрические направляющие 11 кареток левого 5 и правого 9 снимкодержателей, измерительные винты со шкалами 2, 6, 8, 15 и штурвалами Ш_x , Ш_p , Ш_q , Ш_z ;

каретку общей подвижной части 2 (рис.19) наблюдательной системы и каретку ее правой ветви 3.

Измерительную марку совмещают с точкой левого снимка движениями общей каретки вдоль оси X прибора штурвалом Ш_x и подвижной части наблюдательной системы вдоль оси Z прибора штурвалом Ш_z (см. рис.18). С одноименной точкой правого снимка марку совмещают перемещением параллактической каретки 10 параллельно оси X путем вращения штурвала Ш_p и правой ветви наблюдательной системы

параллельно оси Z прибора путем вращения штурвала Ш_q . Значение координат и параллаксов отсчитывают по шкалам 2, 6, 8 и 15.

В плоскости XZ прибора снимкодержатели поворачивают от руки с помощью накатаных гаек 4 или микрометрическими винтами. Кроме того, каретка 5 левого снимкодержателя может перемещаться вдоль направления оси X прибора при помощи удлинителя базиса.

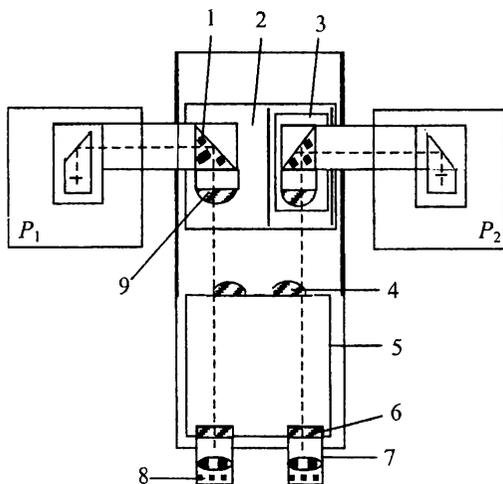


Рис.19. Наблюдательная система стереокомпаратора СК-1818:

- 1 – призма; 2 – общая подвижная часть; 3 – каретка;
- 4 и 9 – объективы; 5 – неподвижная часть;
- 6 – марки; 7 – окуляры; 8 – оптические клинья

Наблюдательная система (рис.19) представляет собой бинокулярный микроскоп с увеличением 8^x и состоит из размещенной внутри станины неподвижной части 5 с блоком окуляров 7, марками 6 и объективами 4 и общей подвижной части 2 с объективами 9 и призмами 1. Правая ветвь подвижной части, расположенная на каретке 3, имеет дополнительное движение параллельно оси Z прибора.

Лучи от точек снимков P_1 и P_2 выходят из объективов 9 параллельным пучком и попадают в объективы 4, которые строят изображение снимков в плоскости марок 6. Изображения снимков и марок наблюдатель рассматривает через окуляры 7. В поле зрения окуляров с измерительными марками и четырьмя перекрестиями (рис.20) нижняя (точечная) марка предназначена для измерения аэро-снимков, верхняя – для измерения наземных снимков, а перекрестие – для юстировок микроскопа и специальных измерений.

Установка марок на резкость осуществляется накатанными трубками окуляров, а получение резкого изображения снимка – накатанными кольцами объективов 9. Глазной базис изменяется от 54 до 76 мм. Устранение видимого поперечного параллакса марок выполняется оптическими линзами 8.

Устройство освещения (см. рис.18) состоит из верхних осветителей 7 и ламп, расположенных в нижней части прибора. При измерении прозрачных основ (диапозитивов, негативов) включаются верхние осветители, при измерении контактных отпечатков – лампы.

При транспортировке объектив каретку приподнимают и крепят при помощи рычажков 12 и 13, расположенных на обеих сторонах прибора, а верхние осветители снимают и перевозят отдельно.

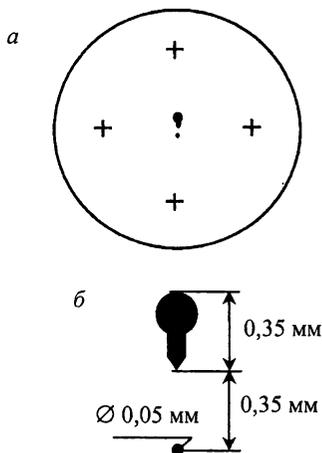


Рис.20. Поле зрения окуляров (а) и измерительная марка (б)

Наблюдательная система (рис.19) представляет собой би-окулярный микроскоп с увеличением 8^x и состоит из размещенной внутри станины неподвижной части 5 с блоком окуляров 7, марками 6 и объективами 4 и общей подвижной части 2 с объективами 9 и призмами 1. Правая ветвь подвижной части, расположенная на каретке 3, имеет дополнительное движение параллельно оси Z прибора.

Лучи от точек снимков P_1 и P_2 выходят из объективов 9 параллельным пучком и попадают в объективы 4, которые строят изображение снимков в плоскости марок 6. Изображения снимков и марки наблюдатель рассматривает через окуляры 7. В поле зрения окуляров с измерительными марками и четырьмя перекрестиями (рис.20) нижняя (точечная) марка предназначена для измерения аэро-снимков, верхняя – для измерения наземных снимков, а перекрестие – для центрировок микроскопа и специальных измерений.

Установка марок на резкость осуществляется накатанными трубками окуляров, а получение резкого изображения снимка – накатанными кольцами объективов 9. Глазной базис изменяется от 54 до 76 мм. Устранение видимого поперечного параллакса марок выполняется оптическими линзами 8.

Устройство освещения (рис.18) состоит из верхних осветителей 7 и ламп, расположенных в нижней части прибора. При измерении прозрачных основ (позитивов, негативов) включаются верхние осветители, при измерении контактных отпечатков – лампы.

При транспортировке объективную каретку приподнимают и крепят при помощи рычажков 12 и 13, расположенных на обеих сторонах прибора, а верхние осветители выключают и перевозят отдельно.

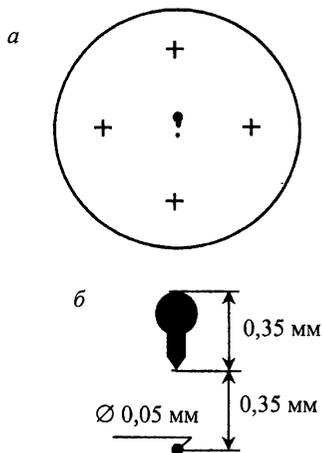


Рис.20. Поле зрения окуляров (а) и измерительная марка (б)

Основные характеристики СК-1818

Формат снимков, мм	180×180
Пределы измерений, мм:	
абсцисс x	235
высот z	180
продольных параллаксов p	75
с удлинителем базиса	131
поперечных параллаксов q	± 10
Поворот снимкодержателей, градус	360
Точность отсчетов по шкалам измерительных барабанов, мм:	
абсцисс и высот	0,02
с оценкой на глаз	До 0,004
продольных параллаксов	0,005
с оценкой на глаз	До 0,001
поперечных параллаксов	0,01
с оценкой на глаз	До 0,002
Увеличение наблюдательной системы	8^x
Диаметр поля зрения, мм	16
Диаметр точечной марки, мм	0,05
Масса прибора, кг	132
Необходимая площадь для размещения, м ²	1,0

Отличительной особенностью стереокомпаратора являются компактность и невысокая стоимость его изготовления. Прибор создает хорошие условия стереоскопических наблюдений, но из-за отсутствия автоматической регистрации координат и параллаксов не обеспечивает высокой производительности стереоскопических измерений.

Измерение координат и параллаксов точек снимков стереопары на стереокомпараторе включает следующие процессы:

- установку снимков и юстировку наблюдательной системы;
- ориентирование снимков;
- стереоскопическое наведение марок на точки снимков и снятие отсчетов по шкалам;
- определение начальных отсчетов шкал.

Левый снимок стереопары устанавливают в левый, а правый – в правый снимкодержатели и приступают к юстировке наблюдательной системы. Последовательность юстировки следующая:

- изменяя расстояние между окулярами, устанавливают глазной базис наблюдательной системы. При правильной установке базиса поля зрения окуляров, видимые левым и правым глазами совмещаются;

- вращением накатанных трубок окуляров добиваются резкости изображения марок, а разворотом оптических клиньев устраняют видимый параллакс марок;

- вращая накатанные кольца объективов, расположенные в задней станины, устанавливают резкое изображение снимков и четкое положение марки и контуров фотоизображения, при котором небольшие перемещения головы наблюдателя относительно окуляров не вызвали бы смещение марки относительно контуров (устраняют притирательный параллакс изображения).

Ориентирование снимков выполняют по координатным меткам. Перед началом измерений снимки устанавливают так, чтобы координатные оси x_1 и x_2 (z_1 и z_2) были параллельны координатной оси XZ прибора, а стороны снимка располагались симметрично. Штурвалами $Ш_x$ и $Ш_z$ наводят левую марку на координатную метку 1 правого снимка (для достижения одновременности видения на соответствующие пары координатных меток пользуются удлинителем базиса). Штурвалом $Ш_x$ подводят левую марку к координатной метке 2 и наблюдают в левый окуляр. Если марка не попадает через метку 2, то ось x снимка не параллельна оси X прибора. Половину несовмещения марки и метки устраняют штурвалом $Ш_z$, а оставшееся несовмещение – разворотом левого снимкодержателя с помощью микрометрического винта $Ш_{x_1}$. Затем наблюдают в правый окуляр и совмещают правую марку с меткой 2. Половину несовмещения устраняют штурвалом $Ш_q$, другую половину – микрометрическим винтом $Ш_{x_2}$ правого снимкодержателя. При совмещении марки с координатной меткой 2 возможно использование штурвала $Ш_p$.

Указанные действия повторяют несколько раз. Ориентирование считается законченным, если координатные оси x_1 и x_2 снимков будут находиться на одной линии, параллельной оси X прибора.

Ориентирование всех снимков должно выполняться вдоль либо оси X (метки 1 и 2), либо оси Z (метки 3 и 4) прибора, так как прямые, соединяющие противоположные координатные метки фотокамеры, не всегда строго перпендикулярны.

Если программой построения модели предусматривается аналитическое внутреннее ориентирование снимков, то их в приборе выполняют приближенно, устанавливая снимки так, чтобы хорошо наблюдался стереозффект. В этом случае отсчеты, снятые по шкалам прибора при наведении марки на координатные метки, вводят в ЭВМ вместе с другой исходной информацией. По этим отсчетам вычисляют места нулей шкал стереокомпаратора и поправок в каждую точку за неточное ориентирование снимков в приборе.

Стереоскопическое наведение марки на точки снимков и снятие отсчетов по шкалам прибора выполняют следующим образом. Сначала движением штурвалов $Ш_x$ и $Ш_z$ совмещают марку с точкой на левом снимке. Наблюдая снимки стереоскопически, движением $Ш_q$ устраняют поперечное двоение марок (поперечный параллакс q), а движением $Ш_p$ совмещают марку с поверхностью модели.

После стереоскопического совмещения марки с определяемой точкой снимают отсчеты по шкалам прибора V_x, V_z, V_p, V_q и записывают их в журнал. Визирование на каждую точку и снятие отсчетов выполняют двумя полуприемами. Значения координат и параллаксов точек, полученных в полуприемах, не должны отличаться от заданных отклонений, которые устанавливают в зависимости от качества снимков, характера местности, изобразившейся на снимках, инструментальной точности прибора и опыта работы оператора-фотограмметриста.

Местом нулей шкал стереокомпаратора называют такие отсчеты, при которых левая марка наведена на начало координат o_1 левого снимка, а правая – на начало координат o_2 правого снимка (точки o определяют начало координат плоской системы координат снимков).

Места нулей шкал определяют по результатам последовательного визирования на координатные метки 1-4 по формулам

$$\begin{aligned}
 MO_X &= 0,25 \sum_1^4 V_X; MO_Z = 0,25 \sum_1^4 V_Z; \\
 MO_P &= 0,25 \sum_1^4 V_P; MO_q = 0,25 \sum_1^4 V_q,
 \end{aligned}
 \tag{56}$$

где V_X, V_P, V_q – отсчеты по шкалам стереокомпаратора при наведении измерительной марки на соответствующие координатные метки.

Координаты изображений точек местности на левом x'_1, z'_1 и правом x'_2, z'_2 снимках стереопары в системе координат прибора вычисляются по формулам

$$\begin{aligned}
 x'_1 &= V_X - MO_X; \quad x'_2 = x'_1 - V_P + MO_P; \\
 z'_1 &= V_Z - MO_Z; \quad z'_2 = z'_1 - V_q + MO_q.
 \end{aligned}
 \tag{57}$$

Автоматизированные стереокомпараторы. К настоящему времени имеется несколько моделей стереокомпараторов, отличающиеся друг от друга некоторыми конструктивными особенностями.

Так, в стереокомпараторе СКА-18 (Россия) наличие каретки для установки дополнительного (крупномасштабного) снимка и возможность стереоскопического рассматривания его с одним из основных снимков позволяет повысить достоверность и точность определения точек.

Фирмой ОМЈ (Италия) выпущен трехкареточный стереокомпаратор ТА-3, позволяющий стереоскопически рассматривать любую пару из трех снимков, что существенно повышает достоверность и точность идентификации точек.

В стереокомпараторе ПСК фирмы «Карл Цейсс» (Германия) каретки снимков установлены вертикально, а, благодаря использованию для измерений стеклянных сеток, влияние температурных изменений сводится к минимуму.

Таблица 4

Технические характеристики фотограмметрических приборов

Название прибора, страна-изготовитель	Формат снимков, см	Измеряемые величинны	Увеличение наблюдательной системы, крат	Точность регистрации, мкм	Тип преобразователя	Выходные устройства	Размер прибора, см	Масса прибора, кг
СКА-18, Россия	18×18	x_1, y_1, x_2, y_2	5-20	2	Угол – код, бесконтактный	Телеграфный аппарат с перфоратором и десятичное табло	170×113×156	700
СКВ-1, Россия	18×18	x_1, y_1, x_2, y_2	8, 16, 20	2	Линия – код, бесконтактный отражательная дифракционная решетка	Телегайт, перфоратор и десятичное табло	151×100×65	300
«Стекометр» Германия	23×23	x_1, y_2, p, q	6, 9, 12, 18	2	Угол – код, контактный	Печатная машинка, перфоратор ленточный, механический счетчик	118×63×64	80
SOM, Франция	23×23	x_1, y_1, x_2, y_2	4, 7, 12	2	Угол – код, бесконтактный	Печатная машинка, перфоратор, десятичное табло	130×105×130 65×97×105	625
PSK, Германия	24×24	x_1, y_2, p, q	8, 12, 16	1	Угол – код, контактный	Пишущая машинка, перфоратор, механический счетчик	113×75×73 132×56×66	215
«Истри» ТА-3, Италия	30×30	$x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$	8-12	2	"	Пишущая машинка, перфоратор, световое табло	210×110×130	1340
STK-1, Швейцария	24×24	x_1, y_2, p, q	6, 11, 20, 40	2	"	Пишущая машинка, перфоратор, механический счетчик	185×120×130	1500
ТА-3/Р1, Италия	23×46	$x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$	7-14	2	-	Телегайт, перфоратор, магнитная лента	-	-

В стереокомпараторах СКВ-1 (Россия) и «Стекометр» (Германия) для перемещения кареток используют сельсинные передачи.

Наиболее совершенны по своей конструкции стереокомпараторы СКА-18, СКВ-1 (Россия) и ТА-3/PJ (Италия), так как они позволяют выполнять независимое измерение координат точек левого x_1, y_1 и правого x_2, y_2 снимков. Это дает возможность повысить точность отождествления точек путем восстановления при обработке последующей стереопары отсчетов, зафиксированных при наблюдении точек предыдущей стереопары.

Оптические наблюдательные системы большинства стереокомпараторов имеют переменное увеличение, позволяющее стереоскопически рассматривать снимки разных масштабов, снабжены устройствами для переключения оптических ветвей и устройствами изменения изображения снимков.

Измерения на всех стереокомпараторах осуществляют по принципу «мнимая модель – мнимая марка», используя, как правило, точечные светящиеся марки различной формы, размера и цвета.

Основные технические характеристики автоматизированных стереокомпараторов приведены в табл.4. Измеряемые на приборах координаты записаны в системе координат аэроснимка.

§ 13. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Универсальные стереофотограмметрические приборы (УСП) используют для составления топографических карт и планов различного масштаба, получения цифровых моделей сфотографированного объекта и топографической карты, а также для построения сетей пространственной фототриангуляции. На УСП по снимкам производят связки проектирующих лучей, из связок путем их взаимного ориентирования образуют модель заснятого объекта, вычисляют ее внешнее ориентирование и осуществляют съемку контура и рельефа.

По способу определения пространственных координат точек объекта съемки УСП подразделяются на аналоговые и аналого-цифровые.

В аналоговых УСП восстановление связей проектирующих лучей, их взаимное и внешнее ориентирование осуществляется с помощью оптических, оптико-механических и механических технических средств. Наиболее точными аналоговыми УСП являются приборы механического типа. Наименьшей инструментальной точностью обладают приборы оптического типа.

Аналоговые УСП позволяют измерять плановые координаты с точностью 5-20 мкм в масштабе снимка, а высоты – с точностью 1/10000-1/5000 от высоты проектирования.

В аналитических приборах объединены автоматизированный стереокомпаратор, ЭВМ, автоматизированный координатограф и печатающее устройство. Координаты точек снимков стереопары измеряют на автоматизированном стереокомпараторе, они поступают в ЭВМ в качестве исходной информации. Воспроизведение связей проектирующих лучей, построение модели и ее внешнее ориентирование осуществляют с помощью ЭВМ. Вычисленные координаты точек модели оформляют в виде списка координат точек или передают на координатограф для вычерчивания горизонталей и контуров.

Плановые координаты точек измеряют с точностью 2-5 мкм в масштабе снимка, а высоты – с точностью 1/30000-1/10000 от высоты фотографирования.

Для обработки снимков фототеодолитной съемки более широкое применение нашли аналоговые приборы механического типа: стереоавтограф, технокарт, топокарт и стереоmetroграф. В табл.4 представлены некоторые технические характеристики этих приборов.

Стереометрограф и топокарт позволяют также выполнять обработку и аэроснимков.

Для обработки наземных снимков в нашей стране наиболее широкое распространение получили стереоавтограф и технокарт.

Стереоавтограф. Стереоавтограф (рис.21) – высокоточный фотограмметрический прибор универсального типа, предназначенный для составления топографических планов, карт и обмерных чертежей по снимкам нормального и равноотклоненного видов фототеодолитной съемки.

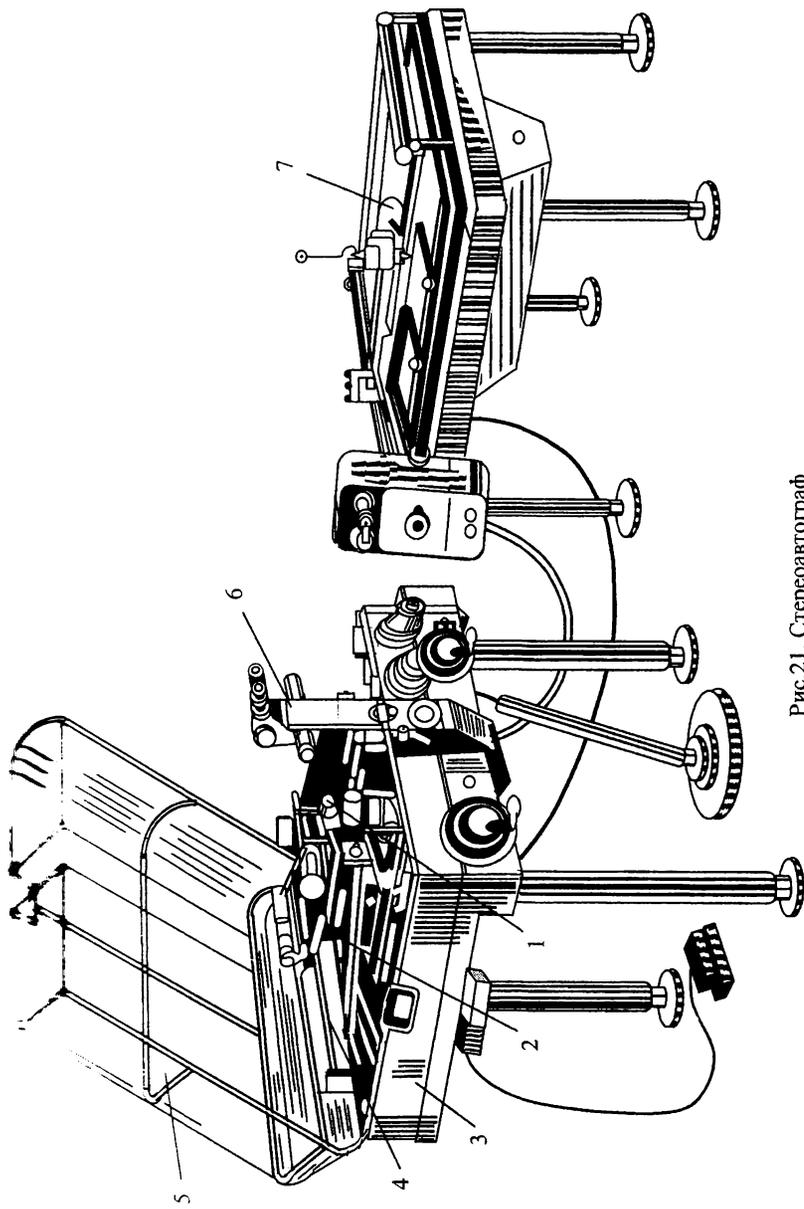


Рис.21. Стереовидеограф

1 — каретки снимков; 2 — мостик линеек; 3 — станна; 4 — мостик отстояний;
5 — прозрачный кожух; 6 — наблюдательная система; 7 — координатограф

Основные характеристики стереоавтографа 1318 EL

Формат снимков, см	13×18
Фокусное расстояние, мм	157-198
Угол конвергенции, гон	От +5 до -2
Пределы установки координат, мм:	
X	От -220 до +220
Y	От 50 до 400
Z	От -235 до +235
Пределы установки базисных составляющих, мм:	
B_X	От 0 до + 60
B_Y	От -30 до +30
B_Z	От +10 до -10

Прямая фотограмметрическая засечка в приборе решается плоскостными механизмами плановой и высотной засечек. Механизм плановой засечки (рис.22, а) имеет линейки L_1 и L_2 , вращающиеся вокруг осей S_1 , S_2 , укрепленных на станине прибора. С помощью скользящих шарниров M_1 , M_2 и базисных суппортов B_X , B_Y линейки соединены с кареткой X измерительной системы, перемещающейся по направляющим X , а вместе с ней и по направляющим Y . С помощью скользящих шарниров N_1 , N_2 через суппорты фокусных расстояний f_{x_1} , f_{x_2} линейки соединены с каретками снимков P_1 , P_2 , перемещающихся по направляющим X . Короткое плечо линейки L_2 может поворачиваться относительно длинного на угол конвергенции γ . Особыми точками механизма являются проекции на оси X , Y осей S_1 , S_2 , M_1 , M_2 , N_1 , N_2 . Векторы, образованные этими точками, и их проекции на оси X , Y позволяют определять координаты X , Y , x_1 , x_2 , фокусные расстояния f_{x_1} , f_{x_2} снимков, проекции базиса на плоскость XU и его компоненты B_X и B_Y . Механизм плановой засечки определяет координаты X , Y точек модели для названных случаев съемки.

Высотные отметки определяют с помощью механизма высотной засечки. Механизм высотной засечки (рис.22, б) имеет линейки L_3 и L_4 , вращающиеся вокруг оси S , укрепленной на станине

прибора. С линейками L_1 и L_2 жестко связаны под углом 90° соответственно линейки L_3 и L_4 . Через рычажно-шарнирный механизм с линейкой L'_4 связана линейка L''_4 , которая ориентируется механизмом в симметричное с L'_4 положение.

Через базисные суппорты B_Z , B_Y с помощью скользящих шарниров M_3 и M_4 линейки соответственно L_3 и L_4 связаны с кареткой Z , перемещающейся по направляющим Z , а вместе с ней и по направляющим Y измерительной системы. В приборе направляющие X и Z параллельны и располагается одна под другой образуя мостик разностей.

Через суппорты фокусных расстояний f_{z_1}, f_{z_2} с помощью скользящих шарниров N_3 и N_4 линейки соответственно L'_3 и L''_4 связаны с каретками подвижных частей бикулярного микроскопа, перемещающихся по направляющим соответственно z_1 и z_2 . Особыми точками механизма являются проекции осей S, M_3, M_4, N_3, N_4 на плоскость YZ . После установки величины Y с помощью механизма плановой засечки можно определить

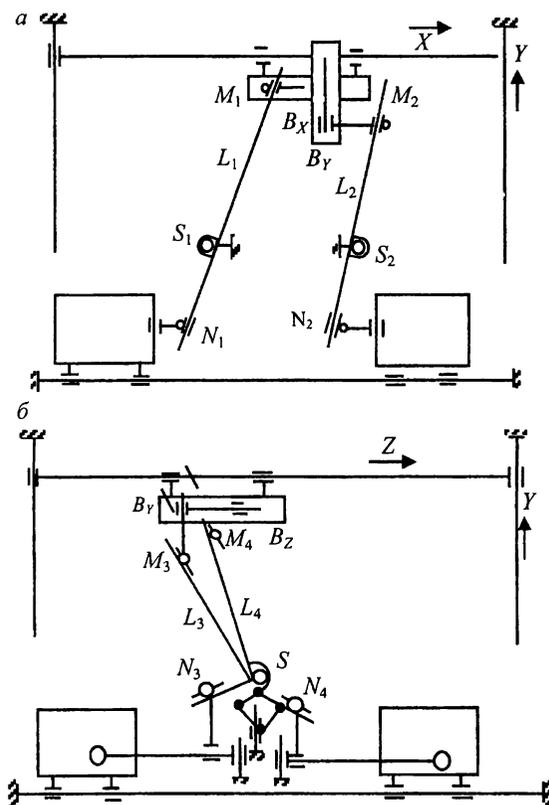


Рис.22. Схемы механизмов решения прямой фотограмметрической засечки в стереоавтографе: а – плановой засечки; б – высотной засечки

координату Z точек модели. Подвижные части бинокулярного микроскопа снабжены дополнительно суппортами с микрометрическими винтами, которые позволяют осуществлять поперечный наклон модели при корректуре ее внешнего ориентирования.

Стереавтограф конструктивно выполнен из нескольких функциональных блоков (см. рис.21): станины, мостика отстояний, кареток снимков, мостика линеек, наблюдательной системы, координатографа и прозрачного кожуха.

Станина прибора 3 закреплена на трех ножках с подъемными винтами. На ней установлена направляющая оси Y и перпендикулярно к ней цилиндрическая направляющая кареток снимков. На передней панели станины размещены: неподвижные элементы наблюдательной системы; штурвалы ведущих винтов X , Y , Z со счетчиками координат; реостаты осветительной системы снимков и марок.

Мостик отстояний 4 выполнен в виде двухэтажной Т-образной детали с салазкой. В нижней части установлена направляющая оси X , а в верхней – направляющая оси Z . По ним перемещаются каретки отстояний и высот.

Каретки снимков 1 перемещаются по цилиндрической направляющей. На них установлены суппорты плановых линеек f_{x_1}, f_{x_2} .

Мостик линеек 2 крепится к станине выше направляющей Y . Он несет на себе: оси вращения плановых и высотных линеек; направляющие осей z_1 и z_2 подвижных частей бинокулярного микроскопа с повторительными системами для установки высоты горизонта и суппорта фокусных расстояний с ножничными маршрутами.

Наблюдательная система 6 состоит из двух частей – неподвижной и подвижной. Ход лучей между ними телескопический. Система оборудована цветными светящимися марками, диоптрийными кольцами и приспособлениями для изменения глазного базиса.

Координатограф служит для графических построений в заданном масштабе плана. Его координатные винты связаны с приводом стереавтографа механическими карданными или сельсинными моторами (стереавтограф 1318 EL) через редуктор, который позволяет установить необходимый коэффициент редукции с помощью набора сменных шестерен. Чертежное устройство оборудовано

инструментом для управления цапговым карандашом или лупой – для измерения с помощью ножной педали.

Технокарт. По своему назначению и принципу работы прибор по своему устройству идентичен стереоавтографу. В отличие от него в конструкции изменена оптическая бинокулярная система. Мостик отстояний подвижен к оператору, что облегчает установку составляющих для различных фокусных расстояний и угла конвергенции.

Основные характеристики технокарта

размер листов, см	От 4×4 до 23×23
диапазон фокусировки окуляров, диоптрии	От –5 до +5
диапазон увеличения наблюдательной системы, крат	6-11
диапазон установки фокусных расстояний, мм	50-215
диапазон конвергенции, гон	От –2 до +6
диапазон установки базисных составляющих, мм:	
Z_1	От 0 до 240
Z_2	От –20 до +20
Z_3	От –20 до +20
диапазон установки пространственных координат, мм:	
X	От –20 до +240
Y	От +35 до +350

Так и в стереоавтографе, в технокарте решение прямой пространственной фотограмметрической засечки осуществляется при помощи проектирующих линеек, вращающихся вокруг центров проецирования S и шарнирно связанных с каретками снимков и каретками, перемещающимися на мостике отстояний (рис.23). Мостик перемещается по направляющей Y при помощи ходового винта, связанного с ведущим валом со штурвалом. На мостике по направляющим X и Z перемещаются левая и правая каретки Z и левая и правая каретки X .

Левый винт кареток X связан через карданный вал со штурвалом, а каретки Z , находящиеся под каретками X , – с ножным диском. Путем точного перемещения кареток X , а также кареток Z устанавливаются

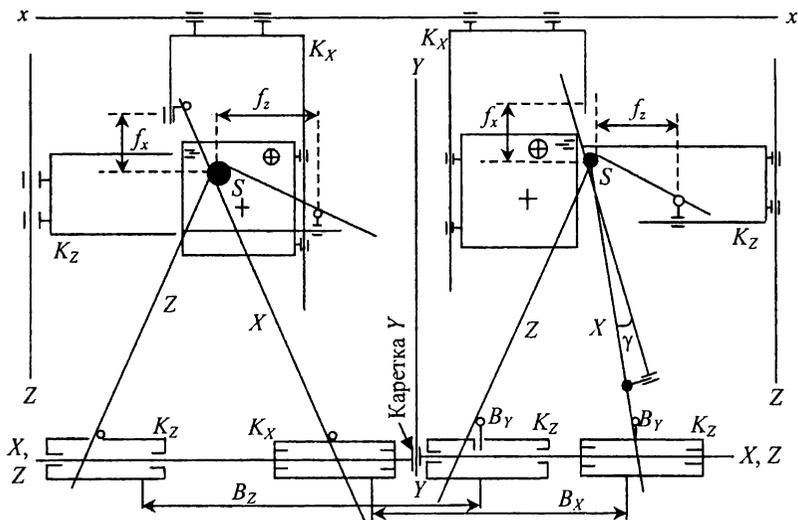


Рис.23. Схема технокарта

соответственно базисные составляющие B_X и B_Z . На правых каретках имеются устройства для установки составляющей B_Y . Короткие плечи линейек касаются роликов, которые определяются в соответствии с фокусным расстоянием фотокамеры. Отсчетные барабаны, фиксирующие фокусные расстояния, закрепляются винтами. Длинное плечо правой плановой линейки может быть повернуто относительно короткого на угол γ . Каретки снимков K_X и K_Z перемещаются по направляющим X и Z при вращении линейек.

Обработывающий прибор состоит из трех основных узлов: основания, станины и бинокулярной головки. На основании, опираясь тремя подъемными винтами, покоится станина, на которой смонтированы механические части прибора и бинокулярная головка. Штурвалы, расположенные на лицевой панели, снабжены цифровыми счетчиками координат и зажимными винтами. На каретках снимков устанавливаются взаимозаменяемые кассеты, которые могут поворачиваться в своей плоскости винтом χ и фиксироваться крепежными винтами. Опорные стекла кассет имеют осевые штрихи для установки снимков, центральные кресты, а также штрихи для

установки снимков, полученных со смещением объектива фототеодолита. Наблюдательная система технокарта позволяет рассматривать негативы, диапозитивы и контактные отпечатки. На бинокулярной головке имеются регулировки для изменения освещения снимков и фокусировки измерительных марок, для установки глазного базиса в пределах от 55 до 75 мм. На оправе окуляров расположены кольца с накаткой, которые связаны с клиньями, корригирующими косоглазие.

Технокарт предназначен для составления планов по фотоснимкам, полученным при горизонтальном положении главных лучей, поэтому он не имеет устройств для корректирования модели по углу ω . Но при обработке снимков могут быть использованы методы корректирования модели, разработанные для стереоавтографа.

Некоторые точностные характеристики УСП, применяемые для обработки фототеодолитных снимков, приведены в табл.3.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СТЕРЕОПАРЫ НАЗЕМНЫХ СНИМКОВ

§ 14. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Обработка наземных снимков производится с целью определения координат точек заснятого объекта, составления топографических планов и карт или решения инженерных и научных задач.

В зависимости от поставленной задачи и точности ее решения, наличия того или иного фотограмметрического прибора и средств вычислительной техники, периферийного оборудования, программного обеспечения обработку снимков фототеодолитной съемки можно осуществлять на аналоговых универсальных приборах (графомеханический метод), аналитическим методом на автоматизированных системах и цифровыми методами.

Графомеханический метод основан на применении универсальных обрабатывающих приборов, позволяющих одновременно с измерением пары наземных снимков моделировать уравнения связи между координатами точек объекта и их изображениями на снимках, получать пространственные координаты точек объекта в системе координат прибора, составлять графический оригинал топографического плана (карты) или чертеж объекта в ортогональной проекции на координатные плоскости XY , XZ , YZ .

Аналитический метод основан на измерении координат и параллаксов соответственных точек пары наземных снимков на стереокомпараторе и вычислении пространственных координат точек объекта по строгим формулам связи координат точек снимков и объекта. Способ отличается высокой точностью решения инженерной задачи, но сравнительно большой объем вычислительных работ ограничивает его применение для составления графических документов, поэтому аналитический способ используют главным образом для определения пространственных координат точек заснятого объекта.

Основным методом обработки снимков наземной фототеодолитной съемки до 90-х годов XX столетия являлся графомеханический.

В 70-х годах начинался постепенный переход от аналоговых документов (карт и планов) к их цифровым аналогам. Это стало возможным благодаря быстрому развитию средств вычислительной техники. В фотограмметрии появились новые универсальные аналоговые стереофотограмметрические приборы (гибридные системы) с аналогово-цифровыми преобразователями, пакетами программ, обеспечивающих автоматизацию таких основных процессов, как построение модели, ее внешнее ориентирование, регистрация измерений снимков и модели, построение цифровой модели фотографируемого объекта.

Дальнейшее развитие вычислительной техники привело к созданию цифровых методов обработки фотоизображений, когда компьютер с набором соответствующих программ и периферийного оборудования (сканирующее устройство и средство ввода/вывода изображения) позволяет решить практически все основные фотограмметрические задачи. Кроме того, цифровые методы обработки фотоизображений дают возможность получить новый вид картографического документа – объемную цифровую растровую фотограмметрическую модель, что позволяет перейти к съемке объектов с помощью цифровых камер.

§ 15. ГРАФОМЕХАНИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ

Графомеханический метод применяют для составления топографических планов и планов открытых горных работ (карьеров), а также для составления профилей участков местности по заданным сечениям. При создании топографического плана наземные снимки на универсальных приборах обрабатывают в следующей технологической последовательности: подготовительные работы; построение связок проектирующих лучей; построение фотограмметрической модели заснятого объекта; ориентирование планшета на координатографе; корректура (исправление) модели по контрольным опорным) точкам; рисовка рельефа и ситуации в масштабе плана; оформление результатов.

Подготовительные работы заключаются в выполнении рабочих проверок прибора, в подготовке основы для составления плана и вычислении базисных составляющих. Целью рабочих проверок является определение мест нулей шкал прибора. Проверки выполняют с использованием контрольных сеток.

Подготовка основы (планшета) состоит в построении на ней координатной сетки и нанесении по координатам углов рамки трапеции в принятой разграфке, базисных и контрольных точек, а также в построении по дирекционным углам направлений осей при различных видах съемки.

Разбивку координатной сетки и накладку точек на планшет выполняют на координатографе, отключив его предварительно от стереоавтографа.

Значения базисных компонентов рассчитывают по формулам

$$bx = \frac{B \cos \varphi}{M}; \quad by = \frac{B \sin \varphi}{M}; \quad bz = \frac{B_z}{M},$$

где B – горизонтальное проложение базиса фотографирования; φ – угол скоса; B_z – превышение правого центра фотографирования над левым; M – знаменатель масштаба стереомодели, выбираемой в зависимости от отстояний Y до снимаемого участка и заданного масштаба плана $1/t$.

Построение связок проектирующих лучей заключается в центрировании снимков в снимкодержателях и установке фокусных расстояний f снимков на всех четырех суппортах. Негативы укладывают на снимкодержатели эмульсией вниз. Центрирование выполняют с помощью винтов и специальной лупы. На счетчике высот устанавливают шкалу, соответствующую выбранному для обработки масштабу модели, и при нулевом положении линеек высот на нем ставят отсчет, соответствующий отметке центра проектирования. После этого смещают подвижные части бинокулярного микроскопа в положение, соответствующее высоте объектива камеры при съемке. Это действие производится либо по отсчетам, взятым из полевого журнала, либо путем совмещения измерительных марок прибора с изображениями штрихов указателя горизонта.

Построение фотограмметрической модели заключается в установлении значений базисных составляющих b_x , b_y , и b_z в масштабе модели. Масштаб модели выбирают один из шести, нанесенных на снимках высот, исходя из возможностей размещения дальней и ближней границ обрабатываемой стереопары в пределах рабочего пространства перемещений мостика отстояний.

Наблюдая снимки бинокулярно, убеждаются в том, что стереоскопическая модель сфотографированной местности получена.

Ориентирование планшета состоит в его установке на координатографе в такое положение, чтобы прочерченное на планшете направление оптической оси левого снимка было параллельно направлению Y координатографа.

Корректирование модели выполняют для исключения искажений, вызванных ошибками элементов ориентирования снимков стереопары и юстировок прибора. Корректирование модели выполняют по контрольным точкам 1, 2 и 3, расположенным по определенной схеме (рис.24) на стереопаре и на планшете.

При наведении измерительной марки на контрольные точки стереомодели визирная ось установочного микроскопа (или острие лезвия координатографа) должна устанавливаться над соответствующими точками на планшете. Имеющиеся несовмещения свидетельствуют о необходимости изменения на приборе установочных данных.

Корректирование модели выполняют в такой последовательности. Сначала стереоскопически выискивают на точки модели 1 и 2 и отмечают их положение на планшете. Если размер смещений изменяется пропорционально отстоянию точек от точки S_1 , то можно утверждать, что смещения вызваны ошибкой составляющей базиса b_x . Если размер смещений увеличивается пропорционально квадрату отстояния, то это свидетельствует

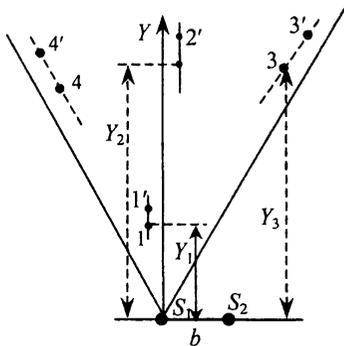


Рис.24. Расположение контрольных точек на стереопаре наземных снимков

о наличии ошибки угла конвергенции γ . В первом случае смещения точек устраняются изменением составляющей базиса b_x , а во втором – винтом конвергенции. При совместном влиянии ошибок составляющей базиса и угла конвергенции смещения устраняют методом последовательных приближений. Для этого штурвалами X и Y совмещают острие карандаша координатографа с положением точки 2 на планшете, а стереоскопическое несовмещение марки на модели устраняют винтом конвергенции. На ближней точке 1 теми же штурвалами совмещают острие карандаша с положением этой точки на планшете, а несовмещение марки на модели устраняют изменением составляющей базиса b_x . Затем наблюдают точку 3. Несовмещение устраняется базисной компонентой b_y . Эти действия повторяют, пока ошибки в положении на контрольных точках не достигнут установленного допуска.

Искажение высот контрольных точек может быть вызвано ошибками углов χ и ω . Ошибку крена устраняют установкой на счетчике высот геодезической отметки точки 3 и поворотом левого снимка на угол $\Delta\chi$, а погрешность высоты точки 2 за счет влияния ошибки угла ω – путем изменения положения марки по высоте микрометрическим винтом левого суппорта горизонта. Если ошибки в положении точек не превосходят 0,2 мм, а по высоте – 1/6 сечения рельефа, то корректирование модели считают законченным.

Построенная таким образом модель позволяет определить пространственные координаты точек местности в системе координат прибора и выполнить методом трассирования рисовку рельефа и контуров.

Рисовку рельефа и ситуации начинают с вычерчивания на планшете элементов гидрографии (реки, ручьи), а также водораздельных и водосливных линий (оси хребтов, лощин, промоин и т.п.), определяющих характер рельефа участка местности. Затем на счетчике высот прибора устанавливают отметку самой верхней горизонтали с учетом поправки за кривизну Земли и рефракцию. Действуя штурвалами X и Y , наводят марку на левый край модели и ведут ее слева направо по стереоскопической модели. Карандаш координатографа в это время вычерчивает на планшете горизонталь. Закончив рисовку одной горизонтали, рисуют вторую и последующие.

Для построения на планшете контуров объектов измерительной маркой обводят соответствующие контуры на стереомодели, действуя одновременно тремя движениями по осям X, Y, Z прибора.

Контролем правильности рисовки рельефа и ситуации служит сходимость горизонталей, контуров и отметок точек, полученных со смежных стереопар. Предельные расхождения контрольных точек, взятых на четко выраженных контурах, для равнинных участков не должны превышать в плане 1 мм, для горных – 1,5 мм. Предельные расхождения высотных пикетов с отметками, рассчитанными по горизонталям, при углах наклона до 6° не должны превышать $2/3$ высоты сечения рельефа, а при углах наклона свыше 6° – тринадцатой высоты сечения рельефа.

Оформление планшета производится в соответствии с наставлениями по топографическим съемкам и действующими условиями знаками.

§ 16. АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ

Наземная стереофотограмметрическая съемка производится фототеодолитом с концов базиса фотографирования, как правило, при параллельном расположении главных лучей фотокамеры и заданных элементах ее внутреннего и внешнего ориентирования. При этом стандартный вид фотосъемки и наличие элементов ориентирования позволяют использовать сравнительно простые уравнения связи (38) и (40) между пространственными координатами точки объекта местности и координатами ее изображения на паре снимков. Начало пространственных координат X, Y, Z совмещено с передней главной точкой объектива S_1 . Переход от координат X, Y, Z к геодезическим координатам осуществляется по формулам (42).

Общий вид фотосъемки характеризуется произвольным значением элементов ориентирования снимков. Задача определения координат точек объекта съемки в этом случае решается аналитическим методом с использованием ЭВМ.

Математической основой метода являются уравнения связи между координатами точки снимка и точки местности и уравнения

связи (32) между геодезическими координатами точки местности и координатами ее изображений на паре снимков.

Примем, что приближенные значения координат точки местности и элементов ориентирования известны. Тогда в результате линеаризации зависимостей (21) получим следующие уравнения поправок:

$$\begin{aligned} & \alpha \delta X_S + b \delta Y_S + c \delta Z_S + d \delta \alpha + e \delta \omega + f \delta \chi + i \delta X + j \delta Y + k \delta Z + \\ & + m \delta f + n \delta x_0 + o \delta z_0 + l_x = v_x; \end{aligned} \quad (58)$$

$$\begin{aligned} & a' \delta X_S + b' \delta Y_S + c' \delta Z_S + d' \delta \alpha + e' \delta \omega + f' \delta \chi + i' \delta X + j' \delta Y + k' \delta Z + \\ & + m' \delta f + n' \delta x_0 + o' \delta z_0 + l_z = v_z, \end{aligned}$$

где $\delta X_S, \delta Y_S, \delta Z_S, \delta \alpha, \delta \omega, \delta \chi, \delta f, \delta x_0, \delta z_0$ – поправки к приближенным значениям элементов внешнего и внутреннего ориентирования снимка; $\delta X, \delta Y, \delta Z$ – поправки к приближенным значениям координат точки сгущения; l_x, l_z – свободные члены, определяемые по разностям между вычисленными по формулам (21) значениями (x) и (z) и измеренными значениями x, z координат этой же точки.

Коэффициенты a, b, c, \dots, o' уравнений (58) представляют собой частные производные функций (21) по соответствующим переменным. Их численные значения находят из уравнений частных производных по измеренным координатам x, z и приближенным значениям определяемых параметров:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial X_S} &= a = \frac{1}{Y^*} [a_2(x - x_0) - a_1 f]; & \frac{\partial x}{\partial Y_S} &= b = \frac{1}{Y^*} [b_2(x - x_0) - b_1 f]; \\ & & \frac{\partial x}{\partial Z_S} &= c = \frac{1}{Y^*} [c_2(x - x_0) - c_1 f]; \end{aligned} \quad (59)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \alpha} = d = \frac{f}{Y^*} [b_1(X - X_S) - a_1(Y - Y_S)] - \frac{x - x_0}{Y^*} [b_2(X - X_S) - a_2(Y - Y_S)];$$

$$\frac{\partial x}{\partial \omega} = e = \frac{x - x_0}{Y^*} [c_2(X - X_S) \sin \alpha + c_2(Y - Y_S) \cos \alpha - (Z - Z_S) \cos \omega] - f \sin \chi;$$

$$\frac{\partial x}{\partial \chi} = f = z - z_0; \quad \frac{\partial x}{\partial X} = i = -a = \frac{1}{Y^*} [-a_2(x - x_0) + a_1 f];$$

$$\frac{\partial x}{\partial Y} = j = -b = \frac{1}{Y^*} [-b_2(x - x_0) + b_1 f];$$

$$\frac{\partial x}{\partial Z} = k = -c = \frac{1}{Y^*} [-c_2(x - x_0) + c_1 f];$$

$$\frac{\partial x}{\partial f} = m = \frac{x - x_0}{f}; \quad \frac{\partial x}{\partial x_0} = n = 1; \quad \frac{\partial x}{\partial z_0} = 0;$$

$$\frac{\partial z}{\partial X_s} = a' = \frac{1}{Y^*} [a_2(z - z_0) - a_3 f]; \quad \frac{\partial z}{\partial Y_s} = b' = \frac{1}{Y^*} [b_2(z - z_0) - b_3 f];$$

$$\frac{\partial z}{\partial Z_s} = c' = \frac{1}{Y^*} [c_2(z - z_0) - c_3 f]; \quad (59)$$

$$\frac{\partial z}{\partial x} = d' = \frac{f}{Y^*} [b_3(X - X_s)x + a_3(Y - Y_s)] - \frac{z - z_0}{Y^*} [b_2(X - X_s) - a_2(Y - Y_s)];$$

$$\frac{\partial z}{\partial x} = e' = \frac{z - z_0}{Y^*} [c_2(X - X_s) \sin \alpha + c_2(Y - Y_s) \cos \alpha - (Z - Z_s) \cos \omega] - f \cos \chi;$$

$$\frac{\partial z}{\partial \chi} = f' = -(x - x_0);$$

$$\frac{\partial z}{\partial X} = i' = -a' = \frac{1}{Y^*} [-a_2(z - z_0) + a_3 f];$$

$$\frac{\partial z}{\partial Y} = j' = -b = \frac{1}{Y^*} [-b_2(z - z_0) + b_3 f];$$

$$\frac{\partial z}{\partial Z} = k' = -c' = \frac{1}{Y^*} [-c_2(z - z_0) + c_3 f];$$

$$\frac{\partial z}{\partial f} = m' = \frac{z - z_0}{f}; \quad \frac{\partial z}{\partial x_0} = 0; \quad \frac{\partial z}{\partial z_0} = 1.$$

В современных фотокамерах элементы внутреннего ориентирования определены с высокой точностью, поэтому для снимков, полученных такими фотокамерами, уравнения поправок (59) можно представить в таком виде:

$$\begin{aligned} a\delta X_S + b\delta Y_S + c\delta Z_S + d\delta\alpha + e\delta\omega + f\delta\chi + i\delta X + j\delta Y + k\delta Z + l_x &= v_x; \\ a'\delta X_S + b'\delta Y_S + c'\delta Z_S + \delta\alpha + e'\delta\omega + f'\delta\chi + i'\delta X + j'\delta Y + k'\delta Z + l_z &= v_z. \end{aligned} \quad (60)$$

Если решается задача определения элементов внешнего ориентирования снимков, а координаты исходных данных опорных точек определены с большой точностью, то

$$\begin{aligned} a\delta X_S + b\delta Y_S + c\delta Z_S + d\delta\alpha + e\delta\omega + f\delta\chi + l_x &= v_x; \\ a'\delta X_S + b'\delta Y_S + c'\delta Z_S + d'\delta\alpha + e'\delta\omega + f'\delta\chi + l_z &= v_z. \end{aligned} \quad (61)$$

Уравнения поправок (60) и (61) используют в аналитическом методе для определения координат точек местности по измерениям стереопары наземных снимков общего вида съёмки.

Исходными данными являются: x', z' – координаты изображений точек местности в системе координат прибора; f, x_0, z_0 – элементы внутреннего ориентирования съёмочной фотокамеры; x, z – координаты координатных меток в системе координат плоскости изображения фотокамеры; X_r, Y_r, Z_r – координаты опорных точек, изобразившихся на снимках стереопары (число точек не менее трех), а также приближенные значения элементов внешнего ориентирования $X_S, Y_S, Z_S, \alpha, \omega, \chi$ снимков стереопары.

Задача решается в следующей последовательности: измерение на стереокомпараторе плоских координат изображений координатных меток, опорных точек, точек фотограмметрического сгущения в системе координат прибора; внутреннее ориентирование снимков стереопары; определение элементов внешнего ориентирования снимков стереопары; определение приближенных геодезических координат точек фотограмметрического сгущения; определение элементов внешнего ориентирования снимков стереопары и геодезических координат точек фотограмметрического сгущения с оценкой точности результата.

Снимки в приборе ориентируют приближенно, устанавливая их так, чтобы хорошо наблюдался стереозффект. Затем стереоскопически измеряют координаты и параллаксы координатных меток и всех запроектированных точек. По результатам измерений определяют места нулей шкал прибора (формулы (56) и плоские координаты x', z' соответственных точек левого и правого снимков (формулы (57)) стереопары.

Плоские координаты x', z' точек пары снимков определяют в системе координат прибора. Однако в основные уравнения связи координат точек снимка и местности входят координаты x, z , отнесенные к системе координат снимка. Поэтому необходимо осуществить переход от системы координат прибора к системе координат снимка. Этот процесс называется *внутренним ориентированием снимка*. Он включает поворот системы координат прибора на угол Θ , параллельный перенос начала координат в главную точку снимка и масштабное преобразование, обусловленное его систематической деформацией.

Для внутреннего ориентирования снимков используют координаты координатных меток в системе координат плоскости изображения фотокамеры фототеодолита и координаты координатных меток x', z' в системе координат прибора. Переход от системы координат прибора к системе координат снимка осуществляется с помощью полиномов аффинного преобразования.

Для каждой координатной метки снимка составляют два уравнения вида

$$a_1x' + b_1z' + c_1 - x = v_x; \quad (62)$$

$$a_2x' + b_2z' + c_2 - z = v_z, \quad (63)$$

где a_1, \dots, c_2 — коэффициенты аффинного преобразования координат; v_x, v_z — отклонения координат меток из-за погрешностей измерений и деформации снимка.

Коэффициенты a_1, b_1, c_1 определяют из решения системы уравнений (62), а коэффициенты a_2, b_2, c_2 — из решения системы уравнений (63) при условии $[\nu\nu] = \min$.

Качество измерения определяют стандартом μ остаточных отклонений координат на метках,

$$\mu = \sqrt{[v_x^2 + v_z^2]} / (2n - 6),$$

где n – число координатных меток.

Координаты точек снимков в системе координат плоскости изображений фотокамеры с началом в главной точке находят из уравнений

$$x = a_1 x' + b_1 z' + c_1 - x_0; \tag{64}$$

$$z = a_2 x' + b_2 z' + c_2 - z_{об} - z_0.$$

где $z_{об}$ – смещение объектива камеры фототеодолита по оси z снимка.

При таком преобразовании одновременно осуществляются переход от одной системы координат к другой и учет систематической деформации снимка в продольном и поперечном направлениях.

Элементы внешнего ориентирования левого и правого снимков стереопары определяют по геодезическим координатам опорных точек и координатам x, z их изображений. Эта задача называется *обратной пространственной фотограмметрической засечкой*. Чтобы ее решить, составляют две системы уравнений поправок (61) для изображений опорных точек на снимках стереопары. Коэффициенты a, b, \dots, f' и свободные члены $l_x = (x) - x, l_z = (z) - z$ уравнений каждой системы вычисляют соответственно по формулам (59) и (21), используя приближенные значения определяемых величин и координаты x, z изображений опорных точек. Если число опорных точек равно n , то каждая система будет содержать $2n$ уравнений. Системы уравнений поправок решают отдельно под условием $[p v_x^2 + p' v_z^2] = \min$, где p и p' – веса измерений координат соответственно x и z .

Неизвестные элементы ориентирования снимков находят методом последовательных приближений. От уравнений поправок переходят к системе нормальных уравнений, в результате решения которой получают поправки к начальному приближению. Введя эти поправки, находят первое приближение неизвестных. Затем снова составляют уравнения поправок, используя уточненные значения

неизвестных при вычислении коэффициентов a, b, \dots, f' и свободных членов l_x, l_z . От уравнений поправок переходят к нормальным уравнениям, решают их и находят поправки к первому приближению и т.д. Процесс вычислений завершают, если разности поправок в $i+1$ -м и i -м приближениях не превышают установленные допуски.

Определив ЭВО, по формулам (32) находят приближенные геодезические координаты точек фотограмметрического сгущения, а по формуле

$$\delta z = \left(\frac{1-K}{2R} L^2 \right) \frac{f}{Y} = \delta Z \frac{f}{Y} \quad (65)$$

определяют поправки в измеренные высоты z точек левого и правого снимков стереопары за влияние рефракции и кривизны поверхности Земли; расстояния L от центров проекции снимков до точек местности находят по геодезическим координатам центров проекций снимков и точек местности.

Затем составляют четыре системы уравнений поправок – две системы уравнений (60), связанных между собой через поправки в координаты точек сгущения, и две системы уравнений (61), независимые между собой, но имеющие связь с системами уравнений (60) через поправки в элементы внешнего ориентирования снимков. Свободные члены уравнений находят с учетом исправленных поправок (65) значений z . В качестве начальных приближений искомым величинам используют вычисленные значения ЭВО снимков и координаты точек местности.

Общее число уравнений поправок $M = 4(n + k)$, где n – число стерео точек; k – число определяемых точек. Общее число неизвестных $N = 12 + 3k$, где 12 – число элементов внешнего ориентирования снимков стереопары; 3 – число координат для каждой точки. Число избыточных уравнений $r = M - N = 4n + k - 12$.

Неизвестные параметры определяют последовательными приближениями по способу наименьших квадратов.

Для оценки точности решения задачи по полученным данным в последнем приближении находят поправки v_x, v_z и весовые коэффициенты Q . Ошибку единицы веса находят из выражения

$$\mu = \sqrt{\frac{[pv_x^2 + p'u_z^2]}{r}} = \sqrt{\frac{[pv_x^2 + p'u_z^2]}{4n + k - 12}}.$$

Средние квадратические ошибки определяемых величин вычисляются по формуле

$$m_j = \mu \sqrt{Q_{jj}} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, 9).$$

Рассматриваемый аналитический метод учитывает систематические ошибки фотоснимка, вызванные его деформацией, кривизной поверхности Земли и рефракцией. Он позволяет также учесть деформации снимка, вызванные дисторсией объектива фотокамеры и другими источниками искажений. В этом случае в исходные уравнения поправок вместо x и z нужно ввести $x + \delta\bar{x}$ и $z + \delta\bar{z}$, где $\delta\bar{x}$ и $\delta\bar{z}$ – поправки в измеренные координаты точки снимка за влияние неучтенных источников искажений снимков. В качестве математических моделей для определения этих поправок используют, например, алгебраические полиномы вида

$$\delta\bar{x} = a_0 + a_1x + a_2z + a_3x^2 + a_4xz + a_5z^2 + \dots;$$

$$\delta\bar{z} = a'_0 + a'_1x + a'_2z + a'_3x^2 + a'_4xz + a'_5z^2 + \dots,$$

коэффициенты которых подлежат определению.

§ 17. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ

Автоматизированная система обработки наземных снимков в автоматическом режиме выполняет следующие процессы решения двойной обратной пространственной фотограмметрической засечки:

- внутреннее ориентирование снимков;
- построение фотограмметрической модели (взаимное ориентирование снимков) и ее внешнее ориентирование;
- съемка ситуации и рельефа.

На всех этапах решения задачи обеспечивается автоматическая регистрация результатов измерений и программная поддержка построения модели на ПЭВМ.

Для реализации процесса автоматизированной обработки необходимы аппаратные и программные средства. Аппаратные средства, как правило, включают:

1. Компьютер типа IBM PC или совместимый с ним. Требования к его техническим характеристикам во многом зависят от объема обрабатываемых данных.

2. Мониторы цветные (лучше SVGA 800×600 пикселей с размером экрана по диагонали от 17 дюймов).

3. Графопостроитель рулонный перьевой формата A0 с количеством перьев не менее четырех.

4. Принтер, совместимый с Epson (9 игл и более).

5. Дискеты и расходные материалы.

Автоматическая регистрация измерений обеспечивается сопряжением приборов для обработки снимков с ПЭВМ. У аналитических и цифровых фотограмметрических станций указанное сопряжение заложено в конструкцию соответствующего оборудования. При использовании аналогового фотограмметрического прибора механического типа на его ходовые винты устанавливаются инкрементальные (дифференциальные) датчики типа «угол – код». Они преобразуют механические перемещения кареток прибора в электрические импульсы. Чтение импульсов, их суммирование, контроль и регистрацию в ПЭВМ выполняют с помощью интерфейсного устройства (координметр, блок расшифровки Marcgraf, ДИ и др.). В результате получается так называемая гибридная система. Чтобы регистрация осуществлялась не в импульсах, а в миллиметрах, перед началом измерений необходимо определить цену импульса, используя для этого, например, результаты измерения сетки Готье.

Что касается программного обеспечения, то в нашей стране разработано несколько пакетов, обеспечивающих как решение прямой обратной пространственной засечки, так и построение цифровой модели объекта. Из них заслуживает внимание программный комплекс «Карьер», разработанный в фотограмметрической лаборатории ВНИМИ. Это специализированный пакет, предназначенный для обработки материалов фотограмметрической и тахеометрической съемки карьеров.

Достоинство пакета в том, что в процесс обработки наземных снимков включен этап корректирования фотограмметрической модели, позволяющий существенно уменьшить невязки на опознаках и в итоге повысить точность конечного продукта. Для этого геодезические координаты опознаков преобразуют в фотограмметрическую систему координат. Разности между перевычисленными координатами опознаков и координатами, полученными в процессе измерения неоткорректированной модели (невязки в фотограмметрической системе координат), позволяют понять природу их возникновения и принять обоснованные решения по устранению.

В основу автоматизированного корректирования фотограмметрической модели положен хорошо известный приближенный метод, основанный на раздельном устранении невязок вначале по оси Y , а затем по осям X и Z . Программа предусматривает два метода выполнения этой операции – автоматический и ручной. Первый вариант является основным. Для его выполнения необходимо обеспечить стереопару как минимум тремя опознаками. Максимальное их число – 20, но три из них должны располагаться по стандартной схеме: все точки находятся на дальнем плане, точка 1 вблизи главного луча правого снимка, точки 2 и 3 – соответственно у левой и правой границы стереопары. Ручное корректирование выполняется по трем стандартно расположенным точкам.

Автоматизированная обработка снимков при наземной стереофотограмметрической съемке включает следующие этапы:

- 1) подготовительные работы;
- 2) корректирование фотограмметрической модели;
- 3) внешнее ориентирование фотограмметрической модели;
- 4) сгущение съемочного обоснования и фотограмметрическая съемка объекта.

Подготовительные работы заключаются в создании каталогов координат опознаков и базисов фотографирования, а также предварительном построении фотограмметрической модели на приборе. На экране монитора указывают имя стереопары и заполняют таблицу с параметрами фотографирования. На отсчетных устройствах обрабатываемого прибора устанавливают значения данных из таблицы и

согласовывают начальные отсчеты интерфейсного устройства с началом системы фотограмметрических координат прибора.

Внешнее ориентирование осуществляется после корректирования модели простым переходом в соответствующий режим. После завершения ориентирования на экране монитора можно получить протокол обработки, в котором отражаются параметры фотографирования и невязки в фотограмметрической и геодезической системах координат. Если значения невязок удовлетворяют требованиям технической инструкции, работа продолжается в режиме либо фотограмметрического сгущения сети, либо фотограмметрической съемки.

В процессе съемки на экран монитора выдаются: положение измерительной марки прибора и ее геодезические координаты, редактируемая линия белого цвета, уже нанесенные контуры и элементы местности розового цвета, изображение цифровой модели (если она существует) голубого цвета. Указанное изображение можно перемещать, выполнять его центровку и масштабировать. Пикеты можно регистрировать в ручном и автоматическом режимах. Можно задавать тип регистрируемых линий, и если необходимо, то и их направление и т.д.

В программе предусмотрены операции склеивания и фильтрации информации. Склеивание – это логическая операция, в результате которой два элемента, имеющие одинаковую часть, заменяются одним элементом. Операция обеспечивает объединение одноименных структурных элементов объекта, расположенных в зоне перекрытия съемки соседних стереопар; съемки, выполненной с различных базисов, а также при пополнении цифровой модели объекта. Операция осуществляется автоматически, если расхождение в положении точек перекрывающихся объектов не превосходит установленных допусков.

Фильтрация – операция автоматического удаления избыточной информации. Параметрами фильтрации являются: минимальное и максимальное расстояния между пикетами и допустимое расстояние между исключаемой точкой и прямой, проходящей через два смежных с ним пикета.

§ 18. ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Существует целый ряд программно-технологических комплексов по обработке цифровых снимков. Они разработаны как зарубежными, так и отечественными фирмами.

Зарубежные продукты DPW (фирмы Leica-Helava), PHODIS («Карл Цейсс»), цифровые системы фирм INTEGRAF и ERDAS широко представлены на отечественном рынке. Однако их применение ограничивается высокой стоимостью и ориентированностью главным образом на рабочие станции различных платформ (UNIX, SUN, ULTRIX). Российские системы PHOTOMOD (фирма «Ракурс»); «Талка» (Институт проблем управления РАН); SDS (НИИГАиК); АПЕРТУГА (НПО ГЕО-СИ) ориентированы на персональные компьютеры, работают в операционной среде Windows, и их цена на порядок ниже. При этом функциональные возможности отечественных программных продуктов практически не уступают зарубежным.

Все перечисленные системы многомодульные и решают широкий круг задач, связанных с обработкой цифровых изображений, обеспечивая:

- 1) выполнение комплекса работ по построению и уравниванию маршрутных и блочных сетей фототриангуляции;
- 2) построение пространственных фотограмметрических моделей;
- 3) съемку контуров и рельефа;
- 4) построение цифровых моделей рельефа;
- 5) создание ортофотопланов, цифровых контурных планов и пространственных моделей объектов.

В качестве исходных данных все системы используют цифровые снимки. В зависимости от аппаратуры, применяемой при фотографировании, либо сразу получают растровые изображения в цифровом виде (при использовании цифровой камеры), либо преобразуют фотоизображение в цифровую форму (в случае фотографирования объекта фотоаппаратом).

Если на компьютере обрабатывается одна цифровая стереопара, то фактически решается обратная пространственная фотограмметрическая засечка, результатом которой являются цифровые трансформированные снимки, ортофотоснимки и стереомодель. Для наблюдения

стереомодели может быть использован анаглифический метод, метод миганий или и тот и другой по желанию. Векторизация может осуществляться как по стереомодели, так и по трансформированным изображениям. При обработке маршрута или блока перекрывающихся снимков строится общая модель, используемая для сгущения сети, построения фотоплана или ортофотоплана и для векторизации.

Аппаратные средства должны обеспечивать работу с большими массивами информации (от сотен мегабайт до десятков гигабайт) и, как правило, включают (рис.25):

- фотограмметрический сканер для оцифровки негативов с достаточной разрешающей способностью, обычно в пределах от 5 до 25 мкм (от 5000 до 1000 dpi), и с высокой геометрической точностью позиционирования, желательна до 10 мкм;
- компьютер Pentium III-700/128 Мбайт/30 Гбайт/SVGA/17"; минимальная конфигурация Celeron-400/32 Мбайт/10 Гбайт/SVGA/15";
- средства стереонаблюдений – шторные типа «3DBIS» и (или) анаглифические стереоочки;
- плоттер для вывода графической информации.

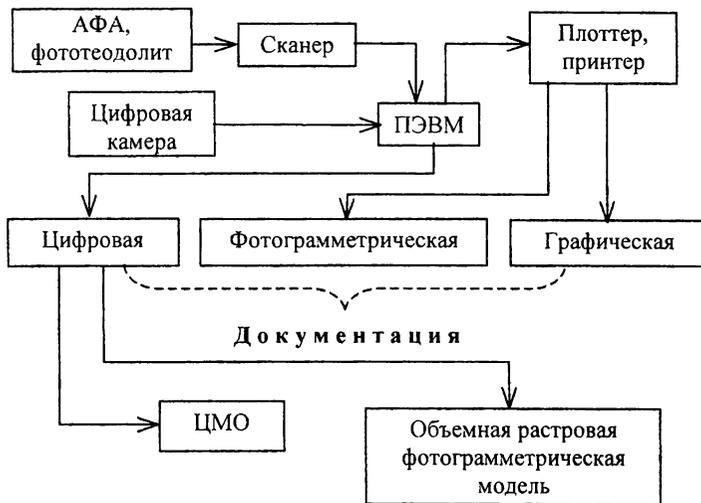


Рис.25. Технологическая схема цифровой обработки изображений
ЦМО – цифровая модель объекта

При работе с программным продуктом «Талка» возможна организация фотограмметрической станции с числом рабочих мест от одного до восьми на один сканер. В этом случае необходимы (рис.26):

- сервер для хранения информации с оперативным доступом для ускоренной обработки;
- комплекс организации архива цифровой информации в случае обработки серии снимков, не помещающихся в совокупности на диски фотограмметрических станций и на сервер;
- сетевое оборудование.

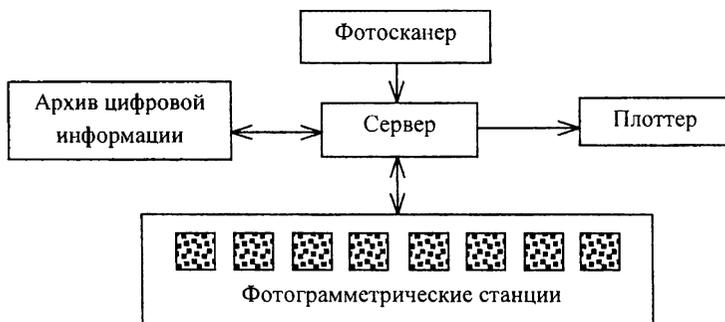


Рис. 26. Схема организации аппаратных средств при использовании программного продукта «Талка»

Цифровые технологии породили ряд новых процессов, с которыми фотограмметрист должен быть знаком. Часть из них следует рассмотреть.

Сканирование. Важным элементом цифровой технологии является сканирование (процесс преобразования визуальной информации в цифровую форму, которой могут оперировать компьютеры). Выполняет эту операцию сканер под управлением программного обеспечения, которое может включать расширение, совместимое с основными графическими редакторами растровых изображений, например Photoshop.

Планшетный сканер (рис.27), на котором в основном работают фотограмметристы, представляет собой прибор, в котором отраженный от оригинала свет проецируется на расположенную на подвижной каретке линейную матрицу ПЗС (прибор с зарядовой связью) размером $n \times 1$ элементов изображения.

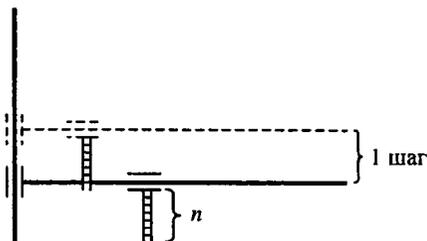


Рис. 27. Схема планшетного сканера

При вращении ходового винта каретка плавно сканирует площадь оригинала, перемещаясь на длину матрицы с помощью шагового двигателя. Линейная матрица ПЗС состоит из конденсаторов МОП (металл – оксид – полупроводник), образующих n элементов изображения (пикселей, picture elements). Экспонирование отраженным или проходящим светом за счет появления зарядов создает в элементах скрытые изображения. При наложении тактового напряжения изображения считываются и переносятся в записывающую часть устройства. Там они преобразуются в видеосигнал. Таким образом, при перемещении линейной матрицы ПЗС с определенной частотой производятся замеры зарядов и их перенос. Разрешающая способность сканера поэтому зависит от размеров конденсаторов и пропорциональна частоте. Далее устройство преобразует заряд в двоичный код. Другими словами, плотности ставится в соответствие число, которое и передается в компьютер.

Если сканер при каждой выборке регистрирует 1 бит информации, то он распознает только черные и белые цвета. При 4-битовом кодировании распознается 16 оттенков, при 8-битовом – 256 и т.д. Существуют сканеры для обработки штриховых рисунков, полутоновых изображений и шкал яркостей (серых шкал). Пример полутонового изображения – газета. Это множество точек разного диаметра с постоянным расстоянием между ними. Разрешающая способность – 65 лин/дюйм. У хорошо иллюстрированных журналов она в 2 раза выше. Вариант со шкалой яркости требует большого объема запоминающего устройства и мощного процессора.

Конструкции сканеров различны. Классифицировать их можно по следующим параметрам:

- способу подачи исходного материала для считывания (ручные, планшетные, протяжные, например роликовые или барабанные);
- по способу передачи изображения сканируемого объекта на матрицу (работающие на просвет и работающие на отражение);
- по способу кодирования или отношению к цветопередаче (штриховые, полутоновые и цветные).

Среди других параметров сканера следует отметить оптическое (геометрическое) разрешение, геометрическую точность, скорость и максимальный формат объекта.

Ручные сканеры самые дешевые. Они работают на отражение, имеют оптическое разрешение от 100 до 800 dpi, бывают полутоновые и цветные, но ширина сканирования у них, как правило, не превышает 100 мм, сканирование осуществляется с достаточно большими искажениями, поэтому они не подходят для решения фотogramметрических задач.

Протяжные сканеры при сканировании протаскивают оригинал. В этом случае ограничивается только ширина сканера. Работают они как на отражение, так и на просвет. Типичные представители этого типа сканеров – рулонные сканеры.

На *барабанных* сканерах оригинал крепится на барабане, который при сканировании вращается. Сканирующая головка перемещается параллельно образующей барабана. Размер исходного материала зависит от размера барабана.

Большинство черно-белых сканеров может работать в черно-белом контрастном и полутоновом режимах. Возможно получение так называемого псевдополутонового изображения, где для имитации оттенков серого используются контрастные графические структуры (маски) с переменной плотностью заполнения. При сканировании чертежей и текста лучше использовать черно-белый контрастный или штриховой режимы. Псевдополутоновое изображение следует использовать при сканировании материала для векторизации или получения растровой подложки в ГИС.

Результаты сканирования загружаются в файлы и могут быть представлены в различных форматах (наиболее популярны *TIFF*, *PCX*, *GIF*, *EPS*, *BMP*).

Размеры места, необходимого для хранения изображения, зависят от размера оригинала, разрешения и количества оттенков серого. Изображение размером 10 × 13 см, отсканированное в штриховом режиме с разрешением 300 dpi в формате *TIFF* занимает около 200 килобайт. Оно же, отсканированное с 256 уровнями серого, требует 1,8 мегабайт.

Цветные сканеры имеют обычно два режима работы – черно-белый и цветной. Цветное сканирование осуществляется за счет того, что отраженный от оригинала свет проходит через три светофильтра: красный, зеленый и синий, – или последовательно освещается тремя указанными цветами. Количество передаваемых цветов зависит от способа кодирования плотностей (обычно 24; 30 или 36 бит).

При сканировании целесообразно руководствоваться рядом правил:

1. Оригинал должен быть выполнен на глянцевой, а не на матовой бумаге, так как сканеры усиливают текстуру, присущую среде. Если сканер может обрабатывать пленку и фотобумагу, то следует предпочесть пленку.

2. Не следует сканировать с разрешением, превышающим оптическое разрешение сканера. Если изготовитель объявляет, что горизонтальное разрешение ниже, чем вертикальное (например, 600 × 1200 dpi), то действительное оптическое разрешение 600 dpi;

3. Следует сканировать с разрешением, кратным оптическому разрешению. Например, если оптическое разрешение 600 dpi, то целесообразно выбирать разрешение 600, 300, 200, 150, 100 dpi т.д. Выбор зависит и от среды дальнейшего использования: низкое разрешение (до 200 dpi) для документов, посылаемых по факсу, 600 dpi для принтера, до 1000 dpi, если документы будут храниться на слайдах или прозрачных носителях, 1000 dpi и более – в фотограмметрии;

4. Коэффициенты увеличения также следует выбирать кратными 100: 100, 200, 300 % и т.д.

5. Качество сканирования определяется технологическими возможностями сканера, квалификацией персонала и средой дальнейшего использования.

Результат следует признать удовлетворительным, если он отвечает всем требованиям конкретного проекта.

Из выпускаемых сканеров для фотограмметрии представляют интерес те, что дают высокое разрешение (не менее 1000 dpi) и обеспечивают точную геометрию. Имеются программные продукты, позволяющие эту геометрию исправлять, например модуль Scan-Correct пакета PHOTOMOD. В этом случае приемлемые результаты получают и при сканировании изображений на полиграфических сканерах, например UMAX. Лучшими фирмами-производителями широкоформатных сканеров считаются «Contex», «INTERGRAPH», «Vidar Systems Corporation», «Microtec», «TDS Cad-Graphics Ltd», «Hewlet Pachard».

Механизм корреляции изображений. Одной из важнейших частей программ по цифровой обработке является корреляционный алгоритм, позволяющий автоматически определять соответственные точки снимков с высокой точностью, многократно увеличивая производительность труда оператора при проведении ориентирования, измерениях и построении цифровой модели рельефа (ЦМР). Алгоритм использует локально нормированные значения интенсивности, что делает его нечувствительным к различным уровням яркости и контрастности левого и правого снимков и позволяет легко различить соответственные точки даже при работе с изображениями плохого качества. Алгоритм также позволяет изменять размеры корреляционного окна для достижения нужного компромисса между надежностью и точностью определения соответственных точек и использовать ряд других параметров настройки коррелятора.

Пакет PHOTMOD SP. Несмотря на общность идеологии, программные продукты по цифровой обработке имеют и много особенностей, поэтому в пособии рассматривается только пакет PHOTMOD SP, который хорошо адаптирован для наземной фотограмметрии. Он многомодульный и включает четыре основных компонента.

1. Основной модуль системы PHOTOMOD предназначен главным образом для построения внешне сориентированной модели по паре снимков.

2. Модуль стереовекторизации (StereoDraw) предназначен для построения и редактирования в моно- или стереорежиме визуализации векторных объектов: точек, полилиний, полигонов и прямоугольников.

3. Программный модуль создания цифровых моделей рельефа (ЦМР или DTM – Digital Terrain Model) не может эксплуатироваться автономно, поскольку использует результаты процедур взаимного и внешнего ориентирования в модулях PHOTOMOD SP. Модуль предназначен для: построения и визуализации ЦМР исследуемого объекта в виде пространственной сети триангуляции TIN (Triangulation Irregular Network); анализа и редактирования модели в режимах моно- и стереоскопического отображения; формирования в автоматическом режиме ортотрансформированных изображений; расчета и визуализации горизонталей; экспорта ЦМР (TIN) в распространенные векторные форматы и т.д.

4. Модуль VectOr – это фактически геоинформационная система, предназначенная для создания и редактирования электронных карт, решения типовых прикладных задач и разработки специализированных ГИС-приложений в среде Windows-95, -98, Windows NT и Windows CE. Система позволяет создавать векторные, растровые и матричные карты, а также оперативно обновлять различную информацию о местности.

При реализации нового проекта работу начинают с основного модуля. Предварительно снимки сканируют с учетом изложенных выше рекомендаций. Следует помнить, что нецелесообразно чрезмерно завышать уровень разрешения, так как это приведет к резкому увеличению объема обрабатываемой информации и к трудностям в работе. Для компенсации искажений, возникающих при использовании полиграфического сканера, используют специальную технологию, которая включает: сканирование калибровочной сетки, расчет поля искажения сканера и коррекцию цифрового снимка с помощью программы Scan-Correct. Сохранять цифровые снимки следует в формате *BMP*.

Далее создается база данных, в которой хранятся исходные цифровые снимки и все другие изображения и данные, появление которых связано с построением и внешним ориентированием модели. В процессе работы может быть создано несколько баз данных, но работать можно только с текущей.

Окно базы данных является одним из основных элементов интерфейса программы. Оно служит для отображения информации о текущей базе данных и для выполнения операций над ее объектами.

Основными операциями являются: ввод исходной стереопары; внутреннее ориентирование снимков: геопривязка левого снимка; обеспечение стереопары набором соответственных точек; взаимное ориентирование снимков (построение модели); перенесение опознаков на правый снимок; внешнее ориентирование модели; выход из модуля ориентирования с сохранением полученных результатов.

Рассмотрим кратко каждую из операций в отдельности.

Чтобы ввести снимки, нужно воспользоваться виртуальными клавишами «Левый/правый» в окне базы данных и указать в диалоговом окне путь и имя файла *BMP*, содержащего соответствующее изображение. При выполнении операции цветные снимки можно преобразовать в черно-белые и изменить масштаб изображения.

В процессе внутреннего ориентирования снимков (виртуальная клавиша «Внутреннее ориентирование») с помощью марки указывают координатные метки на левом и правом снимках, положение главной точки (смещение объектива). Кроме того, вводят фокусное расстояние снимков, расстояние между координатными метками и дисторсию, если они известны. В качестве единиц выбирают миллиметры или пиксели. Пересчет из одной системы в другую легко выполнить, если известно разрешение сканирования, которое вводится при первом запуске базы.

Геодезическая привязка включает выбор системы координат, нанесение на левый снимок опознаков и опорных отрезков, если такие есть (до 99 единиц каждого из объектов), введение координат точек базиса. Возможен и процесс редактирования.

В программе предусмотрено, что для взаимного ориентирования снимков необходимо иметь как минимум восемь соответственных точек. Первые три вводят вручную, но их положение может быть уточнено с помощью механизма корреляции. Затем может быть задействован механизм автоматического добавления соответственных точек. В процессе выбора точек на экран выдается сообщение о значении коэффициента корреляции. Хорошо, когда он более 0,9, но даже и в этом случае корреляционный механизм дает сбой и оператору необходимо осуществлять визуальный контроль. В процессе введения точек можно заниматься редактированием.

Взаимное ориентирование выполняется, если соответственных точек не менее восьми, нажатием на соответствующую виртуальную

клавишу. В результате на экране появляется сообщение, в котором указаны элементы взаимного ориентирования в базисной системе координат (если решение найдено), максимальное значение остаточного поперечного параллакса в пикселах и его среднее значение. Можно вызвать таблицу соответственных точек с параллаксами на каждой из них, что позволяет удалить «плохие» точки и повторить взаимное ориентирование. Считается приемлемым, если остаточные поперечные параллаксы не превосходят одного пиксела.

Перенос опознаков с правого снимка на левый осуществляется корреляционным механизмом, но если коэффициент корреляции мал, то лучше это сделать вручную.

После операции переноса опознаков выполняется внешнее ориентирование модели. При этом в процесс уравнивания можно включать или не включать точки базиса, корректировать список используемых опознаков, редактировать их координаты и т.д. Основные результаты внешнего ориентирования высвечиваются в окне. Если результаты удовлетворительны, из модуля можно выходить с сохранением результата. Программа выполнит трансформирование изображений и сформирует стереоизображение, которое можно рассматривать уже в другом модуле (StereoDraw).

Стереокартину в указанном выше модуле можно рассматривать, используя анаглифические или затворные очки (по выбору). Пространственная измерительная марка управляется как с клавиатуры, так и мышью. Можно использовать и коррелятор. На экране будут отображены пространственные координаты марки. Модуль является главным при съемке подробностей. Основными элементами, которые можно использовать при нанесении ситуации и рельефа, будут векторные объекты: точка, полилиния, полигон и прямоугольник. Каждый из векторных объектов имеет набор характеризующих его параметров. Часть из них задается с помощью таблицы кодов, которую можно редактировать и пополнять в соответствии с характером измеряемого объекта. Объекты могут быть сгруппированы по слоям. Созданные векторные объекты можно сохранять, использовать для построения цифровой модели рельефа (модуль DTM) или экспортировать в другие векторные форматы для использования в иных приложениях.

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОТЕОДОЛИТНОЙ СЪЕМКИ ПРИ РЕШЕНИИ ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧ

§ 19. СОЗДАНИЕ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ПЛАНОВ

Наземную фототеодолитную съемку применяют, как правило, в высокогорной и горной, преимущественно открытой местности, со сложными формами рельефа и, в особых случаях, в равнинных районах для инженерных изысканий. На небольших участках она может быть применена как самостоятельный метод съемки, а при картографировании значительных площадей – в сочетании с другими методами.

Точность и содержание топографических планов, создаваемых методом наземной стереофотограмметрической съемки, должны соответствовать общим требованиям, предъявляемым к топографическим съемкам этих планов.

Перед началом работ составляется проект НСС. Составление проекта заключается в размещении на карте (плане) основных фотостанций, разработке способов их геодезической привязки, определении кратности перекрытий снимаемой территории с различных фотостанций, определении необходимой густоты контрольных точек. Проект должен учитывать способы фотограмметрического сгущения опорной сети и составления оригинала плана, предусматривать методы съемки «мертвых пространств».

Графическая часть проекта составляется по плану (карте), масштаб которого должен быть мельче масштаба съемки не более чем в 5 раз. При отсутствии топографической основы в нужном масштабе рекомендуется изготовить схематическую карту путем соответствующего увеличения наиболее детальной карты из имеющихся.

Составление графической части проекта начинают с размещения базисов фотографирования (фотостанций). При этом учитывают, что расстояние от базиса до дальней границы снимаемой площади не должно превышать некоторой предельной величины Y_{max} , зависящей от точности создаваемого топографического плана,

технических возможностей фототеодолита и приборов для камеральной обработки снимков (см. табл.3). При использовании Y_{\max} некоторые мелкие объекты могут не изобразиться на фотоснимках. В этом случае при полевых работах производят их инструментальную привязку или съемку с достаточно близко расположенных базисов фотографиярования.

Основная цель составления проекта – обеспечение участка съемкой с минимумом «мертвых пространств» и базисов фотографиярования. Для этого следует: 1) выбирать базисы на возвышенных местах с хорошим обзором окружающей местности; 2) располагать базисы так, чтобы их наклон не превышал 10° , а между концами базисов обеспечивалась видимость; 3) размещать базисы параллельно общему направлению горизонталей рельефа фотографируемых участков местности, что позволит получить на фотоснимках изображения лощин, оврагов, промоин и других форм рельефа; 4) избегать съемки с малых отстояний, учитывая что при этом резко сокращается полезная площадь стереопары; 5) проектировать, по возможности, на каждом базисе фотосъемку с нормальными и равноотклоненными вправо и влево осями; углы отклонения φ должны быть стандартными ($31,5^\circ$); 6) располагать базисы так, чтобы в зависимости от сложности рельефа обеспечивалось необходимое (20-50 %) перекрытие смежных стереопар соседних базисов; 7) располагать базисы фотографиярования группами с целью сокращения объема и сроков выполнения полевых геодезических работ.

Измерение длины базисов должно проводиться с относительной погрешностью не более $1/2000$. Минимально допустимая длина базиса рассчитывается по формуле (51). За окончательное значение базиса фотографиярования на станции принимается наибольшее из рассчитанных для всех проектируемых на станции стереопар. Рассчитав значение длины базисов фотографиярования для всех проектируемых на фотостанции стереопар, по формуле (52) вычисляют расстояние Y_{\min} до ближней границы съемки. Величина $\Delta Y = Y_{\max} - Y_{\min}$ позволяет судить о глубине участка местности, который можно обработать по данной стереопаре. При выполнении съемки каждая стереопара должна обеспечиваться контрольными точками, которые используют при камеральной обработке для

исключения влияния погрешностей элементов внешнего ориентирования снимков.

Если съемка выполняется без перекрытия или с одиночного базиса, то каждая стереопара обеспечивается четырьмя точками: первая – в ближнем, вторая – в дальнем плане вблизи от главной оси снимка, третья и четвертая – в дальнем плане по разные стороны от оси Y на максимальном удалении друг от друга (см. рис.24).

Если съемка выполняется с двухкратным и более перекрытием, то основная стереопара обеспечивается одной-двумя точками, расположенными на дальней границе, остальные стереопары контрольными точками не обеспечиваются; опорные точки для ориентирования таких стереопар определяют фотограмметрическим сгущением.

В качестве контрольных точек используют пункты опорных геодезических сетей, точки съемочного обоснования, а также четкие контуры местности, хорошо опознаваемые на фотоснимках. Контрольные точки для левого и правого концов базиса фотографирования, как правило, выбирают общими.

До производства фотографирования пункты съемочной сети, а также контрольные точки должны быть замаркированы, если они не совмещены с характерными контурами или с местными предметами, опознающимися на снимках с ошибкой не более 0,1 мм. С целью уменьшения объема работ по полевой досъемке выполняют также маркировку важных контуров, которые могут не изобразиться на снимках, но должны быть нанесены на план (например, выходы инженерных сетей и сооружений).

Размер маркировочного знака зависит от отстояния Y до фотостанции и равен 0,1 мм по высоте и 0,05 мм по ширине в масштабе его изображения.

Обязательным условием выбора материалов и красящих веществ для маркировки является обеспечение максимального контраста между маркировочным знаком и фоном. Если фон ландшафта светлый или если знак проектируется на небо или на снег, то применяют материалы темного цвета, при этом ширина знаков увеличивается на 30 %.

Привязка фототеодолитных станций и контрольных точек в зависимости от условий местности выполняется прямыми, обратными

и комбинированными засечками, дальномерно-теодолитными ходами или построением триангуляционной съемочной сети.

Работа на фотостанции состоит в производстве фототеодолитной съемки, измерениях длины, направления и угла наклона базиса.

Фотографирование с концов базиса должно выполняться с небольшим разрывом во времени, чтобы различия в освещенности были небольшими. Оно производится в солнечную погоду или при наличии легкой высокой облачности в такое время, когда солнце находится сзади и несколько сбоку от фототеодолита.

После фотолабораторной обработки проверяют фотографическое и фотограмметрическое качество всех негативов. Проверку фотографического качества производят по общей плотности, по проработке деталей в «тенях» (светлые места негатива) и в «светах» (плотные, темные места негатива), по контрастности негатива и по плотности вуали. Негатив считается непригодным для фотограмметрических измерений, если на нем обнаружены сползания эмульсии, царапины, пятна с непроработанными деталями на рабочей части, отсутствие изображения координатной метки или расхождение расстояний между координатными метками превосходит 0,2 мм. При наличии брака одного из негативов стереопара не принимается.

На негативах и отпечатках снимков опознаются все контрольные точки и пункты съемочной сети. Опознавание производят под стереоскопом, пользуясь полевыми описаниями и зарисовками.

Полевое дешифрование производится при обходе по намеченным маршрутам или при обзоре местности с фотостанций. При полевом топографическом дешифровании на отпечатках снимков опознают все элементы и предметы местности, которые не могут быть узнаны при камеральной обработке снимков, а также собирают качественные и количественные характеристики на дешифрируемые объекты.

Камеральная обработка фототеодолитных снимков производится графомеханическим методом на стереоавтографе или технокарте. Технология обработки фототеодолитных снимков при создании топографического плана изложена в § 15.

§ 20. СОСТАВЛЕНИЕ МАРКШЕЙДЕРСКИХ ПЛАНОВ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Наземная стереофотограмметрическая съемка при маркшейдерском обеспечении открытых горных разработок (карьеров) имеет перед тахеометрической съемкой определенные достоинства:

- высокая точность измерений;
- объективность и достоверность получаемых результатов;
- бесконтактный характер измерений, так как измеряют не объекты в натуре, а их фотографические изображения; этим обуславливается возможность измерений недоступных для человека с точки зрения техники безопасности участков горных разработок (откосов уступов карьеров, оползневых участков, зон действия горных машин и механизмов и др.);
- высокая производительность труда благодаря возможности максимальной механизации и автоматизации процессов производства отдельных этапов съемочных работ;
- возможность зафиксировать в короткий срок состояние всего сфотографированного объекта (например, карьера, оползня и др.) или отдельных его участков.

Наземная стереофотограмметрическая съемка применяется: для составления и пополнения маркшейдерских планов вскрышных и добычных участков карьеров; съемок отвалов и складов готовой продукции; маркшейдерского обеспечения буровзрывных работ; геологического документирования откосов карьерных уступов; съемок транспортных путей, энергосетей, оборудования и др.

Общая организация НСС объектов открытых горных разработок аналогична организации работ при составлении топографических планов. Но имеются и некоторые отличия, вызванные особенностями объекта съемки – карьера, целями и задачами построения маркшейдерских планов, а также их содержанием.

Пополнительные съемки карьеров, являющиеся наиболее распространенным видом маркшейдерских съемочных работ, представляют собой постоянно повторяемый процесс. Повторные съемки производят по мере продвижения фронта горных работ на определенный отчетный период (месяц, квартал, год). Масштаб съемки горных выработок зависит от размеров и производительности карьеров

и устанавливается равным 1:2000 или 1:1000. Постоянство масштаба съемки и принятой системы разработки приводит к тому, что работа по составлению проекта фототеодолитной съемки карьера носит, как правило, разовый характер. Следовательно, имеется возможность выбора местоположения базисов фотографирования и контрольных точек с расчетом на их многократное использование при дополнительных съемках в течение длительного времени, что существенно упрощает организацию работ по съемке и значительно сокращает объемы геодезических измерений длин базисов при привязке базисных и контрольных точек.

Основные технологические процессы производства НСС карьеров остаются такими же, как и при создании топографических планов и включают подготовительные, полевые и камеральные работы.

Подготовительные работы начинаются с составления проекта фототеодолитной съемки. Он должен удовлетворять следующим требованиям: обеспечение необходимой точности определения пространственных координат отдельных точек карьера, полнота охвата съемкой всей намечаемой территории, обеспечение длительной сохранности базисов и контрольных точек, возможность максимального упрощения камеральных работ.

Выполнение этих требований во многом определяется выбором мест размещения съемочных базисов, направлений осей съемки (вида съемки), мест расположения контрольных точек с учетом имеющегося в наличии съемочного и фотограмметрического оборудования.

Для камеральной обработки стереоскопических пар используют стереокомпараторы, универсальные приборы и автоматизированные системы. Для фотографирования применяют фототеодолит Photheo 19/1318 или фотокамеры УМК 20/1318 и УМК 30/1318.

При выборе базисов фотографирования руководствуются следующими правилами:

1. Базисы следует располагать так, чтобы их число было минимальным при возможно полном охвате съемкой всего карьера. На каждом базисе следует использовать нормальный и равноотклоненный виды съемок. Съемка ведется по схеме «с борта на борт».

2. Должно быть обеспечено длительное сохранение базисных и контрольных точек с целью обеспечения дополнительных съемок.

3. Направление базиса должно быть, по возможности, параллельным основному направлению фронта работ на карьере.

4. Базисы располагают выше фотографируемых участков, что обеспечивает съемку с минимальной площадью «мертвых пространств».

5. При транспортной системе разработок с внешним отвалообразованием базисы выбирают на неподвижном борту карьера, с внутренним – на отвалах.

В карьерах со сложной криволинейной формой рабочих уступов для достижения полного охвата съемкой всего карьера возможно проектирование базисов при направлении осей съемки вдоль фронта работ.

Проект размещения базисов фотографирования составляют на плане масштаба 1:2000, на котором намечают границы съемки с каждой стереоскопической пары наземных снимков (рис.28). Базисы

размещают таким образом, чтобы обеспечивалось перекрытие площадей съемок со смежных базисов не менее чем на 20 %. На плане показывают максимальное Y_{max} и минимальное Y_{min} отстояния до дальней и ближней границ съемки. Расчет величин B , Y_{min} производится по формулам § 11.

С целью исключения возможных ошибок при камеральной обработке наземных снимков каждая стереопара обеспечивается контрольными (корректируемыми) точками.

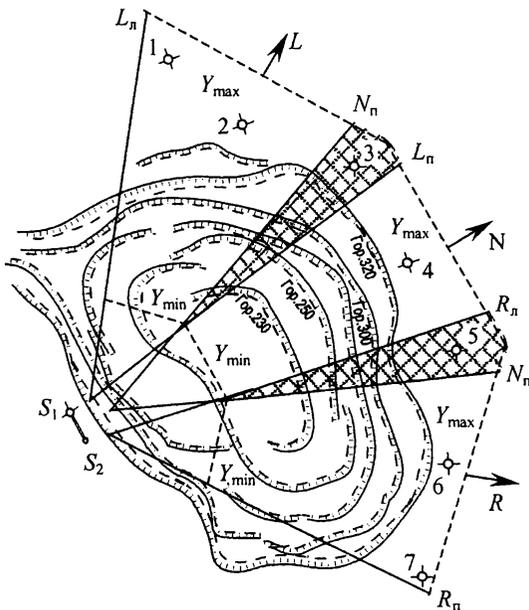


Рис.28. Схема размещения базиса и секторов фотографирования при съемке карьера

Для нанесения боковых границ участка съемки палетку накладывают на план (карту) так, чтобы точка S_1 палетки совместилась с левой точкой намеченного базиса фотографирования, а направление S_1S_2 прошло через правую точку базиса. На план (карту) переносят правые границы секторов съемки L_n , N_n , R_n и направления оптических осей. Затем палетку перемещают вдоль базиса до совпадения точки S_1 с правой базисной точкой и на план (карту) переносят левые границы секторов L_n , N_n , R_n . Затем откладывают по направлениям оптических осей вычисленные отстояния Y_{\min} и Y_{\max} и определяют участки съемки, полученные на каждой стереопаре снимков. На рис.28 эти участки показаны сплошными линиями, а штриховкой отмечены области перекрытия смежных стереопар.

После нанесения границ съемочных участков проверяют охват участков съемки по высоте, который зависит от предельных углов наклона проектирующих лучей фотокамеры, глубины карьера, высоты расположения базиса и наличия объектов, способствующих образованию «мертвых пространств». Для решения этой задачи также используют прозрачную палетку (рис.30), на которой относительно изображения главного луча SU построены крайний верхний SC и крайний нижний SD лучи, ограничивающие вертикальный угол поля зрения. По оси SU в масштабе основы строится шкала отстояний, а по вертикали – шкала превышений h в метрах. На рис.30 представлена палетка, построенная для фототеодолита Phototheo 19/1318 с учетом возможного перемещения объектива по вертикали вверх и вниз от среднего положения на углы соответственно от $+17$ до $+25^\circ$ и от -17 до -29° . Для нанесения границ «мертвых пространств» на плане в пределах сектора съемки выбирают точки с максимальными и минимальными отметками, определяют их отстояния, а также превышения относительно левой точки базиса фотографирования и наносят на палетку. В результате устанавливают, какие участки карьера находятся за пределами вертикального угла поля зрения. Для досъемки этих мест проектируют самостоятельно базисы или производство тахеометрической съемки.

После установления границ участка съемки с данного базиса приступают к выбору контрольных точек. Каждая стереопара обеспечивается тремя-четырьмя точками, расположенными по схеме,

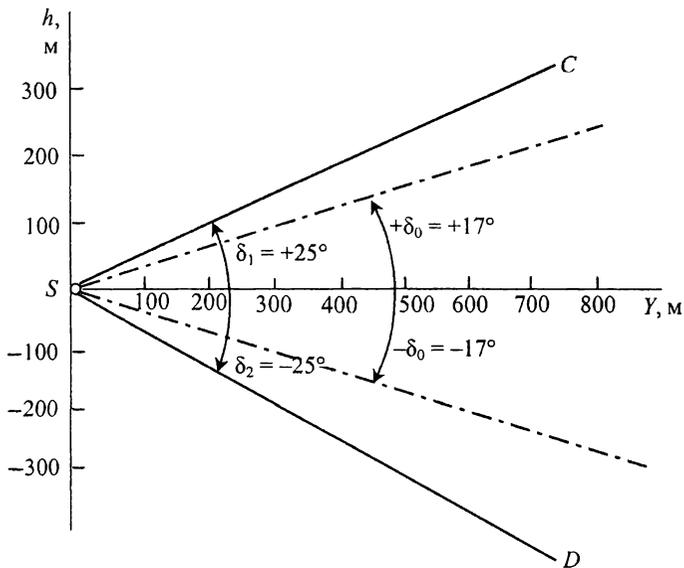


Рис.30. Палетка для определения сектора съемки по вертикали

показанной на рис.24. В качестве контрольных точек выбирают отчетливо видимые и четко опознающиеся на снимках постоянные местные предметы, а также точки маркшейдерской опорной сети.

Проектируя следующий базис, при нанесении на проектную схему границ секторов съемки необходимо предусматривать перекрытие со смежными базисами, а также использование при возможности уже выбранных контрольных точек.

Полевые работы при фототеодолитной съемке состоят из рекогносцировки участка съемки с целью уточнения составленного технического проекта; сгущения геодезической опорной сети и привязки к ней базисов и корректурных точек; маркировки корректурных точек; фотосъемки участка; фотолабораторных работ; контроля качества негативов; топографического дешифрования снимков; досъемки «мертвых пространств»; вычисления рабочих координат опорных, базисных и контрольных точек, длины дирекционных углов базисов.

Содержание всех видов полевых работ достаточно полно освещено в соответствующих курсах геодезии, в специальной литературе по НСС и инструкции по топографическим съемкам в крупных масштабах.

Камеральная обработка наземных снимков производится с целью составления плана карьера, а также для определения пространственных координат отдельных точек сфотографированных объектов. Обработка снимков ведется чаще всего графомеханическим методом или на автоматизированной системе по технологии, изложенной в § 15, 17, с той лишь разницей, что вместо рисовки горизонталей на план наносят границы и высотные пикеты по бровкам уступов (на рис.28 показаны высотные отметки горизонтов).

Основной целью съемки карьеров является подсчет объемов как вскрышных, так и добычных работ, выполненных за определенный период времени. Подсчет объемов вынутых масс производится по последовательно составленным планам методами вертикальных или горизонтальных сечений.

§ 21. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Деформация инженерных сооружений происходит под действием внешней силы (нагрузки). Она приводит к изменению формы объекта или перемещению частиц его материала. Если нагрузка не превышает допустимого предела, определенного для данного материала, то после прекращения ее действия сооружение благодаря взаимодействию частиц материала возвращается к первоначальной форме. При перегрузке частицы материала могут утратить взаимную связь и сооружение деформируется или разрушается. Исследование этих процессов имеет важное значение при проектировании и строительстве различных инженерных сооружений.

Для изучения деформации объекта применяют геодезические и фотограмметрические методы. По данным геодезических измерений можно определить довольно малые, разнесенные по времени перемещения точек объекта, что не позволяет оценить его состояние в целом в данный момент. Фотограмметрические методы по точности

уступают геодезическим, но они позволяют фиксировать положение точек изучаемого объекта в один физический момент, что дает возможность оценить взаимную деформацию точек объекта в целом и отдельных его частей.

При большом количестве определяемых точек фотограмметрические методы более экономичны и производительны, чем геодезические, поэтому они находят широкое практическое применение для определения деформаций инженерных сооружений, строительных конструкций, узлов и моделей при испытании статическими нагрузками и динамическими воздействиями. Фото снимки получают, как правило, с помощью фототеодолитной съемки. Она имеет особенно важное значение при выполнении исследований деформации объектов в условиях действующего предприятия без специальной организации работ по обеспечению мер безопасности.

Принцип определения деформаций заключается в многократном получении координат точек исследуемого объекта по измерениям наземных снимков и сравнении их с исходными или проектными данными.

В наземной фотограмметрии изучение деформации объекта может производиться по измерениям одиночных снимков или по результатам измерений снимков стереопары. Первый метод определения деформаций называют *фотограмметрическим* (метод нулевого базиса), а второй – *стереофотограмметрическим*.

Фотограмметрический метод используют в тех случаях, когда необходимо определить изменение положения точек объекта (плоские объекты) в плоскости, параллельной плоскости снимка. Фотографирование объекта производится Photho 19/1318 или UMK с одной фотостанции многократно с сохранением элементов внутреннего и внешнего ориентирования фотокамеры. Первую съемку, выполняемую после завершения строительства (монтажа) объекта или до его нагрузки, называют *съемкой (снимком) нулевого цикла*. Последующие съемки (снимки) называют *съемками (снимками) деформационных циклов*.

Снимки каждого цикла измеряют на стереокомпараторе. Разности координат одноименных точек снимков разноименных

циклов характеризуют общую деформацию объекта в этих точках (или деформацию в точках за период времени между съемками):

$$\Delta X = X_2 - X_1 = \frac{Y}{f}(x' - x) = \frac{Y}{f} \Delta x; \quad (66)$$

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1 = \frac{Y}{f}(z' - z) = \frac{Y}{f} \Delta z,$$

где Y – отстояние от центра проекции до плоскости объекта; x, z и x', z' – координаты одноименных точек снимков в двух рассматриваемых циклах.

Параллельность между плоскостью изображения и плоскостью объекта при съемке должна выдерживаться с точностью $\pm 2,5^\circ$.

В стереофотограмметрическом методе фотографирование объекта выполняют с концов базиса. Отстояние Y и длину базиса фотографирования рассчитывают. Применяется нормальный вид съемки. Снимки стереопары, полученные в каждом цикле, измеряют на стереокомпараторе. Смещения точек объекта определяют по трем координатным осям как разности координат X, Y, Z одноименных точек, вычисленных по измерениям плоских координат снимков стереопар деформационного и нулевого циклов:

$$\Delta X = X_2 - X_1 \approx \frac{B}{p^2}(p\Delta x - x_1\Delta p);$$

$$\Delta Y = Y_2 - Y_1 \approx -\frac{Bf}{p^2}\Delta p; \quad (67)$$

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1 \approx \frac{B}{p^2}(p\Delta z_1 - z_1\Delta p),$$

где p – продольный параллакс точки до деформации; Δx и Δz – разности координат точки до и после деформации; Δp – разность продольных параллаксов соответственных точек пар снимков деформационного и нулевого циклов.

Деформации точек объекта определяют из выражений

$$\begin{aligned}\Delta X &= X_2 - X_1 = \frac{B}{p^2} (\Delta x_2 x_1 - \Delta x_1 x_2); \\ \Delta Y &= Y_2 - Y_1 = -\frac{B}{p^2} (\Delta x_1 - \Delta x_2); \\ \Delta Z &= Z_2 - Z_1 = \frac{B}{p^2} [p \Delta z_1 - z_1 (\Delta x_1 - \Delta x_2)].\end{aligned}\tag{68}$$

Уравнения (68) получены путем преобразования зависимостей (67). К ним можно прийти также дифференцированием исходных уравнений (40), записанных для пар снимков нулевого и деформационного циклов, по переменным x_1, z_1, x_2, z_2 .

Ожидаемую точность определения деформации фотограмметрическим методом согласно (66) рассчитывают по формулам

$$\begin{aligned}m_{\Delta X} &= \Delta X \sqrt{\left(\frac{m_Y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{m_{\Delta x}}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{m_f}{f}\right)^2}; \\ m_{\Delta Z} &= \Delta Z \sqrt{\left(\frac{m_Y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{m_{\Delta z}}{\Delta z}\right)^2 + \left(\frac{m_f}{f}\right)^2}.\end{aligned}$$

Учитывая, что влияние первого и третьего членов подкоренного выражений этих формул, по сравнению со вторым, мало, расчет можно производить по упрощенным формулам

$$\begin{aligned}m_{\Delta X} &= \frac{\Delta X}{\Delta x} m_{\Delta x} = \frac{Y}{f} m_{\Delta x}; \\ m_{\Delta Z} &= \frac{\Delta Z}{\Delta z} m_{\Delta z} = \frac{Y}{f} m_{\Delta z}.\end{aligned}\tag{69}$$

Из уравнений (69) следует, что для повышения точности определения деформации съемку необходимо производить с коротких отстояний длиннофокусными камерами.

В стереофотограмметрическом методе средние квадратические ошибки деформаций точек объекта по координатным осям рассчитывают двумя способами:

- способом координат (формулы (67))

$$m_{\Delta X} = \sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{Y}{f}\right)^2 m_x^2 + \left(\frac{Y^2 x_1}{Bf^2}\right)^2 m_p^2};$$

$$m_{\Delta Y} = \frac{Y^2}{Bf} m_p \sqrt{2} = \frac{Bf}{p^2} m_{\Delta p}; \quad (70)$$

$$m_{\Delta Z} = \sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{Y}{f}\right)^2 m_z^2 + \left(\frac{Y^2 z_1}{Bf^2}\right)^2 m_p^2},$$

- способом смещений (формулы (68))

$$m_{\Delta X} \approx \frac{B}{p^2} m_{\Delta x} \sqrt{x_1^2 + x_2^2} = \frac{Y^2}{Bf^2} m_p \sqrt{x_1^2 + x_2^2};$$

$$m_{\Delta Y} \approx \frac{Bf}{p^2} m_{\Delta x} \sqrt{2} = \frac{Y^2}{Bf} m_p \sqrt{2}; \quad (71)$$

$$m_{\Delta Z} \approx \frac{B}{p^2} \sqrt{p^2 m_{\Delta z_1}^2 + 2z_1^2 m_{\Delta x}^2} \approx \frac{Y^2}{Bf^2} m_p \sqrt{p^2 + 2z^2}.$$

При выводе формул (71) принято $m_{\Delta x} = m_{\Delta z} = m_p$, поскольку смещения Δx , Δz измеряют стереоскопически. Кроме того, в целях упрощения формул (70) и (71) в них, как сравнительно малые, опущены члены, содержащие погрешности базиса, фокусного расстояния и координат.

Анализ формул (70) и (71) показывает, что точность определения деформации по смещениям в направлениях осей X , Z в 2 раза выше, чем по координатам. По направлению оси Y она остается без изменений.

§ 22. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОГРАММЕТРИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И АРХИТЕКТУРЕ

Возникновение фотограмметрии связано с применением фотографии в 50-х годах XX в. для съемки и составления чертежей сооружений.

Методами фотограмметрии можно выполнить: архитектурно-строительные обмеры существующих сооружений; архитектурные обмеры исторических сооружений по архивным снимкам; фиксацию зондажа исторических памятников; съемку интерьера, скульптур; инвентаризационную съемку; археологические поиски архитектурных памятников; исследование моделей сооружений; автоматизацию изготовления макетов проектов; нанесение запроектированного сооружения на фотографии застройки; создание макетов, моделей скульптур и т.д.

Большую практическую ценность имеет применение фотограмметрии в архитектурно-строительных обмерах для реконструкции зданий. Обычно натурные методы выполнения обмеров требуют больших затрат времени и средств, особенно в тех случаях, когда для обмерных работ сложных сооружений необходимо возводить строительные леса.

Для архитектурных обмеров используют фотограмметрический и стереофотограмметрический методы. Одиночные снимки обрабатывают на фототрансформаторах или аналитическим способом с измерением снимков на стереокомпараторе. Стереопары снимков обрабатывают графомеханическим или аналитическим методами. В результате обработки снимков получают фотопланы, графические планы, цифровую модель всего здания или его фрагментов.

Часто единственным источником информации об исчезнувшем или разрушенном историческом памятнике служат архивные снимки с неизвестными элементами ориентирования. Их использование для архитектурных обмеров имеет важное практическое значение.

Производительность труда при обмерных работах с применением фотограмметрии, по данным В.М.Сердюкова [9], возрастает в 10-15 раз, причем чем сложнее сооружение, тем больше выигрыш.

Метод фототрансформирования используют при съемке плоских зданий или зданий, состоящих из плоских элементов. Из трансформированных снимков составляют фронтальные фотопланы. Фотопланы фасадов можно получить простым увеличением снимков, если углы между плоскостями снимка и сооружения не превосходят значений, определяемых по формуле

$$\alpha = f\delta z\rho/(xz\bar{k}), \quad (72)$$

где δz – допустимая погрешность в положении точки на плане; x, z – расстояния между крайними точками сооружения на снимке; \bar{k} – коэффициент увеличения снимка.

Трансформирование наземных снимков сооружений имеет ряд особенностей по сравнению с аэроснимками:

- 1) повышаются требования к точности трансформирования;
- 2) уменьшается число опорных точек (трансформирование наземных снимков можно выполнить по двум и трем точкам, тогда как для аэроснимков необходимо иметь не менее четырех точек);
- 3) возможен переход от зоны к зоне по общей смежной грани сооружения, что в ряде случаев упрощает и уточняет их преобразование.

Трансформирование по двум опорным точкам (по одному контрольному отрезку) применяют в том случае, когда углы непараллельности снимка и плоскости сооружения не превышают значений, подсчитанных по формуле (72). Трансформирование по двум точкам заключается в масштабировании изображения по этим точкам, устранении нарушения формы (прямоугольника, квадрата) сооружения наклоном экрана и, если снимок в кассете недостаточно точно установлен, децентрациями снимка. Трансформирование считается законченным при получении на экране геометрических форм сооружения: равенство боковых граней, диагоналей сооружения и т.д.

Трансформирование снимков, полученных с наклонной оптической осью, выполняют по четырем опорным точкам по методике трансформирования аэроснимков.

Монтаж трансформированных снимков сооружений аналогичен монтажу аэроснимков.

Если фасад сооружения не плоский и некоторые детали отступают от общей плоскости сооружения, то трансформирование выполняют по зонам, как и при обработке аэроснимков.

Если фронтальные планы будут составляться на универсальных стереофотограмметрических приборах, съемку целесообразно выполнять с оптимальными параметрами.

При съемке сооружений к основным параметрам относятся: отстояния, базис съемки и фокусное расстояние фототеодолита. Отстояние Y_{\max} определяется заданной точностью определения координат, габаритами сооружения, возможностью расположения базиса фотографирования.

С увеличением базиса при неизменном отстоянии возрастает точность определения координат точек, но уменьшается перекрывающаяся часть изображения сооружения в пределах стереопары, следовательно, затрудняется продвижение работ. Таким образом, при стереофотограмметрической съемке сооружений необходимо отыскать оптимальные значения продольного параллакса (или базиса) и отстояния, обеспечивающие заданную точность определения координат.

Согласно второй формуле (40)

$$m_y = \frac{Y^2}{Bf} m_p = \frac{\bar{X}Y}{\bar{x}B} m_p = \frac{\bar{X}f}{\bar{x}p} m_p = \frac{\bar{X}f}{(\ell - p)p} m_p, \quad (73)$$

где \bar{X} – протяженность изображения сооружения, попадающего в зону перекрытия снимков; \bar{x} – соответствующая протяженность изображения сооружения на снимке; ℓ – размер кадра фотокамеры по оси x ; p – продольный параллакс.

При заданной протяженности сооружения \bar{X} оптимальное значение продольного параллакса $p_{\text{опт}}$, при котором будет получена наибольшая точность определения отстояний, находят отысканием минимума ошибки m_y . Дифференцируя уравнение (73) и приравнивания первую производную нулю, получим

$$p_{\text{опт}} = 0,5 \ell = x_{\max}. \quad (74)$$

Таким образом, оптимальное значение p при съемке сооружения равно половине размера кадра фотокамеры по оси x , т.е. максимальному значению абсциссы на снимке. При выбранном $p_{\text{опт}}$ согласно (73) предельное отстояние, обеспечивающее получение заданной точности m_Y при максимальном продвижении работ,

$$Y_{\text{max}} = m_Y \frac{p_{\text{опт}}}{m_p}. \quad (75)$$

Максимальные отстояния должны соответствовать конструктивным возможностям приборов, на которых будут создавать фронтальные планы (см. табл.3).

На основании уравнений (40), (74) и (75) базис съемки

$$B_{\text{опт}} = \frac{Y_{\text{max}} x_{\text{max}}}{f} = \bar{X}. \quad (76)$$

Таким образом оптимальная длина базиса будет равна заданной протяженности сооружения по оси X .

При большой протяженности объекта выполнение оптимальных условий съемки возможно при последовательной съемке сооружения с 60-процентным перекрытием, когда правый снимок первой стереопары будет левым снимком второй стереопары и т.д.

Для фототеодолита Photoe 19/1318, имеющего $f = 195$ мм, $x_{\text{max}} = 80$ мм, в соответствии с (76) $B_{\text{опт}} = 0,4Y_{\text{max}}$. Отношение $Y/B = K$ называют коэффициентом съемки. По снимкам зданий стереозффект будет наблюдаться при $K = 2,5$, поскольку при съемке зданий на снимках обычно не возникают большие взаимные перспективные искажения, затрудняющие восприятие стереозффекта.

При съемке высоких сооружений необходимо рассчитывать минимальное значение отстояния, при котором будет обеспечен захват здания по высоте:

$$Y_{\text{min}} = Z_{\text{max}} f / z_{\text{max}}, \quad (77)$$

где Z_{max} – высота сооружения относительно фотокамеры; z_{max} – максимальное значение высоты изображения сооружения на снимке.

Для увеличения высоты z на снимке съемку высоких сооружений выполняют при верхнем положении объектива фотокамеры Photoe 19/1318.

Точность составления фронтального плана аналитическим способом можно рассчитать по формулам (47) средних квадратических ошибок определения пространственных координат при нормальном виде съемки.

§ 23. ИССЛЕДОВАНИЕ СКЛОНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Составной частью инженерных изысканий в горной местности является изучение различных склоновых процессов: оползней, снежных лавин, селей, обвалов, осыпей и т.п. Динамику происходящих процессов характеризуют изменения на исследуемом участке за определенный промежуток времени. Метод фотографической съемки позволяет получать фотографическое изображение всего изучаемого объекта с определенной периодичностью или наиболее подвижных его частей в один физический момент времени.

При изучении деформации горных склонов основное внимание уделяют определению зон распространения подвижных участков и максимальных подвижек, площадей смещенных участков и направлению смещений, углов наклона траектории к горизонту и объемов переместившихся масс.

В зависимости от скорости протекания того или другого процесса для получения фотоснимков используют фототеодолиты или специальные съемочные камеры, предназначенные для скоростной стереосъемки.

Для фотосъемки медленно протекающих оползневых явлений применяют фотографические системы Photheo 19/1318 и УМК. Фотографирование производится многократно с точек базиса и одиночных фотостанций с соблюдением требования неизменности элементов внутреннего и внешнего ориентирования фотокамеры. Базисы фотографирования располагают параллельно направлению смещения оползня.

Перед начальным циклом фотографирования на местности геодезическими методами создается сеть опорных точек, включающая точки базиса и три-четыре точки, расположенные в пределах стереопары по стандартной схеме. Точки выбирают вне зоны действия изучаемого явления.

Обработка фотоснимков в зависимости от вида требуемой для решения конкретной задачи информации производится на стереоком-

параторах или универсальных приборах. В первом случае информация представляется в виде списка координат и смещений точек по координатным осям, а во втором – в графическом виде.

Технология обработки снимков, полученных в разных циклах, и формулы для расчета смещений при использовании фотограмметрического и стереофотограмметрического методов изложены в § 21.

Технология обработки стереоскопических пар наземных снимков графомеханическим методом описана в § 15.

Изучение быстро протекающих процессов (снежные лавины, сели, обвалы и др.) фотограмметрическими методами возможно только на основе стереосъемки с базиса необходимой длины двумя специальными камерами, работающими синхронно в автоматическом режиме с приближенно заданными элементами ориентирования и фиксированными интервалами между экспозициями.

Материалы такой съемки представляют собой два кадровых фильма, полученных с концов базиса. Отдельные кадры, относящиеся к одному и тому же моменту фотографирования, определяемому по меткам времени, образуют стереопары, фиксирующие в пространстве и времени положение, форму и размеры движущегося на местности объекта.

Последующая обработка снимков стереопар при наличии необходимого числа опорных точек выполняется так же, как и снимков стереопар оползневых явлений. При этом параметры движения, морфологические показатели склона, а также пространственно-геометрические характеристики его покрова могут быть выражены количественно через разность соответствующих пространственных координат точек движущегося объекта и местности. Результаты обработки снимков могут быть представлены в численной или графической форме.

Съемочная аппаратура, предназначенная для скоростной стереосъемки, должна удовлетворять следующим условиям [5]:

- затворы камер в процессе своей работы не должны вносить в фотоизображение изучаемого явления смаз более 0,03 мм, длительность выдержки не должна превышать 0,01 с, а синхронность работы затворов двух камер – 0,003 с;

- командный прибор должен обеспечивать постоянство заданных значений интервалов съемки с точностью 0,01 с;

- емкость кассет камер должна составлять не менее 200 кадров;
- комплект аппаратуры должен быть приспособлен к ручной переноске и быстро к приведению в рабочее состояние.

§ 24. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕДНИКОВ

Ледники, являясь аккумуляторами пресной воды, играют важную роль в жизни на Земле.

Для решения целого ряда гляциологических задач за ледниками постоянно ведутся стационарные и эксплуатационные наблюдения с использованием различных физических приборов, геодезических измерений и фотоснимков, полученных с помощью космической фотосъемки, аэрофотосъемки и наземной фототеодолитной съемки.

С помощью физических приборов изучают количество выпавших осадков, спектральную отражательную способность льда, фирна, снега и т.д. Геодезические измерения позволяют определить направление и скорость перемещения отдельных точек ледника. Материалы аэрокосмических съемок используют для дешифрирования ледниковых образований, связанных с выявлением изменений границ оледенения, мощности ледника и его объема, а также для прогнозирования начала катастрофических подвижек пульсирующих ледников путем выявления в областях их питания ледяных волн, создающих огромные напряжения в концевых частях и приводящих к отрыву ледяной массы и ее сползанию. Пространственное положение ледников фиксируется на топографических планах, составленных стереофотограмметрическим методом.

Наземную фототеодолитную съемку применяют для составления карт концов ледников, являющихся наиболее динамичными их частями, а также для установления изменений ледника за различные промежутки времени. Для более детального изучения ледников можно использовать комбинированные методы.

Наиболее точным способом получения количественной информации о ледниках является геодезический. Однако он весьма трудоемок и не дает возможности судить о состоянии объекта в целом

в один и тот же момент времени. В этом отношении рядом преимуществ обладает фототеодолитная съемка. Технология создания топографических планов ледников по наземным снимкам не отличается от технологии наземной фототопографической съемки, изложенной в § 15. Крупномасштабные тематические карты ледников составляют графомеханическим методом с использованием универсальных приборов. Изменение положения пунктов и объема ледника за отдельные периоды времени определяют по полученным повторным снимкам. Повторные фотосъемки производят, как правило, с одних и тех же станций фотографирования, закрепленных скальными марками. Геодезическое ориентирование фотограмметрических моделей осуществляют по контрольным точкам, полученным из предыдущих съемок, или по неподвижным точкам склонов, нанесенным на планы прошлых лет.

По разновременным планам получают сведения: 1) об изменениях концов ледника, его площади, объема, углов наклона; 2) о высоте поверхности и мощности ледника. По разновременным снимкам, снятым с нулевого базиса, определяют поверхностную скорость ледника на основе измерения смещений его подвижных точек. Для решения второй задачи с закрепленных точек базиса борта ледниковой долины производят съемку нормального вида участка поверхности ледника в направлении, перпендикулярном к его движению. Повторную съемку выполняют лишь с левого конца базиса с сохранением прежних элементов ориентирования. Таким образом, получают три снимка, два из которых образуют обычную стереопару. По измерениям этой стереопары определяют отстояния Y и координаты точек. По разновременным левым снимкам получают стереопару нулевого базиса, по которой измеряют параллаксы всех подвижных точек.

Проверку элементов ориентирования повторного снимка осуществляют по неподвижным точкам объекта, на которых продольные и поперечные параллаксы должны равняться нулю.

Путь подвижной точки на леднике, пройденный за промежуток времени, вычисляют по формуле

$$S = p_S Y / f ,$$

где p_S – измеренный параллакс смещения.

в один и тот же момент времени. В этом отношении рядом преимуществ обладает фототеодолитная съемка. Технология создания топографических планов ледников по наземным снимкам не отличается от технологии наземной фототопографической съемки, изложенной в § 15. Крупномасштабные тематические карты ледников составляют графомеханическим методом с использованием универсальных приборов. Изменение положения пунктов и объема ледника за отдельные периоды времени определяют по полученным повторным снимкам. Повторные фотосъемки производят, как правило, с одних и тех же станций фотографирования, закрепленных скальными марками. Геодезическое ориентирование фотограмметрических моделей осуществляют по контрольным точкам, полученным из предыдущих съемок, или по неподвижным точкам склонов, нанесенным на планы прошлых лет.

По разновременным планам получают сведения: 1) об изменениях концов ледника, его площади, объема, углов наклона; 2) о высоте поверхности и мощности ледника. По разновременным снимкам, снятым с нулевого базиса, определяют поверхностную скорость ледника на основе измерения смещений его подвижных точек. Для решения второй задачи с закрепленных точек базиса борта ледниковой долины производят съемку нормального вида участка поверхности ледника в направлении, перпендикулярном к его движению. Повторную съемку выполняют лишь с левого конца базиса с сохранением прежних элементов ориентирования. Таким образом, получают три снимка, два из которых образуют обычную стереопару. По измерениям этой стереопары определяют отстояния Y и координаты точек. По разновременным левым снимкам получают стереопару нулевого базиса, по которой измеряют параллаксы всех подвижных точек.

Проверку элементов ориентирования повторного снимка осуществляют по неподвижным точкам объекта, на которых продольные и поперечные параллаксы должны равняться нулю.

Путь подвижной точки на леднике, пройденный за промежуток времени, вычисляют по формуле

$$S = p_S Y / f ,$$

где p_S – измеренный параллакс смещения.

Поверхностную скорость движения ледника определяют по общеизвестной формуле

$$V = S/t,$$

где t – период времени.

§ 25. ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ РАЗМЫВА БЕРЕГОВ РЕК

Для оценки размыва берегов речных русел используют картографические и аэрофотосъемочные материалы, а для детальной оценки – материалы крупномасштабных наземных съемок. Наземную фотографическую съемку выполняют через заданные интервалы времени с закрепленных точек базиса. Частота съемок зависит от режима реки, обычно выполняют 4-5 съемок в половодье и по одной съемке в месяц в меженный период.

Для определения характеристик поверхностных струй водного потока производится специальная фототеодолитная съемка перемещающихся вместе с водным потоком поплавков. Эту съемку выполняют двумя фотокамерами несколько раз на одни и те же фотопластины, обладающие большой фотографической шириной. Экспонирование производится синхронно по команде через заданные интервалы.

В результате фотограмметрической обработки материалов съемок составляют регистрационные планы масштабов 1:200 – 1:5000 и планы направления и скорости поверхностных струй водного потока. На регистрационном плане отображают результаты определения положения бровки размываемого берега по всем сериям съемок с указанием дат их выполнения. На плане направлений и скорости поверхностных струй водного потока фиксируют траектории движения поплавков с указанием местоположения каждого поплавка в момент фотографирования и скорости его движения.

Обработка материалов фототеодолитной съемки выполняется на стереоавтографе, топокарте и др.

Положение линии, отображающей кромку размывания берега, можно нанести по координатам точек, определенных аналитическим способом. Этим же способом могут быть определены:

основные характеристики динамики размыва берега и скорость поверхностных потоков.

Динамика размыва берега характеризуется средним размывом берега L . По регистрационному плану измеряют площадь S размыва участка и протяженность D подверженного размыванию участка берега. Тогда $L = S/D$.

Скорость поверхностных струй водного потока

$$V = dM/(1000t), \quad (78)$$

где d – протяженность участка траектории движения поплавок на плане; M – знаменатель масштаба плана; t – время между смежными экспозициями.

Средний размыв берега L может быть найден по результатам вычисления отстояния Y точек, определяющих положение бровки изучаемого берега:

$$L = Y_{\text{cp}} - Y_{\text{cp},0}, \quad (79)$$

где Y_{cp} – среднее отстояние точек бровки; $Y_{\text{cp},0}$ – среднее отстояние точек бровки, полученное по материалам исходной (начальной) съемки.

Среднее значение отстояний получается для каждой съемки как среднее арифметическое:

$$Y_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i,$$

где Y_i – ордината точки i бровки берега, полученная по материалам съемки на фиксированную дату; n – количество точек, определяющих положение бровки берега.

Аналогично

$$Y_{\text{cp},0} = \frac{1}{n_0} \sum_{k=1}^{n_0} Y_{k0},$$

где Y_{k0} – ордината k -й точки бровки берега, полученная по материалам исходной съемки; n_0 – количество точек, определяющих положение бровки берега на дату исходной съемки.

Ординаты Y точек бровки берега в зависимости от вида съемки вычисляют по формулам (37)-(40). Направление выбирают так, чтобы базис был параллелен фотографируемому участку берега.

Для определения направления поверхностных струй водного потока определяют координаты X и Y поплавков на фиксированный момент съемки. Съемку выполняют многократно через выбранный интервал времени t на одни и те же фотопластинки.

Скорость подсчитывают по формуле

$$V = \Delta D / t, \quad (80)$$

где ΔD – перемещение поплавок за время t ; t – интервал времени между смежными экспозициями.

Перемещение поплавок

$$\Delta D = (\Delta X^2 + \Delta Y^2)^{1/2},$$

где ΔX и ΔY – приращения координат одного и того же поплавок в результате его перемещения за время t .

Приращения координат ΔX и ΔY определяют по разностям соответствующих координат точки поплавок в начале и в конце фиксируемого времени t по формулам (66).

Направление поверхностных струй водного потока находят по приращениям координат ΔX и ΔY или координатам X и Y поплавок, определенным по измерениям стереопар, полученным на каждый момент съемки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наземная стереофотограмметрическая съемка нашла широкое применение в различных областях науки и техники для решения разнообразных задач. Топографическая съемка земной поверхности и маркшейдерская съемка открытых горных разработок; астрономия и геология; гидротехника и горная геометрия; машиностроение и приборостроение; военное дело и медицина; обмеры зданий, сооружений, различного рода моделей; съемка морского

волнения, движение ледников, оползней, селей – таков далеко не полный перечень задач, при решении которых метод съемки оказался весьма эффективен.

Несмотря на простоту производства фотографической съемки изучаемого явления и последующей обработки фотоснимков на аналоговых приборах, наземная фотограмметрия как наука продолжает развиваться. В настоящее время на смену фотоматериалам приходят матрицы ПЗС, являющиеся основой цифровых камер, а на смену аналоговым приборам – цифровые фотограмметрические станции с развитым программным обеспечением.

Дальнейшее развитие фотограмметрии будет связано с общим развитием науки в таких областях, как электроника, математика, физика, химия, приборостроение, определяющих научно-технический прогресс.

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бруевич П.Н.* Фотограмметрия. М.: Недра, 1990. 286 с.
2. *Бруевич П.Н.* Наземная фототопографическая съемка при инженерных изысканиях / П.Н.Бруевич, В.С.Кириленко, Г.А.Лысков. М.: Недра, 1979. 256 с.
3. Геодезия. Геодезические и фотограмметрические приборы / Под ред. В.П.Савиных, В.Р.Яценко. М.: Недра, 1991. 430 с.
4. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. М.: Недра, 1982. 158 с.
5. *Лобанов А.Н.* Фотограмметрия / А.Н.Лобанов, М.И.Буров, Б.В.Краснопевцев. М.: Недра, 1987. 312 с.
6. *Лобанов А.Н.* Фототопография. М.: Недра, 1983. 224 с.
7. *Павлов В.И.* Фотограмметрия. Теория одиночного снимка и стереоскопической пары снимков / Санкт-Петербургский горный ин-т. СПб, 2000. 153 с.
8. *Павлов В.И.* Аналитический метод обработки стереопары наземных снимков // Записки Горного института. 2001. Т. 146. С. 194-197.
9. *Сердюков В.М.* Фотограмметрия. М.:Высшая школа. 1983. 352 с.
10. *Трунин А.П.* Фототеодолитная съемка в крупных масштабах / А.П.Трунин, И.И.Финаревский, С.В.Чистяков. М.: Недра, 1971. 208 с.
11. Фотограмметрия / Л.Н.Келль, Ю.Н.Корнилов, Е.В.Пономарев, И.А.Черкасов. М.: Недра, 1989. 320 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
<i>Глава 1. ФОТОТЕОДОЛИТНАЯ СЪЕМКА</i>	4
§ 1. Общие положения	4
§ 2. Виды фототеодолитной съемки	6
§ 3. Технические средства фототеодолитной съемки	7
<i>Глава 2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАЗЕМНОГО СНИМКА И СНИМКОВ СТЕРЕОПАРЫ</i>	13
§ 4. Системы координат, применяемые при фототеодолитной съемке	13
§ 5. Элементы ориентирования наземного снимка и пары наземных снимков	15
§ 6. Зависимости между пространственными и плоскими координатами точки наземного снимка	17
§ 7. Зависимости между координатами точки местности и координатами ее изображения на наземном снимке	21
§ 8. Зависимости между координатами точки местности и координатами ее изображений на паре наземных снимков	25
§ 9. Продольный и поперечный параллакс точек стереопары	32
§ 10. Точность наземной стереофотограмметрической съемки	33
§ 11. Расчет технических параметров фототеодолитной съемки	38
<i>Глава 3. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАЗЕМНЫХ СНИМКОВ</i>	40
§ 12. Стереоскопические приборы	40
§ 13. Универсальные стереофотограмметрические приборы	49
<i>Глава 4. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СТЕРЕОПАРЫ НАЗЕМНЫХ СНИМКОВ</i>	58
§ 14. Классификация методов обработки	58
§ 15. Графомеханический метод обработки	59
§ 16. Аналитический метод обработки	63
§ 17. Автоматизированная система обработки	70
§ 18. Цифровые методы обработки	74
<i>Глава 5. ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОТЕОДОЛИТНОЙ СЪЕМКИ ПРИ РЕШЕНИИ ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧ</i>	84
§ 19. Создание топографических планов	84
§ 20. Составление маркшейдерских планов открытых горных работ	88
§ 21. Определение деформации инженерных сооружений	94
§ 22. Использование фотограмметрии в строительстве и архитектуре	100
§ 23. Исследование склоновых процессов	104
§ 24. Исследование ледников	106
§ 25. Изучение динамики размыва берегов рек	108
Заключение	110
Рекомендательный библиографический список	111

Учебное издание

ПАВЛОВ Виктор Иванович

ФОТОГРАММЕТРИЯ

**НАЗЕМНАЯ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ
СЪЕМКА**

Учебное пособие

Редактор и корректор *И.В.Неверова*
Компьютерная верстка *Г.Ф.Ивановой*
Обложка *Н.Н.Седых*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 24.07.2006. Формат 60x84/16.

Зум. для копировальной техники. Гарнитура Таймс. Отпечатано на ризографе.
Усл.печ.л. 6,5. Усл.кр.-отт. 6,5. Уч.-изд.л. 6,1. Тираж 500 экз. Заказ 323. С 75.

Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В.Плеханова
РИЦ Санкт-Петербургского государственного горного института
Адрес института и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2