

СПРАВОЧНИК ГЕОДЕЗИСТА



СПРАВОЧНИК ГЕОДЕЗИСТА

Под редакцией
заслуженного деятеля науки и техники РСФСР,
проф., д-ра техн. наук *В. Д. Большакова*
и проф., д-ра техн. наук *Г. П. Левчука*

(В ДВУХ КНИГАХ)

КНИГА 2

*Третье издание,
переработанное и дополненное*



МОСКВА „НЕДРА” 1985

Справочник геодезиста. В 2-х книгах. Кн. 2/Под ред. В. Д. Большакова и Г. П. Левчука. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 1985. — 440 с., ил.

Является логическим продолжением *Справочника геодезиста*, кн. 1. Рассматриваются основные геодезические работы. Большое внимание уделяется нивелированию, топографическим, стереотопографическим и космическим съемкам. Показано применение геодезии в изысканиях и строительстве сооружений, изложены вопросы автоматизации геодезических работ. Освещена система планирования и экономического стимулирования в топографо-геодезическом производстве.

Для инженеров и техников, выполняющих основные геодезические работы и топографические съемки, а также изыскания и разбивки инженерных сооружений, будет полезен для преподавателей, аспирантов и студентов геодезических специальностей высших учебных заведений.

Табл. 49, ил. 168, список лит. — 55 назв.

Рецензенты: *М. Н. Булушев*, д-р техн. наук (Военно-инженерная академия им. В. В. Куйбышева); *А. В. Гордеев*, д-р техн. наук (Московский институт инженеров землеустройства); *М. М. Машимов*, д-р техн. наук (Военно-инженерная академия им. В. В. Куйбышева), *В. К. Панкрушин*, д-р техн. наук (Новосибирский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии); *Е. М. Рыбина*, канд. техн. наук (Московский гидромелиоративный институт); *Г. Е. Рязанцев*, канд. техн. наук (Государственный союзный проектный институт); *А. А. Синдяев*, канд. техн. наук (Центральный научно-исследовательский институт инженеров геодезии, аэросъемки и картографии); *В. С. Сытник*, канд. техн. наук (Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт организации, механизации и технической помощи строительству); *А. П. Тищенко*, канд. техн. наук (Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова).

РАЗДЕЛ III

ОСНОВНЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

III.4. ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЙ СВЕТО- И РАДИОДАЛЬНОМЕРАМИ

В. Д. Большаков, А. Н. Голубев

А. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ

III.4.1. Общие сведения о методах измерения расстояний при помощи электромагнитных волн

Современные линейные измерения выполняются электронными дальномерами, использующими электромагнитные волны радио- и оптического диапазонов. Принцип измерения расстояний такими дальномерами основан на определении времени и скорости распространения электромагнитных волн вдоль измеряемой дистанции. В основе всех методов электронной дальнометрии лежит соотношение

$$D = \frac{v\tau}{2}, \quad (\text{III.4.1})$$

где D — искомое расстояние; v — скорость распространения электромагнитных волн; τ — время распространения вдоль дистанции D в прямом и обратном направлениях.

Любая дальномерная аппаратура доставляет информацию о времени распространения τ , а скорость v определяется косвенным образом по известному значению скорости света в вакууме c и метеорологическим измерениям (см. гл. III.4.3).

В дальномерных устройствах измеряется либо непосредственно временной интервал τ , либо другой параметр, являющийся определенной функцией этого временного интервала. В зависимости от конкретного метода реализуется та или иная схема измерений, определяющая соответствующую функциональную схему построения измерительной аппаратуры.

Физическая сущность всех методов измерения расстояний заключается в сравнении одного и того же физического параметра, связанного с электромагнитным излучением, до и после прохождения излучением двойной измеряемой дистанции. Для этого аппаратура на одном конце измеряемой линии обычно содержит передатчик и приемник, а на другом конце — отражатель, и один и тот же сигнал от передатчика направляется на приемник одновременно по двум различным путям: непосредственно (без выхода на дистанцию) и через измеряемую дистанцию. Первый путь называется опорным каналом или трактом, а идущий по нему сигнал — опорным сигналом. Второй путь образует дистанционный (измерительный) канал, и со-

ответственно приходящий от отражателя сигнал называют дистанционным или измерительным сигналом. В приемнике осуществляется сравнение опорного и дистанционного сигналов по избранному параметру, или, другими словами, измеряется их различие по этому параметру. Выбор параметра, по которому производится сравнение опорного и дистанционного сигналов, определяет метод измерения расстояния. Такими параметрами могут быть: время прихода импульса излучения (при импульсном излучении), фаза гармонического колебания при непрерывном излучении, фаза сигнала, модулирующего непрерывное или импульсное излучение, частота модулированного колебания при непрерывном или импульсном излучении с частотной модуляцией (ЧМ). Соответственно различают следующие методы измерения расстояний:

1) временной, использующий импульсное излучение, с измерением непосредственно времени распространения импульса;

2) интерференционный, использующий непрерывное излучение без модуляции, с регистрацией результата непосредственной интерференции опорной и отраженной волн;

3) фазовый, использующий непрерывное или импульсное излучение с модуляцией гармоническим сигналом или непрерывное излучение без модуляции, с измерением разности фаз излучаемых и принимаемых колебаний на модулирующей или несущей частоте;

4) частотный, использующий непрерывное или импульсное частотно-модулированное излучение с измерением разности мгновенных частот излучаемых и принимаемых колебаний.

Временной метод, называемый часто импульсным, — это метод прямого измерения времени распространения электромагнитных волн т. Импульсный дальномер содержит измеритель временных интервалов, запускаемый опорным импульсом от передатчика и останавливаемый импульсом, пришедшим с дистанции (рис. 1). Расстояние вычисляется непосредственно по соотношению (III.4.1). Импульсный метод характеризуется сравнительно большой абсолютной ошибкой, возникающей из-за трудности получения импульсов малой длительности с крутым фронтом и хорошей воспроизводимостью формы. Ошибка во времени распространения электромагнитных волн, равная ~ 10 нс (типичное значение), дает ошибку в расстоянии $\sim 1,5$ м. Поэтому импульсный метод выгодно использовать для измерения больших расстояний, когда относительная ошибка измерения получается малой. В настоящее время импульсный метод используется как в радио-, так и в оптическом диапазонах. В радиодиапазоне он применяется на больших дальностях (в импульсных радиогеодезических системах) или при не слишком высоких требованиях к точности (радиовысотомеры малых высот). Наиболее эффективно применение импульсного метода в оптическом диапазоне

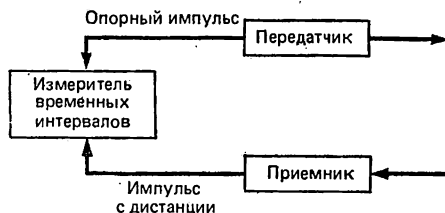


Рис. 1. Схема реализации временного метода измерения расстояний



Рис. 2. Схема реализации частотного метода

с использованием мощных импульсных лазеров для измерения больших и сверхбольших расстояний в космической геодезии (до ИСЗ и до Луны). Весьма многообещающим направлением в развитии импульсной дальнометрии оптического диапазона является использование пикосекундной лазерной техники — лазеров с синхронизацией мод, способных генерировать сверхкороткие оптические импульсы длительностью вплоть до пикосекунд ($1 \text{ пс} = 10^{-12} \text{ с}$), что сулит возможность резкого увеличения точности импульсного метода.

Частотный метод измерения расстояний основан на использовании частотно-модулированных колебаний и сводится к измерению приращения частоты за время распространения ЧМ колебания до отражателя (отражающего объекта, цели) и обратно. При непрерывном излучении применяется частотная модуляция по периодическому закону — треугольному, пилообразному или синусоидальному. Схема реализации частотного метода изображена на рис. 2. Генератор модулирует излучение передатчика по частоте. В приемнике смешиваются два ЧМ колебания: одно — поступающее непосредственно от передатчика (опорное), и второе — приходящее после отражения от цели. В результате выделяется сигнал биений с частотой Δf_0 , равной разности мгновенных частот смешиваемых колебаний. При частотном методе расстояние определяется соотношением

$$D = \frac{v \Delta f_0}{p F \Delta F}, \quad (\text{III.4.2})$$

где F — частота модуляции; ΔF — полоса качания частоты; $p=4$ — коэффициент для треугольной и синусоидальной модуляции и $p=2$ — для пилообразной модуляции. При этом в случае синусоидальной ЧМ под Δf_0 понимается среднее за полупериод модуляции значение частоты биений.

При измерении Δf_0 частотомерами возникает так называемая постоянная ошибка (ошибка дискретности), равная в линейной мере

$$\delta D = \frac{v}{p \Delta F}. \quad (\text{III.4.3})$$

Для ее исключения применяют более сложные схемы построения дальномера.

Максимальное однозначно измеряемое расстояние

$$D_{\max} = \frac{v}{4F}. \quad (\text{III.4.4})$$

Точность приборов, реализующих частотный метод, обычно имеет порядок 10^{-3} . Метод применяется главным образом в самолетных радиовысотомерах малых высот и некоторых радиолокационных системах. В этом случае из-за движения прибора или цели возникает дополнительный сдвиг частоты вследствие эффекта Допплера.

Перспективными являются системы, реализующие частотный метод при импульсном излучении. В этом случае появляется возможность применения не периодической, а линейной частотной модуляции в пределах длительности импульса излучения, что позволяет избавиться от некоторых отрицательных явлений, обусловленных периодичностью модуляции.

Интерференционный метод измерения расстояний используется в оптическом диапазоне для измерения небольших расстояний и перемещений (десятки метров) и является наиболее прецизионным из всех существующих методов. Он основан на непосредственном наблюдении результата интерференции двух (или более) когерентных световых волн, прошедших различные расстояния. Различают два варианта интерференционного метода: абсолютные и относительные интерференционные измерения. Абсолютными называют измерения, осуществленные по такой схеме, когда двойное измеряемое расстояние является разностью хода интерферирующих волн и поэтому его можно выразить в длинах волн света. При абсолютном методе измерения расстояний или перемещений используются лазерные интерферометры типа Майкельсона со счетом интерференционных полос. Такие интерферометры могут быть одночастотными или двухчастотными (гетеродинными). В первых используется одночастотный стабилизированный гелий-неоновый лазер, во вторых — гелий-неоновый лазер, генерирующий одновременно две близкие оптические частоты, что позволяет перенести измерения на разностную частоту биений, лежащую в радиодиапазоне. Типичные схемы одночастотного a и гетеродинного b интерферометров показаны на рис. 3. Если в гетеродинной схеме светоделитель СД поляризационного типа, то пластинки $\lambda/4$ после него не требуются. Процедура измерения расстояния сводится к перемещению отражателя вдоль всей измеряемой дистанции и счету числа интерференционных полос, проходящих перед фотоприемником при перемещении отражателя, после чего искомая длина вычисляется по соотношению

$$D = \frac{\lambda}{2} M = \frac{\lambda_0}{2n} M, \quad (\text{III.4.5})$$

где λ_0 — длина волны излучения лазера в вакууме; n — фазовый показатель преломления воздуха на пути перемещения; M — число полос. В одночастотных интерферометрах имеется один счетчик полос, а в гетеродинных интерферометрах число M определяется в виде разности показаний двух счетчиков при перемещении отражателя вдоль измеряемой дистанции. Число M достаточно знать с точностью до единицы (т. е. определять целое число полос). В некоторых случаях определяется не только целое число полос, но и дробная часть интерференционной полосы. В современных интерферометрах все измерения автоматизированы и окончательный результат выдается на цифровое табло.

Максимальная дальность действия лазерных интерферометров определяется длиной когерентности лазерного излучения в атмосфере, составляющей для используемых лазеров величины порядка сотен метров. Однако необходимость перемещения отражателя вдоль всей трассы требует сооружения точных направляющих на местности, что

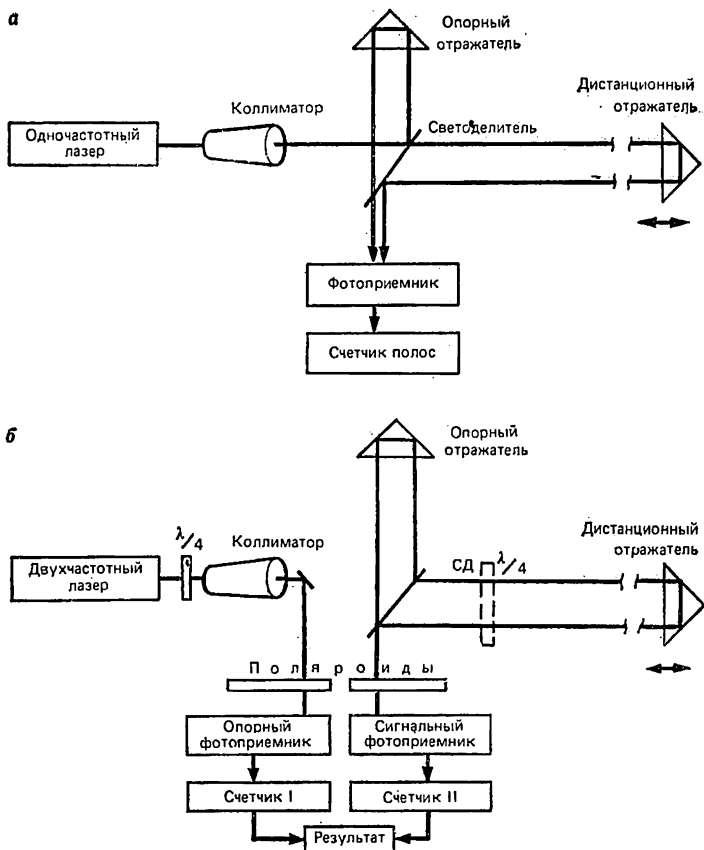


Рис. 3. Схема лазерного интерферометра

технически сложно и дорого. Поэтому лазерные интерферометры, за исключением специальных случаев (прецизионные работы в закрытых помещениях), используются для измерения сравнительно небольших перемещений, а также в режиме стационарного прецизионного слежения за изменениями расстояний, когда отражатель жестко закрепляется на исследуемом объекте. Для работ по изучению деформаций земной коры возможно использование интерферометров, построенных по схеме типа Фабри—Перо.

Точность лазерной интерферометрии определяется выражением

$$\frac{m_D}{D} = \sqrt{\left(\frac{m_v}{v}\right)^2 + \left(\frac{m_n}{n}\right)^2}, \quad (\text{III.4.6})$$

где m_v/v — относительная нестабильность частоты излучения;
 $m_n/n \approx m_n$ — ошибка определения показателя преломления воздуха.

ТАБЛИЦА 1

Интерферометр	Страна-изготовитель	Тип	Максимально-измеряемое расстояние, м	Точность
ИПЛ-30К	СССР	Одночастотный	30	$1,5 \cdot 10^{-6} D$
ДИП-2	СССР	Двухчастотный	60	$1 \cdot 10^{-7} D$
Метрилас M100-Е	Франция	Одночастотный	30	$0,3 \text{ мкм} + 1 \cdot 10^{-7} D$
Хьюлетт—Паккард	США	Двухчастотный	60	$5 \cdot 10^{-7} D$

Если счет полос в интерферометре производится с точностью до целого числа, то дополнительно появляется ошибка дискретности счета, предельное значение которой равно половине длины волны света.

В табл. 1 приведены основные характеристики некоторых современных лазерных интерферометров.

Совершенно другой тип интерференционных линейных измерений представляют собой относительные интерференционные измерения. Так называются измерения, при которых интерференция используется для последовательного умножения небольшой, но точно известной (измеренной абсолютным методом) длины (эталона) в целое число раз. Относительный интерференционный метод — это метод прецизионного построения на местности отрезка, длина которого кратна заданной длине эталона, что дает возможность создавать высокоточные базисы. Для реализации метода используется интерферометр типа Вьясяля (рис. 4) с источником белого света, обычно лампы накаливания. Излучение источника 1 коллимируется телескопической системой 2 и разделяется зеркалом 3 на два пучка. Один из них многократно проходит между зеркалами 3 и 4, расстояние между которыми выставлено по эталону длиной d_0 , и попадает в приемную зрительную трубу T , а другой пучок отражается от удаленного зеркала 5, установленного на расстоянии D от зеркала 3, и также попадает в приемную трубу. Измерения заключаются в подборе такого расстояния D юстировкой зеркал, при котором в приемной трубе наблюдается интерференционная картина. Последняя появляется лишь в том случае, когда оптические пути опорного и дистанционного пучков уравниваются с точностью до длины когерентности, которая для белого света составляет 2—3 мкм. При появлении интерференционной картины расстояние D определяется выражением

$$D = m d_0 \frac{n_0}{n}, \quad (\text{III.4.7})$$

где m — число отражений от зеркала 4; n_0 и n — групповые показатели преломления воздуха в опорном и дистанционном каналах. Расстояние D может, в свою очередь, служить эталоном, который соответствующей перестановкой зеркал умножается в целое число раз, и т. д. В качестве первичного эталона используется кварцевый жезл длиной 1—1,2 м. Число m обычно не превышает 6.

Наибольшая измеренная таким методом длина — базис в Нуммела (Финляндия) со следующими этапами умножения $1\text{м} \times 6 \times 4 \times 3 \times 3 \times 2 \times 2 = 864 \text{ м}$.

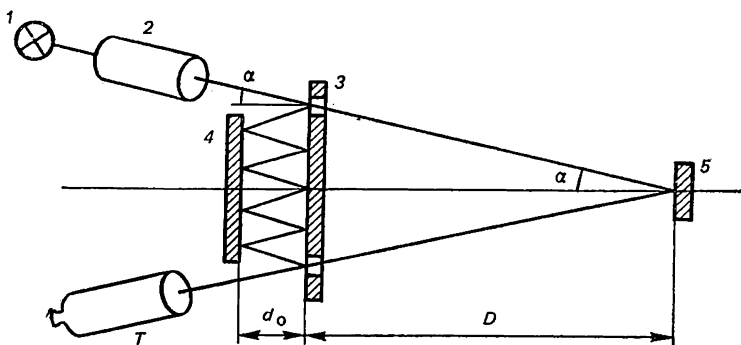


Рис. 4. Схема интерферометра Вайселя

Относительные интерференционные измерения — исключительно сложная и трудоемкая работа, требующая большой и тщательной подготовки (закладка бетонных столбов, предварительные измерения инварными проволоками и т. п.) даже при постройке интерференционных компараторов длиной 24 м для компарирования инварных проволок.

Фазовый метод измерения расстояний является наиболее распространенным методом геодезической дальнометрии и применяется для измерения расстояния от десятков метров до десятков (а в радиодиапазоне до сотен) километров. Практически во всех свето- и радиодальномерах и в большинстве радиогеодезических систем используется именно фазовый метод.

III.4.2. Фазовый метод измерения расстояний

Основной принцип фазового метода. Этот принцип иллюстрируется на рис. 5. Передатчик излучает гармонические колебания частоты f , которые проходят расстояние D до отражателя и обратно и поступают на приемник со сдвигом фаз $\varphi = 2\pi f\tau = 2\pi f2D/v$. Этот сдвиг фаз измеряется фазометром, включенным между передатчиком и приемником. Измеряемое расстояние определяется выражением

$$D = \frac{v}{2f} \cdot \frac{\varphi}{2\pi}. \quad (\text{III.4.8})$$

Сдвиг фаз

$$\varphi = 2\pi N + \Delta\varphi, \quad (\text{III.4.9})$$

где N — целое число; $\Delta\varphi$ — величина, меньшая 2π ($0 < \Delta\varphi < 2\pi$). Любой реальный фазометр может измерить сдвиг фаз только в пределах от 0 до 2π , т. е. только $\Delta\varphi$. Для определения N предпринимают специальные меры. Подстановка формулы (III.4.9) в (III.4.8) дает основное уравнение фазовой дальнометрии

$$D = \frac{v}{2f} \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right). \quad (\text{III.4.10})$$

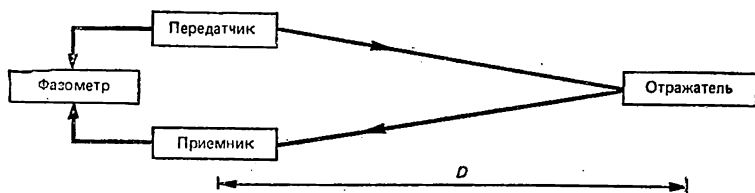


Рис. 5. Схема реализации фазового метода дальнометрии

Это уравнение часто записывают в виде

$$D = \frac{\lambda}{2} (N + \Delta N), \quad (\text{III.4.11})$$

где $\lambda = v/f$ — длина волны; $\Delta N = \Delta\varphi/2\pi$ — дробь, меньшая единицы ($0 < \Delta N < 1$). Фигурирующую в дальнометрическом уравнении частоту f называют масштабной (измерительной) частотой.

В схеме, изображенной на рис. 5, масштабной частотой является частота колебаний, излучаемых передатчиком (несущая частота). Фазовые измерения на не слишком высокой несущей частоте, соответствующей диапазону длинных и средних радиоволн, используются во многих типах радиогеодезических систем. В фазовых геодезических дальнометрах применяются гораздо более высокие несущие частоты и модуляция излучаемых колебаний, и масштабной частотой является частота модуляции. Этому соответствует обобщенная схема построения фазового дальнометра, показанная на рис. 6.

Типы фазовой дальнометрической аппаратуры. Схема на рис. 6 относится к фазовым дальнометрам, измеряющим расстояния между двумя неподвижными пунктами на земной поверхности. Такие фазовые дальнометры делятся, в зависимости от используемого диапазона несущей частоты, на два качественно различных класса — светодальнометры и радиодальнометры.

Светодальнометры — это дальнометры, в которых в качестве несущих колебаний используются колебания оптического диапазона спектра — видимый свет или инфракрасное (ИК) излучение.

Радиодальнометры — это дальнометры, в которых в качестве несущих колебаний используются колебания сверхвысоких (СВЧ) частот радиодиапазона — как правило, сантиметровые или, реже, миллиметровые радиоволны. Эти волны относятся к диапазону ультракоротких (УКВ) волн, и геодезические радиодальнометры иногда называют УКВ-радиодальнометрами или СВЧ-радиодальнометрами.

Для измерения расстояний до подвижных объектов с целью определения их координат применяется особый класс устройств, называемых радиогеодезическими системами (см. часть I данной главы). Такие системы могут быть не только фазовыми, но также временными, частотными и смешанными, однако большинство их относится к фазовому типу. Радиогеодезические системы могут работать в различных диапазонах радиоволн — от УКВ до СДВ (сверхдлинные волны).

Разрешение неоднозначности в фазовых дальнометрах. Разрешением неоднозначности называется определение неизвестного целого числа N в дальнометрическом уравнении (III.4.10) или (III.4.11). В современных свето- и радиодальнометрах неоднозначность разрешается, как правило, способом фиксированных частот, при котором в даль-

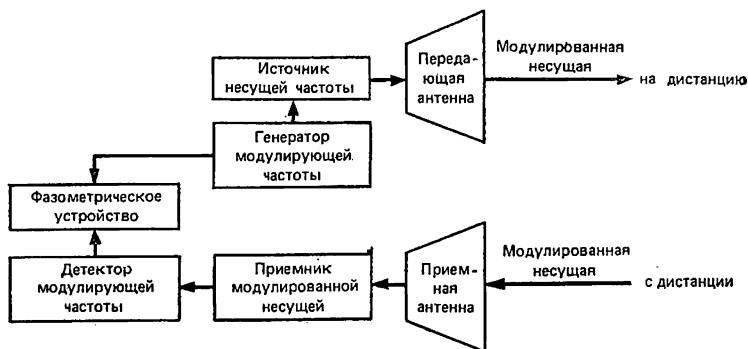


Рис. 6. Обобщенная схема построения фазового дальномера

номере предусматривается несколько точно известных (стабилизированных кварцами) переключаемых частот модуляции. Возможны два варианта построения сетки фиксированных частот:

1) набор последовательно уменьшающихся в целое число раз частот, создающих ряд

$$f_1 > f_2 > \dots > f_m; \quad (\text{III.4.12})$$

2) набор близких частот, выбранных так, чтобы последовательно уменьшались в целое число раз разности первой и остальных частот; например, при нумерации частот в порядке их уменьшения это дает ряд

$$f_1 > (f_1 - f_m) > (f_1 - f_{m-1}) > \dots > (f_1 - f_2). \quad (\text{III.4.13})$$

Первый вариант частот называют методом кратных частот, второй — методом комбинационных частот.

Отношения соседних кратных ступеней ряда (III.4.12) или (III.4.13) называются коэффициентами неоднозначности; они могут быть различными или одинаковыми по всем ступеням. Дополнительным условием при способе фиксированных частот является необходимость знания приближенного значения измеряемого расстояния; его можно знать тем грубее, чем больше число частот и коэффициенты неоднозначности. Обычно в дальномерах бывает от 2 до 5 частот, а допустимая погрешность знания приближенного расстояния в различных приборах колеблется примерно от 0,5 км (у приборов для измерения коротких расстояний) до 20 км и более, т. е. может быть заведомо обеспечена. Знание приближенного расстояния позволяет однозначно решить систему дальнометрических уравнений для всех частот и вычислить как N , так и D . При этом в первом из указанных вариантов построения сетки частот точное значение расстояния получают только на самой высокой частоте f_1 , а во втором варианте — на всех частотах.

Чтобы свести к минимуму вычислительные операции при разрешении неоднозначности и получить результат измерения расстояния сразу в метрической десятичной форме, используют так называемый поразрядный способ разрешения неоднозначности, являющийся частным случаем способа близких фиксированных частот. Для этого частотный ряд (III.4.12) или (III.4.13) строят так, что коэффициенты

неоднозначности по всем ступеням одинаковы и равны 10, а первая частота выбирается такой, что соответствующая ей длина волны равна (при стандартных метеоусловиях) 20 м ($\lambda/2=10$ м). В этом случае обработка измерений, выполненных на всех частотах, сводится просто к определению десятичных разрядов в значении расстояния без вычисления чисел N . При этом самый точный разряд и его доли определяются обычно на первой самой высокой частоте. Поразрядный десятичный способ наиболее удобен для автоматизации измерений и широко применяется в современных приборах.

Разрешение многозначности в одночастотных (имеющих только один комплект рабочих частот) фазовых радиогеодезических системах, когда производятся измерения до подвижного объекта, осуществляется по-другому — непосредственным счетом числа N , меняющегося при движении объекта (при работе системы в режимах радиолока и фазового зонда).

Техника фазовых измерений. Измерение разности фаз может выполняться аналоговым или цифровым методами. Аналоговые измерения в фазовых дальномерах выполняются обычно компенсационными способами. Компенсация подлежащей измерению разности фаз до определенного регистрируемого индикатором значения производится при помощи фазовращателя (в светодальномерах) для этой цели может быть использована оптическая линия задержки, а также плавное изменение модулирующей частоты). Величина измеряемого фазового сдвига считывается по шкале фазовращателя, которая может быть проградуирована сразу в единицах расстояния.

Цифровой метод измерения разности фаз (цифровой фазометр) основан на преобразовании сравниваемых по фазе гармонических сигналов в импульсы, сдвинутые по времени на интервал Δt , соответствующий измеряемой разности фаз $\Delta\varphi$, и измерении Δt путем счета числа заполняющих (счетных) импульсов за этот интервал времени. Счетчик цифрового фазометра обычно градуируется в единицах расстояния, для чего частота следования счетных импульсов $f_{сч}$ выбирается численно равной или кратной величине $v_0/2$ — половине скорости электромагнитных волн в стандартных условиях (с надлежащим учетом размерности этой величины). Частоту $f_{сч}$ часто получают делением модулирующей частоты f , к которой в этом случае также предъявляется требование равенства или кратности величине $v_0/2$, что в частности, и обеспечивает десятичный масштаб шкалы ($\lambda/2=10$ м) при поразрядном способе разрешения неоднозначности.

Точность измерений фазовыми дальномерами. Ошибка измерения расстояния определяется соотношением

$$m_D = \sqrt{m_k^2 + \left(\frac{v}{4\pi f}\right)^2 m_{\Delta\varphi}^2 + D^2 \left[\left(\frac{m_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{m_v}{v}\right)^2 \right]}, \quad (\text{III.4.14})$$

где m_k — средняя квадратическая ошибка постоянной (приборной) поправки; $m_{\Delta\varphi}$ — средняя квадратическая ошибка измерения разности фаз; m_f/f — относительная ошибка частоты; m_v/v — относительная ошибка определения рабочей скорости электромагнитных волн. При использовании радиоволн имеет место также не учитываемая формулой (III.4.14) специфическая ошибка, обусловленная влиянием отражений радиоволн от подстилающей поверхности.

Формулу (III.4.14) можно обобщенно записать в виде

$$m_D^2 = p + qD^2.$$

В практике вместо этой формулы точность дальномера обычно характеризуют эмпирической линейной зависимостью вида

$$m_D = a + bD, \quad (\text{III.4.15})$$

в которой значения коэффициентов a и b находят либо из сопоставления длин измеренных линий с их ошибками, обрабатывая измерения ряда эталонных базисов по способу наименьших квадратов, либо рассчитывают по результатам лабораторных определений отдельных ошибок.

III.4.3. Влияние атмосферы на дальномерные измерения

Распространение электромагнитных волн в атмосфере сопровождается следующими явлениями: уменьшением скорости распространения по сравнению с вакуумом; искривлением траектории волны (явление рефракции); затуханием (ослаблением интенсивности); случайными изменениями (флуктуациями) параметров волны, обусловленными турбулентностью атмосферного воздуха.

Все эти явления оказывают влияние на электронные методы измерения расстояний, но степень этого влияния различна. Наиболее существенным фактором является уменьшение скорости из-за наличия атмосферы. Это ставит основную проблему учета влияния атмосферы на дальномерные измерения — определение реальной скорости электромагнитных волн в каждом конкретном случае, так называемой рабочей скорости v , фигурирующей в уравнении (III.4.1).

Рефракционное искривление траектории волны приводит к удлинению расстояния. Это удлинение невелико, и часто им можно пренебречь, а в необходимых случаях учесть с достаточной точностью. Затухание сигнала в атмосфере резко увеличивается с уменьшением длины волны и поэтому особенно сильно проявляется в оптическом диапазоне. Для радиоволн длиннее 10 см затухание ничтожно мало. Наличие атмосферного затухания приводит к снижению дальности действия аппаратуры.

Флуктуации параметров электромагнитной волны (амплитуды, частоты, фазы, поляризации, направления распространения и поперечного сечения пучка) вызывают увеличение спектральной плотности мощности шумов на входе приемника, ухудшая отношение сигнал—шум. Особенно сильно действие флуктуаций сказывается на работе интерферометров оптического диапазона и может привести к нарушению работы вплоть до полной невозможности измерений. В дальномерах, работающих на модулированном излучении, влияние флуктуаций значительно меньше. Лучший способ борьбы с влиянием флуктуаций — выбор наиболее благоприятного для измерений времени суток, когда турбулентность минимальна (хорошо известные геодезистам периоды «спокойных изображений»).

При распространении длинных, средних и коротких радиоволн может иметь место отражение от ионосферы (пространственная волна). Интерференция прямой (поверхностной) и пространственной волн может сильно затруднять работу радиогодезических систем, которая должна поэтому проводиться в определенное время суток, различное для разных диапазонов волн и соответствующее минимальному отражению от ионосферных слоев.

Определение рабочей скорости электромагнитных волн. Исходное соотношение для определения рабочей скорости v :

$$v = c/n, \quad (\text{III.4.16})$$

где $c=299792458$ м/с — скорость света в вакууме; n — показатель преломления воздуха. Таким образом, задача определения скорости целиком сводится к задаче определения показателя преломления. Показатель преломления зависит от температуры, давления и влажности воздуха, которые надо измерить, чтобы вычислить n . Для оптического диапазона n зависит также от длины волны излучения λ .

Различают фазовую и групповую скорость и соответственно фазовый и групповой показатели преломления, связанные соотношением Рэлея

$$n_{\text{гр}} = n_{\text{ф}} - \lambda \frac{dn_{\text{ф}}}{d\lambda}. \quad (\text{III.4.17})$$

При лазерной интерферометрии должен определяться фазовый показатель преломления. При относительных интерференционных измерениях в белом свете и при любых, в том числе лазерных, светодальномерных измерениях должен определяться групповой показатель преломления. В радиодиапазоне групповая и фазовая скорости и соответственно групповой и фазовый показатели преломления из-за практического отсутствия дисперсии (зависимости от длины волны) совпадают.

Из-за малого отличия показателя преломления воздуха от единицы часто удобнее пользоваться индексом преломления, обозначаемым буквой N и показывающим, на сколько миллионных долей показатель преломления больше единицы. Индекс и показатель преломления связаны соотношениями:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6; \quad n = 1 + N \cdot 10^{-6}. \quad (\text{III.4.18})$$

Например, $n=1,000298$; $N=298$. Одну миллионную долю — единицу шестого знака — иногда называют N -единицей.

Задача определения показателя или индекса преломления воздуха при измерении расстояний содержит два аспекта. Первый из них — определение показателя преломления в отдельной точке. Вторым — проблема осреднения вдоль всей трассы.

Определение показателя (индекса) преломления в отдельной точке. В оптическом диапазоне индекс преломления воздуха при температуре T (по абсолютной шкале), давлении P и влажности e вычисляется по формуле Баррелла—Сирса:

для фазового индекса преломления

$$N_{\text{ф}} = (N_0)_{\text{ф}} \frac{T_0}{P_0} \frac{P}{T} - \left(17,045 - \frac{0,1857}{\lambda^2} \right) \frac{e}{T}; \quad (\text{III.4.19})$$

для группового индекса преломления

$$N_{\text{гр}} = (N_0)_{\text{гр}} \frac{T_0}{P_0} \cdot \frac{P}{T} - \left(17,045 - \frac{0,5572}{\lambda^2} \right) \frac{e}{T}. \quad (\text{III.4.20})$$

В этих формулах $(N_0)_{\text{ф}}$ и $(N_0)_{\text{гр}}$ — фазовый и групповой индексы преломления для стандартных условий — сухого воздуха при температуре T_0 и давлении P_0 , содержащего 0,03 % углекислого газа. Эти стандартные индексы преломления зависят от длины волны и вычисляются по дисперсионной формуле Коши:

$$(N_0)_{\text{ф}} = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}; \quad (\text{III.4.21})$$

ТАБЛИЦА 2

Дисперсионные коэффициенты	Стандартные условия	
	международные: $T_0 = 228,16 \text{ K}/t_0 = +15^\circ \text{C},$ $P_0 = 760 \text{ тор}$	$T_0 = 273,16 \text{ K}/t_0 = 0^\circ \text{C},$ $P_0 = 760 \text{ тор}$
A	272,613	287,583
B	1,5294	1,6134
C	0,01367	0,01442

$$(N_0)_{\text{гр}} = A + \frac{3B}{\lambda^2} + \frac{5C}{\lambda^4}, \quad (\text{III.4.22})$$

где A, B, C , — дисперсионные коэффициенты. В табл. 2 приведены значения дисперсионных коэффициентов по Эдлену при двух наиболее распространенных значениях T_0 и P_0 . Значения коэффициентов даны в N -единицах. При использовании этих значений давление и влажность (парциальное давление водяных паров) в формулах (III.4.19) и (III.4.20) надо выражать в торах (миллиметрах ртутного столба).

В формулах (III.4.19)—(III.4.22) λ — эффективная длина волны света в вакууме, выражаемая в микрометрах. В случае лазерного источника эффективная длина волны равна длине волны излучения лазера. При использовании источников с широким спектром эффективная длина волны есть длина волны, соответствующая максимуму результирующей спектральной характеристики дальнометрического устройства, получаемой как произведение спектральных характеристик источника излучения, оптики (включая модулятор света, оптические фильтры и т. п.), атмосферы и приемника света.

Поскольку при подстановке в формулы (III.4.19) и (III.4.20) любых из указанных в табл. 2 стандартных значений T_0 и P_0 используется соответствующее им значение N_0 , результат вычисления по этим формулам не зависит от выбора стандартных условий.

Для распространенного случая, когда источником света служит гелий-неоновый лазер (длина волны в вакууме 0,632991 мкм), формулы для N приобретают вид:

$$N_{\text{ф}} = 104,843 \frac{P}{T} - 16,582 \frac{e}{T};$$

$$N_{\text{гр}} = 107,867 \frac{P}{T} - 15,654 \frac{e}{T}.$$

В радиодиапазоне индекс преломления вычисляется по формуле Фрума—Эссена

$$N = 103,49 \frac{P}{T} - 17,23 \frac{e}{T} + 495820 \frac{e}{T^2}, \quad (\text{III.4.23})$$

где P и e выражены в мм рт. ст. (торах).

Средняя квадратическая ошибка в индексе преломления, обусловленная ошибками определения температуры, давления и влажности (m_T, m_P и m_e соответственно), дается выражением

$$m_N = \sqrt{\left(\frac{\partial N}{\partial T}\right)^2 m_T^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial P}\right)^2 m_P^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial e}\right)^2 m_e^2}.$$

ТАБЛИЦА 3

Производные	Для света	Для радиоволн
$\partial N/\partial T$	$\approx 1,0/K$	$-1,4/K$
$\partial N/\partial P$	$+0,4/\text{тор}$	$+0,4/\text{тор}$
$\partial N/\partial e$	$-0,05/\text{тор}$	$+5,9/\text{тор}$

В табл. 3 приведены (в N -единицах) значения производных $\partial N/\partial T$, $\partial N/\partial P$ и $\partial N/\partial e$ для световых волн и радиоволн при средних метеорологических условиях ($T=288$ К, $P=745$ тор, $e=12$ тор).

Из табл. 3 видно, что для радиоволн $\partial N/\partial e$ более чем в 100 раз превышает значение этой же производной для световых волн. Это означает, что та часть ошибки в индексе преломления, которая обусловлена неточным определением влажности, в радиодиапазоне на два порядка больше, чем в оптическом диапазоне, что свидетельствует о важности точного определения влажности воздуха при использовании радиоволн.

Измерение метеозаэлементов. Для измерения давления обычно используют барометр-анероид, а для точного измерения температуры и влажности — аспирационный психрометр Ассмана. Последний состоит из двух одинаковых термометров, ртутный резервуар одного из которых смачивается дистиллированной водой, и аспиратора (вентилятора), приводимого в действие пружинным механизмом и создающего принудительный обдув термометров окружающим воздухом. Температура определяется непосредственно по сухому термометру ($^{\circ}\text{C}$), а абсолютная влажность e вычисляется по показаниям сухого (t_c) и смоченного ($t_{\text{вл}}$) термометров и величине атмосферного давления P в соответствии с эмпирической формулой Шпрунга

$$e = E - \frac{P}{k} (t_c - t_{\text{вл}}),$$

где E — давление насыщенных водяных паров при температуре смоченного термометра; $k = \frac{a}{1 + t_{\text{вл}}/872,8}$; a — психрометрическая постоянная (постоянная Ассмана), равная 1510, если ртутный резервуар смоченного термометра покрыт водой, и 1756, если он покрыт льдом. Значения k и E приведены в таблицах работы [6].

Получение среднего вдоль трассы показателя преломления. Так как метеозаэлементы T , P , e (а следовательно, и n) меняются вдоль трассы неконтролируемым образом, необходимо в соотношение (III.4.16) подставлять средний вдоль всей трассы (среднеинтегральный) показатель преломления $\langle n \rangle$, определяемый соотношением

$$\langle n \rangle = \frac{1}{D} \int_0^D n(x) dx, \quad (\text{III.4.24})$$

где D — длина трассы; x — текущее значение расстояния. Однако точное определение $\langle n \rangle$ представляет собой весьма сложную задачу, строго решаемую лишь аппаратными методами дальномерной рефрактометрии [8]. Наиболее перспективен дисперсионный метод, основанный на использовании двух (или трех) различных волн излучения. В настоящее время аппаратная реализация дисперси-

онного метода (двухволновые светодальномеры) еще не достигла стадии выхода в практику геодезических измерений. Приближенное, но достаточно удовлетворительное решение заключается в измерении метеозлементов в нескольких отдельных точках трассы с последующим их осреднением. Однако и этот путь настолько сложен практически, что при производственных измерениях неприменим. Поэтому в практике аппроксимируют $\langle n \rangle$ значением, полученным по измерениям метеозлементов лишь в двух крайних точках измеряемой линии. Если в начальной точке линии получены значения T_1, P_1, e_1 , а в конечной — T_2, P_2, e_2 , то в формулы Баррелла — Сирса или Фрума—Эссена подставляют средние значения:

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2}; \quad P = \frac{P_1 + P_2}{2}; \quad e = \frac{e_1 + e_2}{2}.$$

При короткой линии (менее 3 км) и небольшом превышении между ее концами, а также при измерениях дальномерами не слишком высокой инструментальной точности допускается выполнять метеоизмерения лишь на одном конце трассы (в точке стояния прибора).

Определение среднеинтегрального показателя преломления на наклонных трассах. Если линия имеет значительный угол наклона к горизонту, например при измерении дальномерами расстояний до высоко расположенных точек (в горных районах) или при измерениях радиогеодезическими системами, в которых подвижная станция находится на самолете, то среднеинтегральный показатель преломления следует вычислять с использованием той или иной модели атмосферы — зависимости индекса преломления от высоты H . Такая зависимость может приниматься линейной с постоянным градиентом dN/dH (простейшая модель, дающая низкую точность), параболической или экспоненциальной. Наиболее удовлетворительной моделью в смысле приближения к реальному распределению N по высоте в пределах тропосферы (до 11—12 км) считается биэкспоненциальная модель по Бину и Даттону [2], описываемая уравнением

$$N(H) = N_c e^{-H/H_c} + N_b e^{-H/H_b}, \quad (\text{III. 4. 25})$$

где N_c и N_b — индексы преломления сухого воздуха и водяного пара на поверхности Земли; H_c и H_b — так называемые масштабы высот (высоты, на которых индексы преломления уменьшаются в $e=2,718$ раз по сравнению с N_c и N_b). Значения N_c и N_b вычисляются по метеоизмерениям на поверхности Земли (в нижней точке трассы) по формулам:

для радиоволн

$$N_c = 103,49 \frac{P - e}{T}; \quad N_b = \left(86,26 + \frac{495820}{T} \right) \frac{e}{T}; \quad (\text{III. 4. 26})$$

для световых волн

$$N_c = N_0 \frac{T_0}{P_0} \cdot \frac{P - e}{T}; \quad N_b = \left[N_0 \frac{T_0}{P_0} - \left(17,045 - \frac{0,5572}{\lambda^2} \right) \right] \frac{e}{T}. \quad (\text{III. 4. 27})$$

В этих формулах P и e — в торрах (мм рт. ст.); λ — в микрометрах.

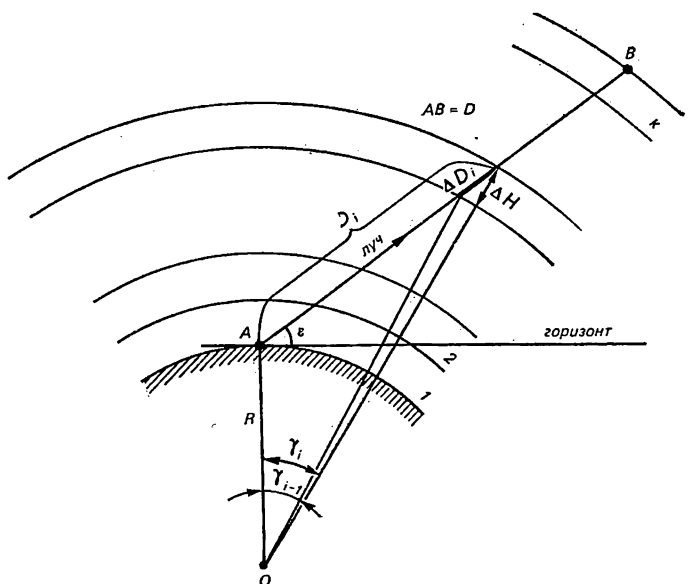


Рис. 7. Схема прохождения луча в сферически-слоистой атмосфере (без учета рефракционного искривления)

С использованием биэкспоненциальной модели атмосферы выражение для среднеинтегрального индекса преломления (при условии пренебрежения горизонтальным градиентом индекса преломления, который обычно мал) имеет вид

$$\langle N \rangle = \frac{N_c}{D} \int_0^D e^{-H/H_c} dx + \frac{N_b}{D} \int_0^D e^{-H/H_b} dx. \quad (\text{III.4.28})$$

Для практического использования этой формулы атмосферу разбивают на сферические концентрические слои равной толщины ΔH с предположением о постоянстве вертикального градиента в каждом слое, что дает возможность заменить интегралы в (III.4.28) суммами. Если трасса электромагнитной волны пересекает k слоев (рис. 7), то суммы будут состоять из k членов. Каждому члену суммы соответствует высота H_i , которую можно представить, отнеся ее к середине слоя, в виде $H_i = \Delta H \left(i - \frac{1}{2} \right)$, где i — номер слоя, отсчитываемый от поверхности Земли (нижней точки трассы), и формула (III.4.28) принимает вид

$$\langle N \rangle = \frac{N_c}{D} \sum_{i=1}^k \exp \left[-\frac{\Delta H}{H} \left(i - \frac{1}{2} \right) \right] \Delta D_i +$$

$$+ \frac{N_B}{D} \sum_{i=1}^k \exp \left[-\frac{\Delta H}{H} \left(i - \frac{1}{2} \right) \right] \Delta D_i. \quad (\text{III.4.29})$$

Элементы ΔD_i вычисляются по формуле

$$\Delta D_i = D_i - D_{i-1} = \sqrt{(R + \Delta H i)^2 - (R \cos \varepsilon)^2} - \sqrt{[R + \Delta H (i-1)]^2 - (R \cos \varepsilon)^2}, \quad (\text{III.4.30})$$

где R — радиус Земли; ε — угол наклона линии; k — число слоев определяется по формуле

$$k = \frac{H'}{\Delta H}, \quad (\text{III.4.31})$$

где H' — высота конечной точки трассы. При отсутствии непосредственных данных об этой высоте ее можно вычислить из соотношения

$$H' = \sqrt{R^2 + 2RD \sin \varepsilon + D^2} - R, \quad (\text{III.4.32})$$

где D — приближенная длина измеряемой линии.

Масштабы высоты для территории Европы и большей части Азии в среднем можно принять следующими: $H_c = 9,4$ км; $H_B = 2,6$ км. Если имеется возможность выполнить метеоизмерения в конечной точке трассы и, следовательно, получить [по формулам (III.4.26) или (III.4.27)] индексы преломления в этой точке N'_c и N'_B , то это позволяет определить конкретные масштабы высоты для условий измерений (скорректировать биэкспоненциальную модель) по формулам:

$$H_c = \frac{H'}{\ln N_c - \ln N'_c}; \quad (\text{III.4.33})$$

$$H_B = \frac{H'}{\ln N_B - \ln N'_B} \quad (\text{III.4.34})$$

и тем самым существенно улучшить результаты вычисления по формуле (III.4.29).

Формула (III.4.29) решает задачу определения среднеинтегрального индекса преломления на наклонных трассах с углом наклона ε к горизонту. Для углов $45^\circ < \varepsilon < 90^\circ$, когда можно принять $\Delta D_i = \text{const}$, эта формула упрощается

$$\begin{aligned} \langle N \rangle = & \frac{N_c}{k} \sum_{i=1}^k \exp \left[-\frac{\Delta H}{H} \left(i - \frac{1}{2} \right) \right] + \\ & + \frac{N_B}{k} \sum_{i=1}^k \exp \left[-\frac{\Delta H}{H_B} \left(i - \frac{1}{2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (\text{III.4.35})$$

Точность определения $\langle N \rangle$ будет тем выше, чем меньше взят интервал ΔH по высоте. Уменьшение ΔH увеличивает число слоев k , т. е. число членов суммы, что значительно увеличивает объем вычис-

лений, поэтому такого рода вычисления целесообразно выполнять на ЭВМ.

Определение рефракционного удлинения траектории электромагнитной волны. Рефракционное удлинение траектории с достаточной во всех случаях точностью представляется величиной

$$\Delta D_r = \frac{D^3}{24\rho^2}, \quad (\text{III.4.36})$$

где D — измеренная длина линии; ρ — радиус кривизны траектории волны. Радиус кривизны в приближении сферической Земли определяется выражением

$$\rho = \frac{n}{\sin \alpha \left(\frac{dn}{dH} \right)}, \quad (\text{III.4.37})$$

где α — угол, под которым волна входит в атмосферу (угол падения); dn/dH — вертикальный градиент показателя преломления.

При небольших углах наклона трассы к горизонту $\sin \alpha \approx 1$ и

$$\rho = \frac{1}{dn/dH} = \frac{10^6}{dN/dH}. \quad (\text{III.4.38})$$

Аналитическое выражение для градиента можно получить в любой модели атмосферы $N(H)$, продифференцировав ее по высоте. Обычно для определения ρ , в отличие от задачи определения $\langle N \rangle$, достаточно использовать линейную модель атмосферы, в которой градиент индекса постоянен и равен $(-40N)$ -ед/км для радиоволн и $(-20N)$ -ед/км для световых волн. Постоянство градиента означает, что радиус кривизны в любой точке траектории одинаков, т. е. траектория принимается за дугу окружности с радиусом:

для радиоволн

$$\rho = \frac{10^6}{40} = 25\,000 \text{ км};$$

для света

$$\rho = \frac{10^6}{20} = 50\,000 \text{ км}.$$

В табл. 4 приведены значения рефракционного удлинения траектории для различных расстояний.

Из таблицы видно, что при измерении расстояния порядка 50 км поправка за рефракцию составляет не более $2 \cdot 10^{-7}$ от расстояния.

ТАБЛИЦА 4

D , км	Рефракционное удлинение траектории ΔD_r , м	
	для света	для радиоволн
50	0,002	0,008
100	0,017	0,07
200	—	0,53
300	—	1,80
400	—	4,27
500	—	8,33

Такая величина при обычных свето- и радиодальномерных измерениях может не учитываться. Учет поправки за рефракцию необходим в случае измерения больших (более 100 км) расстояний.

Б. СВЕТОДАЛЬНОМЕРЫ

III.4.4. Общие сведения

Светодальномер состоит из приемопередатчика и пассивного отражателя, устанавливаемых в конечных точках измеряемой линии. Отражатель может быть призмённым или зеркально-линзовым. Чаще всего используется призмённый отражатель, состоящий из различного числа угловых призм (трипельпризм), смонтированных в общем корпусе.

Приемопередатчик фазового светодальномера состоит в общем случае из следующих элементов: источника излучения, модулятора излучения, генератора модулирующей (масштабной) частоты, передающей и приемной оптических систем и приемно-фазометрической части, включающей в себя приемник излучения, аналоговый или цифровой фазометр и оконечное индикаторное устройство.

В качестве источника излучения используются, за редким исключением, либо газовый лазер на смеси гелий—неон (He—Ne), излучающий в красной области спектра (длина волны излучения $\lambda = 0,63$ мкм), либо светодиод на арсениде галлия (GaAs), излучающий в ИК области ($\lambda = 0,9$ мкм).

В дальномерах с лазерами в качестве модулятора применяется ячейка Погкельса на кристалле типа KDP или ячейка Керра с нитробензолом. В дальномерах со светодиодами используется внутренняя модуляция излучения.

Приемником излучения обычно служит либо фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), либо, реже, фотодиод.

По типу схемы светодальномеры подразделяются на две группы: 1) светодальномеры, в которых фазовое сравнение опорного и отраженного сигналов происходит на высокой частоте модуляции света, и 2) гетеродинные светодальномеры, в которых фазовое сравнение переносится на низкую частоту, образуемую в результате смешения частоты модуляции и частоты вспомогательного генератора (гетеродина) в опорном и сигнальном каналах.

Неоднозначность в современных приборах разрешается, в подавляющем большинстве случаев, введением набора нескольких фиксированных частот модуляции света.

Для исключения в процессе измерений влияния неустойчивости постоянной поправки прибора предусматривается линия оптического короткого замыкания (ОКЗ).

Фазовые измерения производятся либо аналоговым (компенсационным), либо цифровым методом. В последнем случае измерения могут быть автоматизированы вплоть до выдачи результата на электронное цифровое табло и на внешний накопитель данных (перфоленту, магнитный носитель и др.). В новейших приборах задачи управления, вычисления и контроля решаются с помощью микропроцессоров или микро-ЭВМ.

Современные фазовые светодальномеры можно разделить на три группы:

1. Светодальномеры большой дальности действия, три помощи которых можно измерять расстояния до 15—50 км со средней квадра-

Современные фазовые

Прибор	Страна-изготовитель	Дальность действия, км	Точность	Потребляемая мощность, Вт
1	2	3	4	5

Светодальномеры с большой дальностью

«Гранат»	СССР	20	5 мм + 2 мм/км	40
СГ-3	СССР	30	4 мм + 1 мм/км	500
Геодиметр 600	Швеция	40	5 мм + 1 мм/км	26
Геодолит 3G	США	80	1 мм + 1 мм/км	400
Рейнджер VA	США	25	5 мм + 1 мм/км	85
Рейнджмастер III	США	60	3 мм + 1 мм/км	120

Светодальномеры повышенной и наивысшей

МСД-1М	СССР	0,5	2 мм + 5 мм/км	2,5
ДВСД-1200	СССР	0,25	0,25 мм + 1 мм/км 0,15 мм + 0,2 мм/км	90
ДК 001	СССР	0,6	0,8 мм + 1,5 мм/км	25
Мекометр ME 3000	Швейцария	3	0,2 мм + 1 мм/км	16
Теллуrometer MA 100	Великобритания	2	1,5 мм + 2 мм/км	15

Светодальномеры массового

А. Несовмещае

2СМ-2	СССР	2	2 см + 1 см/км	15
ЕОК 2000	ГДР	2	10 мм	8

Б. Совмещае

3СМ-2 (СТ-5)	СССР	3	10 мм + 5 мм/км	5

ТАБЛИЦА 5

светодиодномеры

Источник излучения	Модулятор	Основная частота модуляции, МГц	Количество частот	Метод фазовых измерений	Масса прибора (без источника питания), кг	Примечание
6	7	8	9	10	11	12

действия (геодезические)

He-Ne-лазер	Ячейка Керра	30	4	Аналоговый	15	Выпуск прекращен
He-Ne-лазер	Ячейка Керра	6,7—10	Перем.	Аналого-цифровой	75	
He-Ne-лазер	Ячейка Покельса	30	4	Аналоговый	15	
He-Ne-лазер	Ячейка Покельса	50	5	Цифровой	80	
He-Ne-лазер	Ячейка Покельса	15	4	Цифровой	18	
He-Ne-лазер	Ячейка Покельса	15	4	Цифровой	27	

точности для коротких расстояний

GaAs-диод	Внутренняя модуляция	150	3	Аналоговый	8,6	Точность указана для компенсационного способа и способа сравнения
He-Ne-лазер	Ячейка Покельса	1200	1	Аналоговый	27	
GaAs-диод	Внутренняя модуляция	750	2	Цифровой	8+10	
Ксеноновая лампа	Ячейка Покельса	500	5	Аналоговый	18,7	
GaAs-диод	Внутренняя модуляция	75	4	Цифровой	17	

применения (топографические)

мые приборы

GaAs-диод	15	3	Цифровой	4,6+7	Выпуск прекращен
GaAs-диод	30	3	Аналоговый	12	

мые приборы

Импульсный GaAs-диод	15		Цифровой	4,5	Импульсно-фазовый

Прибор	Страна-изготовитель	Дальность действия, км	Точность	Потребляемая мощность, Вт
1	2	3	4	5
СМ-5	СССР	0,5	3 см	5
Геодиметр 122	Швеция	до 1,5—3	5 мм+5 мм/км	24
Геодиметр 14А	Швеция	до 6—15	5 мм+5 мм/км	24
Дистомат DI20	Швейцария	до 9—14	5 мм+1 мм/км	5
CI-450	США	3	5 мм+5 мм/км	9
DM-503	Швейцария	до 5	3 мм+2 мм/км	11
Eldi 2	ФРГ	3	5 мм+2 мм/км	5
Авторейнджер III	США	4	5 мм+2 мм/км	10
RED 2	Япония	до 5	5 мм+5 мм/км	
RED MINI	Япония	0,8	5 мм+5 мм/км	3
DM-C3	Япония	до 3,2	5 мм+5 мм/км	

Электронные

Прибор	Страна-изготовитель	Дальномерная		
		Дальность, км	Точность	Источник излучения

А. С визуальным

Та 5	СССР	2	20 мм	GaAs-диод
ЕОТ 2000	ГДР	До 2	10 мм	GaAs-диод
SM 41	ФРГ	До 1,8	20 мм+2 мм/км	GaAs-диод
RSM4	ФРГ	До 3	10 мм+2 мм/км	GaAs-диод
SDM3	Япония	1,8	5 мм+5 мм/км	GaAs-диод

Продолжение табл. 5

Источник излучения	Модулятор	Основная частота модуляции, МГц	Количество частот	Метод фазовых измерений	Масса прибора (без источника питания), кг	Примечание
6	7	8	9	10	11	12
Импульсный GaAs-диод		15	2	Цифровой	4,4+3,6	Импульсно-фазовый
GaAs-диод		15	2	Цифровой	2,8	
GaAs-диод		15	2	Цифровой	2,5	
GaAs-диод		4,5	3	Цифровой	3,7	
GaAs-диод		15		Цифровой	2,6	
GaAs-диод		15	2	Цифровой	1,6	
GaAs-диод		15	2	Цифровой	4,2	
GaAs-диод		15	2	Цифровой	2,4	
GaAs-диод		15	3	Цифровой	2	
GaAs-диод				Цифровой	0,9	
GaAs-диод				Цифровой	2,0	

ТАБЛИЦА 6

тахеометры

часть		Угломерная часть			Масса, кг	Примечание
Модуля- тор	Основная частота модуляции	Тип теодолита (по способу считы- вания углов)	Точность измерения углов, мгон			
			горизон- тальных	верти- кальных		

отсчетом углов

	15	Шкаловой	2	3,5	8	1 мгон-3,2" Выпуск прекращен
	15	Шкаловой	0,3	0,3	11	
	15	Шкаловой	1	1	6,5	
	15	Шкаловой	1	1	7,5	
		С оптическим микрометром			7,2	

Прибор		Дальномерная		
		Дальность, км	Точность	Источник излучения

Б. С электронным

RECOTA	ГДР	До 3	5 мм+2 мм/км	GaAs-диод
RETA	ГДР	До 3	5 мм+2 мм/км	GaAs-диод
Геодиметр 710А	Швеция	До 5	5 мм+1 мм/км	He-Ne-лазер, 1 мВт
Геодиметр 140	Швеция	До 5,5	5 мм+3 мм/км	GaAs-диод
НР-3820А	США	До 5	5 мм+5 мм/км	GaAs-диод
Elta 2	ФРГ	До 5	10 мм+2 мм/км	GaAs-диод
Elta 20	ФРГ	До 4	10 мм+2 мм/км	GaAs-диод
Elta 4	ФРГ	До 3	10 мм+2 мм/км	GaAs-диод
Такимат ТС 1	Швейцария	До 2	5 мм+5 мм/км	GaAs-диод
ЕТ-1	Япония	2	5 мм+5 мм/км	GaAs-диод

тической ошибкой $[(5-10) \text{ мм} + (1-2) \text{ мм/км}]$. Они предназначены для измерения сторон в государственных геодезических сетях, а также базисов космической триангуляции и триангуляции высших классов.

2. Светодальномеры малой дальности действия, при помощи которых можно измерять расстояния до нескольких километров (до 1—3) с ошибкой 2 см. Они предназначены для измерения расстояний в геодезических сетях сгущения и для выполнения топографических съемок. В отдельных случаях дальность действия приборов этой группы может превышать указанный предел, достигая 10—15 км.

3. Светодальномеры повышенной и наивысшей точности для коротких расстояний, при помощи которых можно измерять расстояния 0,1—3 км с ошибкой 2 мм и менее. Они предназначены для прецизионного измерения расстояний при решении различных задач прикладной геодезии, в маркшейдерских работах и измерениях специального назначения.

В СССР в соответствии с ГОСТ 19223—82 указанным группам светодальномеров приданы соответствующие буквенные индексы:

часть		Угломерная часть		Масса, кг	Примечание
Модулятор	Основная частота модуляции	Тип теодолита (по способу считывания углов)	Точность измерения углов, мгон		
			горизонтальных	вертикальных	

отсчетом углов

Ячейка-Керра	15	Кодовый с интерполятором	0,5	0,5	12,8	Выпуск прекращен
	15	Кодовый с интерполятором	1	1	10,5	
	30	Цифровой (инкрементальный)	0,5	0,5	25	
					7,5	Выпуск прекращен
	15	Кодовый с интерполятором	0,2	0,2	9,5	
	15	Кодовый с интерполятором	0,2	0,2	13,5	
	15	Кодовый с интерполятором	0,3	0,3	13,5	Модификация Elta 3 с угловой точностью 0,6мгон Модификация Elta 46
	15	Цифровой (инкрементальный)	1	1	6,5	
	15	Цифровой (инкрементальный)	0,6	0,6	9,8	
		Цифровой (инкрементальный)	0,6	1	6,0	

1) Г (геодезические), 2) Т (топографические), 3) П (применяемые в прикладной геодезии). Эти буквы добавляются к букве С, обозначающей слово «светодальномер», после чего указываются цифры, обозначающие дальность действия прибора. Например, СТ-3 означает: светодальномер топографический с дальностью действия 3 км.

Светодальномеры второй группы (топографические) часто выполняются в виде совмещаемых приборов. Это означает, что они могут использоваться не только как автономные светодальномеры, но и как дальномерные насадки на теодолит, придавая полученной комбинации приборов функции электронного тахеометра. В этом случае к буквенно-цифровому обозначению добавляется буква Н (насадка).

Маркшейдерское исполнение прибора обозначается дополнительной буквой М.

Отдельную категорию приборов составляют электронные тахеометры неразъемной конструкции.

Основные технические характеристики современных светодальномеров представлены в табл. 5, а электронных тахеометров не-

разъемной конструкции — в табл. 6. Ниже приводятся более подробные сведения об отечественных и некоторых зарубежных приборах.

III.4.5. Геодезические светодальномеры

Светодальномер «Гранат»

Лазерный дальномер «Гранат», разработанный в ЦНИИГАиК, — модернизированный вариант более раннего дальномера «Кварц». Отличается от «Кварца» меньшими габаритами и массой, меньшей потребляемой мощностью вследствие применения транзисторов вместо ламп. Несколько меньший диаметр оптики снизил дальность действия до 20 км вместо 30 (у дальномера «Кварц» в дневное время).

Блок-схема прибора приведена на рис. 8. Излучение от лазера направляется в модулятор (конденсатор Керра и поляризатор-анализатор) и при помощи оптической системы посылается на удаленный отражатель. Приемная оптическая система собирает часть отраженного потока и фокусирует его на катоде фотоумножителя. Перед ФЭУ установлен серый клин (ослабитель светового потока) СК и узкополосный интерференционный оптический фильтр ИФ. Рассмотрена возможность визуального наблюдения света через окуляр ОК. В приборе имеется линия оптического короткого замыкания (ОКЗ), в которую можно направить свет при помощи переключателя ОТР—ОКЗ.

Электронная часть дальномера выполнена по гетеродинной схеме с преобразованием частоты в ФЭУ. Модулирующая частота f_m от генератора подается на модулятор света и одновременно на смеситель, где смешивается с частотой f_r от гетеродина, образуя опорный сигнал низкой разностной частоты $\Delta f = 5$ кГц, выделяемой резонансным усилителем и подаваемой на один вход фазового детектора. На второй вход фазового детектора подается сигнал той же разностной частоты Δf , образуемой смещением частот f_m и f_r в ФЭУ (частота f_r подается на внешний электрод фотоумножителя, принимающего свет, модулированный частотой f_m) и выделяемой вторым резонансным усилителем. Стрелочный нуль-индикатор на

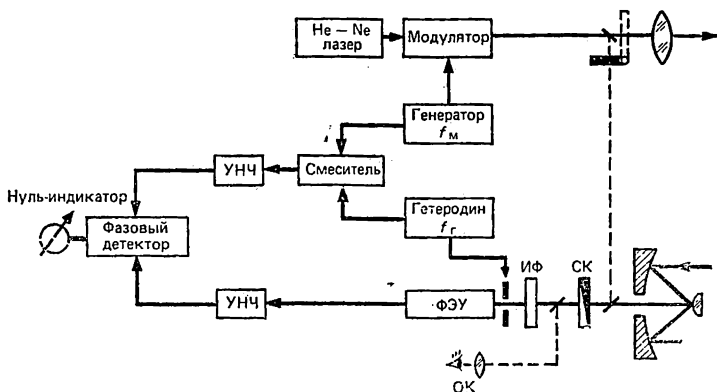


Рис. 8. Блок-схема светодальномера «Гранат»

выходе фазового детектора показывает нуль, когда разность фаз в опорном и сигнальном каналах приведена к 90° или 270° . Это приведение осуществляется фазовращателем, по шкале которого снимается отсчет.

Дальномер имеет четыре частоты модуляции, выбранных так, чтобы реализовать поразрядный способ определения полного расстояния. Номиналы частот: $f_1=29,970252$ МГц; $f_2=32,967276$ МГц; $f_3=30,269955$ МГц; $f_4=30,000222$ МГц. Эти значения удовлетворяют соотношению

$$f_1 = 10 (f_2 - f_1) = 100 (f_3 - f_1) = 1000 (f_4 - f_1).$$

Значение первой частоты таково, что вся шкала фазовращателя соответствует 5 м при стандартных условиях (температуре 0°C и давлении 760 тор в сухом воздухе). Шкала разбита на 100 делений; отсчет берется с точностью до 0,1 деления, т. е. до 5 мм. Для разности частот (f_2-f_1) вся шкала соответствует 50 м, для (f_3-f_1) — 500 м и для (f_4-f_1) — 5000 м. Поэтому измерения на всех четырех частотах позволяют однозначно получить расстояние в пределах 5 км; число полных 5-км отрезков определяют по приближенному значению расстояния, которое надо знать с ошибкой не более $\pm 2,5$ км. Чтобы не образовывать разности отсчетов на f_2 и f_1 , f_3 и f_1 , f_4 и f_1 , в отсчетном устройстве предусмотрено запоминание отсчета на частоте f_1 (сдвигом шкалы на нуль) и при переходе на частоты f_2 , f_3 , f_4 отсчеты по шкале выражают собой непосредственно разности отсчетов. Все отсчеты делаются при нулевом показании индикатора. Запоминание отсчета на частоте f_1 выполняется сначала при работе на линию ОКЗ, а затем при работе на отражатель (ОТР), так что снимаемые со шкалы отсчеты представляют собой разности результатов ОТР—ОКЗ, соответствующие частотам f_1 , (f_2-f_1) , (f_3-f_1) , (f_4-f_1) . Эти отсчеты позволяют получить последовательные десятичные разряды в удвоенном значении расстояния. Деля результат на 2, получают полное измеряемое расстояние (в пределах 5 км), которое оказывается определенным с точностью до 1 см («грубые» измерения). Уточнение последнего разряда (до 1 мм) выполняют двумя приемами измерений на одной первой частоте («точные» измерения). Один прием точных измерений включает в себя отсчеты при работе на отражатель и на ОКЗ при каждом из четырех положений переключателя фазы (на рис. 8 не показан), сдвигающего фазу опорного сигнала скачками на 90° для ослабления циклической ошибки фазовращателя.

Светодалномер СГ-3

Отечественный лазерный дальномер СГ-3 — прибор с плавным изменением частоты модуляции, в котором предусмотрена возможность автоматической работы после ряда соответствующих ручных операций. В приборе имеется счетно-решающее устройство, выдающее расстояние на 8-разрядное световое табло.

Измерения выполняются сначала в режиме «грубо», при котором расстояние определяется с точностью до 3 м, и в режиме «точно», при котором каждый отсчет расстояния на табло получают до 1 мм. Указанная выше точность прибора соответствует среднему из 10 отсчетов.

Дальномер СГ-3 довольно тяжел и громоздок: он состоит из премопередатчика и контрольно-измерительной аппаратуры, содержащей три блока (блок питания, блок управления и счетчик), устанавливаемых друг на друга. Питание прибора осуществляется от бензоэлектрического агрегата; время измерения линии очень велико

(1 час и более). Однако при всех этих недостатках он остается наиболее высокоточным отечественным прибором для измерения больших расстояний и поэтому до сих пор выпускается и используется на практике.

Светодальномер Геодиметр 600

Лазерный дальномер Геодиметр 600 выпускается шведской фирмой «AGA».

Прибор построен по гетеродинной схеме. Дальномер не автоматизирован, но фазовращатель механически сопряжен с решающим цифровым устройством, позволяющим получать результат измерения на каждой частоте в метрической форме. Сетка масштабных частот обеспечивает определение полного расстояния поразрядным способом.

В Геодиметре 600 применен фотоумножитель повышенной чувствительности, благодаря чему измерение расстояний до 200 м возможно без использования отражателя (по диффузному отражению от предмета, до которого измеряется расстояние). Для расстояний до 1,5 км может применяться пластмассовый отражатель типа катафота.

В Геодиметре 600 предусмотрены, в зависимости от требуемой точности, три программы измерений: ускоренная программа продолжительностью 1 мин, обеспечивающая точность $\pm(10 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км})$, стандартная программа (3 мин) с точностью $\pm(5 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км})$ и программа повышенной точности, занимающая 20–30 мин и обеспечивающая точность $\pm(1 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км})$.

III.4.6. Топографические светодальномеры

Отечественные светодальномеры серии СМ

Дальномеры этой серии включают в себя приборы 2СМ-2, СМ-5 и 3СМ-2 («Блеск»). Основные технические характеристики этих приборов указаны в табл. 5, а более подробное описание можно найти в работе [6].

Светодальномер СМ-5. Основной отличительной особенностью топографического светодальномера СМ-5 является использование импульсного метода измерения расстояния в схеме, характерной для фазового светодальномера гетеродинного типа с цифровым фазометром. Упрощенная блок-схема прибора приведена на рис. 9. Источник излучения И (GaAs-диод) излучает импульсы длительностью 15 нс. Частота следования импульсов задается кварцевым генератором и составляет 14,9855 МГц в режиме «точно» и в 100 раз меньше (149,855 кГц) в режиме «грубо». Излучение светодиода отражается от грани разделительной призмы П и направляется оптической системой на дистанцию. Приходящее с дистанции излучение через тот же объектив попадает на другую грань призмы П и поступает на ФЭУ. При помощи переключателя «дистанция—ОКЗ» можно направить излучение от светодиода на ФЭУ по линии ОКЗ, минуя дистанцию.

Сигналы от кварцевого (задающего) генератора и вспомогательного генератора (гетеродина), стабилизированного схемой фазовой автоподстройки частоты, смешиваются в смесителе, образуя опорный сигнал низкой разностной частоты (1498,55 Гц в режиме «точно» и 14,9855 Гц в режиме «грубо»). Сигнал от гетеродина подается также на фотокатод ФЭУ, принимающего излучение, модулированное с частотой основного генератора, вследствие чего на выходе ФЭУ также образуется сигнал низкой частоты, выделяемый

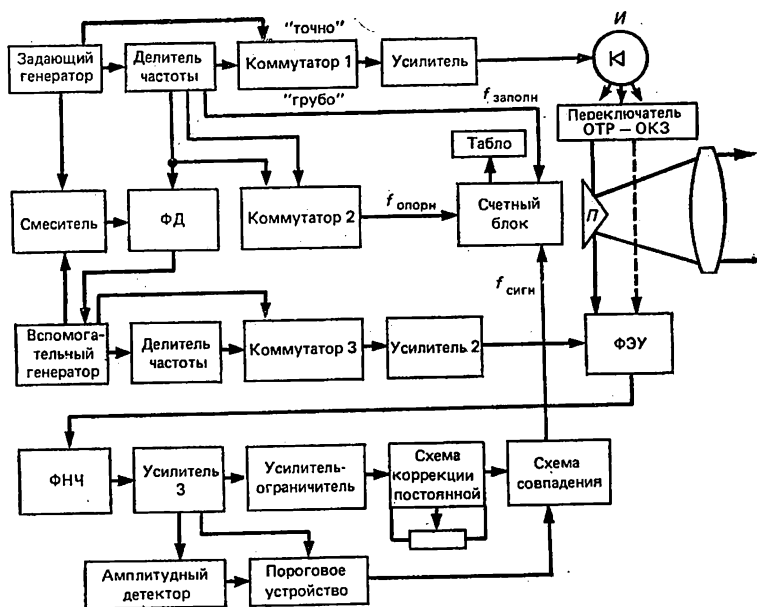


Рис. 9. Упрощенная блок-схема СМ-5

фильтром нижних частот ФНЧ и после определенной обработки снимаемый с выхода схемы совпадений. В результате на счетный блок поступают сигнальные, опорные и счетные (заполняющие) импульсы. Временной интервал между каждым опорным и следующим за ним сигнальным импульсом пропорционален измеряемой дистанции. Этот интервал измеряется путем счета числа импульсов заполнения за этот интервал. Частота следования заполняющих импульсов 1498,55 кГц. Все необходимые частоты получаются десятичным делением частоты генераторов.

Значения частот численно равны половине скорости света в стандартных условиях (соответствующей размерности) и поэтому подсчитываемое счетчиком и индицируемое на табло число импульсов заполнения дает непосредственно расстояние в метрической системе единиц. В режиме «грубо» цена единицы младшего разряда табло — 1 см, в режиме «точно» — 1 мм.

Каждый высвечиваемый на табло отсчет есть разность результатов измерений на дистанцию и на ОКЗ. Переключение режимов «дистанция—ОКЗ» происходит автоматически по командам программного устройства счетного блока. Появление отсчета на табло сопровождается звуковым сигналом.

Постоянную поправку прибора устанавливают равной нулю при помощи схемы коррекции постоянной поправки. Для этого перед измерением линии на объектив надевают блок контрольного отсчета (отражающую призму) и соответствующей ручкой на панели прибора устанавливают на табло указанный в паспорте контрольный отсчет, после чего снимают блок и выполняют грубые и точные изме-

рения. Среднее из всех отсчетов в режиме «точно» уточняет цифры трех последних разрядов в значении, полученном в режиме «грубо», и дает еще один более точный разряд (миллиметры) в измеряемом расстоянии.

Прибор имеет устройство блокировки счета при временном прерывании луча попадающими в створ линии посторонними предметами. После устранения помехи работа автоматически возобновляется.

Дальномер может сниматься с основания и устанавливаться на теодолиты серии Т2.

Светодальномер «Блеск» (ЗСМ-2) является усовершенствованной модификацией дальномера СМ-5 и отличается от него повышенной дальностью действия и точностью измерений. Диапазон измеряемых расстояний — от 0,2 м до 1000 м с отражателем из одной призмы и до 3000 м с отражателем из шести призм. При увеличении количества призм до 18 дальность действия возрастает до 5000 м. Ошибка измерения линии составляет $\pm (10 \text{ мм} + 5 \text{ мм/км})$. Остальные основные характеристики те же, что и у СМ-5. Несколько изменены параметры зрительной трубы (увеличение и поле зрения). В схему внесены некоторые изменения радиотехнического плана. Конструкция и внешний вид прибора аналогичны СМ-5. Так же как и СМ-5, дальномер «Блеск» может быть снят с основания и использован в виде светодальномерной насадки на теодолиты серии Т2.

Электронный тахеометр Та5

Отечественный электронный тахеометр Та5 представляет собой комбинацию шкалового теодолита со светодальномером и вычислительного микропроцессорного устройства. Отсчеты с лимбов теодолита снимаются визуально и вводятся в вычислитель при помощи клавиатуры. Вычислитель выдает на цифровое табло горизонтальное проложение, превышение, приращения прямоугольных координат и зенитное расстояние с учетом поправки за место зенита. Результаты измерений и вычислений могут быть автоматически введены в накопитель информации для последующей обработки на ЭВМ. Данные светодальномерной части прибора указаны в табл. 5. Точность измерения горизонтальных углов составляет 2 мгон, зенитных расстояний — 3,5 мгон.

Зарубежные топографические светодальномеры и электронные тахеометры

Все современные зарубежные топографические светодальномеры массового применения (табл. 5) являются либо совмещаемыми приборами, либо конструктивно неразъемной частью электронных тахеометров. Все приборы такого рода отличаются высоким уровнем автоматизации. Расстояние выдается в цифровом виде на табло. В некоторых электронных тахеометрах предусмотрено представление результатов измерений в виде, удобном для ввода в ЭВМ, а в ряде случаев электронный тахеометр имеет встроенную ЭВМ, снабженную набором программ для окончательной обработки данных, вплоть до вычисления координат пунктов съемочной сети (Геодиметр 710А, Elta 2, Elta 20).

Во всех приборах этого типа источником излучения является GaAs-диод с длиной волны порядка 0,9 мкм (инфракрасное излучение) и внутренней модуляцией, за исключением прибора Геодиметр 710А, в котором источник излучения He-Ne-лазер ($\lambda=0,6328 \text{ мкм}$) и модулятор — ячейка Керра.

III.4.7. Светодальномеры повышенной и наивысшей точности

К дальномерам повышенной точности (ошибка 2—5 мм на всю длину измеряемой линии) относятся светодальномеры МСД-1М и Теллуrometer МА 100*, а к дальномерам наивысшей точности (ошибка составляет доли миллиметра или не более 1 мм/км, т.е. $1 \cdot 10^{-6}$) относятся приборы Мекометр МЕ 3000, ДК 001 и ДВСД-1200 — дальномеры с СВЧ модуляцией света.

Светодальномер МСД-1М

Отечественный маркшейдерский светодальномер МСД-1М разработан во ВНИИ горной геомеханики и маркшейдерского дела. Дальномер построен по схеме с фазовым детектированием в ФЭУ на частоте модуляции света. Блок-схема прибора показана на рис. 10. Модулирующее напряжение от генератора подается на светодиод через фазовый манипулятор и усилитель. Манипулятор осуществляет периодическую переброску фазы на 180° с частотой 80 Гц, задаваемой генератором импульсов. То же модулирующее напряжение через фазовращатель и усилитель поступает на внешний электрод фотоумножителя. С выхода ФЭУ снимается продетектированный сигнал в виде прямоугольных импульсов с частотой манипуляции и амплитудой, зависящей от разности фаз между опорным и принятым с дистанции сигналами. Этот сигнал после усилителя поступает на один вход синхронного амплитудного детектора, на второй вход которого подаются импульсы частоты манипуляции от генератора импульсов. С выхода синхронного детектора снимается постоянное напряжение, пропорциональное косинусу разности фаз и регистрируемое стрелочным нуль-индикатором. Индикатор показывает нуль, если разность фаз приведена к 90 или 270° .

Небольшая часть излучения, выходящего из передающего объектива O_1 , при помощи призмы P_1 поступает в оптическую линию задержки (ОЛЗ) переменной длины, образованную неподвижной призмой P_2 и перемещаемой призмой P_3 . Изменение длины пути света при перемещении призмы может быть отсчитано по шкале ОЛЗ. Излучение, прошедшее ОЛЗ, отражается от призмы P_4 и может быть направлено в приемный объектив O_2 при помощи откидывающегося зеркала M , осуществляющего переключение режимов работы «дистанция — ОЛЗ».

Процедура измерения расстояния заключается в следующем: установив фазовращателем нулевое показание индикатора при работе на дистанцию, переключают свет на ОЛЗ и добиваются нулевого показания изменением длины оптической линии, после чего берут отсчет по шкале ОЛЗ. Эту операцию делают для двух последовательных нулевых показаний индикатора (точек 90 и 270°) на каждой из частот модуляции, получая таким образом два отсчета по ОЛЗ на каждой частоте.

Прибор имеет 3 модулирующих частоты с номиналами: $f_1 = 150,1549$ МГц; $f_2 = 142,3624$ МГц; $f_3 = 149,8552$ МГц, находящиеся в соотношении $f_3 = 20(f_3 - f_2) = 500(f_1 - f_3)$. При этом на частоте f_3 линейный эквивалент фазового цикла $(\lambda/2)$ равен 1 м (при температуре $+20^\circ\text{C}$ и давлении 760 тор). Измерения на частотах f_3 и f_1 позволяют однозначно установить грубое значение расстояния

* Ближе к ним по точности стоит также светодальномерная насадка ДМ-503 швейцарской фирмы «Керн» (см. табл. 5), характеризующаяся ошибкой $\pm(3 \text{ мм} + 2 \text{ мм/км})$ и дальностью действия 2,5 км с отражателем из одной призмы и до 5 км — с отражателем из 7 призм.

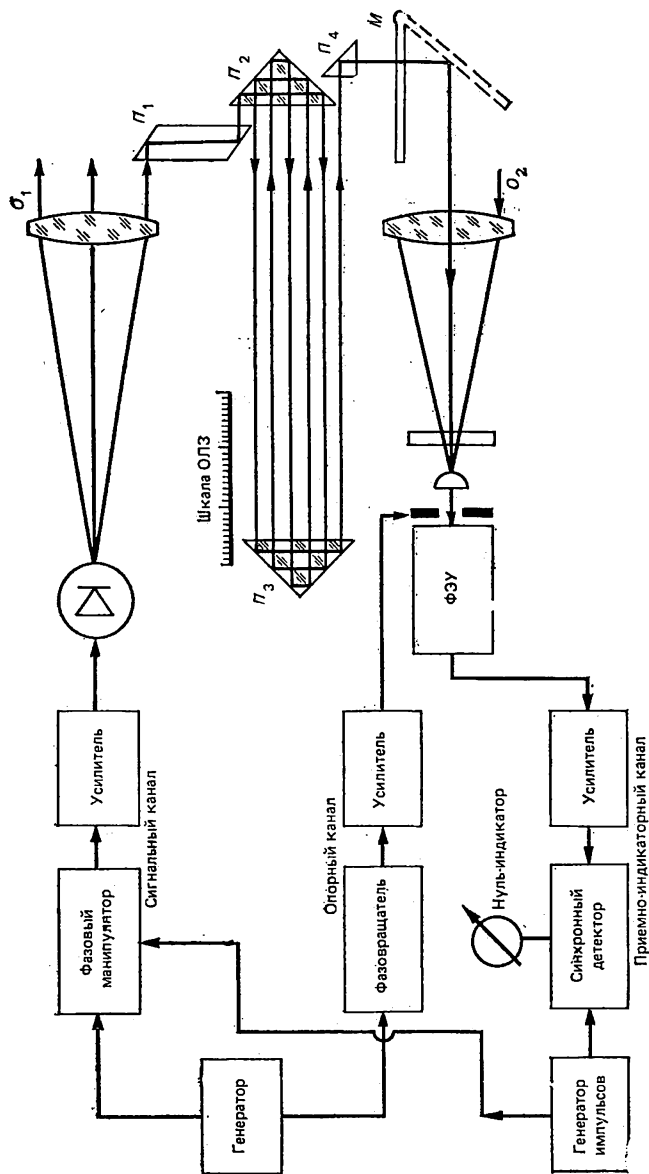


Рис. 10. Блок-схема МСД-1М

в пределах 500 м, на частотах f_3 и f_2 — уточнить в этом значении последнюю неполную двадцатку метров (до 1 м), измерения на частоте f_3 — получить точное значение расстояния (до 0,1 мм). Чтобы получить значение расстояния, в котором доли метра были бы определены не только из измерений на третьей частоте, а из измерений на всех трех частотах, выполняют дополнительный этап вычислений.

Теллуrometer МА 100

Прибор выпущен фирмой «Теллуrometer», входящей в английскую компанию «Плессни».

Теллуrometer МА 100 построен по гетеродинной схеме. Сетка масштабных частот построена по тому же принципу, что и в радиодальнометрах типа Теллуrometer. Фазовые измерения выполняются цифровым методом.

Прибор частично автоматизирован: расстояние воспроизводится на табло, но не сразу, а несколькими последовательными (с ручным переключением) отсчетами, позволяющими определять все более и более старые десятичные разряды в значении расстояния. Всего делается 5 отсчетов, самый точный из них обеспечивает десятые доли миллиметра.

Мекометр МЕ 3000

Мекометр МЕ 3000 выпускается швейцарской фирмой «Керн». Прибор построен по схеме с синхронной демодуляцией. Модулирующий и демодулирующий кристаллы КДР помещены в один и тот же объемный резонатор. Фазовые измерения выполняются аналоговым методом при помощи оптической линии задержки. Мекометр МЕ 3000 относится к частично автоматизированным приборам: измерительные операции (изменение длины ОЛЗ до получения нулевого сигнала на индикаторе) производятся вручную на каждой из пяти частот, но имеется цифровой счетчик, который после выполнения измерений на всех пяти частотах показывает сразу значение измеряемого расстояния.

Важной особенностью Мекометра МЕ 3000 является автоматический учет изменений показателя преломления воздуха в точке стояния прибора. Возможность такого учета основана на применении так называемого стандартного резонатора, который позволяет поддерживать постоянство длины волны модуляции света при изменении атмосферных условий вблизи прибора. Это исключает необходимость введения той метеорологической поправки, которую обычно получают по измерениям температуры и давления в точке стояния прибора.

Светодальномер ДК 001

В отечественном дальнометре ДК 001 применена непосредственная модуляция излучения полупроводникового диода с частотой 750 МГц.

Прибор построен по гетеродинной схеме и может работать в двух режимах: в режиме «грубо» и в режиме «точно». В режиме «точно» модуляция излучения осуществляется СВЧ-генератором с частотой 750 МГц, в режиме «грубо» — ВЧ-генератором с частотой 15 МГц. Фазовые измерения выполняются на низкой частоте 15 кГц, получаемой преобразованием частоты в опорном и сигнальном каналах. При этом в режиме «грубо» осуществляется одиначное преобразование частоты (с 15 МГц до 15 кГц), в режиме «точно» — двойное преобразование частоты (с 750 МГц до 15 МГц и затем до 15 кГц) при помощи соответствующих гетеродинов. В сигнальном канале преобразование частоты происходит в прикатодной области ФЭУ.

Фазовые измерения на частоте 15 кГц производятся цифровым фазометром. Частота следования счетных импульсов составляет 15 МГц. Результаты измерений выдаются на табло. Точность отсчета в режиме «грубо» — 1 мм, в режиме «точно» — 0,01 мм.

Схема фазометра содержит дискриминатор уровня сигнала, прекращающий счет при кратковременном прерывании луча и возобновляющий его при ликвидации помехи.

В дальномере ДК 001 используется один и тот же объектив для передачи и приема излучения, а также для визирования. Разделение передающего и приемного оптических каналов осуществляется при помощи светоделительной призмы.

В приборе имеется линия оптического короткого замыкания в виде трипельпризмы, на которую может направляться излучение при помощи переключающей шторки.

Дальномер снабжен приспособлением для принудительного центрирования.

Прибор выполнен в виде двух блоков: приемопередатчика и электронного блока с цифровым фазометром.

Светодальномер ДВСД-1200В

Дифференциальный высокоточный светодальномер ДВСД-1200В разработан в Ереванском политехническом институте и предназначен главным образом для измерения изменений расстояний.

Дальномер работает на единственной частоте модуляции и не имеет ни передающей, ни приемной оптической системы. Прибор построен по схеме с синхронной демодуляцией в том же кристалле КДР, который служит модулятором. Измерения могут выполняться компенсационным способом экстремума или способом сравнения. Блок-схема прибора (применительно к работе по способу экстремума) показана на рис. 11. Излучение от лазера направляется системой зеркал на кристалл КДР, помещенный в объемный коаксиальный резонатор, возбуждаемый от СВЧ-генератора на частоте 1200 МГц. Прошедший через кристалл свет выходит на дистанцию. Возвращенный отражателем свет проходит через тот же кристалл КДР, выполняющий теперь функцию демодулятора, и далее через поляри-

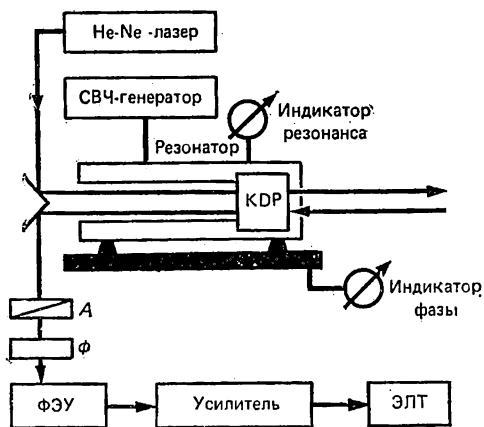


Рис. 11. Блок-схема ДВСД-1200В

анализатор А, скрещенный с направлением поляризации лазерного пучка, и интерференционный фильтр Φ попадает на катод ФЭУ. Выходной сигнал ФЭУ усиливается и регистрируется на электронно-лучевой трубке ЭЛТ. Процедура измерений заключается в том, что оператор при помощи механического устройства перемещает по точным направляющим весь блок модулятора вдоль измеряемой линии до момента, при котором на ЭЛТ наблюдается минимум электрического сигнала. Это перемещение измеряется при помощи индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм.

При работе способом сравнения осуществляется фиксация моментов равенства двух сигналов слева и справа от точки минимума; среднее из этих двух отсчетов дает положение минимума сигнала.

При желании получить полную длину измеряемой дистанции необходимо предварительно знать ее с ошибкой не более $\lambda/4=6$ см.

Прибор состоит из двух отдельных блоков: оптического блока (приемопередатчика) и электронного блока, содержащего СВЧ-генератор и блок питания. Подставка приемопередатчика имеет шаровое устройство для принудительного центрирования с ошибкой 0,02—0,03 мм. При измерениях со штатива используется переходная планка, ось которой центрируется при помощи лотаппарата с ошибкой 0,3—0,5 мм.

В. РАДИОДАЛЬНОМЕРЫ

III.4.8. Общие сведения

Радиодальномер состоит из двух станций — ведущей (на которой выполняются измерения) и ведомой (активного отражателя), устанавливаемых на конечных точках измеряемой линии. Станции часто делаются взаимозаменяемыми, т. е. каждая из них может работать как в режиме ведущей, так и в режиме ведомой. Между станциями радиодальномера предусматривается двусторонняя радиосвязь.

Современные радиодальномеры работают, как правило, в 3-сантиметровом диапазоне радиоволн. В качестве генераторов несущей частоты используются клистронные генераторы или полупроводниковые генераторы на диоде Ганна. Антенны для указанного диапазона — рупорного или параболического типа. В последнем случае они состоят из рупорного облучателя и параболического зеркала.

Геодезические радиодальномеры построены по некогерентной (гетеродинной) схеме. Ведущая и ведомая станции имеют различные несущие частоты, модулируемые различными масштабными частотами, и фазовые измерения выполняются на низкой частоте, равной разности масштабных частот станций и образующейся в результате гетеродинирования несущих частот с последующим детектированием. Разность фаз низкочастотных сигналов, образованных на ведущей и ведомой станциях, пропорциональна расстоянию между станциями. Для измерения этой разности фаз низкочастотный сигнал передается с ведомой станции на ведущую путем дополнительной модуляции этим сигналом генератора несущей частоты ведомой станции.

Для измерения разности фаз в первом поколении радиодальномеров, работавших на длине волны несущей 10 см, использовался фазометр на электронно-лучевой трубке (ЭЛТ). В дальнейшем прямой метод измерения разности фаз при помощи ЭЛТ был заменен компенсационным методом с использованием фазового детектора со стрелочным нуль-индикатором и фазовращателя. В последних мо-

делях радиодальномеров используется цифровой метод измерения разности фаз с индикацией результата на электронном табло.

Разрешение неоднозначности в радиодальномерах осуществляется введением набора фиксированных частот модуляции. Соответствующим выбором сетки масштабных частот реализуется поразрядный способ, позволяющий получать результат измерения непосредственно в единицах расстояния.

Радиодальномерным измерениям присуща дополнительная специфическая ошибка, обусловленная влиянием отражения радиоволн от подстилающей поверхности. Кроме того, в радиодиапазоне гораздо сильнее влияние влажности на показатель преломления воздуха, чем в оптическом диапазоне.

Основные данные наиболее распространенных радиодальномеров представлены в табл. 7. Ниже приводятся более подробные сведения об отечественных и некоторых зарубежных приборах.

III.4.9. Радиодальномеры РДГВ и «Луч»

Радиодальномер РДГВ — прибор первого поколения со взаимозаменяемыми станциями, работающий в диапазоне 10 см и имеющий фазометр на ЭЛТ. Отсчетным устройством служит нанесенная на экран трубки круговая шкала. Изображение на экране ведущей станции представляет собой светящуюся окружность (круговую развертку) с разрывом, создающим отсчетную метку. Отсчет по шкале выражается в единицах времени распространения.

Ведущая станция имеет 4 масштабных частоты: $A=10,000$ МГц; $B=9,990$ МГц; $C=9,900$ МГц; $D=9,000$ МГц, находящихся в соотношении

$$A = 10 (A - D) = 100 (A - C) = 1000 (A - B).$$

На частоте A вся шкала трубки (100 делений) соответствует времени 100 нс. Для соответствующих разностей частот масштаб шкалы последовательно увеличивается в 10 раз (1000, 10000 и 100000 нс).

На ведомой станции имеется 5 частот: A^+ , A^- , B' , C' , D' . Частота A^+ меньше, а частота A^- больше частоты A ведущей станции на 1 кГц. Остальные частоты ведомой станции меньше соответствующих частот ведущей станции на 1 кГц. Фазовые измерения на ведущей станции производятся на разностной частоте 1 кГц. Наличие симметричных частот A^+ и A^- позволяет исключить ошибки за фазовые задержки в цепях станций. Фаза низкочастотного сигнала на ведомой станции может вручную переключаться на 180° , что позволяет исключить ошибку за эксцентриситет шкалы и развертки.

Программа измерений предусматривает «грубые» и «точные» измерения. «Грубые» измерения — это измерения на всех масштабных частотах, позволяющие получить поразрядным способом полное значение времени распространения радиоволн на двойной дистанции в пределах сотни тысяч наносекунд. «Точные» измерения — это многократные измерения на основной частоте A (выполняемые с перестройкой несущих частот станций для уменьшения ошибки из-за отражений от подстилающей поверхности), уточняющие младший разряд во времени распространения (единицы наносекунд и их доли). Умножением измеренного времени распространения на половину рабочей скорости радиоволн, определенной по результатам метеоизмерений, получают расстояние в пределах 15 км. Число полных 15-километровых отрезков в измеряемом расстоянии определяют по приближенному его значению,

ТАБЛИЦА 7

Прибор	Страна-изготовитель	Дальность действия, км	Точность	Потребляемая мощность, Вт	Тип генератора несущей частоты	Длина волны, см	Основная частота модуляции, МГц	Количество каналов	Тип фазометра	Масса станции, кг (без пит.)	Примечание
РДГВ	СССР	40	5см+3мм/км	85	Клистронный	10	10	4	ЭЛТ	19	Выпуск прекращен
«Луч»	СССР	40	3см+3мм/км	60	Клистронный	3	10	4	Компенсационный	14+9,5	Отделяемая антенна. Выпуск прекращен
«Волна»	СССР	15	3см+3мм/км	10	На диоде Ганна	3	15	4	»	10	Выпуск прекращен
«Трап»	СССР	15	3 см+3 мм/км	18	На диоде Ганна	3	15	4	»	12	Выпуск прекращен
РЕМ-2	ГДР	100	3см+3мм/км		Клистронный	3	10	4	ЭЛТ	13,5	
Телеметр RG10	Польша	40	3см+5мм/км	32	Клистронный	3	1,5	4	ЭЛТ	10	
Варидист GET-A2	Венгрия	50	3см+2мм/км		Клистронный	10 и 3	10	4	Цифровой	—	Отделяемая антенна
Теллуrometer MRA4	Великобритания	60	3мм+3мм/км		Клистронный	0,8	75	6	Цифровой	19,5	Выпуск прекращен
Теллуrometer MRA5	»	50	10мм+3мм/км	42	На диоде Ганна	3	75		Цифровой	12+6	Отделяемая антенна
Теллуrometer MRA6	»	50	10мм+3мм/км	20	На диоде Ганна	2			Цифровой	7	
Теллуrometer CA 1000	»	30	15мм+5мм/км	4,5	На диоде Ганна	3	25	5	Компенсационный	1,6	Рекордный по портативности и весу
Электротейп DM 20	США	50	10мм+3мм/км	48	Клистронный	3	7,5	5	Цифровой	16	
Дистомат DI 50	Швейцария	150	2см+5мм/км	50	Клистронный	3	15	4	Цифровой	8+15	Отделяемая антенна
SIAL MD 60	Швейцария	150	10мм+3мм/км	38	Клистронный	3	150	5	Цифровой	13,5	

Радиодальномер «Луч» отличается от РДГВ следующими особенностями:

1. Длина волны несущей 3 см.
2. Приемопередатчик с антенной системой конструктивно отделен от индикаторного блока (на каждой из станций, которые являются взаимозаменяемыми). Он может устанавливаться на переносной мачте и соединяется с индикаторным блоком кабелем длиной 25 м. Ориентирование приемопередатчика и перестройка несущей частоты осуществляется дистанционно с пульта индикаторного блока. Это позволяет выполнять линейные измерения без постройки геодезических знаков.

3. Вместо фазометра на ЭЛТ применен более точный компенсационный фазометр; выходным индикатором служит стрелочный прибор, а отсчеты снимаются по шкале фазовращателя.

4. Передача низкочастотного сигнала с ведомой станции на ведущую осуществляется не импульсной модуляцией, как в РДГВ, а гармонической модуляцией с использованием поднесущей; что создает на ведущей станции два синусоидальных сигнала, необходимых для фазовых измерений компенсационным методом.

5. На станции, работающей в режиме ведомой, введена система автоподстройки несущей частоты.

6. Отсчетное устройство фазовращателя позволяет при работе на частоте A сразу считывать величину $\frac{1}{2}(A^+ - A^-)$ вместо вычисления ее в журнале.

Масштабные частоты дальномера «Луч» аналогичны частотам РДГВ и измеряемой величиной является также время распространения, умноженное затем на половину рабочей скорости радиоволн.

III.4.10. Радиодальномеры «Волна» и «Трап»

Разработанный в ЦНИИГАиК после радиодальномера РДГВ и «Луч» радиодальномер «Волна» отличается значительно большей портативностью, экономичностью и более современным техническим решением схемы. Фазометр проградуйрован в единицах расстояния, генератор несущей частоты выполнен на диоде Ганна, упрощена методика работы исключением перестройки несущей частоты в процессе измерений. Станции взаимозаменяемы.

Упрощенная блок-схема радиодальномера «Волна» показана на рис. 12. СВЧ-генераторы на обеих станциях вырабатывают колебания несущей частоты в диапазоне 8600—8900 МГц (длина волны 3 см). Разность несущих частот ведущей и ведомой станций (промежуточная частота) составляет 33 МГц. На каждой станции несущая модулируется колебаниями кварцевого генератора масштабной частоты, лежащей в диапазоне 12—15 МГц. Масштабные частоты ведущей и ведомой станций отличаются на 1,5 кГц. На каждой станции принимаются модулированные колебания от обеих станций и поступают на диод-смеситель. Усилитель промежуточной частоты УПЧ выделяет и усиливает колебания промежуточной частоты 33 МГц, которые оказываются промодулированными по амплитуде колебаниями низкой частоты 1,5 кГц. НЧ-колебания выделяются после детектирования в амплитудных детекторах АД.

На ведомой станции НЧ-сигнал проходит через усилитель низкой частоты УНЧ и делитель частоты на 2, в результате чего образуется сигнал частоты 750 Гц. Этим сигналом модулируются по частоте колебания генератора поднесущей частоты 120 кГц, после

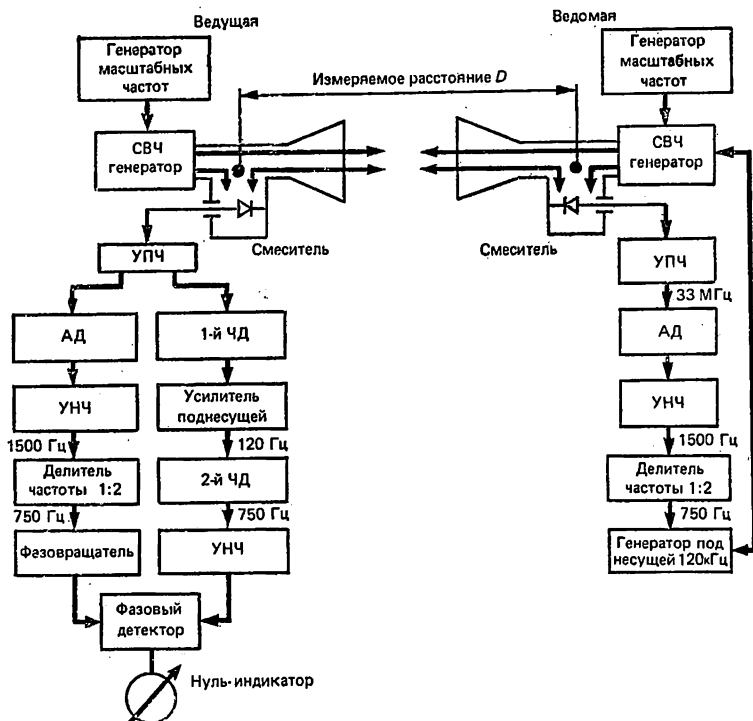


Рис. 12. Упрощенная блок-схема радиодальномера «Волна»

чего модулированная поднесущая подается на СВЧ-генератор и дополнительно модулирует излучаемые им колебания по частоте.

В результате этого колебания промежуточной частоты 33 МГц на выходе УПЧ ведущей станции имеют не только амплитудную, но и двойную частотную модуляцию, которая детектируется применением двух последовательных частотных детекторов ЧД. На выходе 1-го ЧД выделяется сигнал поднесущей частоты, модулированный низкой частотой 750 Гц. Этот сигнал после усиления детектируется во 2-м ЧД, на выходе которого образуется сигнал частоты 750 Гц.

С выхода амплитудного детектора АД снимается сигнал частоты 1,5 кГц, который после усиления и деления частоты на 2 превращается также в сигнал частоты 750 Гц.

Разность фаз сигналов частоты 750 Гц, полученных в каналах амплитудного и частотного детектирования ведущей станции, зависит от расстояния между станциями. Для измерения этой разности фаз применен аналоговый фазометр компенсационного типа, состоящий из фазового детектора со стрелочным нуль-индикатором и фазовращателя. Нулевое показание индикатора соответствует приведению разности фаз к 90 или 270°. Это приведение осуществляется фазовращателем, по шкале которого снимается отсчет,

Для разрешения неоднозначности на каждой станции предусмотрен набор фиксированных масштабных частот, выбранных так, чтобы реализовать поразрядный способ определения полного расстояния. На ведущей станции имеются 4 частоты A, B, C, D со следующими номиналами:

$$A = 14,984750 \text{ МГц}; \quad B = 0,998A = 14,954780 \text{ МГц};$$

$$C = 0,980A = 14,685055 \text{ МГц}; \quad D = 0,800A = 11,987800 \text{ МГц}.$$

На ведомой станции имеется 5 частот: $+A, -A, B', C', D'$, которые отличаются от соответствующих частот ведущей станции на постоянную величину 1,5 кГц (частоты $+A$ и $-A$ симметричны относительно частоты A ведущей станции; наличие двух симметричных частот позволяет исключить ошибку за фазовые задержки в цепях станций).

Частоты ведущей станции удовлетворяют соотношению

$$A = 5(A - D) = 50(A - C) = 500(A - B).$$

Значение частоты A таково, что вся шкала фазовращателя соответствует 10 м при стандартных условиях (температуре $+20^\circ\text{C}$, давлении 760 тор и влажности 10 тор). Для разности частот $(A - D)$ вся шкала соответствует 50 м, для $(A - C)$ — 500 м, для $(A - B)$ — 5000 м. Поэтому измерения на всех четырех частотах позволяют однозначно получить расстояние в пределах 5 км; при измерении большего расстояния его надо знать с точностью до $\pm 2,5$ км. Шкала разбита на 50 делений, т. е. цена одного деления шкалы на частотах $A, (A - D), (A - C)$ и $(A - B)$ равна 0,2 м, 1 м, 10 м и 100 м соответственно. Отсчет берется с точностью до десятой доли деления шкалы, что на частоте A составляет 2 см; при этом отсчеты берутся при двух положениях переключателя фазы НЧ-сигнала — 0 и 180° .

Чтобы не вычислять разности отсчетов на частотах A и B, A и C, A и D , а также сразу получать по шкале величину полуразности $\frac{(+A) - (-A)}{2}$, представляющий собой свободный от влияния фа-

зовых задержек результат измерения на частоте A , в отсчетном устройстве предусмотрено запоминание отсчета на первой частоте (при установке A на ведущей и $+A$ на ведомой станции), так что дальнейшие отсчеты уже выражают собой необходимые разностные величины. Набор всех отсчетов позволяет получить последовательные десятичные разряды в двойном измеряемом расстоянии. На базе радиодальномера «Волна» в последние годы в СССР разработан радиодальномер «Трап», обладающий аналогичными основными характеристиками (см. табл. 7), но отличающийся более высоким уровнем автоматизации процесса измерений. Аналоговый фазометр заменен цифровым, исключена ручная обработка измерений в части разрешения неоднозначности. Принцип построения схемы и сетка масштабных частот те же, что и у прибора «Волна».

III.4.11. Зарубежные радиодальномеры

Основные данные наиболее распространенных зарубежных радиодальномеров указаны в табл. 7. Наиболее интересны из них следующие приборы:

Теллуrometer MRA 4 — имеет длину волны несущей 8 мм и основную частоту модуляции 75 МГц, что значительно увеличило точность прибора, характеризуемую величиной $\pm(3 \text{ мм} + 3 \text{ мм/км})$.

Дальность действия — 60 км, станции взаимозаменяемы, прибор выполнен на транзисторах, цифровой отсчет.

Теллуrometer СА 1000 резко отличается от остальных моделей малыми габаритами и массой. Каждая станция вместе с источником питания (никель-кадмиевой аккумуляторной батареей) весит всего 3,6 кг (без батареи — 1,6 кг) и имеет размеры 30×15×8 см. Прибор рассчитан на дальность действия 10 или 30 км (две сменные рупорные антенны) и обеспечивает точность измерений $\pm(1,5 \text{ см} + 5 \text{ мм/км})$. Потребляемая мощность менее 5 Вт. Станции не взаимозаменяемы. Схема выполнена на миниатюрных твердотельных элементах. Отсчеты берутся по круговой шкале фазометра в единицах расстояния на каждой из пяти масштабных частот, лежащих в диапазоне от 19 до 25 МГц. Портативность прибора и простота выполнения измерений делают его весьма привлекательным для массового применения. Он может устанавливаться сверху теодолита.

Дистомат DI 60 отличается от DI 50 добавлением к четырем масштабным частотам, лежащим в диапазоне 15 МГц, еще одной на порядок более высокой частоты 150 МГц и отсутствием перестройки несущих частот станций, т. е. каждая станция работает на фиксированной длине волны в диапазоне 3 см. Дальность действия 150 км, точность $\pm(1 \text{ см} + 3 \text{ мм/км})$. В настоящее время прибор выпускается под маркой SIAL MD 60 в двух модификациях — без отделения антенны (SIAL MD 60C) и с отделяемой антенной (SIAL MD 60S).

Г. РАДИОГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

III.4.12. Основные принципы радиогеодезических систем

Радиогеодезическая система (РГС) — комплекс аппаратуры, состоящей из нескольких станций и предназначенной для определения координат движущихся объектов, а в ряде случаев — для измерения больших (сотни и тысячи километров) расстояний на земной поверхности.

Основные области применения РГС — аэрофотосъемка, морская геодезия и геодезическое обеспечение больших территорий. В аэрофотосъемке при помощи РГС производится определение координат центра аэрофотоснимков в момент фотографирования для плановой привязки аэрофотосъемочных маршрутов. В морской геодезии РГС используются для определения местоположения судна при геодезических работах на различных акваториях. При геодезическом обеспечении больших территорий РГС используются для создания радиогеодезических сетей со сторонами в несколько сотен километров, при помощи которых можно осуществлять геодезическую связь различных территорий, материков и т. п. Для таких работ применяются самолетные РГС, измеряющие расстояния методом пересечения створа. Этим методом измеряются большие расстояния, недоступные для непосредственного измерения наземной дальномерной аппаратурой. При методе пересечения створа измерение длинной линии заменяется измерением двух расстояний (наклонных дальностей) от конечных точек этой линии до самолета, пересекающего ее створ, и искомая длина находится из обработки измерений.

Радиогеодезические системы могут быть классифицированы по нескольким признакам, связанным с физическими и геометрическими характеристиками РГС. Основная классификация РГС представлена в табл. 8.

ТАБЛИЦА 8

Вид классификации	Возможные типы РГС	Примечание
По диапазону радиоволн	Длинноволновые Средневолновые Коротковолновые Ультракоротковолновые	Обеспечивают наибольшую дальность Наиболее распространены Используются редко Обеспечивают наибольшую точность
По характеру излучения	Импульсные С непрерывным излучением	
По методу измерений	Временные Фазовые Фазово-временные	Частный случай — фазовые гетеродинные с измерениями на низкой частоте
По виду измеряемых геометрических величин (указаны основные типы)	Дальномерные Разностные Разностно-дальномерные (комбинированные)	Измеряются расстояния или их приращения. Последний случай называют режимом радиолога Измеряются разности двух расстояний или приращения этих разностей. Последний случай для фазовых систем называют режимом фазового зонда Измеряются расстояния и разности расстояний или соответствующие приращения
По виду создаваемой сетки изолиний	Круговые Гиперболические Комбинированные	Относится к дальномерным системам Относится к разностным системам Относится к разностно-дальномерным системам

В большинстве РГС используется фазовый метод измерений.

С геометрической точки зрения РГС дают возможность определить положение объекта как точку пересечения двух кривых, называемых изолиниями. Изолиниями обычно являются окружности или гиперболы. Соответственно различают круговые и гиперболические РГС.

Геометрия круговой системы с сеткой линий положения показана на рис. 13. Система состоит из двух неподвижных станций А

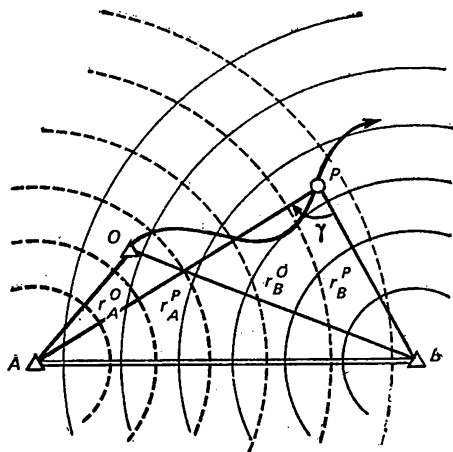


Рис. 13. Геометрия круговой РГС

и B с известными координатами, называемых базисными станциями, и подвижной станции P , перемещающейся по некоторому маршруту из начальной точки O . Положение точки P определяется двумя расстояниями — r_A^P и r_B^P , являющимися радиусами окружностей с центрами в точках A и B . Многочастотные круговые системы (фазовые), по результатам измерений которыми получают непосредственно расстояния r_A^P и r_B^P , называются системами, работающими в дальном режиме. Некоторые из них построены по принципу УКВ-радиодальномера типа теллуrometer с автоматическим переключением масштабных частот для разрешения неоднозначности при измерении расстояния до движущегося объекта. Одночастотные фазовые круговые системы, позволяющие измерять только приращения расстояний Δr_A и Δr_B при перемещении подвижной станции из начальной точки O в определяемую точку P , называются системами, работающими в режиме радиолога (в большинстве случаев это средневолновые системы). В таких системах сами расстояния до определяемой точки находятся из соотношений:

$$r_A^P = r_A^O + \Delta r_A; \quad r_B^P = r_B^O + \Delta r_B,$$

где r_A^O и r_B^O — исходные расстояния от базисных станций до начальной точки O , для получения которых требуется геодезическая привязка начальной точки маршрута.

Геометрия гиперболической системы показана на рис. 14. В пунктах A , B и C с известными координатами располагаются неподвижные базисные станции — центральная станция A и боковые станции B и C , а подвижная станция перемещается по некоторому маршруту из начальной точки O . На базисе AB строится одно семейство гипербол с фокусами в точках A и B , на базисе AC — второе семейство гипербол с фокусами в точках A и C . Две пары станций A , B и A , C образуют с подвижной станцией P два канала системы, позволяющие определить две разности расстояний: $r_A^P - r_B^P$ и $r_A^P - r_C^P$ (в многочастотных системах). В одночастотных системах, которые

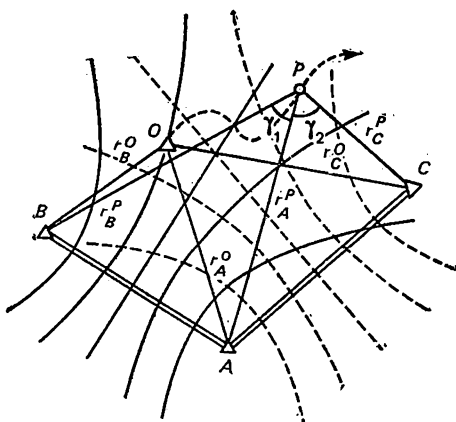


Рис. 14. Геометрия гиперболической РГС

называют работающими в режиме фазового зонда (фазовым зондом называется подвижная станция), измеряются не сами разности расстояний, а их приращения

$$\Delta r_{AB} = (r_A^P - r_B^P) - (r_A^O - r_B^O);$$

$$\Delta r_{AC} = (r_A^P - r_C^P) - (r_A^O - r_C^O),$$

после чего искомые разности расстояний находятся из соотношений:

$$r_A^P - r_B^P = (r_A^O - r_B^O) + \Delta r_{AB};$$

$$r_A^P - r_C^P = (r_A^O - r_C^O) + \Delta r_{AC}.$$

Для определения исходных разностей $r_A^O - r_B^O$ и $r_A^O - r_C^O$ требуется, как и в варианте радиолога, геодезическая привязка начальной точки маршрута.

В гиперболических системах подвижная станция является (за редким исключением) только приемной, поэтому система может работать с неограниченным числом таких станций (приемоиндикаторов).

В когерентных фазовых системах фазовые измерения производятся на несущих частотах. Такие системы строятся с частотным или временным разделением каналов, обеспечивающим возможность раздельного приема на подвижной станции сигналов от базисных станций. Когерентные системы требуют синхронизации станций (передатчиков).

В некогерентных (гетеродинных) фазовых системах фазовые измерения производятся на низкой разностной частоте, образуемой в результате гетеродинирования (смещения частот). Передатчики базисных станций некогерентных РГС не нуждаются в синхронизации.

В любом типе фазовых РГС измеряемая величина получается в виде $\Lambda(N + \Delta N)$, где Λ — линейный эквивалент фазового цикла (длина волны или половина длины волны); N — целое число; ΔN — дробь, меньшая единицы. Числа N и ΔN определяются по цифровым индикаторам (счетчикам) или по пленке непрерывной записи фазовых циклов (фазограмме) в результате ее обработки.

Средняя квадратическая ошибка положения определяемого пункта

$$M = \sqrt{m_x^2 + m_y^2},$$

где m_x и m_y — средние квадратические ошибки определения координат.

$M_{кр}$ для круговых (однобазисных) систем

$$M_{кр} = \sqrt{\frac{m_r \sqrt{2}}{\sin \gamma}}; \quad (\text{III.4.39})$$

для гиперболических (двухбазисных) систем

$$M_{гип} = \frac{m_{\Delta r}}{2 \sin \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2}} \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \frac{\gamma_1}{2}} + \frac{1}{\sin^2 \frac{\gamma_2}{2}}}, \quad (\text{III.4.40})$$

где m_r и $m_{\Delta r}$ — средние квадратические ошибки измерения расстояния и разности расстояний соответственно; γ , γ_1 и γ_2 — углы, под которыми видны из определяемого пункта базисы системы (углы засечки).

Измерение больших расстояний методом пересечения створа. Как уже упоминалось, РГС могут применяться не только для определения координат, но и для измерения больших расстояний на земной поверхности. Для таких измерений пригодны не любые РГС, а лишь круговые системы, работающие в варианте радиодальномера, т. е. измеряющие не пирашения расстояний, а сами расстояния. Такими системами являются либо импульсные круговые системы, либо фазовые УКВ-системы, построенные по принципу наземного радиодальномера типа теллуrometer. Из отечественных РГС системой такого рода является РДС-2 («Измурд»).

При методе пересечения створа две неподвижные наземные (ведомые) станции помещаются на концах измеряемой линии 1—2, а подвижная (ведущая) станция помещается на самолете, который, летя с постоянной скоростью, пересекает плоскость створа линии 1—2 под некоторым углом (рис. 15). При приближении самолета к створу периодически (через 1—3 с) выполняются одновременные измерения двух наклонных расстояний r_1 и r_2 от самолета до наземных станций. Сумма этих наклонных расстояний будет минимальной, когда самолет находится точно в створе линии, и задача сводится к отысканию этой минимальной суммы. Как правило, ни один из моментов измерений не совпадает с моментом нахождения самолета точно в створе, и минимальную сумму находят из обработки измерений (см. гл. III.4.17).

При измерении относи-

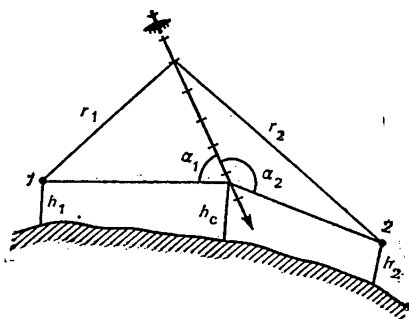


Рис. 15. Схема измерения расстояний методом пересечения створа

тельно коротких (до 100 км) линий может использоваться метод не внутреннего, а внешнего пересечения створа, когда самолет пересекает продолжение измеряемой линии за одной из наземных станций. В этом случае вычисляются не суммы, а разности наклонных расстояний от самолета до наземных станций, и момент пересечения створа соответствует максимальной разности расстояний, к нахождению которой сводится обработка измерений.

III.4.13. Радиогодезическая система «Поиск»

Система «Поиск» является наиболее широко распространенной в СССР радиогодезической системой. Эта система — средневолновая, фазовая, гетеродинная, гиперболическая, одночастотная (имеет один комплект рабочих частот станций), работает в варианте фазового зонда. Ошибка определения места 10—50 м, дальность действия системы 350 км. Разработана в 1957—1959 гг. (ВНИИ Геофизика); в последующие годы выпускалась серийно в различных модификациях, в том числе в транзисторном варианте («Поиск АТМ»).

Блок-схема системы приведена на рис. 16. Всего в системе пять станций: три базисных — 1, 2 и 3; вспомогательная станция 4 — ретранслятор; подвижная станция 5 — приемоиндикатор (фазовый зонд). Станции работают в частотном диапазоне 1,6—2,5 МГц. На центральной базисной станции 3 имеется двудвойной передатчик, излучающий попеременно частоты f_1 и f_2 . Попеременный режим обеспечивается коммутатором K , поочередно (4—8 раз в секунду) подключающим антенну к соответствующему генератору. На боковых базисных станциях 1 и 2 имеются передатчики, непрерывно излучающие частоты $f_1 + \Delta f_1$ и $f_2 + \Delta f_2$. При этом $\Delta f_1 = 460$ Гц, $\Delta f_2 = 660$ Гц (низкие частоты). Излучение базисных станций принимается как на ретрансляторе 4, так и на подвижной станции 5, и в соответствующих приемниках происходит смешение принимаемых частот (гетеродинирование), в результате которого соответствующей фильтрацией выделяются колебания низких частот Δf_1 (в первом канале) и Δf_2 (во втором канале). На ретрансляторе частотами Δf_1 и Δf_2 попеременно модулируется несущая передатчика F . Модулированное излучение ретранслятора принимается на подвижной станции 5 и детектируется. Таким образом, в первом канале образуются два сигнала частоты Δf_1 , а во втором канале — два сигнала частоты Δf_2 . Эти низкочастотные сигналы в каждом канале поступают на фазометр. К выходам фазометров подключены индикаторы — цифровые счетчики фазовых циклов и электромеханический регистратор, осуществляющий непрерывную двухканальную запись фазовых циклов на бумажной ленте (фазограмме). Запись по каждому каналу имеет вид наклонных линий (рис. 17). Одна линия соответствует приращению разности фаз на один фазовый цикл. Наклон линии (вправо или влево) определяет знак приращения. В момент нахождения подвижной станции в исходной точке маршрута и определяемых точках на фазограмму наносятся отметки в виде коротких поперечных штрихов на осевой линии. При обработке фазограммы фазовые циклы оцифровывают и подсчитывают для каждой из определяемых точек целое число циклов N и дробную часть цикла ΔN относительно исходной точки маршрута. Приращение разности расстояний, соответствующее приращению разности фаз на $N + \Delta N$ циклов, находится из соотношений:

$$\Delta(r_{3.5} - r_{1.5}) = \Delta_1(N_1 + \Delta N_1) + \frac{\Delta f_1}{f_1} \Delta(r_{1.5} - r_{4.5}); \text{ (III.4.41)}$$

Рис. 16. Блок-схема системы «Понск»

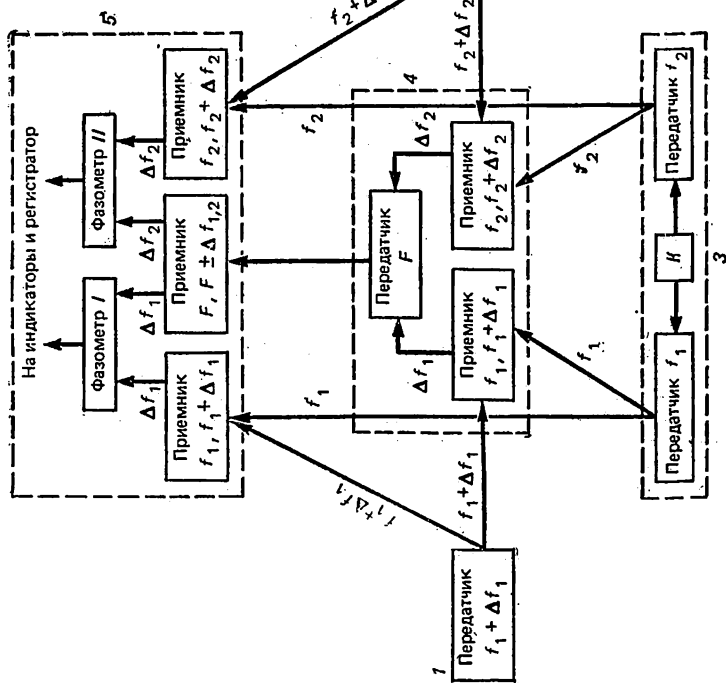


Рис. 17. Фазограмма системы «Понск»



для канала II:

$$\Delta(r_{3.5} - r_{2.5}) = \Lambda_{II} (N_{II} + \Delta N_{II}) + \frac{\Delta f_2}{f_2} \Delta(r_{2.5} - r_{4.5}), \quad (\text{III.4.42})$$

где r_{ik} — расстояния между станциями с соответствующими номерами; $\Lambda_I = v/f_1$, $\Lambda_{II} = v/f_2$ — цены фазовых циклов в линейной мере (длины волн), определяемые экспериментально для данного участка работ. Вторые члены в правых частях этих равенств намного меньше первых и являются поправочными (поправка за положение ретрансляционной станции).

Наряду с описанным выше фазоиндикаторным устройством электромеханического типа для системы «Поиск» разработана более совершенная электронная аппаратура, предусматривающая возможность частичной или полной автоматизации радиогодезических измерений [1], [4]:

аналого-цифровой преобразователь фаза-код для вывода результатов на цифровое табло и записи на перфоленту;

цифровой фазометр с выводом результатов на перфоратор;

электронный цифровой приемоиндикатор (ЭЦПИ) с выдачей результатов фазовых измерений на табло и возможностью состыковки с ЭВМ, телетайпом и графопостроителем;

комплекс бортовой измерительной аппаратуры с цифровым фазометром, перфоратором и графопостроителем;

автокоординатор — автоматический комплекс регистрации и обработки измерений со звеньями: бортовая станция — фазорегистратор — реверсивные счетчики — транскриптор — перфоратор — ЭВМ — печатающее устройство;

автоматический радиогодезический комплекс на основе автокоординатора (бортовая станция — фазорегистратор и цифровой фазометр — бортовая ЭВМ — печатающее устройство — графопостроитель).

Автоматические комплексы осуществляют полную автоматизацию измерений и вычислений вплоть до получения координат и вычерчивания курса подвижного объекта.

III.4.14. Радиогодезическая система «Изумруд»

РГС «Изумруд» выпускается серийно на базе разработанной в ЦНИИГАиК радиогодезической системы РДС-2 (самолетный радиодальномер). Система является круговой, многочастотной и работает в дальнометрическом режиме, измеряя одновременно два расстояния от самолета до двух наземных пунктов. Дальность действия составляет 250—300 км, аппаратурная ошибка измерений характеризуется величиной $\pm (1 \text{ м} + 1 \text{ мм/км})$. Комплект системы состоит из ведущей станции, помещаемой на самолете, и трех наземных станций 1, 2 и 3, из которых одновременно в работе участвуют две: 1 и 2 или 3 и 2 (станции 1 и 3 работают на одной и той же несущей частоте, станция 2 — на другой).

Самолетная ведущая станция имеет двухканальный приемный тракт (при общей антенне и смесителе) для работы одновременно с двумя ведомыми станциями. Несущая частота самолетной станции равна $f = 350 \text{ МГц}$, наземных: $f_1 = 314 \text{ МГц}$, $f_2 = 322 \text{ МГц}$, $f_3 = 314 \text{ МГц}$. Соответственно промежуточная частота (разность несущих самолетной и наземных станций) составляет 36 МГц, 28 МГц и 36 МГц. Несущие модулируются по амплитуде колебаниями масштабных частот, вырабатываемых кварцевыми генераторами и ле-

жащими в диапазоне 1,5 МГц. Далее работа каждого канала системы (ведущей и одной ведомой станции) в принципе аналогична работе наземного радиодальномера типа теллуrometer: на каждой станции происходит смещение принимаемых от другой станции и генерируемых собственным передатчиком модулированных колебаний, выделение сигнала промежуточной частоты и его детектирование, вследствие чего на выходе детекторов ведущей и ведомой станций образуются сигналы низкой частоты, равной разности масштабных частот станций. Разность фаз этих сигналов пропорциональна расстоянию между станциями, и для ее измерения низкочастотный сигнал с ведомой станции превращается в импульсы и передается на ведущую посредством дополнительной модуляции этими импульсами генератора несущей частоты. В результате на выходе детектора каждого канала самолетной станции образуются два НЧ-сигнала, между которыми измеряется разность фаз.

Основная масштабная частота ведущей станции $F = 1,498475$ МГц, что при температуре $+20^\circ\text{C}$, давлении 760 тор и влажности 10 тор дает линейный масштаб шкалы фазометра $\lambda/2$, равный 100 м.

Для разрешения неоднозначности на самолетной и наземных станциях предусмотрены еще две фиксированные масштабные частоты. На самолетной станции вторая и третья частоты составляют соответственно $F' = 0,9F$ и $F'' = 0,99F$, что обеспечивает разности частот $F - F' = 0,1F$ и $F - F'' = 0,01F$, соответствующие увеличению линейного масштаба шкалы в 10 и 100 раз (1 км и 10 км), т. е. обеспечивается однозначное измерение расстояния в пределах 10 км. С точностью до 10 км измеряемое расстояние должно быть известно.

Масштабные частоты наземных станций отличаются от частот самолетной станции на небольшую величину ΔF , равную 1500 Гц для первой, 1400 Гц для второй и 1600 Гц для третьей станции. Для исключения фазовых задержек в аппаратуре наземные станции вместо одной первой частоты имеют две, симметричные относительно первой частоты самолетной станции.

Масштабные частоты на самолетной и наземных станциях синхронно переключаются при помощи электронного коммутатора по определенной программе.

В отличие от раннего варианта системы РДС с электронно-лучевой трубкой и фотографированием изображения на движущуюся фотопленку с последующей довольно трудоемкой обработкой полученной регистрограммы, в системе «Изумруд» применен электронный цифровой фазометр, с табло которого сразу считываются отсчеты наклонных дальностей по обоим каналам. Эти отсчеты периодически фотографируются на пленку. Обработка заключается лишь во введении необходимых поправок в зарегистрированные отсчеты расстояний. В последних выпусках предусматривается автоматическое вычисление и печать непосредственно координат определяемых точек.

III.4.15. Краткие сведения о зарубежных радиогодезических системах

К настоящему времени в различных странах разработано большое количество радиогодезических систем различных типов. Основные данные наиболее распространенных современных систем приведены в табл. 9. Большинство из них, как видно из таблицы, используется для измерений на море (морская геодезия для обеспечения гидрографических и геофизических работ). Более полные сведения о них сообщаются в курсе морской геодезии [4].

ТАБЛИЦА 9

Название	Страна-изготовитель	Тип системы		Дальность действия, км	Точность	Примечание
		аппаратурный	геометрический			
Длинноволновые системы						
Лоран С	США	Импульсно-фазовая	Гиперболическая	До 2500	50—200 м	Для измерений на море
Палс/8	Великобритания	Импульсно-фазовая	Круговая или гиперболическая	500	50 м	То же
Ламбда	Великобритания	Фазовая когерентная	Гиперболическая	500	20 м	»
Средневолновые системы						
Сэрвей-Декка	Великобритания	Фазовая когерентная	Гиперболическая	500	50—100 м	Для измерений на море
Рейдист	США	Фазовая когерентная	Круговая или гиперболическая	400	5—20 м	То же
«Понск»	СССР	Фазовая гетеродина	Гиперболическая	400	10—50 м	Применяется в аэрофотогосъемке и морской геодезии
Лорак В	США	Фазовая гетеродина	Гиперболическая	400	10—50 м	Для измерений на море
Торан	Франция	Фазовая гетеродина	Гиперболическая, вариант Торан-О-круговая	400	10—50 м	То же
Хай-Фикс	Великобритания	Импульсно-фазовая	Круговая или гиперболическая	300	10—50 м	»

Ультракоротковолновые системы

«Мир»	СССР	Импульсная	Круговая	300	5—10 м	—
Шоран (современный вариант)	США	Импульсная	Круговая	320	4—8 м	Для измерений на море
Дилжитал Шоран	Великобритания	Импульсная	Круговая	320	2—5 м	То же
Трайспондер	Великобритания	Импульсная	Круговая	80	3 м	»
Силедис	Франция	Импульсная	Круговая или гиперболическая	Более 200	5—10 м	»

Ультракоротковолновые системы, построенные по принципу радиодальномера

Теллуrometer MRB-201	Великобритания	Фазовая динная	гетеро-	Круговая	Более 500	1,5 м	Для измерений на море
Теллуrometer MRB-301	Великобритания	Фазовая динная	гетеро-	Круговая	До 150	1 м+3 мм/км	Самолетный вариант системы MRB-201
Теллуrometer MRD-1 «Изумруд»	Великобритания СССР	Фазовая динная	гетеро-	Круговая	Более 50	3—5 м	Для измерений на море
CR-100	США	Фазовая динная	гетеро-	Круговая	250	1 м+1 мм/км	Самолетная РГС
Ширан	США	Фазовая динная	гетеро-	Круговая	320	1,5 м	»
Автотейп	США	Фазовая динная	гетеро-	Круговая	450	3—4 м	Самолетная РГС
		Фазовая динная	гетеро-	Круговая	100	0,5 м+ +1 см/км	Для измерений на море

III.4.16. Обработка измерений,
выполненных свето- и радиодальномерами

Обработку свето- и радиодальномерных измерений можно разделить на два этапа:

- 1) получение наклонного расстояния между центрами пунктов, исправленного аппаратурными и атмосферными поправками;
- 2) редуцирование наклонного расстояния на поверхность относимости (в случае измерения больших расстояний).

На первом этапе в измеренное расстояние вводятся следующие поправки:

аппаратурные поправки (постоянная поправка прибора и, при необходимости, другие поправки, регламентируемые в каждом конкретном случае);

поправка за отличие рабочей скорости от стандартной или расчетной;

поправка за приведение линии к центрам пунктов (в плане).

В случае измерения коротких расстояний топографическими светодальномерами или электронными тахеометрами вводится также поправка за наклон линии (за приведение к горизонту в точке стояния прибора). Полученное горизонтальное расстояние в этом случае обычно является окончательным результатом.

В приборах, снабженных микропроцессорами или микро-ЭВМ, вся обработка производится автоматически при вводе необходимых данных при помощи клавиатуры или переключателей на панели прибора.

Ниже приводятся основные принципы обработки независимо от способа ее технического осуществления.

Поправка за отличие рабочей скорости от расчетной (в метрах) определяется по формуле

$$\Delta D_b = D (N_0 - N) 10^{-6}, \quad (\text{III.4.43})$$

где D — измеренное расстояние, м; N_0 — стандартное или табличное значение индекса преломления; N — значение индекса преломления в реальных условиях измерений.

Для светодальномеров N вычисляется по формуле Баррелла — Сирса (III.4.20), для радиодальномеров — по формуле Фрума — Эссена (III.4.23) по измеренным значениям температуры, давления и влажности.

Индекс N_0 можно определить, зная стандартные значения метеозлементов T_0 , P_0 , e_0 ; обычно он указывается в техническом описании прибора.

Определение поправки ΔD_b обычно производится либо по специально составленным с учетом надлежащих формул таблицам, либо с использованием соответствующих номограмм, либо автоматически по введенным в прибор метеоданным.

В ранних моделях радиодальномеров, в которых расстояние получается не непосредственно, а вычисляется по измеренному времени распространения радиоволн, метеопправка как таковая не определяется, а осуществляется переход от скорости в вакууме к скорости в атмосфере определением показателя преломления воздуха, и расстояние получают умножением измеренного времени распространения на половину найденного значения скорости.

Поправка за приведение линии к центрам пунктов необходима в случае установки дальномерной аппаратуры на столиках геодезических знаков. Эта поправка

$$\Delta D_{\Pi} = \delta_c + \delta_r, \quad (\text{III.4.44})$$

где δ_c — поправка за центрировку приемопередатчика светодальномера или ведущей станции радиодальномера; δ_r — поправка за редуцицию отражателя или ведомой станции.

Поправки δ_c и δ_r вычисляются по формулам:

$$\delta_c = -l_1 \cos \theta_1; \quad (\text{III.4.45})$$

$$\delta_r = -l_2 \cos \theta_2, \quad (\text{III.4.45'})$$

где l_1 , θ_1 и l_2 , θ_2 — линейные и угловые элементы приведения на пунктах. Углы θ отсчитываются от направления на центр своего знака до направления на другой знак.

При графическом определении элементов приведения поправки δ_c и δ_r могут быть получены также графически как проекции линейных элементов на направление измеряемой линии.

Поправка за наклон линии в случае измерения коротких расстояний вычисляется по формуле

$$\Delta D_h = -\frac{h^2}{2D}, \quad (\text{III.4.46})$$

где h — превышение между концами линии.

При высокоточном измерении больших расстояний свето- и радиодальномерами учитывается еще один член ($-h^4/8D^3$). В этом случае поправка за наклон входит в общую формулу для редуцирования линии [см. формулу (III.4.47)].

Редуцирование на поверхность относимости. В высшей геодезии за поверхность относимости обычно принимается поверхность референц-эллипсоида. При построении сетей 2-го и низших классов обработка часто ведется на плоскости в проекции Гаусса—Крюгера.

Переход от наклонного расстояния D между точками с геодезическими высотами H_1 и H_2 к расстоянию s на референц-эллипсоиде осуществляется по формуле

$$s = D - \frac{h^2}{2D} - \frac{h^4}{8D^3} - \frac{H_m}{R_n} D + \frac{H_m^2}{R_n^2} D + \frac{D^3}{24R_n^2}, \quad (\text{III.4.47})$$

где $h = H_2 - H_1$ — превышение между конечными точками линии; $H_m = (H_1 + H_2)/2$ — средняя высота линии; R_n — радиус кривизны нормального сечения из первой точки на вторую, определяемый по формуле

$$R_n = R_0 \left(1 - \frac{e^2}{2} \cos^2 B_m \cos 2A \right), \quad (\text{III.4.48})$$

где B_m — средняя широта линии; A — азимут; R_0 — средний радиус кривизны эллипсоида на широте B_m , определяемый выражением

$$R_0 = \sqrt{MN} = \frac{a \sqrt{1 - e^2}}{1 - e^2 \sin^2 B_m}, \quad (\text{III.4.49})$$

где M и N — радиусы кривизны меридиана и первого вертикала на широте B_m ; a — большая полуось эллипсоида; e — его первый экс-

центриситет. Для референц-эллипсоида Красовского $a=6\,378\,245$ м, $e^2=0.0066934216$.

Переход от длины линии s на эллипсоиде к длине $s_{пл}$ на плоскости в проекции Гаусса осуществляется по формуле

$$s_{пл} = s + s \left(\frac{y_m^2}{2R_g} + \frac{y_m^4}{24R_g^3} + \frac{\Delta y^2}{24R_g^2} \right), \quad (\text{III.4.50})$$

где $y_m = (y_1 + y_2)/2$ — средняя ордината линии; $\Delta y = y_2 - y_1$ — разность ординат конечных точек. Если линия расположена не более чем в 150 км от осевого меридиана шестиградусной зоны, второй член в скобке можно не учитывать.

Значения R_n и R_g можно взять из таблиц, приведенных в работе [9] (для диапазона широт $36-80^\circ$).

III.4.17. Обработка измерений, выполненных радиогодезическими системами

Обработка радиогодезических измерений состоит из следующих этапов:

введение аппаратурных поправок и поправок за влияние внешних условий;

редуцирование расстояний или разностей расстояний на поверхность относимости;

вычисление координат (или искомого расстояния при методе пересечения створа).

В последних моделях РГС, сопряженных с ЭВМ, вся обработка выполняется автоматически с выдачей результатов на печать.

Ниже излагаются основные теоретические предпосылки обработки измерений в РГС.

Введение поправок в измеренные величины и редуцирование

Аппаратурные поправки могут быть различными в зависимости от типа применяемой РГС, и их введение регламентируется в каждой конкретной системе.

Поправки за влияние внешних условий включают в себя:

поправку за отличие скорости распространения радиоволн от стандартной или табличной;

поправку за рефракционное удлинение траектории радиоволн.

Первая из этих поправок играет особенно важную роль при измерении расстояний УКВ-системами, обеспечивающими высокую инструментальную точность измерений. В общем виде поправка за скорость дается в соответствии с формулой (III.4.43)

$$\Delta D_v = D_{изм} (N_0 - N) 10^{-6}.$$

Определение индекса преломления N при работе с самолетными РГС (на наклонных трассах) выполняется с привлечением той или иной модели атмосферы — зависимости индекса преломления от высоты. Рекомендуется использовать биэкспоненциальную модель как наиболее удовлетворительную в диапазоне тропосферных высот и выполнять определение среднеинтегрального индекса преломления по формуле (III.4.29) (см. гл. III.4.3).

Поправка за рефракционное удлинение траектории (за кривизну пути радиоволн) вычисляется по формуле

$$\Delta D_r = - \frac{D^3}{24\rho^2}, \quad (\text{III.4.51})$$

где ρ — радиус кривизны траектории волны. Обычно достаточно принимать $\rho = 5 \cdot 10^4$ км. Величины этой поправки указаны в табл. 4.

Редуцирование расстояний на референц-эллипсоид (в случае круговых РГС) выполняется по формуле

$$s = D - \frac{h^2}{2D} - \frac{H_m}{R_g} D + \frac{D^3}{24R_g^2} - \frac{D^3}{24\rho^2}, \quad (\text{III.4.52})$$

являющейся упрощенным вариантом формулы (III.4.47). Круговые системы измеряют два расстояния до подвижного объекта и соответственно формула вида (III.4.52) используется дважды.

Редуцирование разностей расстояний на референц-эллипсоид (в случае гиперболических систем) выполняется по формуле вида

$$s_1 - s_2 = (D_1 - D_2) - \left(\frac{h_1^2}{2D_1} - \frac{h_2^2}{2D_2} \right) - \left(\frac{H_{m1}}{R_{g1}} D_1 - \frac{H_{m2}}{R_{g2}} D_2 \right) + \frac{1}{24} \left(\frac{1}{R_g^2} - \frac{1}{\rho^2} \right) (D_1^3 - D_2^3), \quad (\text{III.4.53})$$

где все индексы 1 и 2 относятся к расстояниям D_1 и D_2 соответственно. В последнем слагаемом вместо R_g достаточно брать средний радиус Земли (6371 км). Гиперболические системы определяют две разности расстояний и соответственно формула вида (III.4.53) используется дважды. Сами расстояния D , необходимые для вычисления поправочных членов, достаточно знать приближенно (с ошибкой порядка нескольких километров). Их находят следующим образом:

1) по измеренным разностям расстояний определяют приближенные координаты определяемого пункта при помощи гиперболической сетки, нанесенной на планшет участка работ;

2) по полученным приближенным координатам определяемого пункта и известным координатам базисных станций определяют, решая обратную геодезическую задачу, приближенные значения самих расстояний, которые и подставляют в формулы вида (III.4.53).

Редуцирование расстояний с референц-эллипсоида на плоскость в проекции Гаусса выполняется по формуле (III.4.50), в которой второй член в скобке можно не учитывать при длине линии до 300 км.

Редуцирование разностей расстояний с референц-эллипсоида на плоскость в проекции Гаусса выполняется по формуле

$$(s_1 - s_2)_{пл} = (s_1 - s_2) + s_1 \left(\frac{y_m^2}{2R_g} + \frac{y_m^4}{24R_g^3} + \frac{\Delta y^2}{24R_g^2} \right)_1 - s_2 \left(\frac{y_m^2}{2R_g} + \frac{y_m^4}{24R_g^3} + \frac{\Delta y^2}{24R_g^2} \right)_2, \quad (\text{III.4.54})$$

где y_m — средние ординаты линий; Δy — разности ординат конечных точек; индексы 1 и 2 относятся к двум линиям, разность которых редуцируется.

Вычисление координат

Вычисление плоских прямоугольных координат пункта из измерений круговыми системами. Если круговой РГС измерены два расстояния r_1 и r_2 от базисных станций 1 и 2 с известными координатами x_1, y_1 и x_2, y_2 до определяемой точки P , то искомые координаты этой точки x, y вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} x &= x_1 + p \cos \alpha + h \sin \alpha; \\ y &= y_1 + p \sin \alpha - h \cos \alpha \end{aligned} \quad (\text{III.4.55})$$

или

$$\begin{aligned} x &= x_2 - q \cos \alpha + h \sin \alpha; \\ y &= y_2 - q \sin \alpha - h \cos \alpha, \end{aligned} \quad (\text{III.4.56})$$

где

$$p = (r_1^2 - r_2^2 + d_2)/2d; \quad q = (r_2^2 - r_1^2 + d_2)/2d;$$

d — длина; α — дирекционный угол базиса 1—2.

Вычисление плоских прямоугольных координат пункта из измерений гиперболическими системами (решение задачи фазового зонда на плоскости). Задача фазового зонда формулируется следующим образом: найти координаты определяемой точки P по известным координатам трех базисных станций 1(x_1, y_1), 2(x_2, y_2), 3(x_3, y_3) и двум измеренным разностям расстояний $(r_3 - r_1)$ и $(r_3 - r_2)$. Наиболее часто эта задача решается способом последовательных приближений. Искомые координаты пункта P представляют в виде:

$$x = x_0 + \Delta x; \quad y = y_0 + \Delta y,$$

где Δx и Δy — приближенные значения координат x и y , получаемые по измеренным разностям расстояний (гиперболическим координатам) при помощи планшета с гиперболической сеткой. Поправки Δx и Δy вычисляются по формулам:

$$\Delta x = \frac{n_2 \delta r_1 - n_1 \delta r_2}{m_1 n_2 - m_2 n_1}; \quad \Delta y = \frac{-m_2 \delta r_1 + m_1 \delta r_2}{m_1 n_2 - m_2 n_1}, \quad (\text{III.4.57})$$

где

$$\begin{aligned} \delta r_1 &= (r_3 - r_1) - (r_{03} - r_{01}); \quad \delta r_2 = (r_3 - r_2) - (r_{03} - r_{02}); \\ r_{01} &= \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}; \quad r_{02} = \sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2}; \\ r_{03} &= \sqrt{(x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2}; \end{aligned}$$

$$m_1 = \frac{x_0 - x_3}{r_{03}} - \frac{x_0 - x_1}{r_{01}}; \quad n_1 = \frac{y_0 - y_3}{r_{03}} - \frac{y_0 - y_1}{r_{01}};$$

$$m_2 = \frac{x_0 - x_3}{r_{03}} - \frac{x_0 - x_2}{r_{02}}; \quad n_2 = \frac{y_0 - y_3}{r_{03}} - \frac{y_0 - y_2}{r_{02}}.$$

Число приближений зависит от точности приближенных координат. Постопным приближением считается такое, при котором поправки Δx и Δy оказываются меньше величины, характеризующей точность данной РГС.

Вычисление длины линии, измеренной методом пересечения створа

При методе пересечения створа (см. рис. 15) периодически измеряются наклонные расстояния r_1 и r_2 от самолета до двух наземных станций. Обработка измерений заключается в нахождении минимальной суммы наклонных дальностей $(r_1 + r_2)_{\min}$, соответствующей положению самолета в створе измеряемой линии.

Измерению, произведенному наиболее близко от створа, присваивают нулевой номер, измерениям до пересечения створа — номера от $-n$ до -1 , после пересечения створа — от $+1$ до $+n$. Минимальная сумма дальностей находится по формуле

$$(r_1 + r_2)_{\min} = P - \frac{Q^2}{4R}, \quad (\text{III.4.58})$$

где $P = P_0 + (r_1 + r_2)$; P_0 , Q и R определяют по способу наименьших квадратов. Система уравнений поправок имеет вид

$$P_0 + iQ + i^2R + l_i = v_i, \quad (\text{III.4.59})$$

где i — номер измерения; $l_i = (r_1 + r_2)_0 - (r_1 + r_2)_i$ — свободные члены. Если в обработку не принимается измерение с каким-либо номером (например, -6), то следует отбросить также измерение с симметричным номером $+6$. Системе уравнений поправок соответствует система трех нормальных уравнений, которая с учетом таблицы коэффициентов уравнений поправок имеет вид

$$\begin{array}{lll} [aa] P_0 & + [ac] R & + [al] = 0 \\ & [bb] Q & + [bl] = 0 \\ [ac] P_0 & + [cc] R & + [cl] = 0. \end{array} \quad (\text{III.4.60})$$

Из решения нормальных уравнений:

$$P_0 = \frac{[cc][al] - [bb][al]}{[bb]^2 - [aa][cc]}; \quad (\text{III.4.61})$$

$$Q = -\frac{[bl]}{[bb]}; \quad (\text{III.4.62})$$

$$R = \frac{[aa][cl] - [bb][al]}{[bb]^2 - [aa][cc]}. \quad (\text{III.4.63})$$

Средняя квадратическая ошибка минимальной суммы дальностей определяется по формуле

$$m = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{[vv]}{2(n-k-2)(2n-k+1)}}, \quad (\text{III.4.64})$$

где k — число пропущенных сумм.

После определения $(r_1 + r_2)_{\min}$ находят наклонные дальности, составляющие эту минимальную сумму:

$$r_{1,\min} = (r_1 + r_2)_{\min} - r_{2,0};$$

$$r_{2,\min} = (r_1 + r_2)_{\min} - r_{1,0}.$$

Эти дальности исправляют поправками за скорость распространения и кривизну пути радиоволн и редуцируют на поверхность относительно по формулам, приведенным в данной главе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баландин В. Н. Радиогодезические системы в аэросъемке. М., Недра, 1983.
2. Бин Б. Р., Даттон Е. Дж. Радиометеорология. Пер. с англ., М., Гидрометеиздат, 1971.
3. Генике А. А., Ларин Б. А., Назаров В. М. Геодезические фазовые дальнометры. М., Недра, 1974.
4. Глумов В. П. Основы морской геодезии. М., Недра, 1983.
5. Кондрашков А. В. Электрооптические и радиогодезические измерения. М., Недра, 1972.
6. Лобачев В. М. Радиоэлектронная геодезия. М., Недра, 1980.
7. Пащенко В. З. Радио- и светодальномеры. М., Недра, 1980.
8. Прилепин М. Т., Голубев А. Н. Инструментальные методы геодезической рефрактометрии. — Итоги науки и техники. Геодезия и аэросъемка, М., ВИНИТИ, 1979, т. 15.
9. Радиогодезические и электрооптические измерения/В. Д. Большаков, А. Н. Голубев, Ф. Деймлих и др. М., Недра, 1985.

III.5. УРАВНИВАНИЕ ТРИАНГУЛЯЦИИ, ТРИЛАТЕРАЦИИ И КОМБИНИРОВАННОЙ СЕТИ

П. А. Гайдаев

А. ВВЕДЕНИЕ

III.5.1. Исходные данные

Уравнивание государственных геодезических сетей всех классов производится на основе метода проектирования (т. е. на поверхности относимости) и на плоскости в проекции Гаусса. Поэтому в дальнейшем изложении все величины, включаемые в уравнивание, будут предполагаться приведенными сначала на поверхность относимости, а затем на плоскость.

Конечная цель создания геодезической сети — получение координат пунктов. Для достижения этой цели в сети должно быть не менее четырех исходных величин, из них по крайней мере один пункт с известными координатами (в общепринятой или местной системе). Остальными необходимыми исходными величинами могут быть координаты второго пункта или длина одной из сторон сети и дирекционный угол той же либо другой стороны. Указанные четыре величины назовем «необходимыми исходными данными».

Когда при уравнивании к исходным величинам поправок не ищут, их называют жесткими исходными данными. Элементы геодезической сети, которые при уравнивании получают поправки, называют не жесткими.

Если в сети имеются только необходимые исходные данные, то ее называют свободной. При наличии в сети больше четырех необходимых жестких исходных данных ее называют несвободной.

Очевидно, что для вычисления координат всех пунктов триангуляции необходимо иметь два исходных пункта либо один пункт, а также один дирекционный угол и длину одной стороны; в полигонометрии и трилатерации, кроме исходного пункта, достаточно иметь один дирекционный угол.

В качестве исходных при уравнивании государственных геодезических сетей служат следующие данные:

— в сети I класса — начальный пункт, а также базисные стороны и геодезические азимуты на концах всех звеньев;

- в сети 2 класса — элементы сети 1 класса, а также базисные стороны и геодезические азимуты уравниваемой сети;
- в сетях и фигурах 3 и 4 классов — элементы сетей высших классов.

III.5.2. Измеряемые величины. Системы координат

В геодезических сетях измеряют горизонтальные и вертикальные углы, расстояния, а также астрономические широты, долготы и азимуты. Все эти величины измеряются в топоцентрической системе координат, основной осью которой служит отвесная линия. В СССР по предложению Ф. Н. Красовского для математической обработки государственной геодезической сети применяется метод проектирования, сущность которого заключается в следующем.

Результаты измерений, выполненные на разных пунктах сети, исправляют «редукционными» поправками для приведения (редуцирования) этих результатов в общую систему координат. Получив все результаты измерений в единой системе координат, можно выполнить их совместное уравнивание.

Общую систему координат выбирают на поверхности референц-эллипсоида (на «поверхности относимости»). Для этого должны быть определены параметры эллипсоида, т. е. a — большая полуось и α — сжатие, а также начальный пункт, для которого назначают геодезические координаты: B_0 — широту, L_0 — долготу и H_0 — геодезическую высоту над поверхностью относимости. Выбранные величины a , α , B_0 , L_0 и H_0 называют исходными датами*. Для получения исходных дат выполняют соответствующие астрономические определения и гравиметрическую съемку.

Результаты наблюдений горизонтальных углов на каждом геодезическом пункте, независимо от применявшихся способов наблюдений, после уравнивания на станции всегда представляются в виде ряда направлений. Эти ряды (по одному на каждом пункте) при уравнивании сети рассматриваются как непосредственные результаты измерений.

Однако при уравнивании геодезических сетей в качестве результатов измерений часто принимают не направления, а углы, образованные смежными направлениями. Несмотря на очевидное нарушение при этом строгости уравнивания, его результаты оказываются вполне приемлемыми для сетей 3 и 4 классов.

III.5.3. Редукционные поправки

Ниже приведены формулы вычисления редукционных поправок в направления, расстояния и астрономические азимуты.

а. Поправка в направление за уклонение отвеса (v'')

$$v''_{12} = u_1 \sin(\theta_1 - A_{12}) \operatorname{tg} v_{12}, \quad (\text{III.5.1})$$

где

$$u_1 = \sqrt{\xi_1^2 + \eta_1^2},$$

ξ_1 и η_1 — составляющие уклонения отвеса на пункте 1,

$$\theta_1 = \operatorname{arctg} \frac{\eta_1}{\xi_1},$$

A_{12} — азимут направления, v_{12} — угол наклона.

* Ориентирование сети обеспечивается азимутами на всех пунктах Лапласа, а не только в начальном пункте. Поэтому азимут Лапласа в начальном пункте неправильно причислять к исходным датам.

6. Поправка в направление за высоту наблюдаемой визирной цели (v^H).

$$v_{12}^H = c H_2^{KM} \sin 2A_{12}, \quad (\text{III.5.2})$$

где

$$c = 0,11 \cos^2 B,$$

B — средняя широта для всей заполняющей сети или для звена 1 класса; H_2^{KM} — высота визирной цели (берется с карты до 0,1 км); A_{12} — азимут направления (до 1°).

в. Редуцирование наклонного расстояния.

$$1) v_h = - \left(\frac{h^2}{2s} + \frac{h^4}{8s^3} \right), \quad (\text{III.5.3})$$

где s — наклонное расстояние,

$$h = H_2^Y - H_1^Y + s \frac{\vartheta_{21}'' - \vartheta_{12}''}{2\rho''}, \quad (\text{III.5.3}')$$

H^Y — нормальная высота; $v_{hi} = u_h \cos(A_{hi} - \theta_h)$ (о величинах u и θ см. пункт «а»), $\rho'' = 206\,265''$.

$$2) d = s + v_h; \quad (\text{III.5.4})$$

поправка v_h всегда отрицательна, т. е. ее абсолютное значение всегда вычитается.

$$3) S = d - d \frac{H_{cp}}{R + H_{cp}} + \frac{d^3}{24R^2}, \quad (\text{III.5.5})$$

где s — редуцированное расстояние; $H_{cp} = H_{cp}^Y + \zeta_{cp}$ — средняя геодезическая высота

$$H_{cp}^Y = \frac{1}{2} (H_1^Y + H_2^Y), \quad \zeta_{cp} = \frac{1}{2} (\zeta_1 + \zeta_2)$$

(ζ_1 и ζ_2 — берутся с карты высот геоида), $R = R(B_{cp}, A_{cp})$ — выбирается из приведенной табл. 10.

ТАБЛИЦА 10

$$R_{KM} = R_{KM}(B_{cp}, A_{cp})$$

x, км	B	A									
		0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
		180 360	170 350	160 340	150 330	140 320	130 310	120 300	110 290	100 280	270
0	0°	6336	6337	6341	6346	6353	6361	6367	6373	6377	6378
1100	10	38	39	43	48	54	62	67	73	77	78
2210	20	43	44	47	52	59	66	72	77	80	81
3320	30	52	54	57	61	66	72	76	80	83	84
4430	40	62	62	64	68	71	76	79	83	85	87
5540	50	73	74	75	78	81	83	86	89	90	91
6650	60	84	84	85	86	88	90	92	93	93	94
7770	70	92	93	93	94	95	96	97	98	98	98
8885	80	98	97	98	97	98	98	98	98	98	99
10 000	90	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400

Последний член формулы (III.5.5) можно вычислять по простой и практически точной формуле

$$\frac{d^3}{24R^2} \approx (d_0^3) \text{ мм}, \quad (\text{III.5.5}')$$

где

$$d_0 = \frac{d_{\text{км}}}{10_{\text{км}}}.$$

г. Редуцирование расстояния, измеренного подвесными мерными приборами.

$$S = s_0 - s_0 \frac{H_{\text{ср}}}{R + H_{\text{ср}}} + \frac{\vartheta_{12}''}{\rho''} (H_0^\gamma - H_1^\gamma) \frac{\vartheta_{21}''}{\rho''} (H_0^\gamma - H_2^\gamma), \quad (\text{III.5.6})$$

где s_0 — сумма горизонтальных проложений всех пролетов; $H_{\text{ср}} = H_0^\gamma + \xi_{\text{ср}}$ (о величине $\xi_{\text{ср}}$ см. пункт «в, 3»); H_0^γ — среднее арифметическое значение нормальных высот всех целиков базисных штативов. О величине ϑ_{kl} см. пункт «в, 1».

д. Вычисление азимута Лапласа (геодезического азимута) A_{12} .

$$A_{12} = \alpha_{12} + (L_1 - \lambda_1) \sin \varphi_1 + v_{12}'' + v_{12}^H, \quad (\text{III.5.7})$$

где α — астрономический азимут; λ — астрономическая долгота; φ — астрономическая широта; L — геодезическая долгота; v'' и v^H — см. пункты «а» и «б».

е. Поправка в направление за переход к геодезической линии.

$$v_{12}' = 0,000003 \cdot \cos^2 B_1 \sin 2A_{12} \cdot s_{\text{км}}^2 \text{ (в секундах)}.$$

Вводится только в сетях 1 класса.

III.5.4. О способах уравнивания

Для уравнивания геодезических сетей наиболее широко применяются основные способы: коррелятный и параметрический. В некоторых случаях находит применение коррелятный способ с дополнительными неизвестными (например, для уравнивания системы рядов триангуляции 2 и низших классов).

Небольшие фигуры триангуляции, включающие два-три определяемых пункта, как правило, уравнивают коррелятным способом с той или иной его модификацией и с отысканием поправок в углы. В частности, ряд триангуляции выгоднее всего уравнивать двухгрупповым коррелятным способом Крюгера—Урмаева.

Большие сети триангуляции наиболее целесообразно уравнивать параметрическим способом. Этим же способом проще всего уравниваются обратные засечки.

Уравнивание линейно-угловой триангуляции проще всего и выгоднее выполнять параметрическим способом. Этот же способ оказывается наиболее экономичным для уравнивания больших сетей трилатерации, а также комбинированной сети. Однако отдельные фигуры трилатерации (геодезический четырехугольник, центральная система, вставка в угол нескольких пунктов), а также ряд трилатерации лучше уравнивать коррелятным способом. Для применения ЭВМ наиболее эффективны параметрические алгоритмы, основанные на методе приближений,

Б. ВИДЫ УСЛОВИЙ (УСЛОВНЫХ УРАВНЕНИЙ), ВОЗНИКАЮЩИХ В ТРИАНГУЛЯЦИИ

III.5.5. Обозначения (на плоскости)

На рисунках:

	— жесткие исходные пункты и стороны;
	— определяемые пункты и стороны;
	— измеренная жесткая базисная сторона;
	— измеренная нежесткая сторона;
	— измеренный жесткий дирекционный угол;
	— измеренный нежесткий дирекционный угол;
	— одностороннее направление по стороне.

В формулах:

- X, Y — координаты жестких исходных пунктов;
 x, y — уравненные координаты определяемых пунктов;
 x^o, y^o — предварительные координаты;
 δ_x, δ_y — поправки координат;
 D — длина жесткой базисной стороны;
 d — измеренное нежесткое значение стороны;
 v_d — поправка измеренной стороны;
 $d + v_d = d'$ — уравненное значение стороны;
 T — жесткий дирекционный угол;
 t — измеренное нежесткое значение дирекционного угла;
 v_t — поправка дирекционного угла;
 $t + v_t = t'$ — уравненное значение дирекционного угла;
 M_{ki} — измеренное значение направления;
 v_{ki} — поправка направления;
 $M_{ki} + v_{ki} = M'_{ki}$ — уравненное значение направления;
 β_i — измеренное значение угла;
 v_β — поправка в угол;
 $\beta_i + v_\beta = \beta'_i$ — уравненное значение угла.

III.5.6. Угловые условия

Угловыми называют условия, возникающие непосредственно между углами или направлениями в линейной форме и с коэффициентами ± 1 и нулевыми, иными словами, в виде алгебраической суммы некоторых измеренных величин и свободного члена.

После устранения невязок угловых условий любой дирекционный угол в сети может быть получен однозначно, независимо от пути его передачи от исходных дирекционных углов. Однако невязки при вычислении длин сторон и координат пунктов останутся; для их устранения необходимо учесть еще синусные условия.

Напомним общий порядок получения условного уравнения поправок.

а. Составляют условное уравнение связи в форме

$$\varphi(\beta_1, \dots, \beta_n) = 0. \quad (\text{III.5.8})$$

Заметим, что эта форма условного уравнения связи (в правой части — нуль) обязательна во всех случаях.

б. Вычисляют невязку по формуле

$$\Phi(\beta_1, \dots, \beta_n) = W_j, \quad (\text{III.5.9})$$

Левая часть равенства (III.5.9) имеет точно такой же вид, как и в равенстве (III.5.8), если вместо β' подставить в нее β . Поэтому для сокращения хода рассуждений условные уравнения будем представлять, как правило, сразу в виде (III.5.9).

в. Получают коэффициенты условного уравнения поправок (т. е. условного уравнения связи, приведенного к линейному виду) по формуле

$$a_{ij} = \frac{\partial W_j}{\partial \beta_i} \quad (i = 1, \dots, n). \quad (\text{III.5.10})$$

г. Выписывают в таблицу коэффициенты и свободные члены (невязки) условных уравнений поправок, т. е. равенств

$$a_{1j} v_1 + \dots + a_{nj} v_n + W_j = 0 \quad (j = 1, \dots, r), \quad (\text{III.5.11})$$

где r — число уравнений.

д. Далее действуют в соответствии с общим порядком уравнения коррелятным способом (см. раздел I.2).

Отметим следующее практически важное обстоятельство: коэффициенты перед поправками v_i (± 1 и нули) в уравнениях поправок угловых условий будут те же, что и перед величинами β_i в (III.5.9). Это обстоятельство существенно облегчает заполнение таблицы коэффициентов (в отношении угловых условий): для этого не требуется составлять равенства типа (III.5.11).

Рассмотрим виды угловых условий, возникающих в триангуляции при уравнивании углов.

Условия фигур. Условие фигуры возникает в многоугольнике и соответствует формуле для суммы его внутренних углов: $\sum_{i=1}^g \beta_i = 180^\circ (g-2)$ или согласно (III.5.9)

$$\sum_{i=1}^g \beta_i - (g-2) 180^\circ = W, \quad (\text{III.5.12})$$

где g — число внутренних углов многоугольника.

Условное уравнение поправок имеет вид

$$\sum_{i=1}^g v_i + W = 0, \quad (\text{III.5.12}')$$

где v_i — поправки к величинам β_i .

Практически приходится иметь дело только с треугольниками, и равенства (III.5.12) и (III.5.12') принимают вид

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 - 180^\circ = W \quad (\text{III.5.13})$$

и

$$v_1 + v_2 + v_3 + W = 0. \quad (\text{III.5.13}')$$

Условие фигуры возникает и в случае, показанном на рис. 18, когда имеется одностороннее направление. В этой фигуре измерялся угол β_{5+6} , а углы β_5 и β_6 по отдельности не измерялись. Поэтому

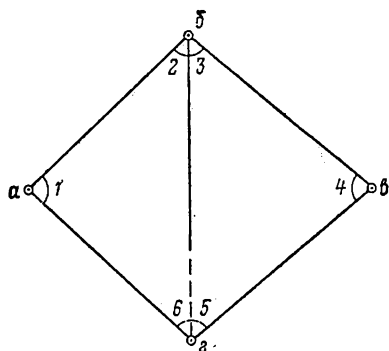


Рис. 18. Треугольники для условия фигур

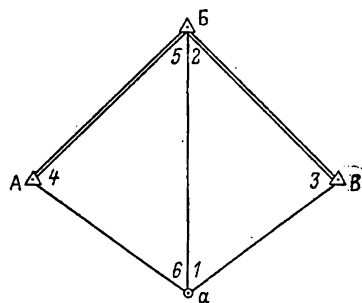


Рис. 19. Вставка в жесткий угол

му, формально рассуждая, следовало бы учитывать такое условное уравнение:

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6 - 360^\circ = W.$$

Однако такое уравнение усложнило бы уравнивание. Поэтому при наличии одностороннего направления рекомендуется взаимное, неотнаблюдаемое направление вычислить по имеющимся данным и затем включать в уравнивание наряду с измеренными.

Для случая, показанного на рис. 18, порядок действий для получения вычисленного направления $M_{гб}$ будет следующий [8]:

1) вычисляют значения

$$\beta_5^\circ = 180^\circ - \beta_3 - \beta_4,$$

$$\beta_6^\circ = 180^\circ - \beta_1 - \beta_2;$$

2) получают два значения направления с пункта г на пункт б:

$$M_{гб}^{(1)} = M_{га} + \beta_6^\circ \text{ и } M_{гб}^{(2)} = M_{гб} - \beta_5^\circ;$$

3) в качестве измеренного значения направления $M_{гб}$ принимают среднее, т. е.

$$M_{гб} = \frac{1}{2} (M_{гб}^{(1)} + M_{гб}^{(2)}).$$

В последующем изложении под условиями фигур будем понимать только условия треугольников.

Условие горизонта. Это условие возникает на тех пунктах, на которых включают в уравнивание все углы, образованные всеми парами смежных направлений. В этом случае сумма углов вокруг пункта после уравнивания должна быть равна 360° . Особенностью условия горизонта является то, что и сумма измеренных значений углов также равна точно 360° , т. е. невязки этих условий всегда равны нулю. В этой особенности условия горизонта нетрудно убедиться, вычислив углы из любого ряда направлений.

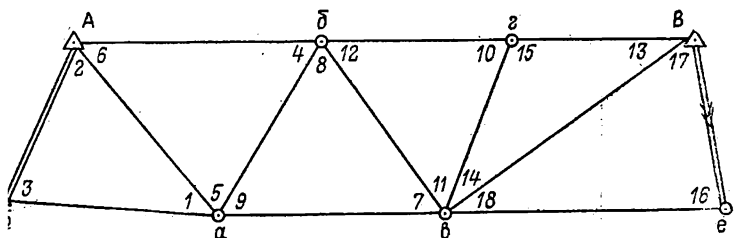


Рис. 20. Ряд с жесткими дирекционными углами

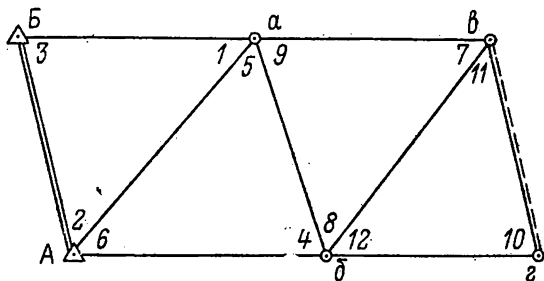


Рис. 21. Ряд с нежесткими дирекционными углами

Для пяти смежных углов условие горизонта имеет вид

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5 - 360^\circ = W \quad (\text{III.5.14})$$

и

$$v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5 + W = 0. \quad (\text{III.5.14}')$$

Заметим, что при уравнивании направлений условия горизонта не возникают.

Условия жестких дирекционных углов. Такие условия возникают в двух случаях (рис. 19 и 20):

$$1) T_{BV} + \beta_2 + \beta_5 - T_{BA} = W; \quad (\text{III.5.15})$$

$$v_2 + v_5 + W = 0; \quad (\text{III.5.15}')$$

$$2) T_{AB} - \beta_2 \pm 180^\circ + \beta_5 \pm 180^\circ - \beta_8 \pm 180^\circ + \beta_{11} + \beta_{14} \pm 180^\circ - \beta_{17} - T_{Be} = W; \quad (\text{III.5.16})$$

$$-v_2 + v_5 - v_8 + v_{11} + v_{14} - v_{17} + W = 0. \quad (\text{III.5.16}')$$

Порядок нумерации углов в ряде треугольников следующий: первым в треугольнике нумеруют угол, лежащий против стороны, исходной для решения данного треугольника; последним — угол, лежащий против стороны, исходной для следующего треугольника ряда. Указанные углы и противолежащие им стороны называют связующими. Остальные углы и противолежащие им стороны называются промежуточными.

В условие дирекционных углов следует включать промежуточные углы.

Условие нежестких дирекционных углов. Это условие возникает в случае, если в сети имеются измеренные дирекционные углы, подлежащие исправлению, ввиду их недостаточной точности. Для случая, показанного на рис. 21, имеем

$$T_{AB} + \beta_2 \pm 180^\circ - \beta_5 \pm 180^\circ + \beta_8 \pm 180^\circ - \beta_{11} - t_{82} = W \quad (\text{III.5.17})$$

и

$$v_2 - v_5 + v_8 - v_{11} - v_{82} + W = 0. \quad (\text{III.5.17}')$$

Уравнения типа (III.5.17') отличаются от уравнений типа (III.5.16') тем, что в них, кроме поправок в углы, имеются еще и поправки в дирекционные углы (v_{82}).

Если бы дирекционный угол с А на В был также измерен, то в уравнении (III.5.17') появилась бы и поправка к нему (со знаком плюс). Разумеется, при уравнивании необходимо учитывать веса измеренных дирекционных углов $P_i = m_B^2/m_i^2$ (или $P_i = m_M^2/m_i^2$, если уравниваются направления).

III.5.7. Синусные условия

Синусными называют условные уравнения нелинейного вида, в которых фигурируют синусы (косинусы). Синусные условия подразделяются на базисные, полюсные и координатные. Учет базисных и полюсных условий обеспечивает получение длины любой стороны в сети однозначно, независимо от пути передачи ее от исходных сторон. Координатные условия обеспечивают однозначность получения координат любого пункта в сети.

Базисные условия жестких сторон возникают в двух случаях (см. рис. 19 и 20).

1) Согласно рис. 2

$$D_{БВ} \frac{\sin \beta_3 \sin \beta_6}{\sin \beta_1 \sin \beta_4} - D_{БА} = W. \quad (\text{III.5.18})$$

Далее, в соответствии с (III.5.10) и (III.5.11), получим:

$$\begin{aligned} & - \frac{D_{БА}}{\rho''} \operatorname{ctg} \beta_1 v_1 + \frac{D_{БА}}{\rho''} \operatorname{ctg} \beta_3 v_3 - \\ & - \frac{D_{БА}}{\rho''} \operatorname{ctg} \beta_4 v_4 + \frac{D_{БА}}{\rho''} \operatorname{ctg} \beta_6 v_6 + W = 0. \end{aligned} \quad (\text{a})$$

В условных уравнениях государственных сетей выгодно выражать линейные величины в дециметрах, а углы — в секундах. В специальных сетях может оказаться удобнее линейные величины выражать и в сантиметрах.

Для удобства вычислений коэффициенты уравнений выгодно иметь в среднем близкими к единице по абсолютной величине. Так как в правой части условного уравнения поправка стоит нуль и его можно умножать на любое число, то умножим уравнение (а) на $\rho''/D_{БА}$. Тогда получим окончательно:

$$- \operatorname{ctg} \beta_1 v_1 + \operatorname{ctg} \beta_3 v_3 - \operatorname{ctg} \beta_4 v_4 + \operatorname{ctg} \beta_6 v_6 + \frac{\rho'' W}{D_{БА}} = 0. \quad (\text{III.5.18}')$$

Базисное условное уравнение можно составить в логарифмической форме. Имея в виду уравнение связи

$$D_{BB} \frac{\sin \beta'_3 \sin \beta'_6}{\sin \beta'_1 \sin \beta'_4} - D_{BA} = 0$$

[см. равенство (III.5.8)], логарифмируя его и переходя к виду (III.5.9), получим

$$(\lg D_{BB} + \lg \sin \beta_3 + \lg \sin \beta_6) - (\lg D_{BA} + \lg \sin \beta_1 + \lg \sin \beta_4) = W. \quad (\text{III.5.19})$$

Учитывая теперь (III.5.10) и (III.5.11), напомним условное уравнение поправок

$$-\Delta_1 v_1 + \Delta_3 v_3 - \Delta_4 v_4 + \Delta_6 v_6 + W = 0, \quad (\text{III.5.19}')$$

где Δ_i — изменение логарифма синуса угла β_i при увеличении его на $1''$, выраженное в единицах последнего знака мантиссы логарифма. Для сетей 3 и низших классов можно пользоваться шестизначными таблицами логарифмов. Невязка W также выражается в единицах последнего знака логарифма.

2) Второй случай отражен на рис. 20. Для помещенного на рисунке ряда треугольников напомним:

$$D_{BA} \frac{\sin \beta_3 \sin \beta_6 \sin \beta_9 \sin \beta_{12} \sin \beta_{15} \sin \beta_{18}}{\sin \beta_1 \sin \beta_4 \sin \beta_7 \sin \beta_{10} \sin \beta_{13} \sin \beta_{16}} - D_{Be} = W \quad (\text{III.5.20})$$

и

$$\begin{aligned} & -\text{ctg } \beta_1 v_1 + \text{ctg } \beta_3 v_3 - \text{ctg } \beta_4 v_4 + \text{ctg } \beta_9 v_9 - \text{ctg } \beta_7 v_7 + \\ & + \text{ctg } \beta_6 v_6 - \text{ctg } \beta_{10} v_{10} + \text{ctg } \beta_{12} v_{12} - \text{ctg } \beta_{13} v_{13} + \text{ctg } \beta_{15} v_{15} - \\ & - \text{ctg } \beta_{16} v_{16} + \text{ctg } \beta_{18} v_{18} + \frac{\rho'' W}{D_{Be}} = 0. \quad (\text{III.5.20}') \end{aligned}$$

Базисное условие не жестких сторон возникает, например, в ряде, показанном на рис. 21, и выглядит следующим образом:

$$D_{AB} \frac{\sin \beta_3 \sin \beta_6 \sin \beta_9 \sin \beta_{12}}{\sin \beta_1 \sin \beta_4 \sin \beta_7 \sin \beta_{10}} - d_{a2} = W \quad (\text{III.5.21})$$

и

$$\begin{aligned} & -\text{ctg } \beta_1 v_1 + \text{ctg } \beta_3 v_3 - \text{ctg } \beta_4 v_4 + \text{ctg } \beta_6 v_6 - \text{ctg } \beta_7 v_7 + \\ & + \text{ctg } \beta_9 v_9 - \text{ctg } \beta_{10} v_{10} + \text{ctg } \beta_{12} v_{12} - \frac{\rho''}{d_{a2}} v_{a2} + \frac{\rho'' W}{d_{a2}} = 0. \quad (\text{III.5.21}') \end{aligned}$$

Уравнение (III.5.21') отличается от (III.5.20') только членом $-\frac{\rho''}{d_{a2}} v_{a2}$.

В логарифмической форме имеем

$$(\lg D_{AB} + \lg \sin \beta_3 + \lg \sin \beta_6 + \lg \sin \beta_9 + \lg \sin \beta_{12}) - (\lg d_{a2} + \lg \sin \beta_1 + \lg \sin \beta_4 + \lg \sin \beta_7 + \lg \sin \beta_{10}) = W \quad (\text{III.5.22})$$

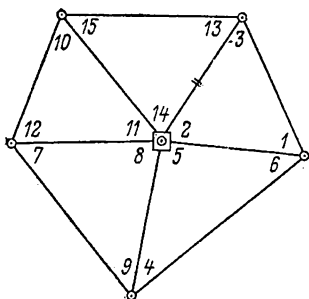
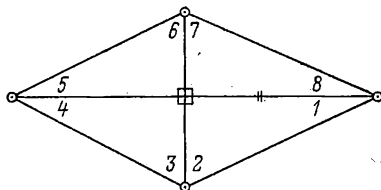


Рис. 22. Центральная система

Рис. 23. Геодезический четырехугольник



и

$$-\Delta_1 v_1 + \Delta_3 v_3 - \Delta_4 v_4 + \Delta_5 v_5 - \Delta_7 v_7 + \Delta_9 v_9 - \\ - \Delta_{10} v_{10} + \Delta_{12} v_{12} - \Delta_{\text{сз}} v_{\text{сз}} + W = 0, \quad (\text{III.5.22''})$$

В (III.5.22') коэффициент $\Delta_{\text{сз}}$ — изменение $\lg d_{\text{сз}}$ на единицу размерности (т. е. на 1 дм или 1 см).

Если на рис. 21 сторона между пунктами A и B нежесткая, то в (III.5.21') должен появиться член $+\frac{\rho''}{d_{AB}} v_{AB}$, а в (III.5.22') — член $+\Delta_{AB} v_{AB}$.

Полусное условие возникает в фигуре, в которой есть точка, называемая полюсом, связанная сторонами или их частями со всеми вершинами некоторого многоугольника. В вычислительном отношении полюс выгодно выбирать так, чтобы указанный многоугольник имел наибольшую площадь.

В фигуре, в которой возникает полюсное условие, можно образовать замкнутый ряд треугольников, начинающийся и заканчивающийся на одной и той же стороне. Назовем такую сторону исходно-конечной.

Рассмотрим типичные случаи, отображенные на рис. 22 и 23 (двумя штрихами на каждом рисунке обозначена исходно-конечная сторона, квадратиком — полюс).

Обозначая исходно-конечную сторону через D_0 , для фигуры на рис. 22 (центральной системы) получим условное уравнение в виде

$$D_0 \frac{\sin \beta_3 \sin \beta_6 \sin \beta_9 \sin \beta_{12} \sin \beta_{15}}{\sin \beta_1 \sin \beta_4 \sin \beta_7 \sin \beta_{10} \sin \beta_{13}} - D_0 = 0, \quad (6)$$

т. е. как частный случай базисного уравнения. Поэтому можем написать уравнение поправок

$$-\text{ctg } \beta_1 v_1 + \text{ctg } \beta_3 v_3 - \dots - \text{ctg } \beta_{13} v_{13} + \text{ctg } \beta_{15} v_{15} + \frac{\rho'' W}{D_0} = 0. \quad (\text{в})$$

Очевидно, что для исходно-конечной стороны D_0 можно принять любое значение. Имея в виду равенство (в), выгодно взять $D_0 = 206\,265$ дм. Тогда получим

$$206265 \frac{\sin \beta_3 \sin \beta_6 \sin \beta_9 \sin \beta_{12} \sin \beta_{15}}{\sin \beta_1 \sin \beta_4 \sin \beta_7 \sin \beta_{10} \sin \beta_{13}} - 206265 = W \quad (\text{III.5.23})$$

и

$$-\operatorname{ctg} \beta_1 v_1 + \operatorname{ctg} \beta_3 v_3 - \dots - \operatorname{ctg} \beta_{13} v_{13} + \operatorname{ctg} \beta_{15} v_{15} + W^* = 0. \quad (\text{III.5.23}')$$

Условное уравнение в логарифмической форме для той же фигуры имеет вид

$$(\lg \sin \beta_3 + \lg \sin \beta_6 + \lg \sin \beta_9 + \lg \sin \beta_{12} + \lg \sin \beta_{15}) - \\ - (\lg \sin \beta_1 + \lg \sin \beta_4 + \lg \sin \beta_7 + \lg \sin \beta_{10} + \lg \sin \beta_{13}) = W \quad (\text{III.5.24})$$

и

$$-\Delta_1 v_1 + \Delta_3 v_3 - \Delta_4 v_4 + \Delta_6 v_6 - \Delta_7 v_7 + \Delta_9 v_9 - \Delta_{10} v_{10} + \Delta_{12} v_{12} - \\ - \Delta_{13} v_{13} + \Delta_{15} v_{15} + W = 0. \quad (\text{III.5.25})$$

Особенностью фигуры (см. рис. 23) (геодезического четырехугольника) является лишь нумерация углов, при которой синусы нечетных углов попадают в числитель условного уравнения, а четных — в знаменатель. Кроме того, полюсом является не пункт, как в других фигурах, а точка пересечения диагоналей.

Координатные условия возникают в сети, в которой имеется несколько изолированных исходных пунктов и их систем, причем один из исходных пунктов должен быть конечным пунктом базисной стороны (жесткой или нежесткой) с известным дирекционным углом (жестким или нежестким).

Составим координатные условия абсцисс и ординат для ряда, изображенного на рис. 20. Заметим, что и в сети для составления координатных условий выделяется ряд треугольников, поэтому дело сводится к одному и тому же случаю.

Координатные условия возникают всегда попарно: условие абсцисс и условие ординат. Рассмотрим вначале условие абсцисс.

Прежде всего в ряде намечается ходовая линия между двумя исходными пунктами, как правило, по связующим сторонам.

В рассмотренном ряде треугольников ходовая линия пройдет по сторонам Aa , ab , ba , aB . Для ходовой линии напомним уравнения связи

$$X_A + D'_{Aa} \cos t'_{Aa} + D'_{ab} \cos t'_{ab} + D'_{ba} \cos t'_{ba} + D'_{aB} \cos t'_{aB} - X_B = 0. \quad (\text{III.5.26})$$

$$Y_A + D'_{Aa} \sin t'_{Aa} + D'_{ab} \sin t'_{ab} + D'_{ba} \sin t'_{ba} + D'_{aB} \sin t'_{aB} - Y_B = 0. \quad (\text{III.5.27})$$

Штрихи обозначают уравненные значения.

Длины сторон и дирекционные углы являются функциями измеренных величин — углов. Учитывая это, напомним уравнения (III.5.28) — (III.5.29), где нулевыми индексами обозначены значения длин сторон и их дирекционных углов, вычисленные от стороны AB через измеренные значения углов.

$$X_A + D^0_{Aa} \cos t^0_{Aa} + D^0_{ab} \cos t^0_{ab} + D^0_{ba} \cos t^0_{ba} + D^0_{aB} \cos t^0_{aB} - X_B = W_x \quad (\text{III.5.28})$$

* Размерность W — в секундах.

$$Y_A + D_{Aa}^0 \sin t_{Aa}^0 + D_{a6}^0 \sin t_{a6}^0 + D_{6s}^0 \sin t_{6s}^0 + D_{sB}^0 \sin t_{sB}^0 - Y_s = W_y. \quad (\text{III.5.29})$$

Раскроем структуру составных частей равенств (III.5.28) — (III.5.29):

$$\left. \begin{aligned} D_{Aa}^0 &= D_{AB} \frac{\sin \beta_3}{\sin \beta_1}; \\ D_{a6}^0 &= D_{AB} \frac{\sin \beta_3 \sin \beta_6}{\sin \beta_1 \sin \beta_4}; \\ D_{6s}^0 &= D_{AB} \frac{\sin \beta_3 \sin \beta_6 \sin \beta_9}{\sin \beta_1 \sin \beta_4 \sin \beta_7}; \\ D_{sB}^0 &= D_{AB} \frac{\sin \beta_3 \sin \beta_6 \sin \beta_9 \sin \beta_{12} \sin \beta_{15}}{\sin \beta_1 \sin \beta_4 \sin \beta_7 \sin \beta_{10} \sin \beta_{13}}; \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.5.30})$$

$$\left. \begin{aligned} t_{Aa}^0 &= T_{AB} - \beta_2; \\ t_{a6}^0 &= T_{AB} - \beta_2 \pm 180^\circ + \beta_5; \\ t_{6s}^0 &= T_{AB} - \beta_2 \pm 180^\circ + \beta_5 \pm 180^\circ - \beta_8; \\ t_{sB}^0 &= T_{AB} - \beta_2 \pm 180^\circ + \beta_5 \pm 180^\circ - \beta_8 \pm 180^\circ + \\ &\quad + \beta_{11} + \beta_{14}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.5.31})$$

Выбор ходовой линии по связующим сторонам приводит к тому, что длины сторон становятся функциями только связующих углов, а их дирекционные углы — функциями только промежуточных. Это обстоятельство существенно облегчает вычисления.

Имея в виду равенства (III.5.28), (III.5.29), (III.5.30) и (III.5.31) и умножая уравнения поправок для абсцисс и ординат на $\rho''/k \cdot 10^n$, получим их окончательно в таком виде:

$$\begin{aligned} & - \frac{X_B - X_A}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_1 v_1 + \frac{Y_B - Y_A}{k \cdot 10^n} v_2 + \frac{X_B - X_A}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_3 v_3 - \\ & - \frac{X_B - x_a}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_4 v_4 - \frac{Y_B - y_a}{k \cdot 10^n} v_5 + \frac{X_B - x_a}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_6 v_6 - \\ & - \frac{X_B - x_6}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_7 v_7 + \frac{Y_B - y_6}{k \cdot 10^n} v_8 + \frac{X_B - x_6}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_9 v_9 - \\ & - \frac{X_B - x_8}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_{10} v_{10} - \frac{Y_B - y_8}{k \cdot 10^n} v_{11} + \frac{X_B - x_8}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_{12} v_{12} - \\ & - \frac{X_B - x_s}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_{13} v_{13} - \frac{Y_B - y_s}{k \cdot 10^n} v_{14} + \frac{X_B - x_s}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_{15} v_{15} + \\ & + \frac{\rho'' W_X}{k \cdot 10^n} = 0 \end{aligned} \quad (\text{III.5.32})$$

для условия абсцисс и

$$\begin{aligned}
 & -\frac{Y_B - Y_A}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_1 v_1 - \frac{X_B - X_A}{k \cdot 10^n} v_2 + \frac{Y_B - Y_A}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_3 v_3 - \\
 & -\frac{Y_B - y_a}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_4 v_4 + \frac{X_B - x_a}{k \cdot 10^n} v_5 + \frac{Y_B - y_a}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_6 v_6 - \\
 & -\frac{Y_B - y_b}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_7 v_7 - \frac{X_B - x_b}{k \cdot 10^n} v_8 + \frac{Y_B - y_b}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_9 v_9 - \\
 & -\frac{Y_B - y_a}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_{10} v_{10} + \frac{X_B - x_a}{k \cdot 10^n} v_{11} + \frac{Y_B - y_a}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_{12} v_{12} - \\
 & -\frac{Y_B - y_e}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_{13} v_{13} + \frac{X_B - x_e}{k \cdot 10^n} v_{14} + \frac{Y_B - y_e}{k \cdot 10^n} \operatorname{ctg} \beta_{15} v_{15} + \\
 & + \frac{\rho'' M_Y}{k \cdot 10^n} = 0 \quad (\text{III.5.33})
 \end{aligned}$$

для условия ординат.

В (III.5.32) и (III.5.33) невязки W_x и W_y вычисляются по формулам (III.5.28) и (III.5.29). Числа k и n следует подбирать так, чтобы среднее значение модулей коэффициентов условного уравнения поправок было близко к единице. При вычислении коэффициентов уравнений поправок полезно учесть следующие их особенности:

а) знаки перед коэффициентами при поправках в связующие углы те же, что и в базисном уравнении (угол в числителе — плюс, в знаменателе — минус);

б) знаки перед коэффициентами при поправках в промежуточные углы в (III.5.33) те же, что и в условии дирекционных углов, а в (III.5.32) — противоположные (разумеется, сами коэффициенты могут быть как положительные, так и отрицательные);

в) во всех разностях координат вычитаемое — всегда координата вершины промежуточного угла соответствующего треугольника.

В специальных сетях может встретиться случай, когда исходная сторона ряда нежесткая и требует исправления. Тогда, обозначая эту сторону через d_{AB} , в уравнение (III.5.32) следует добавить

$$\begin{aligned}
 & \text{член } + \frac{\rho'' (X_B - X_A)}{k \cdot 10^n d_{AB}} v_{AB}, \text{ а в уравнение (III.5.33) — член} \\
 & + \frac{\rho'' (Y_B - Y_A)}{k \cdot 10^n d_{AB}} v_{AB}.
 \end{aligned}$$

Необходимо будет также учесть и вес этой стороны: $P_d = m_\beta^2 / m_d^2$ (или $P_d = m_M^2 / m_d^2$, если уравниваются направления).

III.5.8. Условные уравнения для направлений

При уравнивании направлений возникают почти все те же условия, что и при уравнивании углов, за исключением условий горизонта.

Условные уравнения для направлений рекомендуется получать в такой последовательности:

а) на чертеже обозначают пункты буквами (исходные — прописными, определяемые — строчными), углы нумеруют;

б) вычисляют невязку и составляют уравнение поправок, как при уравнивании углов;

в) в уравнении поправок поправки в углы заменяют разностями поправок соответствующих направлений;

г) в полученном уравнении поправок в направлении раскрывают скобки и приводят подобные члены.

Покажем на примерах применение указанных правил.

Пример 1. Условие треугольника ABC:

$$а) \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 - 180^\circ = W;$$

$$б) v_1 + v_2 + v_3 + W = 0;$$

$$в) (v_{ac} - v_{ab}) + (v_{ba} - v_{bc}) + (v_{cb} - v_{ca}) + W = 0.$$

Пример 2. Условие дирекционных углов (см. рис. 19):

$$а) T_{BB} + \beta_2 + \beta_5 - T_{BA} = W;$$

$$б) v_2 + v_5 + W = 0;$$

$$в) v_{BA} - v_{BB} + v_{BA} - v_{BA} + W = v_{BA} - v_{BB} = 0.$$

Пример 3. Базисное условие (см. рис. 19):

$$а) D_{BB} \frac{\sin \beta_3 \sin \beta_6}{\sin \beta_1 \sin \beta_4} - D_{BA} = W;$$

$$б) -a_1 v_1 + a_3 v_3 - a_4 v_4 + a_6 v_6 + \frac{\rho'' W}{D_{BA}} = 0,$$

где $a_1 = \text{ctg } \beta_1$; $a_3 = \text{ctg } \beta_3$; $a_4 = \text{ctg } \beta_4$; $a_6 = \text{ctg } \beta_6$;

$$в) -a_1 v_{aB} + (a_1 + a_6) v_{aB} + a_3 v_{BB} - a_3 v_{Ba} - a_4 v_{aA} + \\ + a_4 v_{AB} - a_6 v_{aA} + \frac{\rho'' W}{D_{BA}} = 0.$$

III.5.9. Число независимых условий. Выбор условий

Согласно методу наименьших квадратов *общее число условий* подсчитывается по формуле

$$r = n - k, \quad (\text{III.5.34})$$

где n — число всех измеренных величин; k — число необходимых измеренных величин.

При уравнивании углов значение $k=2q$, где q — число определяемых пунктов, и формула (III.5.34) приобретает вид

$$r_y = n - 2q, \quad (\text{III.5.35})$$

где n — число измеренных углов, сторон и азимутов.

При уравнивании направлений общее число условий можно считать сначала для случая уравнивания углов, т. е. по формуле (III.5.35), а затем из полученного числа r_y вычесть число условий горизонта и получить r_n .

Число условий для направлений можно получить и непосредственно по формуле

$$r_n = N - (3q + Q - q'); \quad (\text{III.5.36})$$

где N — число измеренных направлений, сторон и азимутов; Q —

число отнаблюдаемых исходных пунктов; q' — число неотнаблюдаемых определяемых пунктов.

В целях контроля рекомендуется подсчитывать общее число условий и по формуле (III.5.35), и по формуле (III.5.36). Разность $r_y - r_n$ должна быть числом условий горизонта r_r , которое легко определить просто по схеме сети.

Вначале подсчитывают *число угловых условий* r'' .

При уравнивании углов

$$r_y'' = n'' - k'', \quad (\text{III.5.37})$$

где n'' — число измеренных углов и геодезических азимутов; k'' — число определяемых сторон.

При уравнивании направлений

$$r_n'' = N'' - (k'' + q + Q - q'), \quad (\text{III.5.38})$$

где N'' — число измеренных направлений и азимутов.

Так как речь идет об угловых условиях, то разность $r'' - r_n''$ равна числу условий горизонта r_r .

Сопоставляя два равенства: $r_y - r_n = r_r$ и $r_y'' - r_n'' = r_r$, где r_r — число условий горизонта, и принимая во внимание (III.5.34), получим, что r'' — *число синусных условий* — равно

$$r'' = r - r' \quad (\text{II.5.39})$$

как при уравнивании углов, так и при уравнивании направлений.

Число угловых условий различного вида рекомендуется получать в следующем порядке:

а) определяют *число условий горизонта* r_r непосредственно по чертежу сети;

б) определяют *число условий дирекционных углов* r_d , которое равно числу исходных дирекционных углов (жестких и нежестких) без одного;

в) *число условий треугольников* r_t есть оставшееся число угловых условий, т. е. при уравнивании углов

$$r_t = r_y'' - r_r - r_d; \quad (\text{III.5.40})$$

при уравнивании направлений

$$r_t = r_n'' - r_d. \quad (\text{III.5.41})$$

Число синусных условий различного вида рекомендуется определять в такой последовательности:

а) получают *число координатных условий* по формуле

$$r_k = 2(I - 1), \quad (\text{III.5.42})$$

где I — число изолированных систем исходных пунктов; в частном случае система может состоять из одного пункта;

б) определяют *число базисных условий* по формуле

$$r_b = B - 1, \quad (\text{III.5.43})$$

где B — число базисных сторон (жестких и нежестких);

в) *число полюсных условий* r_n равно числу оставшихся синусных условий, т. е.

$$r_n = r'' - r_k - r_b. \quad (\text{III.5.44})$$

Формулы (III.5.39), (III.5.42), (III.5.43) и (III.5.44) действительны как для уравнивания углов, так и для уравнивания направлений.

К условиям свободной сети относятся: условия горизонта; условия треугольников; условия нежестких дирекционных углов; условия нежестких базисных сторон; полюсные условия.

К условиям жесткости относятся: условия жестких дирекционных углов (возникают при наличии двух жестких дирекционных углов и более); условия жестких базисных сторон (возникают при двух жестких базисных сторонах и более); координатные условия, кроме полигональных (см. ниже).

В ряде треугольников, проложенном между двумя сторонами исходной сети, кроме условий свободной сети (треугольников и полюсных), возникает четыре условия жесткости, которые называют полигональными, а именно: два координатных, базисное и условие дирекционных углов.

Полигональные условия возникают и в замкнутом ряде треугольников. В этом случае вид базисного условия становится таким же, как и полюсного, а в условных уравнениях координат отсутствуют координаты исходного и конечного пунктов, т.е. они приобретают вид $[\Delta x] = 0$ и $[\Delta y] = 0$. Имеет особенность и условие дирекционных углов, поскольку начальный и конечный угол один и тот же.

В. УРАВНИВАНИЕ ТРИАНГУЛЯЦИИ КОРРЕЛАТНЫМ СПОСОБОМ

III.5.10. Критерий допустимости невязок

Если невязка $W = \varphi(x_1, \dots, x_n)$, где x_i — результат измерений, то, обозначая через $W_{\text{доп}}$ наибольшее абсолютное значение допустимой невязки, имеем неравенство

$$W_{\text{доп}} \leq 2,5 W_0, \quad (\text{III.5.45})$$

где коэффициент 2,5 соответствует доверительной вероятности $\beta = 0,988$;

$$W_0 = \sqrt{\left(\frac{\partial W}{\partial x_1}\right)^2 m_1^2 + \dots + \left(\frac{\partial W}{\partial x_n}\right)^2 m_n^2}, \quad (\text{III.5.45}')$$

m — значения средних квадратических ошибок, заданные инструкцией; частные производные $\partial W / \partial x$ — коэффициенты условного уравнения поправок в первоначальном виде.

III.5.11. О способах, основанных на методе Крюгера

Сущность метода Крюгера изложена в разделе II.2 Справочника. Условные уравнения разделяют на две группы. Вначале выполняется первый этап уравнивания, на котором учитывают уравнения только первой группы, в результате чего их невязки устраняются и измеренные величины получают первичные поправки u'' . Параллельно с уравнивательными вычислениями на первом этапе в тех же вычислительных схемах и по тому же алгоритму, но в дополнительных графах, отведенных для этого, получают так называемые переходные множители. Далее, пользуясь переходными множителями, выполняют эквивалентные преобразования коэффициентов условных

уравнений второй группы. Свободные члены уравнений этой группы вычисляют с исправленными первичными поправками результатов измерений.

Решая только вторую систему, получают k измеренным величинам вторичные поправки $v^{(k)}$. Поправки $v = v^{(k)} + v^{(n)}$ будут точно такими же, как и при обычном уравнивании, когда учитываются все условные уравнения совместно, т. е. принцип наименьших квадратов не нарушается.

Н. А. Урмаев отнес в первую группу только уравнения неперекрывающихся треугольников, которые не содержат общих углов, и поэтому решение сводится просто к распределению невязок треугольников с обратным знаком поровну на три угла. Полученный способ, в котором сильно облегчено применение метода Крюгера, стали называть способом Крюгера — Урмаева. Он и в настоящее время имеет несомненные преимущества перед всеми другими способами при уравнивании ряда треугольников, опирающегося на две стороны исходной сети. Подробное описание этого способа с примером уравнивания ряда треугольников приведен в разделе II Справочника.

Идея Крюгера и Урмаева развил А. Н. Высоцкий, распространив их на решение преобразованной второй группы условных уравнений. При этом указанная преобразованная вторая группа, в свою очередь, подразделяется на две подгруппы. В первую подгруппу входят оставшиеся угловые условия (кроме условий треугольников, отнесенных в первую группу), во вторую — синусные. Для простых типовых фигур с одним синусным условием способ оказывается достаточно эффективным. Для этого случая получены стандартные формулы, по которым можно получать первичные и вторичные поправки в углы (без составления и решения нормальных уравнений), а также преобразованные коэффициенты синусного условия.

III.5.12. Упрощенный способ

При уравнивании этим способом, так же как и при уравнивании по стандартным формулам, приходится решать систему нормальных уравнений только для синусных условий. Достигается это следующим образом.

Уравнивательные вычисления выполняют в два этапа. На первом этапе решают угловые условия, на втором — синусные. Для того чтобы на втором этапе вновь не возникли невязки угловых условий, поправки при решении синусных условий ищут не в углы треугольников, а в дирекционные углы*. Таким образом, отпадает необходимость в преобразовании коэффициентов, как в методе Крюгера.

Угловые условия в упрощенном способе решаются способом Крюгера — Урмаева либо способом приближений Гаусса. Для применения последнего способа угловые условия делят на две группы:

- а) неперекрывающихся треугольников,
- б) остальных условий.

В процессе приближений эти группы уравнений решают поочередно до полного устранения невязок. Чаще всего во вторую группу попадают условия дирекционных углов и горизонта; лишь в геодезическом четырехугольнике во вторую группу относят перекрывающийся треугольник. При указанном разделении угловые условия в каждой группе распадаются на независимые условия, в которых нет

* Нетрудно убедиться в том, что изменения определяемых дирекционных углов не нарушают угловых условий.

ни одного общего угла. Таким образом, решение уравнений каждой группы в приближениях сводится просто к распределению невязок с обратным знаком поровну на углы, входящие в данное уравнение.

В частном случае, когда во второй группе имеется одно уравнение, выгоднее применить способ Крюгера — Урмаева, и тогда приближений не потребуется.

Г. УРАВНИВАНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

III.5.13. Общие основы. Уравнения поправок

Параметрический способ является эффективным для уравнивания обширных сетей триангуляции и трилатерации, а также для уравнивания линейно-угловых и комбинированных построений. Целесообразно применение этого способа и для уравнивания достаточно сложных фигур триангуляции 3 и 4 классов.

В геодезических сетях в качестве измеренных величин могут быть: длины сторон; дирекционные углы; углы (чаще всего углы между смежными направлениями); направления.

В качестве неизвестных при уравнивании геодезических сетей выбирают координаты определяемых пунктов. Для уравнивания измеренных сторон, дирекционных углов и углов этого оказывается достаточно. Однако для уравнивания направлений, кроме координат, приходится в качестве неизвестных выбирать еще «ориентирующие углы».

Рассмотрим вид уравнений связи и уравнений поправок для разных измеренных величин.

Уравнения для длин сторон

Уравнение связи имеет вид

$$D_{12} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}. \quad (\text{III. 5.46})$$

Продифференцировав равенство

$$D_{12}^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2, \quad (\text{III. 5.47})$$

получим, например,

$$2D_{12} \frac{\partial D_{12}}{\partial x_2} = 2(x_2 - x_1), \quad (\text{III. 5.48})$$

откуда

$$\frac{\partial D_{12}}{\partial x_2} = \frac{(x_2 - x_1)}{D_{12}} = \cos T_{12}. \quad (\text{III. 5.49})$$

Аналогично

$$\frac{\partial D_{12}}{\partial y_2} = \frac{(y_2 - y_1)}{D_{12}} = \sin T_{12}. \quad (\text{III. 5.50})$$

Обозначим

$$\begin{aligned} x &= x^0 + \delta x, \\ y &= y^0 + \delta y. \end{aligned}$$

При уравнивании в ручном счете уравнение поправок для измеренных длин выгодно представлять так

$$v_{12} = -\cos T_{12} \delta x_1 - \sin T_{12} \delta y_1 - \cos T_{21} \delta x_2 - \sin T_{21} \delta y_2 + l_{12}, \quad (\text{III.5.50}')$$

где

$$l_{12} = + \sqrt{(x_2^0 - x_1^0)^2 + (y_2^0 - y_1^0)^2} - d_{12} \quad (\text{III.5.51})$$

(d_{12} —результат измерения).

Для уравнивания на ЭВМ уравнению поправок целесообразно придавать такой вид:

$$v_{12} = \frac{(x_1 - x_2)}{d_{12}} \delta x_1 + \frac{(y_1 - y_2)}{d_{12}} \delta y_1 + \frac{(x_2 - x_1)}{d_{12}} \delta x_2 + \frac{(y_2 - y_1)}{d_{12}} \delta y_2 + l_{12}, \quad (\text{III.5.52})$$

l_{12} вычисляют по формуле (III.5.51).

Уравнения для дирекционных углов

Уравнение связи

$$t'_{12} = \arctg \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \arctg \frac{\Delta y_{12}}{\Delta x_{12}}. \quad (\text{III.5.53})$$

Возьмем частные производные по y_2 и по x_2

$$\begin{aligned} \frac{\partial t'_{12}}{\partial y_2} &= \rho'' \frac{\partial t_{12}}{\partial y_2} = \rho'' \frac{1/\Delta x_{12}}{1 + \Delta y_{12}^2/\Delta x_{12}^2} = \rho'' \frac{\Delta x_{12}}{\Delta x_{12}^2 + \Delta y_{12}^2} = \\ &= \rho'' \frac{D_{12} \cos T_{12}}{D_{12}^2} = \frac{\cos T_{12}}{D_{12}} \rho''. \end{aligned}$$

Для ручного счета используют формулу

$$\frac{\partial t'_{12}}{\partial y_2} = \rho'' \frac{\cos T_{12}}{D_{12}}.$$

Для ЭВМ выгоднее пользоваться формулой

$$\frac{\partial t'_{12}}{\partial y_2} = \rho'' \frac{(x_2 - x_1)}{\Delta x_{12}^2 + \Delta y_{12}^2}.$$

Далее получим

$$\frac{\partial t'_{12}}{\partial x_2} = \rho'' \frac{-\Delta y_{12}/\Delta x_{12}^2}{1 + \Delta y_{12}^2/\Delta x_{12}^2} = -\rho'' \frac{\Delta y_{12}}{\Delta x_{12}^2 + \Delta y_{12}^2} = -\rho'' \frac{\sin t_{12}}{D_{12}}.$$

Для ручного счета

$$\frac{\partial t'_{12}}{\partial x_2} = -\rho'' \frac{\sin t_{12}}{D_{12}}.$$

Для ЭВМ

$$\frac{\partial t_{12}''}{\partial x_2} = -\rho'' \frac{(y_2 - y_1)}{\Delta x_{12}^2 + \Delta y_{12}^2}.$$

Частные производные по x_1 и по y_1 будут по абсолютной величине такими же, как и по x_2 и по y_2 , но с обратными знаками.

Как уже указывалось, при уравнивании государственной геодезической сети линейные величины выражают в дециметрах, угловые — в секундах. Тогда, например,

$$\frac{\partial t_{12}''}{\partial x_1} = + 206265'' \frac{\sin t_{12}}{D_{\text{дм}}}$$

или

$$\frac{\partial t_{12}''}{\partial x_1} = + 20,63 \frac{\sin t_{12}}{D_{\text{км}}}.$$

Аналогично

$$\frac{\partial t_{12}''}{\partial y_1} = - 20,63 \frac{\cos t_{12}}{D_{\text{км}}}.$$

В геодезическом производстве приняты обозначения:

$$a_{12} = + 20,63 \frac{\sin t_{12}}{D_{\text{км}}}; \quad b_{12} = - 20,63 \frac{\cos t_{12}}{D_{\text{км}}}. \quad (\text{III.5.54})$$

для ручного счета и

$$a_{12} = + 20,63 \frac{\Delta y_{12}}{\Delta x_{12}^2 + \Delta y_{12}^2}; \quad b_{12} = - 20,63 \frac{\Delta x_{12}}{\Delta x_{12}^2 + \Delta y_{12}^2}, \quad (\text{III.5.55})$$

где Δx_{12} и Δy_{12} выражены в километрах, — для ЭВМ. В формулах (III.5.54) и (III.5.55) линейные величины берут с точностью до 0,01 км.

Теперь получим уравнение поправок для дирекционного угла в таком виде:

$$v_{12} = a_{12} \delta x_1 + b_{12} \delta y_1 - a_{12} \delta x_2 - b_{12} \delta y_2 + l_{12}, \quad (\text{III.5.56})$$

где

$$l_{12} = \arctg \frac{y_2^0 - y_1^0}{x_2^0 - x_1^0} - t_{12}, \quad (\text{III.5.57})$$

или, обозначая

$$\arctg \frac{y_2^0 - y_1^0}{x_2^0 - x_1^0} = t_{12}^0, \quad (\text{III.5.58})$$

$$l_{12} = t_{12}^0 - t_{12}. \quad (\text{III.5.57}')$$

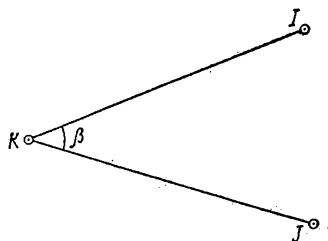
Напоминаем, что поправки δx и δy выражены в дециметрах. Учитывая очевидные равенства

$$a_{12} = - a_{21}; \quad b_{12} = - b_{21}, \quad (\text{III.5.59})$$

Рис. 24. Уравнение углов

уравнение поправок для дирекционного угла можно еще представить в виде

$$v_{12} = a_{12}\delta x_1 + b_{12}\delta y_1 + a_{21}\delta x_2 + b_{21}\delta y_2 + l_{12}. \quad (\text{III.5.60})$$



Уравнение для углов

Любой угол β на пункте k может быть представлен в виде разности дирекционных углов его сторон, т.е. в соответствии с рис. 24

$$\beta_{ij}^k = t_{kj} - t_{ki}.$$

Отсюда получим уравнение связи

$$(\beta_{ij}^k)'' = \text{arctg} \frac{y_j - y_k}{x_j - x_k} - \text{arctg} \frac{y_i - y_k}{x_i - x_k}. \quad (\text{III.5.61})$$

Учитывая (III.5.60), получим следующее уравнение поправок для угла:

$$v_{ij}^k = (a_{kj} - a_{ki})\delta x_k + (b_{kj} - b_{ki})\delta y_k + a_{jk}\delta x_j + b_{jk}\delta y_j - a_{ik}\delta x_i - b_{ik}\delta y_i + l_{ij}, \quad (\text{III.5.62})$$

где

$$t_{ij}^k = (t_{kj}^0 - t_{ki}^0) - \beta_{ij}^k \quad (\text{III.5.63})$$

вычисляются по формуле (III.5.58).

Уравнения для измеренных направлений

Измеренным направлением в геодезии называется угол, отсчитанный от нулевого направления до видимого направления на наблюдаемый объект. Нулевым направлением называется положение коллимационной плоскости, точно соответствующее нулевому диаметру лимба. После получения в результате уравнивания на станции одного ряда направлений нулевое направление отличается от истинного значения начального точно на ошибку его измерения. В случае безошибочности наблюдений начальное и нулевое направления совпали бы. Приблизительно нулевое направление отстоит от начального на величину поправки, полученной начальным направлением в результате уравнивания сети.

В дальнейшем изложении измеренное направление мы будем называть просто направлением и обозначать через M .

Так как нулевое направление не связано с геодезическими пунктами, то в качестве неизвестных, кроме координат, приходится выбирать еще ориентирующие углы, т.е. дирекционные углы нулевых направлений на пунктах.

Введем для ориентирующих углов обозначения:

$$z = z^0 + \delta z. \quad (\text{III.5.64})$$

где z — уравненное значение; z^0 — предварительное значение; δz — поправка из уравнивания.

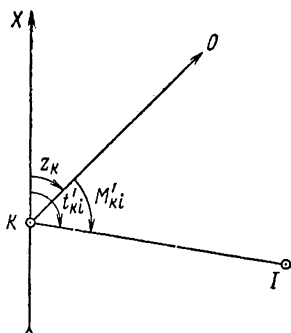


Рис. 25. Составление уравнения поправок

Согласно рис. 25 имеем

$$t'_{ki} = z_k + M'_{ki}. \quad (\text{III.5.65})$$

Уравнение связи

$$M'_{ki} = \text{arctg} \frac{y_i - y_k}{x_i - x_k} - z_k. \quad (\text{III.5.66})$$

Учитывая (III.5.64), уравнения для дирекционных углов (III.5.60) и (III.5.66), получим уравнение поправок для направления

$$v_{ki} = -\delta z_k + a_{ki} \delta x_k + b_{ki} \delta y_k + a_{ik} \delta x_i + b_{ik} \delta y_i + l_{ki}, \quad (\text{III.5.67})$$

где

$$l_{ki} = \left(\text{arctg} \frac{y_i^0 - y_k^0}{x_i^0 - x_k^0} \right) - M_{ki} \quad (\text{III.5.68})$$

или

$$l_{ki} = t_{ki} - z_k^0 - M_{ki}. \quad (\text{III.5.68}')$$

Значение z_k^0 целесообразно вычислять по формуле

$$z_k^0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{ki}^0 - M_{ki}), \quad (\text{III.5.69})$$

где n — число направлений на пункте.

Для исходных сторон под t^0 в формуле (III.5.69) понимается точное значение дирекционного угла.

Представим теперь формулу (III.5.68') в таком виде:

$$l_{ki} = (t_{ki}^0 - M_{ki}) - z_k^0. \quad (\text{III.5.70})$$

Учитывая (III.5.69) и (III.5.70), имеем контрольную формулу

$$[l]_K = 0 \quad (\text{III.5.71})$$

для пункта K .

Первое правило Шрейбера. Применение этого правила позволяет исключить неизвестные δz из уравнений поправок и получить таким образом сразу преобразованную систему нормальных уравнений без этих неизвестных. Практическая реализация правила заключается в следующем.

После исключения неизвестных δz уравнения поправок, составленные для каждого пункта K , приобретают вид

$$v_{ki}^{(')} = a_{ki}^{(')} \delta x_k + b_{ki}^{(')} \delta y_k + a_{ik}^{(')} \delta x_i + b_{ik}^{(')} \delta y_i + l_{ki}. \quad (\text{III.5.72})$$

В строке ki таблицы коэффициентов их вычисляют по формулам

$$a_{ki}^{(')} = a_{ki} - \frac{[a]_k}{n_k}; \quad b_{ki}^{(')} = b_{ki} - \frac{[b]_k}{n_k}, \quad (\text{III.5.72}')$$

$$a_{ik}^{(')} = a_{ik} - \frac{a_{ik}}{n_k}; \quad b_{ik}^{(')} = b_{ik} - \frac{b_{ik}}{n_k}. \quad (\text{III.5.72}'')$$

В остальных строках:
коэффициенты при неизвестных δx_k и δy_k вычисляются по формулам (III.5.72');
коэффициенты при неизвестных δx_j и δy_j ($j \neq i$) вычисляются по формулам

$$a_{ij}^{(')} = -\frac{a_{ik}}{n_k}; \quad b_{ij}^{(')} = -\frac{b_{ik}}{n_k}. \quad (\text{III.5.73})$$

Контроль: сумма преобразованных коэффициентов по столбцам должна удовлетворять неравенству $|[a^{(')}]| \leq 0,005n$.

Значения l_{ki} остаются без изменений, поскольку $[l]_k = 0$.

Из общей системы преобразованных уравнений поправок (III.5.72), составленных для всех пунктов сети, получают сразу общую преобразованную систему нормальных уравнений без неизвестных δz .

Второе правило Шрейбера. В случае измерения дирекционных углов уравнения поправок для прямого и обратного наблюдений по сторонам имеют вид

$$v_{12} = a_{12}\delta x_1 + b_{12}\delta y_1 - a_{12}\delta x_2 - b_{12}\delta y_2 + l_{12} \quad (\text{a})$$

и

$$v_{21} = a_{21}\delta x_2 + b_{21}\delta y_2 - a_{21}\delta x_1 - b_{21}\delta y_1 + l_{21}. \quad (\text{б})$$

Имея в виду (III.5.59), равенство (б) можно переписать так:

$$v_{21} = a_{12}\delta x_1 + b_{12}\delta y_1 - a_{12}\delta x_2 - b_{12}\delta y_2 + l_{21}. \quad (\text{б}')$$

Выясняется, что уравнения (б') и (а) различаются только свободными членами (в правых частях).

Согласно второму правилу, в рассмотренном случае уравнения (а) и (б) при составлении нормальных уравнений можно заменить одним — с весом $p' = p_{12} + p_{21} = 2p$:

$$v_{\text{ср}} = a_{12}\delta x_1 + b_{12}\delta y_1 + a_{21}\delta x_2 + b_{21}\delta y_2 + l_{\text{ср}}, \quad (\text{III.5.74})$$

где

$$l_{\text{ср}} = \frac{1}{2} (l_{12} + l_{21}). \quad (\text{III.5.74}')$$

Таким образом, число уравнений поправок уменьшается в два раза (если, конечно, везде выполнены двусторонние наблюдения).

III.5.14. Уравнивание ориентированных направлений

Ориентированным направлением называется величина $z + M$. Нетрудно видеть (см. рис. 25), что эта величина может рассматриваться как измеренное значение дирекционного угла. Таким обра-

зом, если бы были известны ориентирующие углы на пунктах, то уравнения поправок имели бы вид (а), где

$$l_{12} = t_{12}^0 - (z_1 + M_{12}). \quad (\text{III.5.75})$$

Но в этом случае можно применить второе правило Шрейбера и каждую пару уравнений для взаимообратных ориентированных направлений заменить одним — со свободным членом

$$l_{cp} = \frac{1}{2} (t_{ki}^0 - t_{ki} + t_{ik}^0 - t_{ik}).$$

Учитывая, что

$$t_{ik}^0 = t_{ki}^0 \pm 180^0; \quad t_{ki} = z_k + M_{ki}; \quad t_{ik} = z_i + M_{ik},$$

имеем

$$l_{cp} = \frac{1}{2} \{ 2t_{ki}^0 \pm 180^0 - (z_k + M_{ki} + z_i + M_{ik}) \}$$

или

$$l_{cp} = t_{ki}^0 - \frac{1}{2} (z_k + M_{ki} + z_i + M_{ik} \pm 180^0). \quad (\text{III.5.76})$$

Ориентирующие углы z получают на основании следующих соображений. Если уравнивать направления с целью получения только дирекционных углов, то достаточно учитывать только угловые условия. При уравнивании направлений параметрическим способом в этом случае в качестве неизвестных необходимо выбирать дирекционные и ориентирующие углы. Получив уравнения поправок и далее нормальные уравнения, решим их следующим образом: сначала исключим неизвестные δt , а затем преобразованные уравнения, в которых остаются только поправки δz , будем решать способом приближений Гаусса, наиболее выгодным в данном случае.

Ниже описаны порядок вычислений и рабочие формулы при уравнивании ориентированных направлений в ручном счете. Вычисления на ЭВМ описаны в следующем параграфе. Заметим, что в первом случае неизвестными являются поправки δz и δt , во втором — сами величины z и t .

Последовательность вычислений и рабочие формулы при уравнивании ориентированных направлений в ручном счете.

1. Вычисляют предварительные значения z_0 по формуле

$$z_k^0 = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r (t_{ki} - M_{ki}) \quad (\text{III.5.77})$$

и затем приближенно ориентированные направления $(z_k^0 + M_{ki})$. На исходных пунктах величины t — исходные дирекционные углы, на определяемых пунктах

$$t_{ki}^{\text{прибл}} = z_i^0 + M_{ik} \pm 180^0.$$

Вычисления начинают с исходных пунктов, затем переходят к смежным — определяемым и т. д.

2. Получают приближенные значения дирекционных углов для определяемых сторон по формуле

$$t_{kl}^0 = \frac{1}{2} \{ (z_k^0 + M_{kl}) + (z_l^0 + M_{lk} \pm 180^\circ) \}. \quad (\text{III.5.78})$$

3. Вычисляют свободные члены уравнений поправок ориентирующих и дирекционных углов по формулам

$$l_{kl} = T_{kl} - (z_k^0 + M_{kl}) \quad (\text{III.5.79})$$

для направлений с исходными дирекционными углами и

$$l_{kl} = t_{kl}^0 - (z_k^0 + M_{kl}) \quad (\text{III.5.79}')$$

для направлений с определяемыми дирекционными углами.

Из формулы (III.5.79') следует равенство $l_{kl} = -l_{lk}$ — для определяемых сторон.

4. По способу приближений Гаусса получают поправки ориентирующих углов δz . При этом в очередных приближениях пользуются формулой

$$\delta z^{(j+1)} = \frac{2 [l]_k + \sum_{i=1}^{n_1} \delta z_i^{(j)}}{2n_1 + n_2}, \quad (\text{III.5.80})$$

где $\delta z_i^{(j)}$ — поправки последнего приближения на смежных пунктах, с которыми пункт K связан сторонами с определяемыми дирекционными углами; n_1 — число направлений по сторонам с исходными дирекционными углами; n_2 — число направлений по сторонам с определяемыми дирекционными углами.

Приближения продолжают до тех пор, пока значения δz в очередных приближениях начнут повторяться.

5. Получают

$$\left. \begin{aligned} z_k &= z_k^0 + \delta z_k; \\ \delta t_{ki} &= (\delta z_k + \delta z_i) / 2; \\ t_{kl} &= t_{kl}^0 + \delta t_{kl}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.5.81})$$

6. Осуществляют контроль уравненных значений z по формуле

$$z_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{ki} - M_{ki}), \quad (\text{III.5.82})$$

где t_{ki} — исходные и уравненные дирекционные углы, и по формуле

$$t_{ki} = \frac{1}{2} \{ (z_k + M_{ki}) + (z_i + M_{ik} \pm 180^\circ) \} \quad (\text{III.5.82}')$$

для определяемых дирекционных углов.

7. Пользуясь дирекционными углами, вычисляют по формулам Гаусса предварительные координаты x° , y° определяемых пунктов.

8. Вычисляют для каждой определяемой стороны величины

$$\left. \begin{aligned} T_{ki}' &= \operatorname{arctg} \frac{y_i^0 - y_k^0}{x_i^0 - x_k^0}; \\ t_{ki}^0 &= T_{ki}^0 - t_{ki} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.5.83})$$

[верхний нулевой индекс у свободного члена отличает его от свободного члена в формуле (III.5.79')].

По формулам (III.5.54) получают коэффициенты a и b и затем составляют по два нормальных уравнения на каждом определяемом пункте

$$\left. \begin{aligned} [aa]_k \delta x_k + [ab]_k \delta y_k - \sum_{i=1}^n a_{ki}^2 \delta x_i - \sum_{i=1}^n a_{ki} b_{ki} \delta y_i + \\ + [at^0]_k &= 0; \\ [ab]_k \delta x_k + [bb]_k \delta y_k - \sum_{i=1}^n a_{ki} b_{ki} \delta x_i - \\ - \sum_{i=1}^n b_{ki}^2 \delta y_i + [bt^0]_k &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.5.84})$$

Систему уравнений (III.5.84) целесообразно решать методом приближений.

III.5.15. Уравнивание ориентированных направлений на ЭВМ

Способ уравнивания ориентированных направлений применяется на ЭВМ в сочетании с последовательной вставкой пунктов, являющейся вариантом группового метода приближений. При этом в каждую группу отнесено по два неизвестных: x , y каждого определяемого пункта. Таким образом, при вставке очередного определяемого пункта все окружающие пункты считаются жесткими.

Алгоритмы уравнительных и окончательных вычислений, а также логика программы рассчитаны на использование внутренней памяти, если не считать ввода первичной информации и ее двукратного вызова на внутреннюю память для уравнивания и окончательных вычислений.

На первом этапе уравнивания, когда ищут предварительно уравниваемые дирекционные углы, применяется решение нормальных уравнений обычными приближениями по Гауссу. При этом, в отличие от вычислений на НВМ (настольных вычислительных машинах), на ЭВМ ищут не поправки к неизвестным — ориентирующим углам, а сами ориентирующие углы. На заключительной стадии первого этапа уравнивания получают также не поправки, а сами дирекционные углы, которые рассматриваются в качестве измеренных величин на втором этапе уравнивания. И, наконец, общее замечание: последовательность вычислений соответствует нумерации пунктов.

Последовательность действий: формулы вычислений. При составлении программы для ЭВМ используются следующие формулы и берется в основу указанная ниже последовательность действий.

1. *Первичная информация:*

- а) сферические направления (выписывают до $0,1''$);
- б) точные координаты исходных пунктов и приближенные координаты определяемых (полученные при предварительной обработке, но записанные до $0,01$ м);
- в) дирекционные углы исходных сторон;
- г) условия геометрической связи между пунктами.

Предварительно пункты нумеруют. Первыми нумеруют исходные пункты, затем — определяемые, причем номера последних возрастают по мере удаления от исходных пунктов.

Информацию о геометрических связях составляют для каждого пункта в порядке нумерации, при этом отнаблюдаемые с пункта направления указывают также в порядке нумерации пунктов, наблюдаемых с данного. Систему измеренных направлений записывают одним массивом строго в том порядке, в каком записаны условия связи.

Следующим массивом записывают координаты пунктов, также строго в порядке нумерации (разумеется, $y = y_{\text{каталог}} - 500\,000$ м). Последним массивом выписывают исходные дирекционные углы, придерживаясь той же системы обозначений, как и для направлений.

2. *Первый этап уравнивания:*

- а) вызов на внутреннюю память координат, операторов условий связи, исходных дирекционных углов и направлений;
- б) вычисление поправок в направления за кривизну изображения геодезической линии на плоскости в проекции Гаусса по формуле

$$\delta''_{12} = \frac{f}{3} (x_1 - x_2) (2y_1 + y_2).$$

Величину $f = \rho''/2R^2$ (см. раздел I) также надо поместить в исходную информацию.

Полученные поправки δ'' проверяют в каждом треугольнике (считая нумерацию пунктов по ходу часовой стрелки) по формуле

$$\epsilon'' = \delta''_{12} + \delta''_{23} + \delta''_{31} - \delta''_{21} - \delta''_{32} - \delta''_{13},$$

где ϵ'' — сферический избыток, полученный по формуле

$$\epsilon'' = f2P_{\text{км}^2}.$$

$2P_{\text{км}^2}^2$ получают по формуле

$$2P_{\text{км}^2} = y_1 (x_3 - x_2) + y_2 (x_1 - x_3) + y_3 (x_2 - x_1).$$

Величины δ'' и ϵ'' вычисляют до сотых долей секунды;

в) внесение поправок δ'' , округленных до десятых долей секунды, в сферические направления, в результате чего будут получены плоские направления, которые записывают вместо сферических как на внутренней памяти, так и во внешнем накопителе (в первичной информации). Плоские направления к нулю не приводят;

г) вычисление приближенных ориентирующих углов z^0 , для этого используют в первую очередь формулу

$$z_k^0 = T_{ki} - M_{ki} \quad (a)$$

для пунктов, расположенных на конце отнаблюдаемой исходной стороны, и для всех остальных пунктов — формулу

$$z_k^0 = z_i^0 + M_{ik} \pm 180^\circ - M_{ki},$$

где z_i^0 — ориентирующий угол, полученный ранее по формуле (а). Если же пункт не связан наблюдениями с пунктами, расположенными на конце исходных сторон, то используют z_i^0 , ранее определенный на каком-либо соседнем пункте;

д) получение на каждом пункте K приближенно ориентированных направлений $z_k^0 + M_{ki} = M_{ki}'$, помещаемых на место ранее записанных в оперативной памяти плоских направлений M_{ki} (часть, кратную 360° , вычитают);

е) вычисление уравненных ориентирующих углов путем приближений по формуле

$$z_k = \frac{2 \sum_{j=1}^m (T_{kj}^{\text{исх}} - M_{kj}') + \sum_{i=m+1}^n (z_i + M_{ik}' \pm 180^\circ - M_{ki}')}{n + m}, \quad (6)$$

где $T^{\text{исх}}$ — исходные дирекционные углы; m — их число; n — число всех измеренных на пункте направлений.

Если на пункте нет измеренных направлений по исходным сторонам, то первое слагаемое числителя формулы (6) и число m равны нулю.

Приближения заканчивают, когда очередные значения z начнут повторяться (эти значения будут малы — порядка нескольких секунд);

ж) получение уточненных ориентированных направлений $M_{ki}^{\text{ор}} = z_k + M_{ki}'$ на всех пунктах. Значения $M^{\text{ор}}$ записывают на месте $M^{(0)}$;

з) по формуле

$$t_{ki} = \frac{1}{2} (M_{ki}^{\text{ор}} + M_{ik}^{\text{ор}} \pm 180^\circ)$$

получают предварительно уравненные дирекционные углы. Они записываются в оперативной памяти, а ориентированные направления предварительно стираются. Таким образом, на месте первоначального массива сферических направлений в оперативной памяти останутся только дирекционные углы определяемых сторон, число которых меньше числа направлений в два с лишним раза.

3. *Второй этап уравнивания* (последовательная вставка пунктов).

Как уже указывалось, координаты определяемых пунктов на втором этапе уравнивания получают путем последовательной вставки этих пунктов.

При вычислении очередных значений координат пункта все окружающие пункты, как исходные, так и определяемые, считаются жесткими. Тогда дело сводится к определению всего двух неизвестных: x и y , причем за измеренные величины принимают дирекционные углы всех направлений с данного пункта на окружающие.

Алгоритм уравнивания пункта K в очередном приближении осуществляется в такой последовательности:

а) вычисление значений (с точностью до 0,1")

$$t_{ki}^0 = \operatorname{arctg} \frac{y_i^0 - y_k^0}{x_i^0 - x_k^0},$$

точно соответствующих координатам, и свободных членов уравнений поправок для каждого измеренного дирекционного угла

$$l_{ki}^0 = t_{ki}^0 - t_{hi},$$

где t_{hi} — полученные на первом этапе дирекционные углы;

б) вычисление коэффициентов уравнений поправок по формулам

$$a_{hi} = +20,626 \frac{(y_i - y_k)}{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2};$$

$$b_{hi} = -20,626 \frac{(x_i - x_k)}{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2},$$

где координаты берут в километрах, округленных до сотых долей;

в) составление и решение системы двух нормальных уравнений вида

$$[aa] \delta x + [ab] \delta y + [al^0] = 0;$$

$$[ab] \delta x + [bb] \delta y + [bl^0] = 0,$$

в результате чего получают поправки $\delta x^{(i)}$ и $\delta y^{(i)}$ i -го приближения;

г) получение очередных значений координат

$$x^{(i)} = x^{(i-1)} + \delta x^{(i)} \text{ и } y^{(i)} = y^{(i-1)} + \delta y^{(i)},$$

где $x^{(i-1)}$ и $y^{(i-1)}$ — координаты, полученные в предыдущем приближении;

д) значения $x^{(i)}$ и $y^{(i)}$ записывают вместо прежних — $x^{(i-1)}$ и $y^{(i-1)}$, и вся промежуточная информация, связанная со вставкой очередного пункта K , стирается, освобождая место для уравнивания следующего по порядку номеров пункта. Координаты $x^{(i)}$ и $y^{(i)}$ служат в дальнейшем исходными при вставке соседних определяемых пунктов и предварительными при уравнивании данного пункта K . Приближения продолжают до тех пор, пока очередные поправки в координаты станут менее 0,10 дм.

Все вычисления на ЭВМ можно производить с тем же числом десятичных знаков, что и на НВМ.

4. Оценка точности и завершающий этап:

а) по окончании второго этапа уравнивания на внутренней памяти стираются все данные, кроме координат и операторов условий геометрической связи между пунктами. Из внешней памяти на внутреннюю вызываются направления (плоские);

б) по координатам вычисляют дирекционные углы и расстояния в соответствии с оператором связи между пунктами, используя для этого следующие основные и контрольные формулы:

$$T_{hi} = \operatorname{arctg} \frac{y_i - y_h}{x_i - x_h},$$

$$D_{hi} = +\sqrt{(x_i - x_h)^2 + (y_i - y_h)^2} = (x_i - x_h) \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 T_{hi}} = \\ = (y_i - y_h) \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 T_{hi}}$$

(для контроля используют большее приращение);

в) вычисляют поправки v в направления по формулам

$$v_{ki} = (T_{ki} - M_{ki}) - z_k^{0k},$$

где M_{ki} — направление,

$$z_k^{0k} = \frac{1}{n} \sum (T_{ki} - M_{ki}),$$

затем значения $[v^2]$ и ошибки единицы веса

$$\mu = \sqrt{\frac{[v^2]}{N - Q - 2q}},$$

где N — число всех измеренных величин в сети; Q — число всех пунктов (исходных и определяемых); q — число только определяемых пунктов;

г) выдаются на печать следующие данные: координаты определяемых пунктов, дирекционные углы и длины определяемых сторон (согласно условиям связи), поправки измеренных величин, ошибка единицы веса μ .

III.5.16. Применение параметрического способа для уравнивания различных геодезических построений

Триангуляция 2 класса, нетиповые фигуры триангуляции 3 и 4 класса и аналогичные сети специального назначения. В геодезических сетях, построенных в соответствии с требованиями Инструкции о построении государственной геодезической сети, а также в достаточно жестких сетях специального назначения наиболее целесообразно уравнивать ориентированные направления на ЭВМ или НВМ. Базисные стороны следует включать в уравнивание наряду с ориентированными направлениями на втором этапе. Веса вычисляются по формуле

$$P_D = \frac{\mu^2}{m_D^2}, \quad (*)$$

где m_D — реальная средняя квадратическая ошибка, выраженная в дециметрах; μ — численное значение средней квадратической ошибки измерения направлений.

Вид уравнения поправок для длин сторон представлен формулами (III.5.50') и (III.5.52).

Если геодезическая сеть представляет собой свободное или недостаточно жесткое построение, то правильнее включать в уравнивание углы между смежными направлениями. В этом случае веса сторон вычисляют также по формуле (*), но в качестве ошибки единицы веса берут ошибку угла.

Понятия «жесткое» или «нежесткое» построение — не вполне определенные. Можно рекомендовать следующие критерии: сеть считается достаточно жесткой, если исходные пункты занимают не менее $\frac{2}{3}$ внешней границы либо составляют около половины всех пунктов, располагаясь равномерно по площади. В противном случае сеть следует считать нежесткой.

Линейно-угловая сеть. Имеется в виду сеть треугольников, в которой измерены все направления и все длины сторон. Для уравни-

нивания такой сети наиболее эффективным способом будет параметрический. Все соображения относительно уравнивания триангуляции с базисными сторонами остаются в силе и для данного случая. В обширной сети для установления системы весов надо вычислить среднюю квадратическую ошибку угла m_β по невязкам треугольников.

Если решено уравнивать ориентированные направления (в достаточно жесткой сети), то ошибку единицы веса следует полагать равной

$$\mu = \frac{m_\beta}{\sqrt{2}}.$$

Средние квадратические ошибки сторон m_D для установления системы весов по формуле

$$P_D = \frac{\mu^2}{m_D^2}$$

необходимо получить по невязкам трилатерационных фигур и базисных условий с нежесткими сторонами.

Комбинированная сеть. Комбинированной сетью называют геодезические построения, представляющие собой сочетание триангуляции, полигонометрии и трилатерации.

Уравнивание комбинированных сетей наиболее удобно производить параметрическим способом. При этом в полигонометрии следует уравнивать углы между смежными направлениями. Выбор в триангуляции для уравнивания углов или ориентированных направлений делается в зависимости от степени ее жесткости.

Заметим, что при уравнивании линейно-угловых и комбинированных сетей уравнивания поправок следует приводить к равнопоточному виду.

III.5.17. Уравнивание типовых фигур трилатерации коррелятным способом

При малом числе избыточно измеренных величин по сравнению с числом необходимых величин для уравнивания выгодно применять коррелятный способ.

В геодезических сетях 3 и 4 классов могут встречаться следующие трилатерационные фигуры, показанные на рис. 26, для уравнивания которых выгодно применять коррелятный способ.

Для подсчета числа независимых условий в фигурах, имеющих не менее двух исходных пунктов, служит формула

$$r = n - 2q, \quad (\text{III.5.85})$$

где r — число условий; n — число измеренных сторон; q — число определяемых пунктов.

Если в фигуре имеется только один исходный пункт, то измеренная сторона, примыкающая к исходному пункту, и определяемый пункт на другом конце этой стороны при подсчете числа условий должны условно считаться исходными, хотя при уравнивании «исходная» сторона получает поправку. Разумеется, для получения координат пунктов должен быть известен дирекционный угол этой стороны.

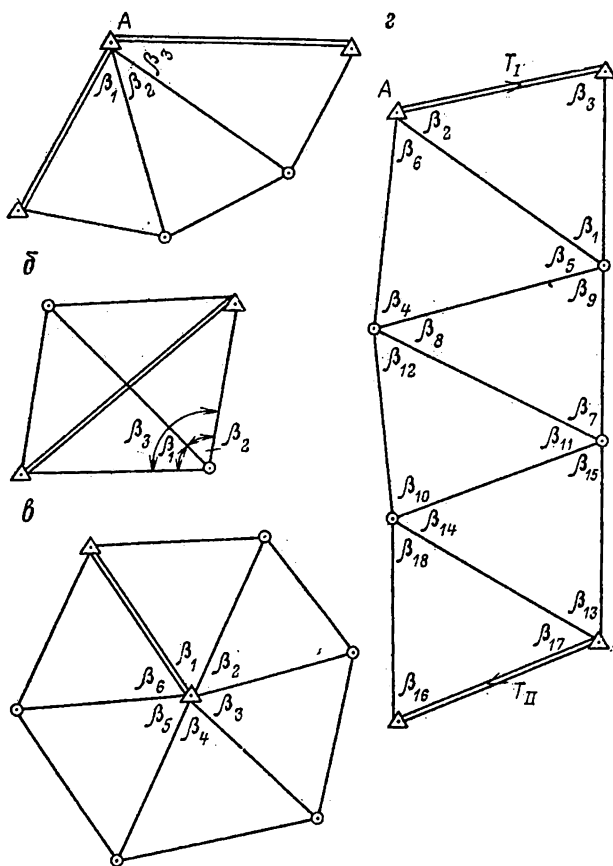


Рис. 26. Типовые схемы трилатерации

Так, например, в фигурах а, б и в (см. рис. 26), возникает по одному условию и соответственно должно решаться одно нормальное уравнение. (При уравнивании по способу поправок координат в фигурах а и б придется решать по четыре нормальных уравнения, в фигуре в — десять). В фигуре г возникает три условия.

Методика составления условных уравнений для фигур а, б и в одна и та же и заключается в следующем.

Вначале составляют условное уравнение алгебраической суммы углов; затем по исходным и измеренным сторонам вычисляют значения углов и получают невязку (в секундах). После этого составляют условное уравнение поправок к углам, и, наконец, эти поправки выражают через поправки в измеренные стороны. В результате получают искомое уравнение поправок в измеренные величины.

Ниже приведены формулы вычислений.

1. Углы треугольника ABC (рис. 27) вычисляют по формулам

$$\left. \begin{aligned} \cos A &= \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}; \\ \cos B &= \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac}; \\ \cos C &= \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.5.86})$$

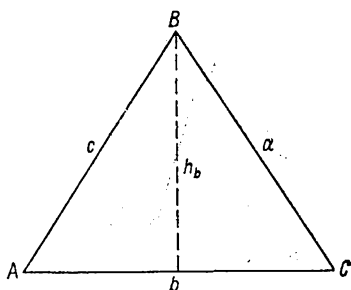


Рис. 27. Вычисление углов в трилатерации

2. Поправки в углы выражают через поправки в стороны следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} v''_A &= \frac{\rho''}{h_a} (v_a - \cos Bv_c - \cos Cv_b); \\ v''_B &= \frac{\rho''}{h_b} (v_b - \cos Av_c - \cos Cv_a); \\ v''_C &= \frac{\rho''}{h_c} (v_c - \cos Bv_a - \cos Av_b), \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.5.87})$$

где h — высота треугольника, опущенная из вершины угла, поправку которого определяют (например h_b — из вершины угла B).

Условные уравнения поправок к углам (см. рис. 26) имеют следующий вид:

в фигуре a

$$v_1 + v_2 + v_3 + W_a = 0,$$

где

$$W_a = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 - \angle A;$$

в фигуре b

$$v_1 + v_2 + v_3 + W_b = 0,$$

где

$$W_b = \beta_1 + \beta_2 - \beta_3;$$

в фигуре c

$$v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5 + v_6 + W_c = 0,$$

где

$$W_c = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6 - 360^\circ.$$

Подставляя на место поправок в углы правые части равенств (III.5.87), раскрывая скобки и приводя подобные члены, получим искомое условное уравнение относительно поправок в стороны.

Фигура g имеет особенности. В ней возникает три условия: одно — дирекционных углов и два — координатных.

Условное уравнение дирекционных углов, аналогичное рассмотренным выше, имеет вид

$$v_2 - v_5 + v_8 - v_{11} + v_{14} - v_{17} + W_z = 0,$$

где

$$W_z = T_I + \beta_2 \pm 180^\circ - \beta_5 \pm 180^\circ + \beta_8 \pm 180^\circ - \\ - \beta_{11} \pm 180^\circ + \beta_{14} \pm 180^\circ - \beta_{17} - T_{II}.$$

Координатные условия имеют следующий вид.

Условное уравнение абсцисс

$$\cos T_{Aa} v_{Aa} + \cos T_{ab} v_{ab} + \cos T_{bc} v_{bc} + \cos T_{cd} v_{cd} + \\ + \cos T_{dB} v_{dB} - \frac{Y_B - Y_A}{\rho''} v_2 + \frac{Y_B - y_a}{\rho''} v_5 - \\ - \frac{Y_B - y_b}{\rho''} v_8 + \frac{Y_B - y_c}{\rho''} v_{11} - \frac{Y_B - y_d}{\rho''} v_{14} + W_x = 0; \\ W_x = X_A + \Delta x_{Aa} + \Delta x_{ab} + \Delta x_{bc} + \Delta x_{cd} + \Delta x_{dB} - X_B,$$

где приращения координат вычисляются по измеренным сторонам и дирекционным углам, переданным от T_I через углы треугольников, вычисленные по сторонам.

Условное уравнение ординат

$$\sin T_{Aa} v_{Aa} + \sin T_{ab} v_{ab} + \sin T_{bc} v_{bc} + \sin T_{cd} v_{cd} + \\ + \sin T_{dB} v_{dB} + \frac{X_B - X_A}{\rho''} v_2 - \frac{X_B - x_a}{\rho''} v_5 + \\ + \frac{X_B - x_b}{\rho''} v_8 - \frac{X_B - x_c}{\rho''} v_{11} - \frac{X_B - x_d}{\rho''} v_{14} + W_y = 0,$$

где невязку W_y вычисляют тем же путем, что и W_x . Заменяя поправки в углы (отмечены цифровыми индексами) поправками в стороны (отмечены двойными буквенными индексами) и приводя подобные члены, получим искомые условные уравнения поправок в стороны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайдаев П. А. Вычисление геодезических сетей 3 и 4 классов. М., Недра, 1972.
2. Практикум по высшей геодезии/Под ред. Н. В. Яковлева. М., Недра, 1982.

III.6. НИВЕЛИРОВАНИЕ

М. Е. Пискунов

III.6.1. Классификация нивелирных сетей СССР

Нивелирные сети СССР подразделяются на государственную нивелирную сеть, нивелирные сети на геодинамических полигонах, нивелирную сеть местного значения, высотную съемочную сеть и высокоточную нивелирную сеть специального назначения.

Государственная нивелирная сеть СССР является главной высотной основой топографических съемок всех масштабов и геодезических измерений, проводимых для удовлетворения потребностей народного хозяйства и обороны страны, для решения научных и практических задач. Она разделяется на нивелирную сеть I, II, III и IV классов.

Посредством нивелирной сети I и II классов создается единая система высот на всей территории страны. Кроме того, нивелирование I и II классов предназначается для решения таких научных задач, как изучение фигуры физической поверхности Земли и ее внешнего гравитационного поля; изучение современных вертикальных движений земной поверхности; определение разности высот и наклонов среднеровненных поверхностей морей и океанов; разработка проблем, связанных с переброской части стока северных и сибирских рек на юг страны.

Нивелирные сети III и IV классов служат для обеспечения топографических съемок и решения инженерно-геодезических задач.

Нивелирная сеть I и II классов на геодинамических полигонах предназначается для изучения современных движений земной коры, поиска предвестников землетрясений, выявления активных поверхностей и глубинных разломов, наиболее активных участков и тектонического строения земной коры. Проект схемы размещения реперов, периметры нивелирных полигонов, а также периодичность повторного нивелирования разрабатывают в каждом отдельном случае.

Нивелирная сеть местного значения является высотным обоснованием топографической съемки масштабов 1:5000—1:500 и инженерно-геодезических работ.

В зависимости от требуемой точности и размера снимаемой площади сеть местного значения развивается в виде одной, двух или трех ступеней ходов и полигонов нивелирования III и IV классов и технического.

Высокоточная нивелирная сеть специального назначения служит высотной геодезической основой для изыскания, строительства, монтажа и выверки сооружений и прецизионных агрегатов, для наблюдений за их осадками и деформациями.

III.6.2. Нивелирные знаки

Назначением нивелирных знаков является долговременное закрепление на местности высот геодезических точек. Тип, конструкция и способ закрепления нивелирных знаков выбираются в зависимости от их назначения, физико-географических характеристик района и от конкретных условий мест крепления. Различают следующие типы нивелирных знаков государственной нивелирной сети.

Фундаментальный репер для районов с сезонным промерзанием грунта состоит из четырехгранной усеченной пирамиды, монолитно скрепленной с якорем (бетонная плита), заделанным в грунт естественной плотности (рис. 28). При наличии монолитных скальных пород, выходящих на поверхность или залегающих на глубине до 1,3 м, закрепляют скальные фундаментальные реперы. В зоне многолетней мерзлоты с глубиной протаивания грунта более 1,5 м закладывают фундаментальные реперы таких же типов, как и в зоне сезонного промерзания, но верхние грани пирами-

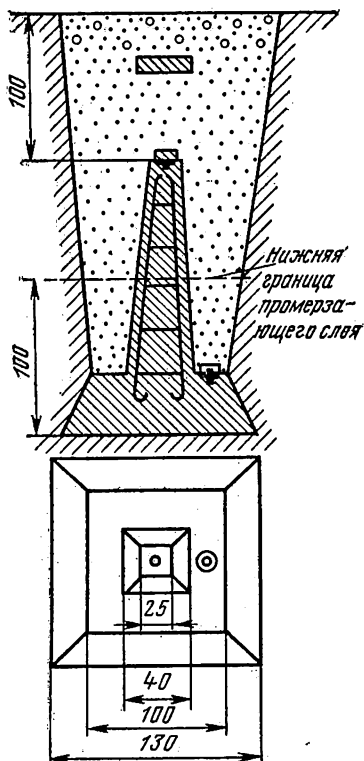
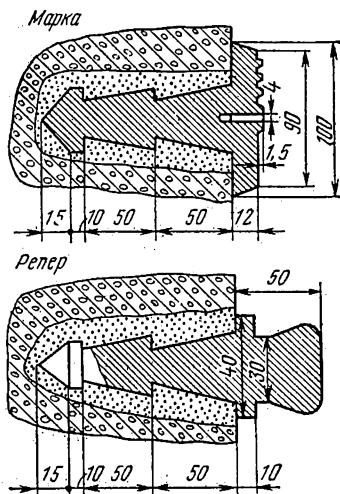


Рис. 28. Фундаментальный репер.
Размеры даны в см

Рис. 29. Стенная марка и репер



ды или труб располагают у поверхности земли. Основание якоря располагают на 1 м ниже наибольшей глубины протаивания.

Фундаментальные реперы устанавливают на нивелирных линиях I и II классов через 50—60 км, а также в узловых точках и вблизи основных морских водомерных постов.

Грунтовой репер для районов с сезонным промерзанием грунтов состоит из бетонного четырехгранного пилона сечением 16×16 см (или асбоцементной трубы диаметром 14—16 см, заполненной бетоном) и бетонного якоря, заделанного в грунт естественной плотности. Глубина закладки грунтовых реперов принята такой, чтобы основание якоря находилось на 50 см ниже наибольшей глубины промерзания, но не менее 1,3 м от поверхности земли плюс высота якоря, а верхняя грань пилон (или трубы) располагалась на 50 см ниже земной поверхности. В верхнюю грань пилон (или трубы) заделывают марку из малоокисляющегося металла.

В районах многолетней мерзлоты закладывают грунтовые реперы таких же типов, как и в зоне сезонного промерзания, но верхние грани металлических труб диаметром 60 мм выводят на поверхность земли. Глубину закладки принимают такой, чтобы многодисковый якорь располагался на 2—3 м ниже границы наибольшей

глубины оттаивания. Реперы закладывают преимущественно в буровые или в протаянные скважины, а также в котлованы.

В районах закрепленных и сыпучих песков реперы закладывают в котлован, в буровые скважины, а также завинчивают на глубину не менее 4 м; верхняя часть выступает над поверхностью земли на 0,8 м.

Стенные марки и реперы имеют вид, указанный на рис. 29. В центре диска марки имеется отверстие диаметром 4 мм для штифта подвесной рейки.

Грунтовые и стенные реперы и марки устанавливают на нивелирных линиях всех классов через 5—7 км и в труднодоступных районах — через 10—15 км.

А. ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ НИВЕЛИРОВАНИЕ

III.6.3. Методы нивелирования

Нивелирование, целью которого является определение высот точек, выполняется различными приборами и методами. Различают нивелирование: 1) геометрическое (пешее и моторизованное); 2) тригонометрическое; 3) барометрическое; 4) механическое; 5) микро nivelирование; 6) гидростатическое и 7) фотограмметрические методы нивелирования.

Геометрическое нивелирование состоит в непосредственном определении превышения одной точки над другой, близкой к ней точкой, при помощи горизонтального луча визирования и отвесно установленных в этих точках реек.

Если превышение h определяют в направлении AB , то точку A называют задней, а B — передней. Непосредственно измеренные высоты $З$ и $П$ горизонтального луча визирования над точками A и B , на которых установлены рейки, называют соответственно взглядом назад и взглядом вперед. Следовательно, определяемое превышение $h = З - П$. Такое определение превышения называют нивелированием из середины, в отличие от нивелирования вперед, в котором взгляд назад заменяется непосредственно измеренной высотой v луча визирования над станцией, и тогда $h' = v - П$.

Влияние кривизны Земли и рефракции. Вследствие кривизны Земли взгляды $З$ и $П$ будут содержать ошибку p , равную в среднем

$$p = 0,5D^2/R, \quad (\text{III.6.1})$$

где D — расстояние от нивелира до рейки; R — средний радиус Земли.

Под влиянием рефракции, меняющейся в зависимости от изменения температуры воздуха и ряда других обстоятельств, взгляды $З$ и $П$ также будут содержать погрешность r , равную в среднем

$$r = 0,08D^2/R. \quad (\text{III.6.2})$$

Совместное влияние f кривизны Земли и рефракции

$$f = p - r = 0,42D^2/R. \quad (\text{III.6.3})$$

Нивелирование из середины ($D_З = D_П$) исключает влияние кривизны Земли и в значительной степени ослабляет влияние рефракции.

III.6.4. Нивелиры и их основные части

Требования к взаимному расположению осей нивелира. Нивелир — геодезический прибор, устройство которого обеспечивает установку визирной оси зрительной трубы перпендикулярно к отвесной линии в процессе нивелирования. Основные части нивелира (рис. 30): зрительная труба Z ; цилиндрический уровень L или заменяющий его компенсатор; алидадная часть, состоящая из втулки B_2 (или оси) и части, связывающей эту втулку (или ось) со зрительной трубой; часто в алидадной части нивелиров с уровнем имеется элевационный винт, предназначенный для изменения угла наклона трубы Z относительно оси VV' подставки; подставка T , связанная с ней ось B_1 (или втулка) и три подъемных винта P .

Зрительная труба и уровень (или заменяющий его компенсатор) являются важнейшими частями нивелира, в котором должно соблюдаться первое главное условие: *ось NN' уровня и визирная ось CC трубы должны быть между собой параллельны*. Второе главное условие: *при фокусировании трубы визирная ось CC должна сохранять неизменное положение*. Кроме того, для удобства работы с нивелиром необходимо, чтобы ось NN' была перпендикулярна к вертикальной оси $V'V'$ вращения алидадной части, а также чтобы средняя горизонтальная нить сетки нитей располагалась перпендикулярно к оси $V'V'$.

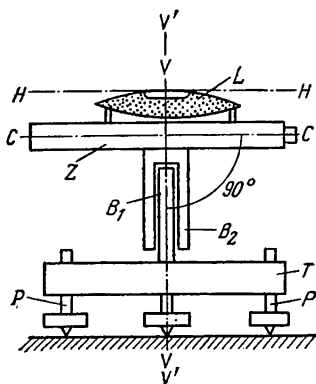


Рис. 30. Схема взаимного расположения частей нивелира

Уровни. Уровень служит для приведения главных осей приборов в горизонтальное или отвесное положение, для измерения малых вертикальных углов, а также для учета изменений положений осей отдельных частей прибора в процессе измерений.

Уровень состоит из стеклянной ампулы и металлической оправы, при помощи которой он крепится к прибору. Ампулу заполняют прозрачной и маловязкой жидкостью с низкой температурой замерзания (этиловый серный эфир,

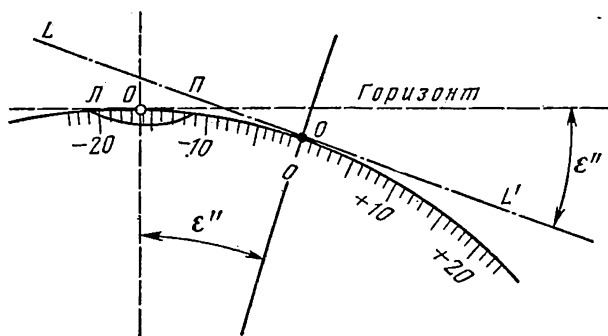


Рис. 31. Нуль-пункт и ось уровня

этиловый или метиловый спирт). Концы ампулы запаивают, и внутри ампулы из паров заполнителя образуется пузырек уровня.

Уровни подразделяются по форме ампулы на сферические (круглые) и цилиндрические (трубчатые) и по конструкции — на простые, компенсационные и камерные.

Внутренняя поверхность ампулы цилиндрического уровня в продольном сечении имеет бочкообразную форму, отшлифованную по дуге большого круга. У круглого уровня внутренняя поверхность верхней части ампулы имеет шлифованную полусферическую поверхность. Пузырек уровня занимает наивысшее положение, и касательная, проведенная к внутренней поверхности ампулы в середине пузырька, всегда занимает горизонтальное положение, а нормаль — отвесное.

На внешней поверхности ампулы уровня нанесена равномерная шкала штрихов через 2 мм. Точка O (рис. 31), расположенная на середине ампулы, относительно которой симметрично нанесены штрихи, называется нуль-пунктом. Касательная LL' в нуль-пункте к дуге продольного сечения ампулы называется осью уровня. Угол, соответствующий наклону оси уровня при смещении середины пузырька на одно деление (2 мм), называется ценой деления уровня и обозначается τ'' .

Цену деления уровня определяют по формуле

$$\tau'' = \frac{l}{R} \rho'', \quad (\text{III.6.4})$$

где l — линейная величина одного деления шкалы ампулы; R — радиус дуги.

Угол ε'' (см. рис. 31) между осью LL' и касательной к середине пузырька называется наклоном (или наклонностью) оси цилиндрического уровня относительно горизонтальной линии. Наклонность ε'' определяется из отсчетов по концам (L — левый и P — правый) пузырька относительно шкалы уровня.

Если подписи штрихов шкал возрастают в одну сторону, то

$$\varepsilon'' = \frac{\tau''}{2} (L + P - 2m), \quad (\text{III.6.5})$$

где m — отсчет по шкале в нуль-пункте уровня.

Если подписи штрихов возрастают от нуля, расположенного в нуль-пункте, к краям ампулы, причем отсчеты по одну сторону от нуль-пункта сопровождаются знаком плюс, а по другую — знаком минус, то

$$\varepsilon'' = \frac{\tau''}{2} (L + P). \quad (\text{III.6.6})$$

Изменение $\Delta\varepsilon''$ угла ε'' определяется по отсчетам L_1 , P_1 и L_2 , P_2 , взятым при первом и втором положениях уровня:

$$\Delta\varepsilon'' = \frac{\tau''}{2} [(L_2 + P_2) - (L_1 + P_1)]. \quad (\text{III.6.7})$$

В уровнях с призмной системой (контактных) изображения концов пузырька передаются к месту, удобному для наблюдателя, часто в поле зрения трубы. При совмещенных изображениях концов пузырька ось уровня занимает горизонтальное положение.

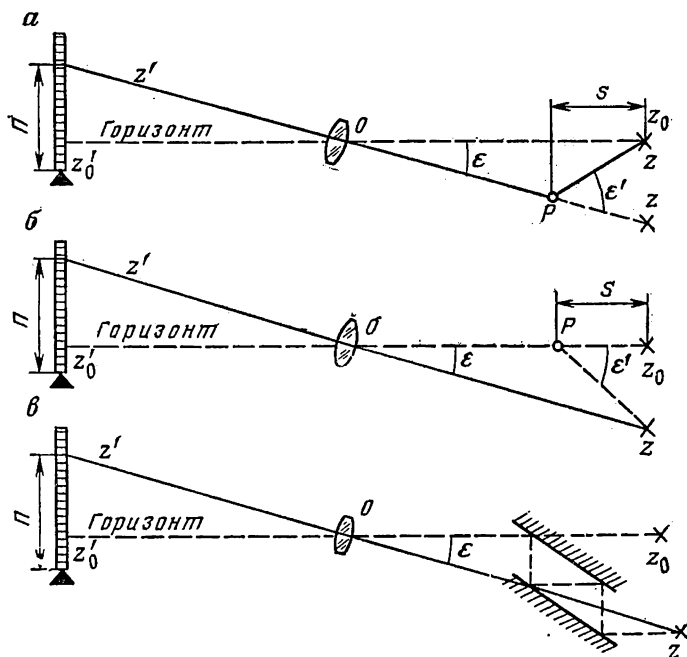


Рис. 32. Схема действия компенсаторов

Под чувствительностью уровня понимают наименьший угол, на который необходимо наклонить ось уровня, чтобы пузырек получил едва заметное для глаза смещение. Чувствительность уровня зависит от радиуса кривизны ампулы, качества шлифовки и чистоты рабочей поверхности, свойств заполнителя, температуры, длины пузырька, способа установки пузырька на нуль-пункт и др.

Нормальная длина пузырька уровня занимает 0,3—0,5 длины ампулы. Чтобы при изменении температуры можно было сохранять длину пузырька постоянной, в некоторых из уровней имеется запасная камера, отделенная от рабочей части ампулы перегородкой с отверстием внизу. В ампулах компенсированных уровней помещается стеклянная палочка, уменьшающая объем заполнителя. Поэтому при изменении температуры длина пузырька почти постоянна.

Для ослабления влияний температуры на уровни ампулы точных уровней предохраняют несколькими оправами, а внешнюю оправу покрывают теплоизолирующим материалом и закрывают трубкой из оргстекла.

Компенсаторы. Компенсаторы автоматически устанавливают линию визирования в горизонтальное положение. Принцип их действия следующий. При наклоне зрительной трубы нивелира на малый угол ϵ (рис. 32) горизонтальная нить сетки сместится с горизонта z_0z_0 на величину

$$z_0z \approx f\epsilon, \quad (\text{III.6.8})$$

где f — фокусное расстояние объектива, и отсчет Π' по рейке окажется неправильным. Чтобы отсчет стал правильным, необходимо либо сдвинуть сетку z в z_0 на величину fe путем поворота рычага Pz_0 (рис. 32, а) вокруг точки P на угол e' так, чтобы

$$fe = se', \quad (\text{III.6.9})$$

либо изменить в трубе направление горизонтального луча $z'z_0$, преломив его в точке P (рис. 32, б) на угол e' так, чтобы луч прошел через горизонтальную сетку, либо, наконец, переместить направление горизонтального луча $z'z_0$ параллельно самому себе на величину z_0z (рис. 32, в) так, чтобы перемещенный луч прошел через смещенную сетку нитей; при этом должно быть удовлетворено условие

$$fe = kse \text{ или } f = ks, \quad (\text{III.6.10})$$

где s — длина луча визирования от точки падения его на зеркало (или призму компенсатора) до сетки нитей; k — коэффициент, зависящий от числа отражений визирного луча. Смещение сетки, излом луча или его поступательное перемещение происходят автоматически при помощи компенсатора.

Из равенств (III.6.9) и (III.6.10) следует основное уравнение (условие стабилизации)

$$\frac{f}{s} = \frac{e'}{e} = k, \quad (\text{III.6.11})$$

где $e'/e = k$ — угловое увеличение (умножение) компенсатора (или коэффициент компенсации). В зависимости от средств получения необходимого значения коэффициента k различают коэффициенты оптической, механической и оптико-механической компенсации.

По устройству компенсаторы делятся на жидкостные и маятниковые. Жидкостные компенсаторы основаны на свойстве свободной поверхности жидкости. Эту поверхность используют в качестве горизонтального зеркала или в качестве оптического клина с переменным преломляющим углом.

Маятниковые компенсаторы делятся на механические и оптико-механические. В механических компенсаторах перемещается сетка нитей, подвешенная на металлических нитях. Простейшим компенсатором этого типа является диск 1 (рис. 33) с сеткой нитей, подвешенной на трех стальных нитях 2 на расстоянии f от главной задней точки объектива 3. При наклоне трубы на малый угол e сетка будет занимать неизменное положение.

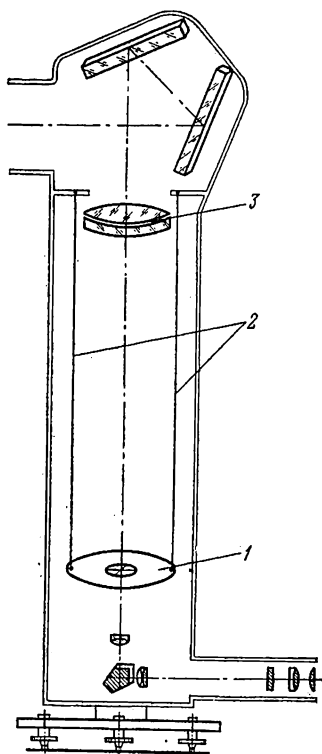


Рис. 33. Схема механического компенсатора

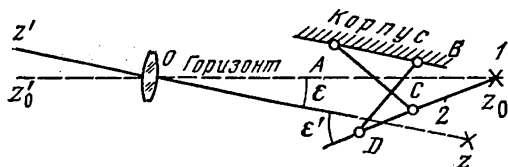


Рис. 34. Схема компенсатора с подвижной сеткой

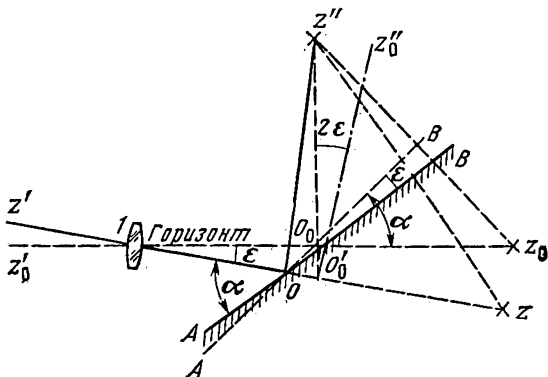


Рис. 35. Компенсатор с подвешенным на металлических нитях зеркалом

На рис. 34 показана схема компенсатора с подвижной сеткой 1, укрепленной на конце пластины 2, подвешенной на двух парах скрепляющихся нитей, прикрепленных в точках *A* и *B* к корпусу трубы. Все нити имеют одинаковую длину. Расстояние между точками *C* и *D* соединения нитей с пластиной 2 меньше соответствующего расстояния между точками *A* и *B*, вследствие чего компенсатор имеет большее угловое увеличение.

Оптико-механические компенсаторы представляют собой оптические компенсаторы (линзы, призмы, зеркала), подвешенные на металлических нитях. На рис. 35 показана схема компенсатора, зеркало АВ которого, вращающееся на горизонтальной оси, проходящей через точку О, под действием силы тяжести устанавливается под углом α к горизонтальному лучу визирования и направляет его на неподвижную сетку z'' . При наклоне трубы на угол φ зеркало повернется на этот же угол и изменит направление луча Oz_0 на угол 2φ . При этом будет соблюдено равенство (III.6.10), где $s = Oz''$. Отсюда следует формула компенсатора с зеркалом (или призмой полного внутреннего отражения)

$$f = 2s. \quad (\text{III.6.12})$$

Для улучшения работы компенсатора зеркало подвешивают на нитях, при помощи которых наклон его увеличивается в n раз. Формула компенсатора с зеркалом на нитях имеет вид

$$f = 2ns. \quad (\text{III.6.13})$$

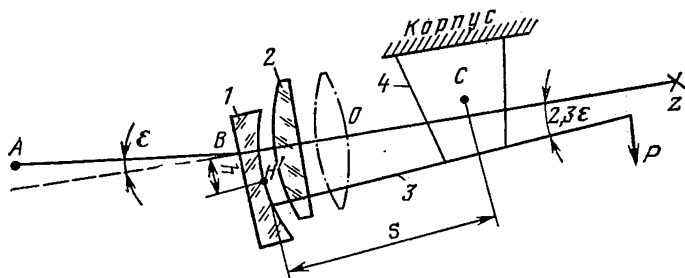


Рис. 36. Компенсатор линзовый

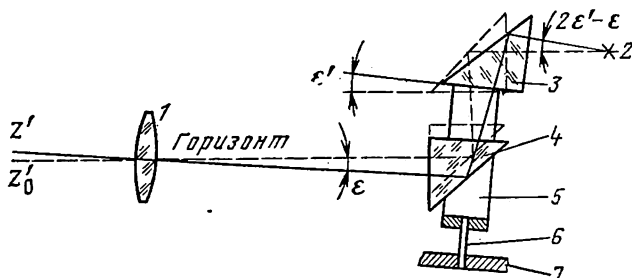


Рис. 37. Компенсатор с эластичным стержнем

Компенсатор линзовый помещается перед объективом трубы и состоит из двух линз: положительной 2 (рис. 36), укрепленной жестко в одной оправе с объективом трубы, и отрицательной 1, закрепленной на звене 3, подвешенном на четырех упругих проволоках 4 и уравновешенном контргрузом Р. Линзы рассчитаны и установлены на таком расстоянии друг от друга, что их суммарное действие равносильно телескопической системе, имеющей увеличение, близкое к единице. Главная точка H' линзы 1 находится на расстоянии s от оси C симметрии трапеции, почти равном радиусу сферической поверхности линзы 1.

При наклоне зрительной трубы на угол ε подвешенная система наклоняется относительно горизонта на угол $2,3\varepsilon$ благодаря трапециевидной форме расположения проволок и смещению центра C тяжести системы. Главная точка H' сместится с оптической оси на величину $h=2,3\varepsilon s$. При этом будет соблюдено равенство (III.6.9), которое для данного компенсатора будет $h=fe=2,3\varepsilon s$ или $f=2,3s$.

Компенсатор с эластичным стержнем. К верхнему концу эластичного стержня 6 (рис. 37), консольно закрепленного на корпусе трубы 7, прикреплена рамка 5 с компенсационной призмой 3. Объектив 1, призма 4 и пластинка 2 с сеткой нитей закреплены в трубе неподвижно. При продольном наклоне трубы на угол ε стержень 6, изгибаясь под действием силы тяжести рамки с компенсационной призмой, наклоняет призму 3 на угол $\varepsilon'=k\varepsilon$, вследствие чего изменяется направление визирного луча на угол $2(\varepsilon'-\varepsilon)$. Согласно

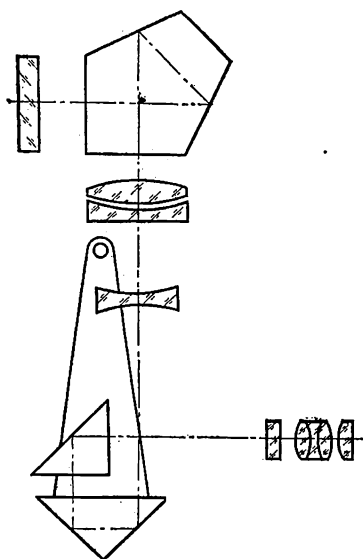


Рис. 38. Компенсатор, смещающий луч параллельно самому себе

(III.6.9), для компенсатора данного типа основное уравнение будет $f_e = s2(e' - e) = 2se \times (k - 1)$ или $f = 2s(k - 1)$.

Компенсаторы, смещающие луч параллельно самому себе. Примером компенсатора такого типа является прямоугольная равнобедренная призма (рис. 38), свободно подвешенная на пластинке и входящая в систему оптики нивелира. При наклоне прибора на угол e сетка нитей сместится с горизонта на величину f_e , призма — на величину $0,5a = se$, а визирный луч — на отрезок $a = 2se$, где s — расстояние от точки подвеса пластинки до компенсирующей призмы. Согласно (III.6.9), для компенсатора данного типа основное уравнение будет $f_e = 2se$ или $f = 2s$. При выполнении этого условия горизонтальный луч, пройдя через оптическую систему, всегда попадет на перекрестие нитей. Работающий по этому принципу компенсатор применен в нивелире Ni 007.

Компенсаторы разных типов действуют в определенных диапазонах углов e наклона базы компенсатора и характеризуются, как и заменяемые ими уровни, чувствительностью. Под чувствительностью компенсатора понимают наименьший угол, на который необходимо наклонить базу компенсатора, чтобы его чувствительный элемент получил едва заметное с помощью автоколлиматора смещение. У большинства компенсаторов чувствительность внутри диапазона их действия неодинакова: она выше в центре и

Марка нивелира, страна-изготовитель	Зрительная труба				
	отверстие объектива, мм	увеличение, крат	длина, мм	наименьшее расстояние визирования, м	угол поля зрения по вертикали
H-05 (СССР)	52	42	390	1,0	55'
Ni 004 (ГДР)	56	44	430	3,0	50
H-3 (СССР)	40	30	170	2,0	1° 20'
Ni 030 (ГДР)	35	25	195	1,8	1 06
H-10Л (СССР)	32	23	140	1,5	1 30

* В — высокоточный (прецизионный); С — точный (средней точности);

ниже у краев диапазона. В лучших нивелирах с компенсатором она достигает 0,05" в середине диапазона.

III.6.5. Типы нивелиров

Современные нивелиры разделяют на две группы: нивелиры с цилиндрическим уровнем (уровенные) и нивелиры с компенсатором.

Нивелиры характеризуются чувствительностью цилиндрического уровня (или точностью работы компенсатора), наличием оптического микрометра и элевационного винта, увеличением, полем зрения и разрешающей способностью зрительной трубы.

В соответствии с действующим ГОСТ изготавливают нивелиры трех типов: высокоточные — Н-05; точные — Н-3 (Н-3К и Н-3КЛ) и технические — Н-10 (Н-10К и Н-10КЛ). В шифрах этих приборов: Н — нивелир; 0,5; 3 и 10 — средняя квадратическая ошибка превышения на 1 км двойного нивелирного хода; К — компенсатор и Л — лимб.

Оптические и конструктивные данные современных уровенных нивелиров приведены в табл. 11 и нивелиров с компенсаторами — в табл. 12.

Нивелир Н-05. Высокоточный уровень нивелир Н-05 снабжен апохроматической зрительной трубой, цилиндрическим контактным уровнем, оптическим микрометром и элевационным винтом.

Для точного наведения на изображение штриха нивелирной рейки сетка нитей, кроме обыкновенной горизонтальной нити, расположенной в левой половине поля зрения, имеет в правой половине две нити (клиновый биссектор), симметрично расходящиеся под углом 5°. Плоскопараллельная пластинка оптического микрометра помещена перед объективом зрительной трубы. Наклон плоскопараллельной пластинки осуществляется посредством маховичка и тяги, на которой жестко укреплен отсчетная шкала, изображение которой передается в поле зрения трубы. Перед плоскопараллельной пластинкой находится защитное стекло, выполненное в виде клина. Вращением защитного стекла вокруг визирной линии можно юстировать угол i'' нивелира.

Уровень компенсационный, контактный помещен слева от трубы. Изображения концов пузырька уровня при помощи призмной системы передаются в поле зрения трубы.

ТАБЛИЦА 11

Уровни				Оптический микрометр		Масса нивелира, кг	Группа точности
цилиндрический		круглый (установочный)					
способ установки пузырька на нуль-пункт	цена деления на 2 мм		число делений	цена деления, мм			
Элевационный винт, контактный	10'	5'	110	0,05	5,6	В*	
То же	10	2	105	0,05	6,2	В	
» »	15	10	—	—	2,0	С*	
» »	30	8	105	0,05	1,6	С	
» »	45	10	—	—	1,0	Т*	

Т — технический.

ТАБЛИЦА 12

Марка нивелира, страна-изготовитель	Труба			Компенсатор				Цена деления шкалы отсчетного устройства, мм	Масса нивелира, кг	Труба точности
	отверстие объек- тива, мм	увеличение, крат	длина трубы, мм	наименьшее рас- стояние визиро- вания, м	взаимодействие элементов, стабилизирующих визирный луч (чувствительный элемент)	Демпфер	Диапазон дейст- вия компенсатора	ошибка само- установки линии визирования		
Н-05К (СССР)	55	40	—	—	Зеркало на маятнике	Воздуш- ный То же	10'	0,3"	5'	В*
Ni-A3 (ВНР)	67	30, 40, 50	—	2,5	Зеркало на маятнике	»	14	0,05	3,0	В
Ni 002 (ГДР)	55	40	—	1,5	Подвесное двустороннее зеркало	»	10	0,05	8	В
Ni1 (ФРГ)	50	30, 40, 50	407	1,4	Полупентапризма на скрепляющихся нитях	»	10	0,1	8	В
Ni007 (ГДР)	40	31,5	—	2,2	Прямоугольная призма подвешена на маятнике	»	10	0,15	8	В
Н-3К (СССР)	40	30	190	2,0	Призма подвешена на 4-х скрепляющихся ни- тях	»	16	0,4	10	С*
Ni-B3 (ВНР)	45	28	272	3,0	Система Поро второго рода	»	8	—	8	С
Н-10КЛ (СССР)	—	20	—	2,0	Призмный	»	15	—	10	Т*
Ni025 (ГДР)	30	20	195	1,5	Маятник с двумя при- зами	»	10	—	8	Т

* В — высокоточный (прецизионный); С — точный (средней точности); Т — технический.

Весь нивелир для предохранения от одностороннего нагрева помещен в дополнительный металлический кожух. Нивелир Н-05 предназначен для нивелирования I и II классов.

Нивелир Ni 002 (ГДР). Высокоточный нивелир Ni 002 создан для нивелирования на автомобилях и пригоден для обычного (пешего) нивелирования I и II классов.

Зрительная труба дает прямое незеркальное изображение. Сетка нитей по своей форме такая же, как и у нивелира Н-05. Она укреплена на переднем компоненте объектива, и ее изображение с помощью проектирующей оптики передается в поле зрения трубы. Перед объективом находится защитное стекло, выполненное в виде клина. Окуляр находится не как обычно, сзади зрительной трубы, а наверху корпуса нивелира и может быть повернут по азимуту на 240° , что позволяет выполнять визирование на обе нивелирные рейки при одном положении наблюдателя. Изображения отсчетной шкалы микрометра и пузырька круглого уровня передаются в поле зрения трубы.

Компенсатор маятниковый с воздушным демпфированием выполнен в виде подвешенного двустороннего зеркала. Поворот маятника (зеркала) на 180° вокруг его оси вращения с помощью переключателя, находящегося внизу корпуса нивелира, освобождает результаты измерений от влияния погрешности недокомпенсации. Для удобства работы с нивелиром Ni 002 фокусирующее устройство, оптический микрометр, винт точной азимутальной наводки имеют по две головки, которые выведены на обе стороны прибора.

Наблюдения на станции нивелиром Ni 002 выполняются в такой последовательности: первое положение компенсатора — отсчеты по задней Z_1 (или Z_0) и передней P_1 (или P_0) рейкам (основная шкала), второе положение компенсатора — отсчеты по передней P_2 (или P_d) и задней Z_2 (или Z_d) рейкам (дополнительная шкала).

Нивелир Н-3 предназначен для нивелирования III и IV классов. Изображения концов пузырька цилиндрического уровня передаются в поле зрения трубы.

Нивелир Н-3К с компенсатором предназначен для нивелирования III и IV классов. Зрительная труба — ломаная (перископическая). Компенсатор — призменный оптико-механического типа. Подвижная призма подвешена на четырех попарно скрещенных проволоках (торсионах). Демпфирование — воздушное. Точное визирование на рейку осуществляется при помощи одной из двух головок винта бесконечной горизонтальной наводки, расположенных с обеих сторон прибора.

Нивелиры Н-10Л и Н-10КЛ предназначены для нивелирования IV класса и технического нивелирования. Цена деления лимба — 1° .

Нивелир Н-10КЛ — технический с компенсатором и лимбом. Цена наименьшего деления 1° . Нивелир предназначен для нивелирования IV класса и технического нивелирования. Зрительная труба нивелира Н-10КЛ дает прямое изображение. Компенсатор — оптико-механический. Он состоит из двух пентапризм, склеенных между собой и наглухо скрепленных с корпусом трубы, и чувствительного элемента — призмы, заключенной в рамку, которая подвешена на двух свободно посаженных шарикоподшипниках.

Наводящего устройства у нивелиров нет; зрительную трубу наводят на рейку вращением от руки.

III.6.6. Нивелирные рейки

Устройство реек. Рейка служит линейной мерой для определения величины превышения. Корпус большинства реек изготавливают в виде бруска длиной 3—4 м из хорошо выдержанного пропитанного маслом дерева. Для большей жесткости их делают в поперечном сечении двутавровыми или Т-образными. Лицевую сторону окрашивают светлой краской, и на ней по трафарету или при помощи делительной машины наносят шашечные или штриховые шкалы.

Рейки бывают цельные трехметровые и складные. Цельные рейки в большинстве случаев делают двусторонними, т. е. шкалы наносят на обеих сторонах реек; одну из этих шкал окрашивают в черный цвет, другую — в красный.

Концы реек оковывают. Плоскость оковки нижнего конца, которой рейка ставится на высотную точку, называется пяткой рейки. Пятка должна быть возможно меньшего размера и перпендикулярна к осям шкал реек, т. е. к прямым, проходящим в плоскостях шкал симметрично относительно боковых граней корпуса рейки. Центр пятки должен лежать на оси симметрии шкал. Точка пересечения оси нулевого штриха (или нижнего края нулевой шашки) с осью основной (или черной) шкалы, к которой относится данный штрих (или шашка), называется нулем шкалы нивелирной рейки. Нуль шкалы рейки должен совпадать с пяткой.

На корпусе рейки имеются: деревянные или металлические ручки; съемный или откидной круглый уровень с ценой деления 7—15' на 2 мм; съемный или откидной кронштейн *В* для подвески и острове *С* для центрирования отвеса при выверке круглого уровня; у реек, предназначенных для точного и высокоточного нивелирования, кронштейн *В* и острове *С* должны быть размещены вблизи окованных концов рейки. Кроме того, эти рейки должны быть оборудованы съемными подпорками для установки и удержания рейки на высотной точке в отвесном положении и съемными подпятниками (рис. 39), обеспечивающими однообразную установку пятки рейки на высотные точки. У прикрепленного к пятке рейки подпятника центр оградительного кольца должен лежать на оси шкалы.

Для нивелирования I, II, III и IV классов применяют в основном цельные трехметровые рейки. При этом для нивелирования III и IV классов применяют шашечные рейки типа НР-3 и НР-10 с сантиметровыми делениями, а для нивелирования I и II классов — штриховые инварные рейки типа НР-05 с полусантиметровыми делениями. Нанесенные на рейках штрихи шкал должны удовлетворять требованиям допусков, приведенных в графе 11 (см. табл. 13).

Для технического нивелирования применяют складные четырехметровые рейки с одно-, двух и пятисантиметровыми шашками.

Штриховая рейка НР-05 с инварной лентой односторонняя. Один конец инварной ленты наглухо прикреплен к нижней стальной оковке корпуса рейки, а другой — к концу равноплечего рычага, ось вращения которого укреплена в верхней стальной оковке. Инварной ленте сообщено постоянное натяжение в 20 кг.

На инварной ленте нанесены две шкалы в виде штрихов толщиной 1 мм. Расстояние между осями смежных штрихов каждой шкалы равно 5 мм. Шкалы смещены одна относительно другой на 2,5 мм. Подписи полудециметровых штрихов обеих шкал нанесены на наклонных к середине гранях корпуса рейки. Шкала, оцифрованная от 0 до 60, называется основной шкалой, а шкала с подписями от 60 до 119 — дополнительной шкалой. Ось нулевого штриха основной шкалы совпадает с пяткой.

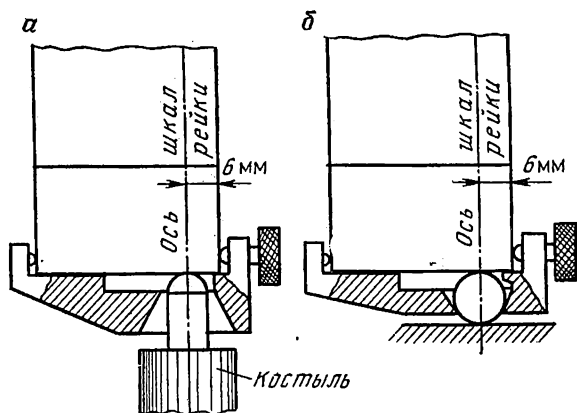


Рис. 39. Подпятники:

а — для установки рейки на нивелирный костыль; *б* — для установки рейки на плоскость (на головку рельса)

III.6.7. Поверки и исследования уровенных нивелиров

Нивелиры и рейки поверяют и исследуют с целью получения исчерпывающих данных о пригодности их для нивелирования и приведения в рабочее состояние.

Поверкой и юстировкой выявляют отступления от требований к взаимному расположению осей прибора и достаточно полно устраняют эти отклонения.

Исследование — это определение неустраняемых отклонений для принятия соответствующих предосторожностей, уменьшающих при измерениях влияние отклонений на результат; определение постоянных прибора; определение ошибок делений шкал, ошибки установки пузырька уровня на нуль-пункт; испытание работы подвижных частей нивелира; установление степени влияния внешних условий и их изменений на стабильность взаимного расположения осей прибора и др.

1. Поверка перпендикулярности оси цилиндрического уровня к оси вращения нивелира выполняется, как в теодолите.

Если в нивелире имеется элевационный винт, то после поворота нивелира вокруг оси на 180° пузырек перемещают на половину дуги его отклонения не исправительными винтами уровня, а элевационным винтом.

Эту поверку выполняют в несколько приемов, пока при любом положении алидадной части нивелира пузырек уровня не будет отклоняться от нуль-пункта более чем на одно деление. В таком случае элевационный винт оказывается установленным на нормальный отсчет.

2. Поверка и исправление установки сетки нитей. *Вертикальная нить сетки должна быть параллельна оси вращения нивелира, а горизонтальная — перпендикулярна к этой оси.* Ось вращения нивелира приводят в отвесное положение, а затем, глядя в трубу нивелира, совмещают один конец вертикальной нити с нитью отвеса, подвешен-

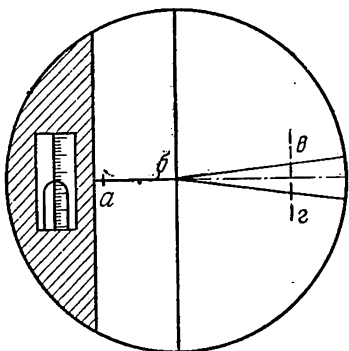


Рис. 40. Проверка установки сетки нитей с клиновым биссектором

ного в 15—20 м от нивелира в защищенном от ветра месте. Если вертикальная нить сетки при этом не совмещается с нитью отвеса и противоположный конец ее отходит от нити отвеса более чем на 0,5 мм, то исправляют положение сетки нитей.

Для проверки горизонтальной нити сетки, действуя наводящим винтом, плавно поворачивают трубу по азимуту в обе стороны. Если нить сетки при этом сходится с выбранной точки или с замеченного деления рейки, то сетку нитей следует заменить.

У сетки нитей с клиновым биссектором ось биссектора должна быть перпендикулярна к вертикальной нити. Для проверки этого условия наводят точкой *a* (рис. 40) горизонтальной нити сетки на хорошо видимую точку, находящуюся на расстоянии 6—7 м от нивелира, точно устанавливают пузырек уровня на нуль-пункт, производят отсчет по шкале оптического микрометра и записывают его с округлением до 0,1 деления (отсчет должен быть близким к 50). Наводят на выбранную точку точками *b*, *в*, *г* горизонтальной нити и биссектора и производят отсчеты. Если расхождение $(a+b)/2 - (в+г)/2$ более 2 делений, то необходимо заменить сетку нитей.

3. Проверка и исправление установки цилиндрического уровня (проверка главного условия). Проекции визирной оси трубы и оси уровня на горизонтальную и отвесную плоскости должны быть параллельны.

Вначале проверяют параллельность проекций этих осей на горизонтальную плоскость, а затем — на отвесную.

Первую часть проверки выполняют при получении новых нивелиров или перед началом полевых работ. Для выполнения первой проверки нивелир устанавливают в 50 м от закрепленной рейки так, чтобы один из подъемных винтов находился в отвесной плоскости, проходящей через визирную ось трубы, а два других — на линии, перпендикулярной к визирной оси. Тщательно приводят ось вращения нивелира в отвесное положение и, установив пузырек уровня на нуль-пункт, отсчитывают по рейке. Затем плавными поворотами подъемных винтов в разные стороны на 2—3 полных оборота придают нивелиру боковые наклоны сначала в одну, а затем в другую сторону, следя при этом за тем, чтобы отсчет по рейке не изменился. Если в обоих случаях пузырек уровня оставался на нуль-пункте или смещался в одну и ту же сторону (или изображения концов пузырька уровня не расходились или смещались в одну и ту же сторону одинаково), то уровень установлен правильно. Если же пузырек смещался с нуль-пункта в разные стороны более чем на 1—2 деления уровня, то установку цилиндрического уровня исправляют его боковыми исправительными винтами.

Вторая часть проверки главного условия, когда определяется угол i'' (проекция на отвесную плоскость угла между осью уровня и визирной осью трубы нивелира), выполняется двойным нивелированием. На расстоянии 48 м друг от друга на ровной местности вы-

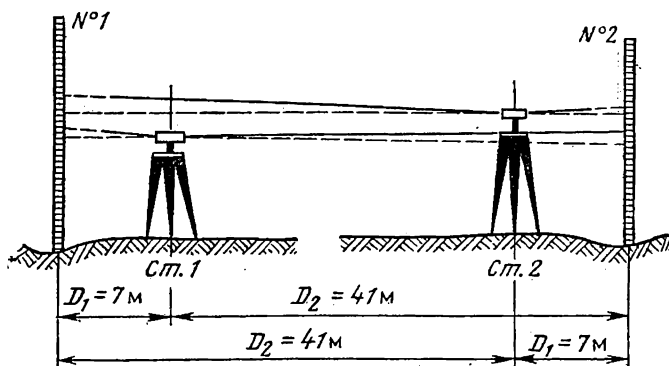


Рис. 41. Проверка главного условия нивелира

бирают две устойчивые по высоте точки. На эти точки устанавливают по уровню рейки и закрепляют их так, чтобы обе рейки в течение всего времени выполнения проверки оставались неподвижными. Нивелир устанавливают примерно в створе между рейками и в 7 м от рейки № 1 (рис. 41). Приводят ось вращения нивелира в отвесное положение и, наведя трубу сначала на ближнюю (заднюю) рейку № 1, берут отсчеты $З_{01}$ и $З_{д1}$ по обоим шкалам. Затем, повернув алидадную часть нивелира на 180° и перефокусировав трубу на дальнюю (переднюю) рейку № 2, берут отсчеты $П_{01}$ и $П_{д1}$. По полученным на первой станции отсчетам вычисляют превышение $h_1 = \frac{1}{2}(З_{01} - П_{01} + З_{д1} - П_{д1})$.

Выполнив нивелирование на первой станции, переносят нивелир на вторую станцию, расположенную также примерно в створе между рейками, но в 7 м от рейки № 2, и повторяют всю операцию, наблюдая сначала дальнюю (заднюю) рейку № 1, а затем — ближнюю (переднюю) рейку № 2 и вычисляя h_2 . Наблюдения на первой и второй станциях составляют один прием. Значение угла i'' вычисляют по формуле

$$i'' = \frac{h_1 - h_2}{2(D_2 - D_1)} \rho'', \quad (\text{III.6.14})$$

где h_1 и h_2 — превышения, измеренные на станциях 1 и 2; D_1 и D_2 — расстояния до первой и второй реек на первой станции. Если $D_1 = 7$ м, $D_2 = 41$ м и $\rho'' = 206\,265''$, то $\rho''/2(D_2 - D_1) = 3,0$, тогда формула (III.6.14) записывается так:

$$i'' = 3(h_1 - h_2). \quad (\text{III.6.15})$$

Если угол i'' , вычисленный по результатам измерений первого приема, окажется менее $10''$, то выполняют еще два приема измерений. За окончательное значение угла i'' принимают среднее из трех его значений. Если же по данным первого приема измерений угол i'' окажется более $10''$, то в зависимости от конструкции нивелира уменьшение угла i'' производят или вертикальными исправительными винтами уровня, или исправительными винтами сетки нитей, или поворотом оптического клина, расположенного перед объективом трубы.

В первом случае, не меняя высоты нивелира на второй станции, при помощи элевационного винта устанавливают трубу на но-

вый отсчет $\mathcal{Z}'_{02} = \mathcal{Z}_{02} + 0,25 \cdot 10^{-2} i''$ по дальней (задней) рейке, а затем, действуя исправительными винтами уровня, устанавливают его пузырьки на нуль-пункт. Во втором и третьем случаях перекрестие сетки нитей устанавливают на указанный выше отсчет, действуя исправительными винтами сетки или поворачивая оптический клин вокруг его оси. Пузырек уровня в это время должен находиться на нуль-пункте. После исправления угла i'' окончательно определяют его значение тремя приемами.

4. Проверка и исправление установки круглого (или установочных) уровня. Ось круглого уровня должна быть параллельна оси вращения нивелира (или оси установочных уровней должны быть перпендикулярны к оси вращения нивелира). Установив элевационный винт на нормальный отсчет и пользуясь выверенным цилиндрическим уровнем, приводят ось вращения нивелира в отвесное положение; если при этом пузырек круглого (или установочных) уровня не на нуль-пункте, то его приводят на нуль-пункт, действуя исправительными винтами круглого (или установочных) уровня.

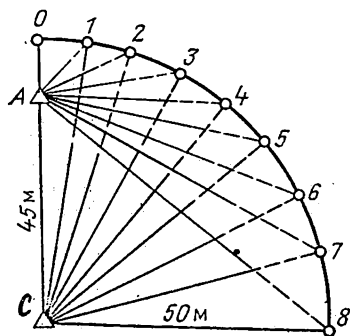
5. Исследование правильности хода фокусирующей линзы. Визирная ось трубы должна сохранять неизменное положение при перефокусировании трубы.

На ровной местности по окружности радиусом 50 м (рис. 42) закрепляют ряд точек (костылей). Эти точки нивелируют дважды: из центра C при строго равных плечах и из точки A при весьма различных длинах плеч. По разностям высот одних и тех же точек судят о влиянии хода фокусирующей линзы на положение визирной оси.

6. Исследование уровней. Исследование уровня имеет целью определить цену его деления и чувствительность (ошибку совмещения изображений концов пузырька контактного уровня), а также установить качество шлифовки внутренней поверхности ампулы.

Определение цены деления уровня может быть выполнено различными методами, в основу которых положен один и тот же принцип: измерение одного и того же вертикального угла при помощи уровня и каким-либо другим путем независимо от уровня. Если величину вертикального угла, измеренного независимо от уровня, обозначить через v'' , а величину того же угла, измеренного при помощи уровня и выраженного в делениях шкалы ампулы, — через n , то цена деления уровня

$$\tau'' = \frac{v''}{n}. \quad (\text{II.6.16})$$



При точных исследованиях уровня для измерения угла v'' и определения чувствительности уровня используют специальные приборы — экзаменаторы с ценой деления шкалы измерительного винта $\mu_a = 1''$ или микроэкзаменатор с $\mu_a = 0,1''$.

Рис. 42. Схема исследования правильности хода фокусирующей линзы

Экзаменатор представляет собой Т-образную металлическую плиту с подъемными винтами и микрометром, цена деления шкалы которого известна. На плиту устанавливают уровень (или прибор с уровнем) и измерительным винтом перемещают пузырек уровня через каждые 10 делений отсчетного устройства экзаменатора, одновременно отсчитывая по концам пузырька. Таких приемов делают несколько в прямом и обратном направлениях.

Подсчитав величину перемещения пузырька уровня в делениях ампулы и соответствующий этому перемещению наклон оси уровня в секундах по шкале измерительного винта экзаменатора, определяют по формуле (III.6.16) цену деления уровня в разных частях ампулы и ее среднее значение.

7. Определение коэффициента дальномера и асимметрии нитей. Коэффициент k дальномера вычисляют по формуле $k = (D - C) : l$, где D — измеренное рулеткой расстояние ~50 м от точки установки нивелира до рейки; $l = v - n$ — разность отсчетов по верхней и нижней дальномерным нитям и C — постоянная дальномера.

Асимметрию a нитей находят по формуле $a = (c - v) - (n - c)$, где c — отсчет по средней нити.

8. Исследование работы механизма, наклоняющего плоскопараллельную пластинку, и определение цены деления шкалы оптического микрометра. Это исследование выполняют в лабораторных условиях при получении нового нивелира с завода, после ремонта нивелира, а также периодически раз в год. В результате исследования определяют: а) среднее значение цены деления шкалы оптического микрометра для расстояний и температур, при которых будет выполняться нивелирование; б) степень зависимости цены деления от расстояния до рейки и от изменения температуры воздуха; в) значения цены деления шкалы микрометра при разных углах наклона плоскопараллельной пластинки и г) качество работы механизма, наклоняющего плоскопараллельную пластинку.

Для исследования используют шкалу тонких штрихов, расстояние между осями которых равно 0,5—0,7 мм. Шкалу компарируют на микроскопе с точностью, характеризующей средней квадратической ошибкой 5 мкм. Полное исследование состоит из шести приемов. Прием включает наблюдение 5—9 штрихов шкалы в прямом и обратном ходах.

У хороших нивелиров ни одно из средних значений цены деления барабана не отличается от номинального значения 0,0500 мм более чем на 0,0025 мм.

III.6.8. Проверки и исследования нивелиров с компенсаторами

Программа проверок и исследований нивелиров с компенсаторами включает:

а) исследование работы компенсатора (определение диапазона действия компенсатора; точности самоустановки линии визирования; систематической ошибки компенсации; коэффициента механического умножителя; качества демпфирования);

б) проверка горизонтальности линии визирования (проверка главного условия).

Диапазон действия компенсатора — это угол наклона нивелира, в пределах которого нормально функционирует маятник компенсатора. Его определяют при помощи рейки или коллиматора как для продольных $\pm \alpha_k$, так и для боковых $\pm \beta_k$ наклонов нивелира. Перед

началом этих исследований следует поверить и отъюстировать круглый (или установочный) уровень.

При помощи экзаменатора* производят продольный или боковой наклон нивелира в обе стороны от нуля-пункта круглого (установочного) уровня до момента зависания маятника компенсатора. Зависание маятника фиксируют в момент резких изменений отсчета по рейке или по коллиматору (сетка нитей нивелира начинает перемещаться вместе с наклоном нивелира). Величину угла α_k или β_k наклона нивелира определяют по показаниям шкалы винта экзаменатора.

Определение точности самоустановки линии визирования. Под точностью самоустановки линии визирования понимается ошибка $\Delta_{сам} = P - \Pi$, с которой маятник компенсатора, выведенный из состояния покоя Π , вновь примет положение равновесия P . Среднюю квадратическую ошибку $m_{сам}$ самоустановки линии визирования определяют в лаборатории на экзаменаторе и в полевых условиях как при продольных, так и при боковых наклонах нивелира в обе стороны от нуля-пункта круглого уровня.

Нивелир, труба которого отфокусирована на бесконечность, ставят на экзаменатор, а рядом с экзаменатором — коллиматор типа АК-0,25, АК-0,5 или высокоточный теодолит, используемые в качестве измерительных устройств. При помощи измерительного винта экзаменатора нивелиру задается дискретный наклон на 0, 2, 4'... β_k (α_k) сначала в поперечном, затем в продольном направлениях (и в обе стороны от нуля-пункта). При каждом наклонном положении в биссектор коллиматора трижды вводят среднюю нить сетки нивелира и производят отсчеты b_1 , b_2 и b_3 по микрометру коллиматора, из которых вычисляют среднее $b_{пр} = (b_1 + b_2 + b_3)/3$. Измерения производят при вращении винта экзаменатора на ввинчивание (прямой ход) и вывинчивание (обратный ход) в пределах $\pm\beta_k$ ($\pm\alpha_k$) работы компенсатора. Это составляет один прием. Таких приемов делают два при наклонах нивелира в поперечном и продольном направлениях.

Среднюю квадратическую ошибку $m_{сам}$ самоустановки линии визирования нивелира вычисляют по известной формуле, используя разности $d = b_{обр} - b_{пр}$ двойных измерений по микрометру коллиматора, полученных в прямом $b_{пр}$ и обратном $b_{обр}$ ходах для одной и той же установки винта экзаменатора.

Систематическую (постоянную) ошибку $\sigma_{сам}$ самоустановки линии визирования, приходящуюся на 1' наклона нивелира, вычисляют по формуле $\sigma_{сам} = (b_1 - b_n)/\sqrt{j}$, где b_1 и b_n — средние отсчеты по коллиматору при максимальных наклонах оси вращения нивелира; $\sqrt{j}$ — суммарный наклон оси вращения нивелира в мин.

В полевых условиях ошибку $\sigma_{сам}$ определяют по превышениям, полученным на станции при длине визирного луча 5, 25, 50 м для высокоточных нивелиров, 75 м для точных и технических нивелиров, и при различных углах продольного и поперечного наклона прибора. Для чего нивелир устанавливают между рейками на равных расстояниях от них; рейки закрепляют отвесно.

Превышения определяют по отсчетам двух шкал реек при положении пузырька круглого уровня, показанных на рис. 43. Углы $\pm\alpha$ и $\pm\beta$, равные продольному и поперечному диапазону действия

* Вместо экзаменатора можно использовать подъемные винты нивелира, определив предварительно на экзаменаторе цену оборота подъемного винта в угловой мере.

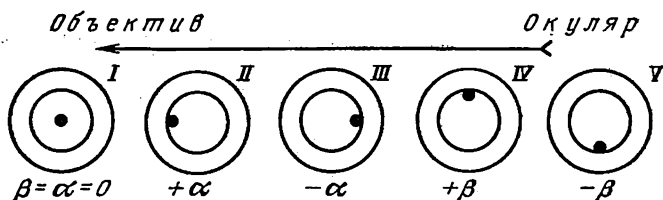


Рис. 43. Положение пузырька круглого уровня при определении точности самоустановки линии визирования

компенсатора, устанавливают при помощи подъемного винта, цена оборота которого определена в угловой мере на экзаменаторе. Для каждой длины визирного луча должно быть выполнено не менее 5 приемов. По вычисленным средним превышениям h_α , $h_{\alpha/2}$ и т. д. определяют ошибку $\sigma_{сам}$, отнесенную к одной минуте наклона, по формуле

$$\sigma_{сам} = \frac{h_\alpha - h_0}{2D\alpha'} \rho''$$
, где h_0 — эталонное превышение (или полученное при положении пузырька уровня в нуль-пункте); D — длина визирного луча; α' — наклон трубы в мин.

Полученная величина для всех расстояний не должна превышать $\pm 0,10''$ у высокоточных, $\pm 0,30''$ у точных и $\pm 0,50''$ у технических нивелиров. В противном случае устранить причины большой перекомпенсации или недокомпенсации можно только в мастерских. Способы юстировки компенсатора различны и зависят от типа компенсатора и его конструкции.

Проверка горизонтальности линии визирования. У нивелиров, установленных в рабочее положение, визирная линия должна располагаться в вертикальной плоскости, проходящей через оптическую ось объектива зрительной трубы, и быть горизонтальной.

Эта проверка, как и проверка главного условия уровенного нивелира, состоит из двух аналогичных частей. Первая часть проверки производится при определении систематической ошибки $\sigma_{сам}$ самоустановки линии визирования, при боковых наклонах нивелира, а юстировка — на заводе-изготовителе или в ремонтных мастерских. Вторая часть проверки выполняется двойным нивелированием так же, как и проверка второй части главного условия уровенных нивелиров. Если разность $h_1 - h_2 \leq 3$ мм, то условие считается выполненным. В противном случае юстировку чаще всего выполняют путем поворота оптического клина, установленного перед объективом зрительной трубы, или перемещением сетки нитей при помощи исправительных винтов.

III.6.9. Исследование и компарирование нивелирных реек

1. Исследование степени покоробления рейки. Ось шкалы рейки должна быть прямой. Для этого у каждой рейки миллиметровой линейкой измеряют стрелки прогиба по каждой из двух взаимно перпендикулярных плоскостей (или граней) корпуса рейки относительно натянутой струны. При этом стрелки прогиба у реек, применяемых без подпятников (см. рис. 39), не должны превышать: 1 мм — у реек, предназначенных для нивелирования I класса; 2 мм —

для нивелирования II класса; 4 мм — для нивелирования III класса и 7 мм — для нивелирования IV класса.

2. Исследование правильности крепления кронштейнов, предназначенных для подвески и центрирования отвеса. У реек, предназначенных для нивелирования I—IV классов, точка *B* крепления нити отвеса и точка *C* центрирования последнего должны лежать на прямой, параллельной осям шкал рейки.

Исследование параллельности линии, соединяющей точки *B* и *C*, осям шкал рейки производится с помощью выверенного теодолита при двух отвесных положениях рейки; при первом положении рейка должна быть повернута лицевой, а при втором — боковой гранями к теодолиту.

3. Проверка и исправление установки круглого уровня на рейке. Ось круглого уровня на рейке должна быть параллельна осям шкал рейки. Эту проверку выполняют при помощи отвеса: точно совмещив острие отвеса с острием центра *C*, перегоняют пузырек на нуль-пункт, действуя исправительными винтами уровня.

4. Исследование перпендикулярности пятки к осям шкал рейки и определение разностей высот идентичных точек пяток пары реек*. Исследование перпендикулярности пятки и определение разности высот выполняют одновременно, для чего в полу (или в стене) закрытого помещения укрепляют штырь с полусферической головкой. В 5—7 м от штыря устанавливают нивелир. На штырь устанавливают по отвесу рейку сначала в средней, а затем в шести точках по контуру пятки, делая каждый раз отсчеты по обоим шкалам инварной рейки. Не изменяя положения нивелира, устанавливают на штырь вторую рейку рабочей пары, и исследование продолжают в указанном выше порядке. Таких приемов выполняют не меньше трех. По полученным данным вычисляют среднее значение перекоса каждой пятки и разности высот идентичных точек пары реек.

5. Определение разности высот нулей черной и красной шкал шапечных реек. На расстоянии до 10 м от нивелира на прочно забитый в землю костыль устанавливают рейку по выверенному уровню и отсчитывают сначала по черной, а затем по красной шкалам. Вычитая из второго отсчета первый, получают разности высот нулей черной и красной шкал реек. Таких определений делают не менее трех, причем перед каждым определением изменяют горизонт инструмента. За окончательный результат берут среднее из всех определений.

6. Точное определение длины метровых интервалов шкал и вычисление средней длины рабочего метра пары штриховых инварных реек. Определение производится на компараторе до начала полевых работ. Рейки для компарирования укладывают горизонтально на две опоры под делениями 10 и 50. При этом определяют длины метровых интервалов между осями штрихов 10—30, 30—50 полудециметров основной и 70—90, 90—110 полудециметров дополнительной шкал обеих реек. По данным этих определений вычисляют среднюю длину рабочего метра реек и поправочный коэффициент, на который умножают среднее значение измеренного превышения.

Средняя квадратическая ошибка измеренного метрового интервала инварной рейки на компараторе равна 10 мкм.

7. Контрольное определение длины метровых интервалов шкал пары штриховых реек. Оно выполняется в полевых условиях при

* Для реек, применяемых с подпятниками (см. рис. 39), позволяющими устанавливать пятки на костыль, башмак или репер точкой, лежащей на оси шкалы рейки, это исследование сводится к определению разности высот нулей шкал пары реек.

помощи контрольной (женевской) линейки один раз в месяц для нивелирования I и II классов. Рейку укладывают горизонтально, на ней размещают линейку так, чтобы ее скошенный 0,2-миллиметровый край лежал примерно на оси исследуемой шкалы. Каждый интервал (10—30, 30—50, 70—90, 90—110) на обеих шкалах рейки измеряют в прямом и обратном ходах по два раза в каждом ходе. Отсчеты производят по обоим краям штрихов шкал реек.

8. Определение средней длины рабочего метра шкал пары шапечных реек. Рейки исследуют при помощи контрольной линейки. Определение производится по частям между делениями 1—10, 10—20, 20—29 дм черной и 48—57, 57—67, 67—76 дм красной шкал реек. По результатам исследований вычисляют среднюю длину рабочего метра пары реек и средний поправочный коэффициент для этого метра.

III.6.10. Нивелирование I класса

Схема построения. Нивелирная сеть I класса состоит из ходов, образующих замкнутые полигоны периметром 2800 км. Ходы такой сети прокладывают преимущественно по шоссе, железным и грунтовым дорогам, а при их отсутствии, особенно в труднодоступных районах страны — по берегам рек, тропам и зимникам. Они должны быть непосредственно связаны с основными морскими и речными водомерными установками.

Нивелирные ходы I класса прокладывают как в прямом, так и в обратном направлениях одновременно по двум парам костылей, образующих две отдельные линии нивелирования: правую, соответствующую ходу по правым костылям, и левую, соответствующую ходу по левым костылям. Наблюдения на станциях прямого и обратного ходов выполняют по программам, данным в графах 22—26 (табл. 13).

Прямой и обратный ходы прокладывают: а) участками, состоящими из нескольких смежных секций общей длиной 25—30 км; б) по одной и той же трассе; в) как правило, в разные половины дня и г) по возможности с четным числом станций в каждой секции. Наблюдения выполняют только при вполне благоприятных условиях видимости и при достаточно отчетливых и спокойных изображениях штрихов реек.

Приборы. При нивелировании I класса применяют высокоточные нивелиры и штриховые с инварной полосой рейки. Нивелиры должны быть снабжены оптическим микрометром с ценой деления 0,05 мм и контактным уровнем. Из современных высокоточных нивелиров наиболее пригодны нивелиры типа Н-05, Ni004.

Методика нивелирования. Нивелирование I класса выполняют способом совмещений с наивысшей точностью, характеризующейся средней квадратической случайной ошибкой $\eta_{км}$ уравненного превышения $[h_{ср}]_{км}$ в ходе длиной 1 км не более 0,5 мм, а превышения $(h_{ср})_{ст}$ на станции — 0,15 мм и с возможно полным исключением систематических ошибок.

Длина визирного луча не должна быть более 50 м, а на участках с большим уклоном она может быть меньше. Неравенство расстояний от нивелира до реек не должно превышать на станциях 0,5 м, а накопление в секции — не более 1 м. Высота визирного луча над почвой не должна быть меньше 0,8 м. При длине визирного луча 25 м и меньше разрешается выполнять наблюдения при высоте визирного луча не менее 0,5 м.

Контроль и допуски. На каждой станции по наблюдениям основных и дополнительных шкал реек вычисляют: а) превышения

Класс нивелирования	Периметр полигона, км	Реперы		Направление нивелирных ходов	Число линий в нивелирном ходе одного направления	Нивелиры			Среднее число станций на 1 км хода	Рейки		Визирный	
		расстояние между реперами в нивелирных ходах, км	длина участка хода между фундаментальными реперами, км			увеличение трубы, крат	цена деления цилиндрического уровня на 2 мм, не более	допустимые величины угла i''		допустимая ошибка метрового интервала и всей шкалы, мм	цена деления круглого уровня на 2 мм	нормальная длина	высота над поверхностью земли
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
I	2800	5—7	50—60	Прямо Обратно	2	44	12"	10"	До 15 Свыше 15	0,10 0,05	10	50	0,8 0,5
II	600	5—7	50—60	Обратно	1	40 44	12	10	До 15 Свыше 15	0,20 0,10	10	65	0,5 0,3
III	150 60*				1	30 35	15	10	—	0,5	12	75 100	0,3
IV	—	—	—	Прямо	1	25 30	25	10	—	1,0	12	100 150	0,2

Примечания: 1. 60* — периметр полигона нивелирования III класса для обратные весам превышений в нивелирном ходе (секции, участке) и в замкнутом Π_0 , $З_d$ и Π_d — взгляды соответственно на основную и дополнительную шкалы и красную шкалы задней и передней реек. 5. h_0 и h_d — превышения, полученные по

$$= \frac{1}{2} (h_0 + h_d)_л; h_{пр} = \frac{1}{2} (h_{п} + h_{л})_{пр}; h_{обр} = \frac{1}{2} (h_{п} + h_{л})_{обр}; h_{ср} = \frac{1}{2} (h_{пр} - \text{вую шкалы реек}; h_{пр} = \frac{1}{2} (h_{ч} + h_{к})_{пр}; h_{обр} = \frac{1}{2} (h_{ч} + h_{к})_{обр}; h_{ср} = \frac{1}{2} (h_{пр} -$$

h_0 по наблюдениям основных и h_d дополнительных шкал реек правой и левой линий; разности $d = h_d - h_0$ не должны превышать 0,5 мм; б) превышения заднего правого костыля над задним левым костылем и переднего правого костыля над передним левым костылем; расхождение между превышениями задней пары костылей дан-

ТАБЛИЦА 13

луч, м		Допустимые невязки сумм превышений, мм				Программа (последовательность) наблюдений на станции					
неравенство расстояний		на станции		в секциях и на участке		в полигонах	номер станции	прямой ход		обратный ход	
на станции	накопление в секции	доп $d \leq h_{\text{д}} - h_0$	доп $d \leq h_{\text{к}} - h_{\text{ч}}$	доп $f \leq \begin{cases} [h_{\text{д}}]_{\text{пр}} - [h_{\text{д}}]_{\text{обр}} \\ [h_{\text{д}}]_{\text{обр}} - [h_{\text{д}}]_{\text{пр}} \\ [h_{\text{пр}}]_{\text{д}} + [h_{\text{обр}}]_{\text{д}} \\ [h_{\text{пр}}]_{\text{п}} + [h_{\text{обр}}]_{\text{п}} \end{cases}$	доп $f' \leq \begin{cases} [h_{\text{ср}}]_{\text{пр}} + [h_{\text{ср}}]_{\text{обр}} \\ [h_{\text{ср}}]_{\text{п}} + [h_{\text{ср}}]_{\text{д}} \end{cases}$	доп $W_{\text{п}} \leq [h_{\text{ср}}]_{\text{п}} \cdot k$		правая линия нивелирования	левая линия нивелирования	правая линия нивелирования	левая линия нивелирования
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
0,5	1	0,5	—	$3\sqrt{L}$ $4\sqrt{L}$	$2,1\sqrt{L}$ $2,8\sqrt{L}$	$1,5\sqrt{П}$ $2\sqrt{П}$	Нечетный Четный	$З_0 П_0$ $П_0 З_0$	$П_{\text{д}} З_{\text{д}}$ $З_{\text{д}} П_{\text{д}}$	$П_0 З_0$ $З_0 П_0$	$З_{\text{д}} П_{\text{д}}$ $П_{\text{д}} З_{\text{д}}$
1	2	0,7	—	$5\sqrt{L}$ $6\sqrt{L}$	— —	$3,5\sqrt{П}$ $4\sqrt{П}$	Нечетный Четный	$З_0 П_0$ $П_0 З_0$	$П_{\text{д}} З_{\text{д}}$ $З_{\text{д}} П_{\text{д}}$	$П_0 З_0$ $З_0 П_0$	$З_{\text{д}} П_{\text{д}}$ $П_{\text{д}} З_{\text{д}}$
2	5	1,5	3	$10\sqrt{L}$	—	$7\sqrt{П}$	Нечетный Четный	$З_0 П_0$ $З_{\text{ч}} П_{\text{ч}}$		$П_{\text{д}} З_{\text{д}}$ $П_{\text{к}} З_{\text{к}}$	
5	10	—	5	$20\sqrt{L}$	—	$20\sqrt{П}$	—	$З_{\text{ч}} П_{\text{ч}}$		$П_{\text{к}} З_{\text{к}}$	

обеспечения топографических съемок 1 : 5000 и крупнее. 2. L и $П$ — величины, полигона соответственно, равные числу километров в ходе или полигоне. 3. $З_0$ и $З_д$ — задний и передний река. 4. $З_ч$ и $П_ч$, $З_к$ и $П_к$ — взгляды соответственно на черную взглядам на основную и дополнительную шкалы рек; $П_д = \frac{1}{2} (h_0 + h_д)$; $h_д =$

$h_{обр}sr$. 6. $h_ч$ и $h_к$ — превышения, полученные по взглядам на черную и крас-

$h_{обр}sr$.

ной станции и превышением передней пары костылей предыдущей станции не должно превышать 0,7 мм.

Для правой и левой линий прямого и обратного ходов по каждой секции (между смежными реперами в ходе) и участку (между фундаментальными реперами в ходе) вычисляют попарно суммы

превышений $[h_n]_{пр}$ по правой и $[h_n]_{обр}$ по левой линиям прямого $[h_n]_{обр}$ и $[h_n]_{обр}$ обратного ходов, а также средние $[h_{ср}]_{пр} = ([h_n] + [h_d])_{пр}/2$ и $[h_{ср}]_{обр} = ([h_n] + [h_d])_{обр}/2$ из превышений по правой и левой линиям прямого и обратного ходов. Расхождения $f_{пр.х}$ и $f_{обр.х}$ между превышениями данной пары не должны превышать соответствующих допусков, приведенных в графах 19 и 20 (см. табл. 13), с учетом числа станций на 1 км хода (графа 10).

Невязка $W_{ПІ} = [h_{ср}]_{ПІ}$ сумм $[h_{ср}]_{ПІ} = ([h_{ср}]_{пр} - [h_{ср}]_{обр})_{ПІ}/2$ превышений; в замкнутых полигонах (с учетом поправки за переход к нормальным высотам), образованных из ходов I класса, не должна превышать допусков, данных в графе 21 (см. табл. 13), с учетом числа станций на 1 км хода (графа 10).

III.6.11. Нивелирование II класса

Схема построения. Нивелирная сеть II класса составлена из ходов, опирающихся на реперы нивелирования I класса и образующих полигоны с периметром $П_{II}$, равным 600 км. В районах, не обеспеченных ходами нивелирования I класса, нивелирная сеть II класса развивается в виде самостоятельных замкнутых полигонов с таким же периметром. Ходы такой сети прокладывают преимущественно по улучшенным путям сообщений, а при их отсутствии, особенно в труднодоступных районах страны — вдоль берегов морей и больших рек, по тропам и зимникам. Они должны быть связаны с морскими и речными водомерными установками.

Нивелирные ходы II класса прокладывают по одной паре костылей в прямом и обратном направлениях. Наблюдения на станциях прямого и обратного ходов выполняют по программам, данным в графах 22—26 (см. табл. 13).

Прямой и обратный ходы прокладывают смежными секциями, как и в нивелировании I класса.

Приборы. При нивелировании II класса применяют высокоточные нивелиры и штриховые с инварной полосой рейки. Нивелиры должны быть снабжены оптическим микрометром и контактным уровнем или заменяющим его компенсатором. Из современных высокоточных нивелиров наиболее пригодны нивелиры Н-05, Н1, Н2, НА, Ni004, а также нивелиры с компенсаторами типа НС2, Ni1, Ni002 и Ni007.

Методика нивелирования. Нивелирование II класса выполняют способом совмещений с точностью, характеризующейся средней квадратической случайной ошибкой $\eta_{км}$ уравнированного превышения $[h_{ср}]_{км}$ в ходе длиной 1 км не более 0,8 мм, а превышение $(h_{ср})_{ст}$ на станции — 0,3 мм.

Нормальная длина визирного луча принята равной 65 м, а при увеличении зрительной трубы не менее 44^х допускается увеличивать длину визирного луча до 75 м. Неравенство расстояний от нивелира до реек не должно превышать на станциях 1 м, а накопление в секции — не более 2 м. Высота визирного луча над почвой не должна быть менее 0,5 м. При длине визирного луча 30 м и короче разрешается выполнять наблюдения при высоте визирного луча не менее 0,3 м.

Контроль и допуски. На каждой станции по наблюдениям основных и дополнительных шкал вычисляют превышения h_0 и h_d ; разность $d = h_d - h_0$ не должна превышать 0,7 мм.

Для прямого и обратного ходов по каждой секции (между смежными реперами в ходе) и по участку (между фундаментальными реперами в ходе) вычисляют суммы превышений $[h]_{пр}$ пря-

мого и $[h]_{обр}$ обратного ходов. Расхождения f_x этих сумм не должны превышать допусков, данных в графе 19 (см. табл. 13), с учетом числа станций на 1 км хода (гр. 10).

Невязки $W_{III} = [h_{ср}]_{III}$ сумм $[h_{ср}]_{III} = ([h]_{пр} - [h]_{обр})_{III}/2$ превышений в замкнутых полигонах (с учетом поправок за переход к нормальным высотам), образованных из ходов II класса, не должны превышать допусков, приведенных в графе 21 (см. табл. 13), с учетом числа станций на 1 км хода (гр. 10).

III.6.12. Нивелирование III класса

Схема построения. Нивелирные сети III класса прокладывают внутри полигонов нивелирования I и II классов как отдельными линиями, так и в виде системы ходов с таким расчетом, чтобы разделить каждый полигон нивелирования II класса на 6—9 полигонов периметром менее 150 км. Для обеспечения топографических съемок масштаба 1:5000 и крупнее линии нивелирования III класса прокладывают с расчетом создания полигонов периметром около 60 км.

Нивелирные ходы III класса прокладывают по одной паре костылей в прямом и обратном направлениях и по возможности с четным числом станций в каждой секции.

Метод нивелирования зависит от применяемых нивелиров и реек. В случае применения нивелиров с оптическим микрометром и штриховых реек используют метод совмещений. Во всех остальных случаях отсчеты по рейкам выполняют по средней нити. Наблюдения на станциях прямого и обратного ходов выполняют по программам, данным в графах 22—26 (см. табл. 13). Наблюдения выполняют при благоприятных условиях видимости и при достаточно четливых и спокойных изображениях шкал реек.

Приборы. При нивелировании III класса применяют точные уровенные нивелиры Н-3, Н-3Л и другие равноценные им, а также нивелиры с компенсаторами: Н-3К, НЗКЛ, Ni007, Ni-B3.

Рейки применяют трехметровые шашечные двусторонние с сантиметровыми делениями и штриховые односторонние, имеющие шкалы с делениями через 0,5 см. Штриховые рейки могут быть деревянными и с инварной полосой.

Методика нивелирования. Нивелирование III класса выполняют с точностью, характеризующейся средней квадратической случайной ошибкой $\eta_{км}$ уравнированного превышения $[h_{ср}]_{1км}$ в ходе длиной 1 км не более 1,6 мм, а превышения $(h_{ср})_{ст}$ на станции — 0,65 мм.

Нормальная длина визирного луча равна 75 м, а при увеличении зрительной трубы не менее 35 $\times$ допускается увеличение длины визирного луча до 100 м. Неравенство расстояний от нивелира до реек не должно превышать на станциях 2 м, а накопление в секции — 5 м. Высота визирного луча над почвой не должна быть менее 0,3 м.

Контроль и допуски. На каждой станции по наблюдениям основных и дополнительных шкал (или по черным и красным шкалам) реек вычисляют превышения h_o и h_d (или h_q и h_k); разность $d = h_d - h_o$ (или $d = h_k - h_q$) не должна превышать 2 мм.

Для прямого и обратного ходов каждой секции вычисляют суммы превышений $[h]_{пр}$ прямого и $[h]_{обр}$ обратного ходов. Расхождения этих сумм не должны превышать допуска, данного в графе 19 (см. табл. 13).

Невязки $W_{III} = [h_{ср}]_{III}$ сумм превышений $[h_{ср}]_{III} = ([h]_{пр} - [h]_{обр})_{III}/2$ в замкнутых полигонах (с учетом попра-

вок за переход к нормальным высотам), образованных из ходов III класса, не должны превышать допуска, данного в графе 21 (см. табл. 13).

III.6.13. Нивелирование IV класса

Схема построения. Нивелирные сети IV класса прокладывают внутри полигонов нивелирования старших классов. Каждая нивелирная линия IV класса должна опираться обоими концами на реперы нивелирования старших классов или на узловые реперы нивелирования IV класса, образуя замкнутые полигоны.

Нивелирные ходы прокладывают в одном направлении. Наблюдения на станциях выполняют по программе, данной в графах 23—26 (см. табл. 13), производя отсчеты по черной и красной шкалам реек по средней нити. Рейки устанавливают по уровню.

Приборы. При нивелировании IV класса применяют уровенные нивелиры типа Н-10Л, НТ, а также нивелиры с компенсаторами Н-10КЛ, НС4, Ni025, Ni-B3 и др. Рейки применяют шашечные двусторонние трехметровые с сантиметровыми делениями.

Методика нивелирования. Нивелирование IV класса выполняется с точностью, характеризующейся средней квадратической случайной ошибкой $\eta_{км}$ уровенного превышения $[h_{ср}]_{км}$ в ходе длиной 1 км не более 6 мм, а превышения $(h_{ср})_{ст}$ на станциях — 3 мм.

Нормальная длина визирного луча равна 100 м, а при увеличении зрительной трубы не менее 30^х допускается увеличивать ее до 150 м. Неравенство расстояний от нивелира до реек не должно превышать на станциях 5 м, а накопление их в секции — 10 м. Высота визирного луча над почвой не должна быть менее 0,2 м.

Контроль и допуски. На каждой станции по наблюдениям черной и красной шкал реек вычисляют превышения $h_{ч}$ и $h_{к}$. Разность $d = h_{к} - h_{ч}$ не должна превышать 5 мм.

Невязки f_x превышений ходов, опирающихся своими концами на реперы старших классов нивелирования, не должны превышать $20\sqrt{L}$ мм, где L — число километров в ходе или полигоне.

III.6.14. Техническое нивелирование

Схема построения. Схемы технического нивелирования строят отдельными линиями, опирающимися обоими концами на реперы старших классов государственной нивелирной сети, а также в виде замкнутых полигонов или систем с узловыми точками. В исключительных случаях на отдельных площадках, не обеспеченных реперами старшего класса, разрешается сеть технического нивелирования развивать в виде самостоятельных замкнутых полигонов.

Нивелирные ходы прокладывают в одном направлении. Программа наблюдений на станциях та же, что и для нивелирования IV класса. В случае нивелирования по односторонним рейкам наблюдения на станциях выполняют при двух горизонтах инструмента.

Приборы. Для технического нивелирования применяют те же нивелиры и рейки, что и при нивелировании IV класса.

Методика нивелирования. Техническое нивелирование выполняют с точностью, характеризуемой средней квадратической случайной ошибкой $\eta_{км}$ превышения $[h_{ср}]_{км}$ в ходе 1 км не более 15 мм, а превышения $(h_{ср})_{ст}$ на станции — 8 мм.

Нормальная длина визирного луча принята 150 м, а при увеличении зрительной трубы не менее 25^х допускается увеличивать ее до 200 м.

Контроль и допуски. На каждой станции по наблюдениям черной и красной шкал реек вычисляют превышения $h_{\text{ч}}$ и $h_{\text{к}}$ (или h_1 и h_2 при первом и втором горизонтах). Разность $d = h_{\text{к}} - h_{\text{ч}}$ не должна превышать 10 мм.

Невязки $f_{\text{х}}$ сумм превышений по ходам, опирающимся своими концами на реперы старших классов нивелирования, и невязки W пт сумм превышений $[h_{\text{ср}}] = ([h_{\text{ч}}] + [h_{\text{к}}])/2$ замкнутых полигонах должны удовлетворять требованию $W_{\text{доп}} \leq (50\sqrt{L})$ мм, где L — число километров в данном ходе или полигоне.

III.6.15. Моторизованное геометрическое нивелирование

При обычном (пешем) геометрическом нивелировании даже в благоприятных условиях равнинной местности продвиг работы зависит в основном от скорости перехода наблюдателя и реечника со станции на станцию нивелирного хода. Чтобы ускорить эти перемещения и повысить точность измерений, для перевозки нивелира, реек и членов нивелирной бригады с одной станции на другую используют автомобили. Такое нивелирование называют моторизованным. Наиболее широко оно применяется в ГДР. При техническом нивелировании нивелир со станции на станцию перевозят на автомобиле, а рейки — на мопедах, велосипедах или автомобилях, при высокоточном нивелировании применяют в одном комплексе три специально оборудованных автомобиля (или вездехода).

Автомобиль нивелирный оборудован нивелиром Ni002, штативом, подъемным устройством (штативодержатель), счетно-печатающей вычислительной машиной, счетчиком метров на станции до задней рейки и расстояний от начала нивелирного хода, сигнальными (предупредительными) знаками.

Штатив удлиненный с более массивной верхней частью специальной конструкции, позволяющей, не выходя из автомобиля, быстро по уровню установить штатив и нивелир в рабочее положение. При этом установленный на грунт (или дорожное покрытие) штатив не соприкасается с автомобилем. При помощи подъемного устройства штатив снимают с грунта, приподнимают и надежно удерживают во время переезда на следующую по ходу станцию, где вновь устанавливают его на грунт, не выходя из автомобиля.

С помощью счетной машины на ленте (вместо нивелирного журнала) записывают дату, время начала работы, название хода, температуру воздуха, объект и результаты наблюдений на станции; производят необходимые контрольные вычисления на станции с выдачей результатов на табло и выполняют последующее суммирование результатов в ходе прямого и обратного направлений.

Автомобиль реечный оборудован рейкой, нивелирной подставкой для забивки нивелирного костыля ручным копром, рейкодержателем и сигнальными (предупредительными) знаками. Рейка инварная оборудована уровнем и подпятником, препятствующим соскальзыванию пятки рейки с высотной точки.

В качестве связующей (переходной) высотной точки используется стальной стержень (в наборе), вставляемый в отверстие нивелирной подставки — трегера и забиваемый в грунт при помощи ручного копра массой 10 кг.

С помощью рейкодержателя нивелирную рейку, не выходя из автомобиля, устанавливают на высотную точку, удерживают отвесно по уровню (при необходимости рейку можно повернуть вокруг ее оси в пределах 180°), перед транспортировкой рейку снимают с

костыля, надежно закрепляют и удерживают во время переезда на следующую по ходу станцию.

Моторизованное геометрическое нивелирование на отдельной станции в ходах прямого и обратного направлений выполняют по симметричной во времени программе: $Z_1, П_1, П_2, Z_2$ (или $Z_0, П_0, П_d, Z_d$), где взгляды Z_1 и $П_1$ взяты при первом и взгляды $П_2$ и Z_2 — при втором положениях маятника (зеркала) компенсатора. Среднее превышение $h = 0,5(h_1 + h_2)$, где $h_1 = Z_1 - П_1$ и $h_2 = Z_2 - П_2$, почти полностью свободно от погрешности превышений h_1 и h_2 из-за влияния угла i'' при наличии неравенства $D_3 \neq D_n$ расстояний до задней и передней реек на станции.

После того как счетная машина выдаст на табло результаты контроля на станции и они окажутся в пределах известных допусков, автомобили нивелирный и задней рейки, подняв и закрепив соответственно штатив и рейку, переезжают на очередную по ходу станцию.

В моторизованной нивелирной бригаде четыре человека: наблюдатель, помощник наблюдателя и два реечника; последние трое являются также водителями автомобилей. В зависимости от характера продольного профиля трассы хода производительность труда увеличивается от 30 до 40 % по сравнению с производительностью труда при пешем геометрическом нивелировании прибором с компенсатором. При этом точность измерений моторизованного геометрического нивелирования также повышается.

III.6.16. Главнейшие источники ошибок измерений в геометрическом нивелировании

В геометрическом нивелировании основной является ошибка взгляда. Под ошибкой $\Delta_{взг}$ взгляда понимает совокупность элементарных ошибок, вызванных влиянием приборов (нивелир и рейки), конструкцией реперов и связующих точек, внешней среды, нестабильностью измеряемого объекта, способом обработки измерений, и личные ошибки, которые неизбежно войдут в урванное превышение,

$$h = \frac{1}{2} (h_0 + h_d). \quad (III.6.17)$$

Ошибки взгляда и превышения из-за несовершенства конструкции и недостаточно полной выверки и юстировки нивелира и его частей.

1. *Средняя квадратическая ошибка m_y взгляда из-за неточной установки пузырька уровня на нуль-пункт (или ошибка совмещения изображений концов пузырька контактного уровня): простого уровня*

$$m_y = (0,5\tau'' D \cdot 10^{-3}) \text{ мм}; \quad (III.6.18)$$

контактного уровня с лупой

$$m_{сов} = (0,15\tau'' D \cdot 10^{-3} \cdot v^x) \text{ мм}. \quad (III.6.19)$$

Здесь: τ'' — цена деления уровня на 2 мм; D — расстояние в метрах от нивелира до рейки; v^x — увеличение лупы.

2. *Средняя квадратическая ошибка $m_{сам}$ взгляда из-за неточной самоустановки линии визирования нивелира с компенсатором*

$$m_{сам} = (5m''_{сам} D \cdot 10^{-3}) \text{ мм}, \quad (III.6.20)$$

где $m''_{\text{сам}}$ — средняя квадратическая ошибка самоустановки линии визирования, определяемая из исследований (см. параграф III.6.8) и выраженная в угловой мере; D — то же, что и в формуле (III.6.18).

3. Средняя квадратическая ошибка $m_{\text{отс}}$ взгляда из-за неточной оценки на глаз долей интервала t — размер шапки рейки в миллиметрах

$$m_{\text{отс}} = \left(0,03t + 0,2 \frac{D}{v^x} \right) \text{ мм}, \quad (\text{III.6.21})$$

где D — то же, что и в формуле (III.6.18); v^x — увеличение трубы.

4. Средняя квадратическая ошибка $m_{\text{виз}}$ взгляда из-за неточного введения (визирования) изображения штриха рейки в клиновидный биссектор сетки нитей

$$m_{\text{виз}} = \left(0,044 \frac{D}{x^x} + 1,8/D \cdot v^x \right) \text{ мм}, \quad (\text{III.6.22})$$

где D — то же, что и в формуле (III.6.18); v^x — увеличение трубы.

5. Ошибка $\Delta_{i''}$ превышения, происходящая от несоблюдения главного условия нивелира,

$$\Delta_{i''} = 5i'' (D_3 - D_n) \cdot 10^{-3} \text{ мм}, \quad (\text{III.6.23})$$

где i'' — угол между визирной линией и осью уровня; D_3 и D_n — расстояния в метрах до задней и передней реек.

6. Ошибка $\Delta_{с.н}$ превышения от неточной установки сетки нитей

$$\Delta_{с.н} = 0,04 (J_3 - J_n) \frac{D}{v^x} \text{ мм}. \quad (\text{III.6.24})$$

где D — то же, что и в формуле (III.6.18); J_3 и J_n — видимые в поле зрения линейные смещения изображений штрихов относительно вертикальной нити при визировании назад и вперед; v^x — увеличение трубы.

7. Ошибка Δ_{ϕ} взгляда из-за перефокусирования трубы уровня нивелира

$$\Delta_{\phi} = (5\Delta i'' D \cdot 10^{-3}) \text{ мм}, \quad (\text{III.6.25})$$

где $\Delta i''$ — изменение угла i'' при вторичном фокусировании; D — то же, что и в формуле (III.6.18).

8. Ошибка $\Delta_{эф}$ — взгляда из-за перефокусирования трубы нивелира с компенсатором

$$\Delta_{эф} = (0,3v' f_{\phi} \cdot 10^{-3}) \text{ мм}, \quad (\text{III.6.26})$$

где v' — угол наклона оси визирования в мин; f_{ϕ} — эквивалентное фокусное расстояние объектива. В нивелирах типа Ni002, H-05K, HC2, Ni-A3 влияние этой ошибки устранено.

9. Средняя систематическая ошибка σ_6 взгляда из-за средней систематической ошибки σ цены деления шкалы оптического микрометра

$$\sigma_6 = \sigma \mu_0 N \text{ мм},$$

где μ_0 — средняя цена деления барабана в миллиметрах; N — число делений отсчетного барабана (в предельном случае $N=50$).

10. Ошибка $\Delta_{эл}$ превышения из-за внецентренного наклона зрительной трубы нивелира типа Ni004 элевационным винтом

$$\Delta_{эл} = (0,2\tau' i \cdot 10^{-3}) \text{ мм}, \quad (\text{III.6.27})$$

где τ' — цена деления круглого (установочного) уровня в мин; l_1 — расстояние в мм между осями вращения нивелира и элевационного винта. Чтобы исключить эту ошибку, необходимо нивелир приводить в рабочее положение не по круглому (установочному), а по цилиндрическому уровню, предварительно поставив элевационный винт на нормальный отсчет.

11. Ошибка $\sigma_{\text{сам}}$ превышения из-за угла ν' наклона оси вращения нивелира с компенсатором

$$\sigma_{\text{сам}} = (0,6\nu' l_2 \cdot 10^{-3}) \text{ мм}, \quad (\text{III.6.28})$$

где l_2 — удаление главной передней точки объектива от оси вращения прибора в мм.

12. Ошибка Δ_K превышения из-за недостаточной точности юстировки и непостоянства механических свойств подвески маятника компенсатора при одном и том же угле наклона прибора

$$\Delta_K = (9,7\Delta\nu'' D \cdot 10^{-3}) \text{ мм}, \quad (\text{III.6.29})$$

где $\Delta\nu'' = \nu_a - \nu_n$ — разность углов наклона трубы при визировании на заднюю ν_a и переднюю ν_n рейки; D — то же, что и в формуле (III.6.18). В хорошо отъюстированных нивелирах разность $\Delta\nu'' < 0,2''$ на $1'$ наклона прибора. Ошибки $\sigma_{\text{сам}}$ и Δ_K почти полностью исключаются, если на каждой станции наблюдения выполняют по программе ЗППЗ или на нечетных станциях — ЗППЗ, а на четных — ПЗП. (Черточки внизу обозначают, что перед этим взглядом пузырек уровня был заново установлен на нуль-пункт).

Суммарная средняя квадратическая ошибка $m_{\text{взг}}$ взгляда из-за влияния основных инструментальных ошибок первой группы при визировании трубой с увеличением $\nu^x = 40 \div 50^x$ в пределах $D \leq 50$ м может быть вычислена по эмпирической формуле

$$m'_{\text{взг}} = (0,014 + 0,0014D) \text{ мм}, \quad (\text{III.6.30})$$

где D — расстояние в м до рейки.

Ошибки взгляда и превышения, обусловленные несовершенством конструкции реек, недостаточно полной выверкой их и внецентренной установкой реек на высотные точки.

1. Ошибка m_n взгляда из-за наклона и неправильной установки рейки на высотные точки: для случая, когда рейка применяется без подпятника,

$$m_n = \left(\frac{bv^2}{2\rho^2} + \frac{av}{\rho} \right) \text{ мм}; \quad (\text{III.6.31})$$

для случая, когда рейка оборудована подпятником, у которого центр оградительного кольца лежит на оси шкалы рейки,

$$m_n = -\frac{bv^2}{2\rho^2}, \quad (\text{III.6.32})$$

где b — взгляд на рейку; a — расстояние от точки установки рейки на костыль (или репер) до точки пересечения оси шкалы рейки с пяткой; ν — средний квадратический угол наклона рейки от отвесного положения в момент отсчета по ней (или наведения).

2. Ошибка Δ_f взгляда из-за коробления рейки: для случая, когда рейка применяется без подпятника,

$$\Delta_f = (12 \cdot 10^{-4} f^2 + 18,7 \cdot 10^{-4} fa) \text{ мм}; \quad (\text{III.6.33})$$

для случая, когда рейка оборудована подпятником,

$$\Delta_f = 12f^2 \cdot 10^{-4} \text{ мм.} \quad (\text{III.6.34})$$

Здесь: f — стрелка прогиба; a — то же, что и в (III.6.31); числовые коэффициенты при f и f^2 соответствуют трехметровой рейке, у которой $l_1=0,3$ м и $l_3=1,5$ м. При этом высота визирного луча над пяткой рейки принята равной в среднем 1,4 м.

3. Ошибка $\Delta_{\text{п}}$ взгляда из-за неперпендикулярности пятки к осям шкал рейки. Перекосы пятки реек приводят к неравенству высот идентичных точек пятки данной пары реек.

4. Ошибка Δ_0 превышения из-за неравенства высот нулей шкал пары реек и несовпадения нулей шкал данной пары реек.

5. Ошибка $\Delta_{\text{ш}}$ взгляда из-за неточного нанесения штрихов (или шашек) шкал реек.

6. Ошибка $\Delta_{[h_{\text{ср}}]_{\text{р}}}$ суммы $[h_{\text{ср}}]$ средних превышений из-за неточного знания средней длины рабочего метра рейки (или пары реек)

$$\Delta_{[h_{\text{ср}}]_{\text{р}}} = \Delta_{\text{р.м}} [h_{\text{ср}}] \text{ мм,} \quad (\text{III.6.35})$$

где $\Delta_{\text{р.м}}$ — ошибка в миллиметрах средней длины рабочего метра из-за неточного компарирования; $[h_{\text{ср}}]$ — сумма превышений в метрах.

Ошибки взгляда, обусловленные влиянием среды. Систематическое влияние оседания костылей на результат нивелирования. Костыли и башмаки в подавляющем большинстве случаев оседают под воздействием собственной массы, массы рейки и неизбежного нажима на рейку. Характер и величина оседаний зависят от физико-механических свойств грунтов.

По исследованиям, выполненным в ЦНИИГАиК, перемещение башмаков имеет такой же характер, как и у костылей, но оседание башмаков во всех грунтах в 3—6 раз больше.

Вертикальные перемещения штатива. Штатив в подавляющем большинстве случаев подвергается выпиранию. Характер и величина выпирания зависят как от физико-механических свойств грунтов, так и от правильности установки штатива. Кроме того, штатив изменяет свою длину и высоту вследствие температурных воздействий окружающей среды.

Меры ослабления систематического влияния перемещений костылей и штатива на результаты нивелирования I, II и III классов: 1) трассы прямого и обратного нивелирных ходов I и II классов должны совпадать и проходить по возможности на всем протяжении по грунтам средней плотности; при этом желательно, чтобы и места закрепления костылей и установки штатива также совпадали; 2) число станций в прямом и обратном ходах должно быть четным и одинаковым; 3) программа наблюдений на станции должна быть строго симметричной во времени ($3_0 \text{ П}_0 \text{ П}_d 3_d$ или $\text{П}_0 3_0 3_d \text{ П}_d$); 4) наблюдения на смежных станциях следует начинать с разных реек, например на нечетной — с задней, на четной — с передней; 5) по ходам нивелирования I класса в зависимости от грунтов следует применять костыли соответствующего типа [3] и закреплять их не ближе 0,5 м друг от друга; 6) штатив следует ставить без перекоса, не задавливать его ножек глубоко в грунт; во время работы на станции штатив должен быть в тени под зонтом; 7) отсчеты по рейке, установленной на костыль, следует брать не ранее чем через 0,5 мин после ее установки по уровню; 8) отказаться от применения башмаков, устанавливаемых на грунт.

Влияние рефракции. Влияние рефракций на результаты геометрического нивелирования носит систематический характер. Чтобы уменьшить это влияние до величин, практически мало ощутимых в сравнении с величинами случайных ошибок, необходимо: 1) применять строго симметричную во времени программу наблюдений на станции, сократив до минимума время, затрачиваемое на наблюдения станции; 2) прокладывать прямой и обратный нивелирные ходы в разное время дня; 3) строго соблюдать требования в отношении допустимой высоты прохождения визирного луча над препятствием.

Тепловое воздействие на нивелир. От тепловых воздействий нивелир претерпевает весьма сложные деформации, приводящие в основном к изменению угла i'' . Ход и величина этого изменения зависят от характера тепловых воздействий, которые, по данным исследований ЦНИИГАиК, подразделяются на постепенные, являющиеся следствием общего изменения температуры окружающей среды, и односторонние (односторонний нагрев или охлаждение нивелира и его частей). Общее изменение температуры нивелира на 1°C приводит к изменению угла i'' в среднем на $\Delta i'' = \pm 0,5''$.

Меры ослабления систематического влияния тепловых воздействий: 1) нивелир должен быть защищен от солнца зонтом на станции и чехлом во время перехода с одной станции на другую; 2) наблюдения на смежных станциях следует начинать с разных реек, например на нечетной — с задней, а на четной — с передней; 5) прокладывать прямой и обратный нивелирные ходы в разные половины дня и «восьмерками».

Тепловое воздействие на рейки. Ошибка $\Delta h_i'$ превышения h , обусловленная различием температуры t_k реек при компарировании и средней температурой t_n во время полевых работ, вычисляется по формуле $\Delta h_i' = \alpha |h| (t_k - t_n)$, где α — коэффициент линейного расширения материала, на котором нанесены шкалы реек.

Ошибка $\Delta h_i''$ превышения, обусловленная различием температуры задней и передней реек во время нивелирования на станции, вычисляется по формуле $\Delta h_i'' = -b\alpha (t_n - t_k)$, где b — взглад на нагретую рейку относительно средней температуры t_n воздуха во время нивелирования; t_n — температура нагретой рейки; α — коэффициент линейного расширения материала, на котором нанесены шкалы рейки.

Чтобы повысить точность нивелирования в горных районах, необходимо применять инварные рейки с термодатчиками.

Совместное влияние температуры и влажности воздуха на рейки. Коэффициент теплового расширения деревянной рейки зависит также и от влажности. В среднем при 20—25 % влажности коэффициент расширения деревянной рейки равен $9 \cdot 10^{-6}$. Под влиянием температуры и влажности длина 1 м деревянной рейки изменяется в процессе работы в среднем на 0,5 мм.

Ошибки взгляда, обусловленные влиянием нестабильности измеряемого объекта. Реперы, костыли и штативы в период нивелирования подвергаются вертикальным перемещениям из-за влияния медленных гидротермических движений земной поверхности (оттаивание и оседание грунта в весенне-летний период, замерзание и поднятие — в осенне-зимний период, а также набухание грунта вследствие сильных дождей и усыхание — при сухой погоде) и других причин.

На точность результатов нивелирования оказывает влияние из-

менение уклонений отвесной линии под действием Луны и Солнца. Величина этого воздействия зависит от азимута A хода, его длины L и положения (зенитных расстояний $z_{\odot}$ и $z_{\ominus}$ и азимутов $A_{\odot}$ и $A_{\ominus}$) небесных светил. Для вычисления соответствующих поправок $v_{\odot}$ и $v_{\ominus}$ в суммы $[h_{\text{ср}}]_L$ средних превышений на участке L применяют формулы

$$v_{\odot} = 0,068L \sin 2z_{\odot} \cos (A_{\odot} - A) \text{ мм};$$

$$v_{\ominus} = 0,032L \sin 2z_{\ominus} \cos (A_{\ominus} - A) \text{ мм},$$

где L — число километров.

Основная мера для ослабления влияний гидротермических движений земной коры — это отказ от нивелирования в период интенсивного оттаивания или замерзания грунта. В остальное время года — нивелирные ходы прокладывать прямо и обратно в разные половины дня и «восьмерками».

III.6.17. Оценка точности результатов геометрического нивелирования

Средняя квадратическая случайная ошибка $\eta_{\text{км}}$ среднего превышения $[h_{\text{ср}}]_{\text{км}}$ на 1 км для нивелирного хода I класса вычисляется по формулам

$$\eta_{\text{км}}^2 = \frac{1}{4n} \left[\frac{d_5^2}{r} \right] \quad (\text{III.6.36})$$

и

$$\eta_{\text{км}}^2 = \frac{1}{4n} \left[\frac{d_6^2}{r} \right], \quad (\text{III.6.37})$$

а для нивелирного хода II и III классов

$$\eta_{\text{км}}^2 = \frac{1}{4n} \left[\frac{d^2}{r} \right]. \quad (\text{III.6.38})$$

В этих формулах n — число секций; r — число километров в секции, d_5 , d_6 и d — разности сумм превышений в секциях, вычисляемые по формулам

$$d_5 = \frac{1}{2} ([h]_{\text{пр}} - [h]_{\text{обр}})_{\text{п}} - \frac{1}{2} ([h]_{\text{пр}} - [h]_{\text{обр}})_{\text{л}}; \quad (\text{III.6.39})$$

$$d_6 = \frac{1}{2} ([h]_{\text{п}} + [h]_{\text{л}})_{\text{пр}} + \frac{1}{2} ([h]_{\text{п}} + [h]_{\text{л}})_{\text{обр}}; \quad (\text{III.6.40})$$

$$d = [h]_{\text{пр}} + [h]_{\text{обр}}. \quad (\text{III.6.41})$$

Средняя квадратическая систематическая ошибка $\sigma_{\text{км}}$ среднего превышения $[h_{\text{ср}}]_{\text{км}}$ на 1 км нивелирного хода I и II классов вычисляется по формуле

$$\sigma_{\text{км}}^2 = \frac{1}{4[L]} \left[\frac{S^2}{L} \right], \quad (\text{III.6.42})$$

где S — накопление разностей d_5 , d_6 или d , берется с графика как разность ординат концов прямой, проведенной симметрично относи-

тельно кривой накопления разностей на соответствующем участке длиной L_i км.

При наличии в сети разомкнутых и замкнутых полигонов с числом Π километров по периметру среднюю квадратическую случайную ошибку $\eta_{\text{км}}$ среднего превышения $[h_{\text{ср}}]_{\text{км}}$ на 1 км нивелирного хода вычисляют по невязкам $w_{\text{п}}$ сумм $[h_{\text{ср}}]_{\text{п}}$ превышений в полигоне с использованием формулы

$$\eta_{\text{км}}^2 = \frac{1}{N} \left[\frac{w_{\text{п}}^2}{\Pi} \right], \quad (\text{III.6.43})$$

где N — число замкнутых полигонов, включая огибающий.

Если нивелирная сеть имеет n секций с числом r км и с k узловыми точками, то средняя квадратическая ошибка $\eta_{\text{км}}$ среднего уравниваемого значения превышения на 1 км нивелирного хода вычисляют по формуле

$$\eta_{\text{км}}^2 = \frac{1}{n-k} \left[\frac{v^2}{r} \right], \quad (\text{III.6.44})$$

где v — поправка в среднее превышение между узловыми точками.

III.6.18. Уравнивание результатов измерений в нивелирных сетях

Принцип уравнивания. Результаты измерений в государственной нивелирной сети, а также в сети местного значения и в высотной съемочной сети уравнивают отдельно по классам: сначала уравнивают результаты нивелирования I класса, затем II и отдельно III классов и, наконец, уравнивают превышения в отдельных нивелирных ходах и в нивелирной сети IV класса. При этом желательно уравнивать превышения в сети низшего класса в целом в пределах полигона высшего класса, но в отдельных случаях допускается уравнивание по частям. При уравнивании превышений в сети низшего класса высоты реперов сети высших классов признаются исходными (безошибочными).

Подготовка материалов к уравниванию. На каждую нивелирную сеть, в пределах которой результаты измерений подлежат уравниванию, составляют рабочую схему. На нее выписывают: номера и отметки опорных реперов; номера узловых реперов; номера и направления (стрелками) ходов; вычисленные и исправленные поправки за переход к нормальным высотам превышения по ходам между узловыми реперами; числа r или L , обратные весам превышений $[h_{\text{ср}}]$ в ходе; номера полигонов и невязок $w_{\text{п}}$ по ним.

Способы уравнивания. Наиболее рациональные и применяющиеся в СССР способы: коррелятный, параметрический, точный способ последовательных приближений (или способ узлов), способ эквивалентной замены, способ полигонов. Каждый из перечисленных способов приводит к одинаковым результатам.

Уравнивание превышений в одиночном нивелирном ходе. Уравниваемое значение превышения $[h_{\text{ср}}]_{Ai}$ между любым опорным репером и репером i одиночного нивелирного хода (рис. 44, а) с общим числом n равнооточных превышений (или величиной r , обратной весу $P_{[h_{\text{ср}}]_{AB}}$ превышения $[h_{\text{ср}}]_{AB}$ по ходу AB) равно

$$[h_{\text{ср}}]_{Ai} = [h'_{\text{ср}}]_{Ai} - \frac{w_h}{n} k, \quad (\text{III.6.45})$$

где $[h'_{\text{ср}}]_{Ai}$ — сумма средних превышений, измеренных по ходу от A до i ; w_h — невязка суммы превышений хода, равная $w_h =$

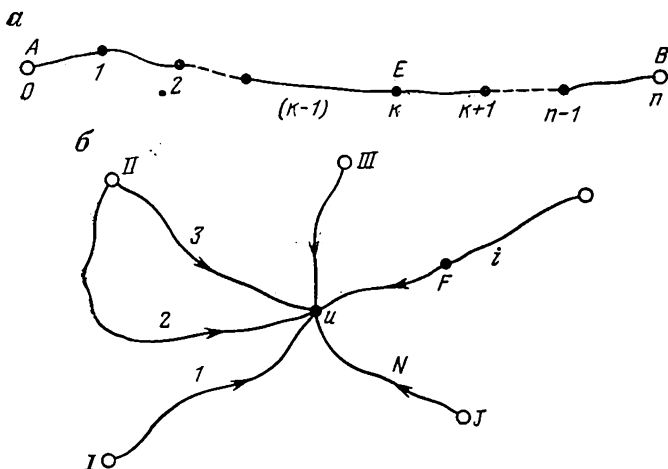


Рис. 44. Схема уравнивания превышений:

a — в одиночном нивелирном ходе *AB*; *б* — в ходах с одной узловой точкой

$= \Sigma (h_{cp})_{от} - (H_B - H_A)$ (здесь H_A и H_B — отметки опорных реперов); k — число равнооточных превышений в ходе от A до i (или величина r_{Ai}).

Вес $P_{[h_{cp}]Ai}$ уравниваемого превышения между любым опорным репером и репером i

$$P_{[h_{cp}]Ai} = \frac{n}{k(n-k)}. \quad (\text{III.6.46})$$

Вес $P_{h_{AE}}$ уравниваемого превышения между опорным репером и репером E , расположенным в середине хода,

$$P_{h_{AE}} = 4/n. \quad (\text{III.6.47})$$

Формулы (III.6.45), (III.6.46) и (III.6.47) применимы и для уравнивания превышений замкнутого полигона, представляющего собой частный случай разомкнутого хода. В замкнутом полигоне: k — число равнооточных превышений (или величина r_{Ai}) от A до i в направлении по ходу часовой стрелки; $w_h = w_n$ — невязка замкнутого полигона, равная $w_n = [h_{cp}]_n$; $n = \Pi$ — периметр полигона.

Уравнивание превышений в нивелирной сети с одной узловой точкой. Если в узловую точку u (рис. 44, б) сходятся N нивелирных ходов, проложенных от J опорных реперов, то уравниваемое значение высоты H_u точки u вычисляют по формуле общей арифметической середины

$$H_u = H_u^0 = \frac{[P_e]}{[P]}, \quad (\text{III.6.48})$$

где H_u^0 — приближенное значение искомой высоты; $P_i = 1/n_i$ (или $P_i = 1/r_i$, где r_i — величина, практически равная числу километров

в ходе с номером i и с числом n_i равноточных превышений); ε_i — остатки, вычисляемые по формуле

$$\varepsilon_i = H_u^i - H_u^0 = H_J + [h_{cp}]_i - H_u^0 \quad (\text{III.6.49})$$

(где H_J — высота опорного репера; $[h_{cp}]_i$ — сумма средних превышений по ходу с номером i от J до u ; H_u^i — высота репера u , вычисленная по ходу i).

Точка u , высота которой определяется с наименьшей надежностью относительно опорных реперов, находится в нивелирном ходе с наибольшим числом n_i (или r_i).

Средняя квадратическая ошибка μ единицы веса

$$\mu = \sqrt{\frac{[P\delta^2]}{N-1}}, \quad (\text{III.6.50})$$

где $\delta_i = H_u - H_u^i$ — остаточные отклонения.

Вес P_u уравнированного превышения $[h_{cp}]_{JF}$ между любым опорным и узловым u реперами находят по формуле

$$P_u = P_1 + P_2 + \dots + P_N = [P]. \quad (\text{III.6.51})$$

Средняя квадратическая ошибка m_u превышения $[h_{cp}]_{Ju}$

$$m_u = \mu \sqrt{\frac{1}{P_u}}. \quad (\text{III.6.52})$$

Превышения в каждом из сходящихся в точке u ходов уравнивают, как в одиночном ходе. Вес P_F уравнированного превышения $[h_{cp}]_{JF}$ между любым опорным репером и репером F , заключенным в ход i и отстоящим на k станций от опорного репера J , к которому примыкает ход i , вычисляют по формуле

$$P_F = \frac{1 + [P]' n_i}{k + [P]' (n_i - k) k}, \quad (\text{III.6.53})$$

где $[P]' = [P] - P_i$ — неполный вес превышения $[h_{cp}]_{Ju}$ (без учета превышения $[h_{cp}]_i$).

В. ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОЕ НИВЕЛИРОВАНИЕ

III.6.19. Формулы тригонометрического нивелирования

Тригонометрическое нивелирование предназначается в основном для определения высот пунктов государственной геодезической сети 1, 2, 3 и 4 классов в районах, где для указанной цели не предусмотрено геометрического нивелирования, для построения высотных геодезических съемочных сетей при топографических съемках в масштабах 1 : 25 000 и 1 : 10 000 в горных условиях.

Для определения разности $(H_2 - H_1)$ высот точек 1 и 2 земной поверхности методом тригонометрического нивелирования необходимо знать расстояние $D_{1,2}$ между этими точками и угол $v_{1,2}$ наклона визирной оси или зенитное расстояние $z_{1,2}$ наблюдаемого предмета.

В зависимости от типа теодолита и расположения подписей делений на вертикальном круге применяют те или иные формулы для вычисления v или z . Для теодолитов, в которых диаметр (0—180°)

вертикального круга установлен параллельно визирной оси и подписи делений возрастают против хода часовой стрелки, пользуются формулами

$$MO = (KЛ + КП \pm 180^\circ)/2; \quad (III.6.54)$$

$$\nu = KЛ - MO = MO - КП \pm 180^\circ = (KЛ - КП \pm 180^\circ)/2; \quad (III.6.55)$$

$$z = (KП - KЛ)/2, \quad (III.6.56)$$

где КЛ и КП — отсчеты по вертикальному кругу соответственно при круге лево и круге право; МО — место нуля вертикального круга (отсчет по вертикальному кругу, когда визирная ось трубы параллельна оси уровня алидады вертикального круга).

У теодолитов типа Т2, Т2Т и др.

$$Mz = (KЛ + КП \pm 360^\circ)/2; \quad (III.6.57)$$

$$z = KЛ - Mz = Mz - КП = (KЛ - КП \pm 360^\circ)/2; \quad (III.6.58)$$

$$\nu = (KП - KЛ \pm 180^\circ)/2, \quad (III.6.59)$$

где Мz — место зенита вертикального круга (отсчет по вертикальному кругу, когда визирная ось трубы, обращенная объективом вверх, перпендикулярна к оси уровня алидады вертикального круга).

У теодолитов типа ОТ-02М

$$Mz = KЛ + КП - 180^\circ; \quad (III.6.60)$$

$$z = KП - KЛ + 90^\circ = 2KП - Mz - 90^\circ = Mz - 2KЛ + 270^\circ. \quad (III.6.61)$$

У теодолитов Т15 и Т30

$$MO = (KЛ + КП + 180^\circ)/2; \quad (III.6.62)$$

$$\nu = (KЛ - КП - 180^\circ)/2 = KЛ - MO = MO - КП - 180^\circ. \quad (III.6.63)$$

При вычислении угла ν по формуле (III.6.63) к отсчету КЛ или КП, меньшему 90° , прибавляют 360° .

Тригонометрическое нивелирование подразделяют на: одностороннее, когда измеряют только один угол наклона (или зенитное расстояние) в точке 1 или 2; двустороннее, когда одновременно измеряют $\nu_{1,2}$ и $\nu_{2,1}$ (или $z_{1,2}$ и $z_{2,1}$) в точках 1 и 2, и нивелирование из середины.

Формулы одностороннего нивелирования. Если в точке 1 с известными геодезическими координатами B_1 , L_1 и H_1 определено и исправлено за влияние рефракции геодезическое зенитное расстояние $z_{1,2}$ на точку 2 с известными плановыми геодезическими координатами B_2 и L_2 , то для вычисления высоты H_2 рекомендуется применять точные формулы одностороннего тригонометрического нивелирования.

В общем же случае, когда зенитные расстояния не свободны от влияния вертикальной рефракции, формулу одностороннего нивелирования записывают так:

$$h_{1,2} = h'_{1,2} + (p)_{1,2} + (r)_{1,2} + (h_{1,2}), \quad (III.6.64)$$

где $h'_{1,2}$ — вычисленное превышение между пунктами 1 и 2,

$$h'_{1,2} = D_{1,2} \operatorname{ctg} z_{1,2} + l_1 - l_2; \quad (III.6.65)$$

$(p)_{1.2}$ — поправка за кривизну Земли,

$$(p)_{1.2} = \frac{D_{\text{KM}}}{2R_{\text{KM}} \sin^2 z_{1.2}} D_{1.2}; \quad (\text{III.6.66})$$

$(r)_{1.2}$ — поправка за вертикальную рефракцию,

$$(r)_{1.2} = \frac{D_{\text{KM}}}{2R_{\text{KM}} \sin^2 z_{1.2}} k_{1.2} D_{1.2}; \quad (\text{III.6.67})$$

$(h)_{1.2}$ — поправка за разность высот пунктов 1 и 2,

$$(h)_{1.2} = \frac{h_{\text{KM}}}{R_{\text{KM}}} D_{1.2} \operatorname{ctg} z_{1.2}, \quad (\text{III.6.68})$$

$D_{1.2}$ — горизонтальное проложение между точками 1 и 2, приведенное с горизонта $H_m = 1/2(H_1 + H_2)$ на поверхность относимости и на плоскость (вычисляется с округлением до 0,1 м в равнинных районах и до 0,01 м — в горных по исходной стороне сети с предварительными уравниваемыми углами или по измеренным наклонным расстояниям $S_{1.2}$ между пунктами 1 и 2 и исправленным поправками: за приведение к центрам пунктов, за наклон линии, за переход на поверхность относимости и за переход на плоскость); $z_{1.2}$ — зенитное расстояние, вычисленное на пункте 1; i_1 и i_2 — высота прибора над центром пункта 1 и высота визирной цели над пунктом 2; R_{KM} — средний радиус кривизны для точки на середине стороны 1—2 (выбирается из геодезических таблиц по средней широте B_m); $k_{1.2}$ — коэффициент земного преломления по направлению 1—2; D_{KM} — то же, что и $D_{1.2}$, но выраженное в км; h_{KM} — то же, что и $h_{1.2}$, но выраженное в км.

Формулы двустороннего нивелирования. Если в точке 1 известны геодезические B_1 , L_1 , H_1 и астрономические φ_1 и λ_1 координаты, в точке 2 — плановые геодезические координаты B_2 и L_2 , вычислены и исправлены за влияние рефракции геодезические зенитные расстояния $z_{1.2}$ и $z_{2.1}$, то для вычисления высоты H_2 и составляющей ϑ в геодезическом азимуте $A_{2.1}$ уклонения отвеса в точке 2 рекомендуется точная формула двустороннего тригонометрического нивелирования.

В общем случае, когда зенитные расстояния не свободны от влияния вертикальной рефракции, формулу одновременного двустороннего тригонометрического нивелирования записывают так:

$$h_{1.2\text{cp}} = h'_{1.2\text{cp}} + (r)_{1.2\text{cp}} + (h)_{1.2\text{cp}}, \quad (\text{III.6.69})$$

где $h'_{1.2\text{cp}}$ — вычисленное среднее превышение между пунктами 1 и 2,

$$h'_{1.2\text{cp}} = D \operatorname{tg} \frac{z_{2.1} - z_{1.2}}{2} + \frac{i_1 - i_2}{2} + \frac{l_1 - l_2}{2}; \quad (\text{III.6.70})$$

поправка за вертикальную рефракцию

$$(r)_{1.2\text{cp}} = \frac{D_{\text{KM}}}{4R \sin^2 z_{1.2}} (k_{2.1} - k_{1.2}) D; \quad (\text{III.6.71})$$

поправка за разность высот пунктов 1 и 2

$$(h)_{1.2\text{cp}} = \frac{h_{\text{KM}}}{R_{\text{KM}}} D \operatorname{tg} \frac{z_{2.1} - z_{1.2}}{2}; \quad (\text{III.6.72})$$

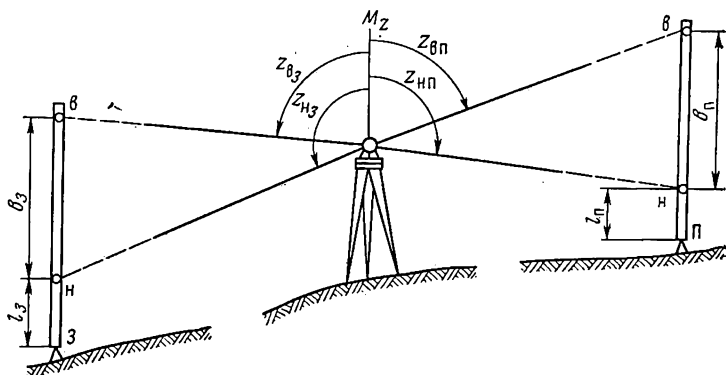


Рис. 45. Схема тригонометрического нивелирования из середины по двум парам визирных целей

$z_{2,1}$ — зенитное расстояние, вычисленное на пункте 2; i_2 и l_1 — высоты прибора и визирной цели над центрами пунктов 2 и 1; k — коэффициент земного преломления по направлению 2—1. Остальные обозначения те же, что и в формуле (III.6.64).

В тех случаях, когда членом $(h)_{1,2cp}$ формулы (III.6.69) можно пренебречь, применяют упрощенную формулу

$$h_{1,2cp} = D \operatorname{tg} \frac{z_{2,1} - z_{1,2}}{2} + \frac{i_1 - i_2}{2} + \frac{l_1 - l_2}{2} + \frac{D_{KM}}{4R_{KM}} (k_{2,1} - k_{1,2}) D. \quad (\text{III.6.73})$$

При $k_{2,1} = k_{1,2}$ (в случае одновременного измерения)

$$h_{1,2cp} = D \operatorname{tg} \frac{z_{2,1} - z_{1,2}}{2} + \frac{i_1 - i_2}{2} + \frac{l_1 - l_2}{2}. \quad (\text{III.6.74})$$

Формула тригонометрического нивелирования из середины. При выполнении тригонометрического нивелирования короткими (до 100 м) визирными лучами из середины формулу записывают так:

$$h_{3,П} = D_{П} \operatorname{ctg} z_{П} - D_3 \operatorname{ctg} z_3 + (l_3 - l_{П}), \quad (\text{III.6.75})$$

где D_3 и $D_{П}$ — расстояние от теодолита соответственно до задней 3 и передней П реек; z_3 и $z_{П}$ — то же, зенитные расстояния; l_3 и $l_{П}$ — высоты визирных целей над задней и передней точками.

Если при определении превышения $h_{3,П}$ из середины используют по две визирные цели на задней и передней рейках (рис. 45), то применяют формулу

$$h_{3,П} = \frac{b_3}{2} \frac{\sin(z_в + l_н)_3}{\sin(z_в - z_н)_3} - \frac{b_{П}}{2} \frac{\sin(z_в + z_н)_П}{\sin(z_в - z_н)_П} - \frac{1}{2} (b_3 - b_{П}) + \frac{1}{2} (l_3 - l_{П}), \quad (\text{III.6.76})$$

где b_3 и b_{Π} — расстояния между осями верхней и нижней визирных целей соответственно на задней 3 и передней Π рейках; $z_{\text{в}}$ и $z_{\text{н}}$ — зенитные расстояния верхней в и нижней н визирных целей.

При $b_3 = b_{\Pi} = b$ и $l_3 = l_{\Pi}$

$$h_{3,\Pi} = \frac{b}{2} \left[\frac{\sin(z_{\text{в}} + z_{\text{н}})_3}{\sin(z_{\text{в}} - z_{\text{н}})_3} - \frac{\sin(z_{\text{в}} + z_{\text{н}})_{\Pi}}{\sin(z_{\text{в}} - z_{\text{н}})_{\Pi}} \right]. \quad (\text{III.6.77})$$

Определение коэффициента земного преломления. Коэффициент k_{ij} может быть определен по результатам тригонометрического нивелирования двумя способами:

1) в случае одностороннего нивелирования — по вычисленному $z_{1,2}$ (или $z_{2,1}$) и отметкам H_1^0 и H_2^0 точек 1 и 2, известным с высокой точностью из геометрического нивелирования,

$$k_{1,2} = \frac{2R}{\rho'' D} \left(z_{1,2}^0 - z_{1,2} - \frac{l_2 - l_1}{D} \rho'' \right), \quad (\text{III.6.78})$$

где

$$z_{1,2}^0 = \left(90^\circ + \frac{D\rho''}{2R} \right) - \frac{H_2^0 - H_1^0}{R} \rho'' \left(1 - \frac{H_2^0 - H_1^0}{2R} \right); \quad (\text{III.6.79})$$

$$k_{2,1} = \frac{2R}{\rho'' D} \left(z_{2,1}^0 - z_{2,1} - \frac{l_1 - l_2}{D} \rho'' \right), \quad (\text{III.6.80})$$

где

$$z_{2,1}^0 = \left(90^\circ + \frac{D\rho''}{2R} \right) + \frac{H_2^0 - H_1^0}{R} \rho'' \left(1 - \frac{H_2^0 - H_1^0}{2R} \right); \quad (\text{III.6.81})$$

2) в случае двустороннего нивелирования — по одновременным измерениям, принимая $k_{1,2} = k_{2,1} = k$,

$$k = 1 - \frac{R}{\rho'' D} (z_{1,2} + z_{2,1} - 180^\circ) - \frac{R}{D^2} \left| (l_1 + l_2) - (i_1 + i_2) \right|. \quad (\text{III.6.82})$$

В формулах (III.6.78) и (III.6.82): D — расстояние между точками 1 и 2, отнесенное к поверхности эллипсоида; R — средний радиус кривизны Земли для точки в середине стороны 1—2 (выбирается из геодезических таблиц по средней широте B_m); $z_{1,2}^0$ и $z_{2,1}^0$ — теоретические значения зенитных расстояний; i_1 и i_2 — высоты геоидов над центрами пунктов 1 и 2; l_1 и l_2 — высоты визирных целей над центрами пунктов 1 и 2.

Для определения k зенитные расстояния необходимо определять с повышенной точностью, применяя для этой цели более точные геоиды по сравнению с теми, которыми выполнялось собственно тригонометрическое нивелирование.

Коэффициент рефракции может быть определен и по метеорологическим данным

$$k = k_0 - \frac{b}{D_{\text{км}}}, \quad (\text{III.6.83})$$

где

$$\left. \begin{aligned} k_0 &= 18,52 \frac{P}{T^2}; \\ b &= 534,96 \frac{P}{T^2} C, \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.6.84})$$

здесь P — давление воздуха в мм рт. ст.; T — абсолютная температура воздуха; C — аномалийная часть градиента температуры на высоте 1 м над почвой; $D_{\text{км}}$ — длина визирного луча в км.

Высоту i_A теодолита над точкой A , согласно рис. 46, можно вычислить по формуле

$$i_A = h_{AP} + b_{\text{ср}}, \quad (\text{III.6.85})$$

где $b_{\text{ср}} = (b_{\text{Л}} + b_{\text{П}}) / 2$ — среднее из отсчетов $b_{\text{Л}}$ и $b_{\text{П}}$, взятых по нивелирной рейке с помощью горизонтальной нити сетки трубы теодолита при двух положениях (Л и П) вертикального круга и соответствующих $z_{\text{Л}} = 90^\circ 00' 00''$ и $z_{\text{П}} = 270^\circ 00' 00''$; h_{AP} — превышение между точками A и P , определяемое с помощью нивелира или теодолита из середины. Такое определение i_A и обеспечивает $m_i \leq 1$ мм.

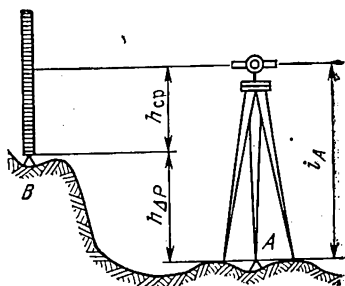


Рис. 46. Схема определения высоты прибора на станции

III.6.20. Точность тригонометрического нивелирования

При применении высокоточных оптических теодолитов и правильных методов работы влияние ошибок измерений (нерефракционных ошибок) на результаты тригонометрического нивелирования может быть уменьшено до очень малых величин, и тогда точность тригонометрического нивелирования будет зависеть, главным образом, от полноты учета и исключения влияния земной вертикальной рефракции на вычисляемый угол ν наклона визирной оси или зенитное расстояние z наблюдаемой цели.

Общая средняя квадратическая ошибка m_h вычисленного превышения:

при одностороннем нивелировании

$$m_h = \sqrt{m_D^2 \operatorname{ctg}^2 z + m_z^2 \left(\frac{D}{\rho'' \sin^2 z} \right)^2 + 2m_i^2}; \quad (\text{III.6.86})$$

при двустороннем

$$m_h = \sqrt{m_D^2 \operatorname{ctg}^2 z + m_z^2 \left(\frac{D}{\rho'' \sin^2 z \sqrt{2}} \right)^2 + 2m_i^2}; \quad (\text{III.6.87})$$

где m_D — средняя квадратическая ошибка измеренного расстояния D ; m_z — нерефракционная часть средней квадратической ошибки измеренного зенитного расстояния; $m_i = m_i$ — ошибка измеренных l и i . В случае тригонометрического нивелирования короткими (до 100 м) лучами погрешность Δz измеренного зенитного расстояния при визи-

ровании на случайно наклоненную вешку (или рейку) определяется по формуле

$$\Delta z = \frac{l\varepsilon^2}{2D\rho} \sin^2 z + \frac{l\varepsilon}{2D} \sin 2z + \frac{a\varepsilon}{D} \sin^2 z, \quad (\text{III.6.88})$$

где l — высота визирной цели над точкой, на которую установлена рейка; ε — угол случайного наклона рейки; z — зенитное расстояние визирной цели; D — расстояние до цели; a — то же, что в формуле (III.6.31).

Средняя квадратическая ошибка m_{z_0} вычисленного по формулам (III.6.79), (III.6.81) и (III.6.82) зенитного расстояния:

для случая одностороннего нивелирования

$$m_{z_0}^2 = \rho^2 \left[\frac{m_{h_{1.2}}^2}{D^2} + \left(\frac{m_D}{D} \right)^2 \operatorname{ctg}^2 z + (\Delta u')^2 \right]; \quad (\text{III.6.89})$$

для случая двустороннего нивелирования

$$m_{z_0}^2 = \rho^2 \left[\frac{m_{h_{1.2}}^2}{D^2} + \left(\frac{m_D}{D} \right)^2 \operatorname{ctg}^2 z + (\Delta u)^2 \right], \quad (\text{III.6.90})$$

где $m_{h_{1.2}}$ — средняя квадратическая ошибка превышения $h_{1.2}$ между пунктами 1 и 2, измеренного методом геометрического нивелирования; m_D/D — средняя относительная ошибка стороны 1—2; $\Delta u'$ и Δu — средние квадратические ошибки соответственно поправок за переход от измеренной разности высот к разностям нормальных высот и за уклонение отвесных линий.

Наилучшим временем для выполнения тригонометрического нивелирования являются периоды четких изображений визирных целей. Зимний период менее пригоден для производства тригонометрического нивелирования, так как влияние рефракции зимой в два с лишним раза больше, чем летом. По исследованиям ЦНИИГАиК, зенитные расстояния выгоднее всего измерять в период от 8—9 до 17 ч дня, а в условиях Средней Азии с 10 до 12 и с 14 до 18 ч.

В. БАРОМЕТРИЧЕСКОЕ НИВЕЛИРОВАНИЕ

В. Г. Селиханович

III.6.21. Барометрические формулы

Барометрическое нивелирование — способ определения разности высот двух точек земной поверхности по результатам одновременного измерения атмосферного давления в этих точках.

В международной системе единиц СИ единицей давления является Паскаль (Па).

Для измерения атмосферного давления применяют Гектопаскаль (ГПа); 1 ГПа = 0,750062 мм рт. ст.

Средняя величина давления на уровне моря принимается равной 760 мм рт. ст. = 1013,25 ГПа.

Интеграл основного уравнения статики атмосферы, устанавливающий связь между величинами атмосферного давления на двух уровнях (разностью высот и температурой столба воздуха между этими уровнями), носит название барометрической или гипсометриче-

ской формулы. Вычисление превышений можно произвести по полной и сокращенной барометрическим формулам.

Полная барометрическая формула

$$h = H_2 - H_1 = \frac{M' P_0}{\rho_0 g_{0,45}} (1 + \alpha t_m) \left(1 + 0,378 \frac{e_m}{P_m} \right) \times \\ \times (1 + \beta \cos 2\varphi_m) \left(1 + \frac{2H_m}{R} \right) \lg \frac{P_1}{P_2}, \quad (\text{III.6.91})$$

где $\frac{M' P_0}{\rho_0 g_{0,45}} = K_0$ — постоянный барический коэффициент; M' — величина, обратная модулю десятичных логарифмов; P_0 — среднее давление на уровне моря; ρ_0 — плотность воздуха при температуре $T_0 = 273$ К и давлении $P_0 = 1013,25$ ГПа; $g_{0,45}$ — ускорение силы тяжести на уровне моря и на широте $\varphi = 45^\circ$; α — температурный коэффициент объемного расширения воздуха, равный $1/273$ или $0,003665$ 1/градус; t_m , e_m , P_m — соответственно средняя температура воздуха, среднее давление водяных паров и среднее атмосферное давление, определенное в первой и второй точках (для вычисления P_m , P_1 и P_2 надо брать без введения поправок за приведение к нормальной силе тяжести); $\beta_0 = 0,0265$ — постоянный коэффициент; φ_m — средняя широта; H_m — средняя высота точек над уровнем моря; P_1 и P_2 — атмосферное давление, определяемое в точках 1 и 2. Приняв для вычисления $M' = 2,30259$, $P_0 = 1013,25$ ГПа $= 101\,325$ кг/см²; $\rho_0 = 1,293$ кг/м³; $g_{0,45} = 9,8062$ м/с², будем иметь $K_0 = 18\,400$.

Сокращенная барометрическая формула
М. В. Певцова

$$h = N (1 + \alpha t_m) \lg \frac{P_1}{P_2}, \quad (\text{III.6.92})$$

где $N = 18\,470$.

Сокращенная барометрическая формула Бабинне

$$h = K (1 + \alpha t_m) \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}, \quad (\text{III.6.93})$$

где $K = 15\,985$.

Формулу вида Бабинне можно получить из формулы М. В. Певцова:

$$h = 2MN (1 + \alpha t_m) \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}, \quad (\text{III.6.94})$$

где $2MN = 16\,043$.

Сокращенная барометрическая формула для вычисления превышений на территории СССР

$$h = K'_0 (1 + \alpha t_m) \left(1 + 0,378 \frac{e_m}{P_m} \right) \lg \frac{P_1}{P_2}, \quad (\text{III.6.95})$$

где $K'_0 = 18\,405$, учитывает влияние членов, содержащих φ_m , h_{g_m} , H_m , соответственно равных 60° , 5000 м и 500 м.

Барометрические таблицы и пользование ими. Для удобства пользования сокращенными барометрическими формулами Бабине (III.6.94) и М. В. Певцова (III.6.92) последние могут быть преобразованы в форму, для которой можно составить таблицы.

1. Таблицы барических ступеней высот.

Преобразуем формулу вида Бабине (III.6.94) в вид

$$h = \frac{2MN}{2} \cdot \frac{\left(1 + \alpha \frac{t_1 + t_2}{2}\right)}{\frac{P_1 + P_2}{2}} (P_1 - P_2), \quad (\text{III.6.96})$$

введем обозначение

$$MN \frac{\left(1 + \alpha \frac{t_1 + t_2}{2}\right)}{\frac{P_1 + P_2}{2}} = e$$

(иногда вместо e обозначают ΔH).

Тогда формула (III.6.96) примет вид

$$h = e (P_1 - P_2), \quad (\text{III.6.97})$$

где e — ступень высоты — расстояние по вертикали (в метрах), на котором атмосферное давление меняется на единицу (1 ГПа или 1 мм рт. ст.), падая вверх и возрастая вниз.

Таблицы барических ступеней высот составлены по аргументам t_m и P_m .

2. Таблицы приближенных альтитуд.

Запишем формулу Певцова (III.6.92) в виде

$$h = (H'_2 - H'_1) + (H'_2 - H'_1) \alpha t_m, \quad (\text{III.6.98})$$

где $H'_1 = N \lg \frac{P_0}{P_1}$; $H'_2 = N \lg \frac{P_0}{P_2}$; P_0 — условная величина давлени

ния на уровне моря. Величины H'_1 и H'_2 — приближенные высоты — высоты точек наблюдения над уровнем моря, где давление принято P_0 , а температура t_0 . По аргументу P из таблиц выбирают H'_1 и H'_2 и вычисляют по формуле (III.6.98).

III.6.22. Приборы для барометрического нивелирования

Беспружинные анероиды МД-49-2 и МД-49-А. Линейные перемещения мембран анероидного блока с помощью передаточно-рычажного механизма преобразуются в угловые повороты стрелки прибора. Предел измерения давления 790÷600 мм рт. ст. при цене наименьшего деления 1 мм рт. ст. Точность измерения атмосферного давления составляет 0,15—0,2 мм рт. ст. Для работы в высокогорных районах выпускаются барометры-анероиды МД-49-А с пределом из-

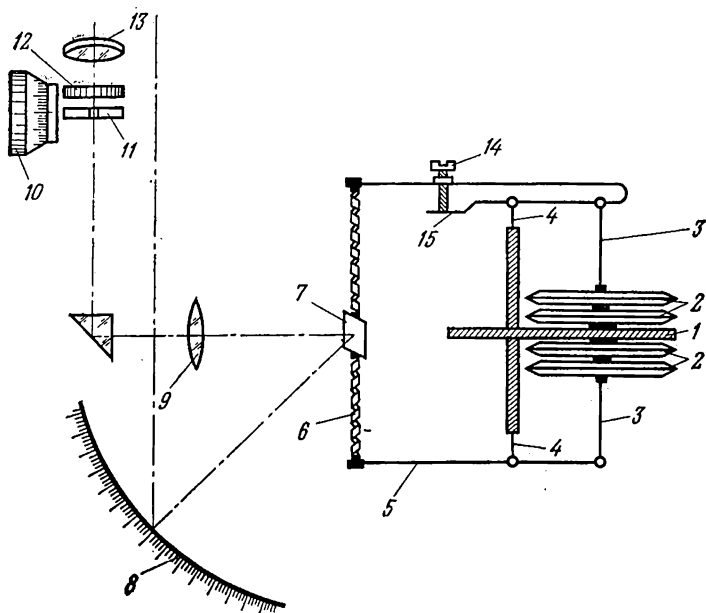


Рис. 47. Схема устройства
микробаронивелира МБНП

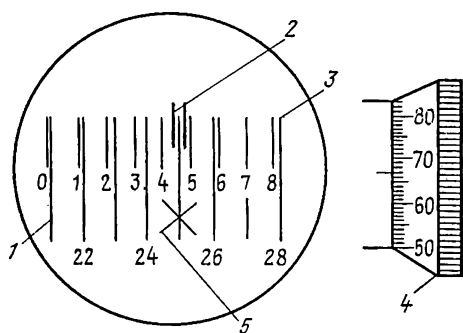


Рис. 48. Поле зрения окуляра
МБНП

Отсчет 25,467

мерения давления 820—300 мм рт.ст. Для определения атмосферного давления P в отсчеты по прибору P' вводятся следующие поправки: шкаловая $\Delta P_{\text{шк}}$, температурная ΔP_t и добавочная ΔP_0 . Давление P вычисляется по формуле

$$P = P' + \Delta P_{\text{шк}} + \Delta P_t + \Delta P_0.$$

Микробарометры. Эти приборы предназначены, как правило, для барометрического нивелирования. К ним относятся отечествен-

ные приборы: оптические микробарометры ОМБ-1 и ОМБ-3П, микробарометр МБ-63 и микробаронивелир пружинный МБНП. Институтом «Энергостройпроект» изготовлен микробаронивелир с регистрацией результатов измерений на электронно-цифровом счетчике. Проходит испытание микробаронивелир цифровой МБЦ с пьезорезонансным датчиком давления и записью результатов на магнитную ленту.

Наиболее точным, надежным и распространенным прибором в настоящее время является МБНП.

Микробаронивелир пружинный МБНП. Датчиком давления у МБНП (рис. 47) служат два двухкоробочных anerоидных блока 2, расположенных друг против друга и жестко закрепленных на общем основании 1. Центры мембран anerоидных блоков посредством упругих штоков 3 связаны с рычагами 5, концы которых жестко соединены с двойной цилиндрической ленточной пружиной 6, несущей зеркало 7. Посредством упругих пластинчатых опор с переменным центром вращения рычаги 5 соединены с мембранами anerоидных блоков, а также с промежуточными штоками 4. При изменении давления происходит изменение высоты anerоидных блоков, передающееся на двойную цилиндрическую пружину, вызывая ее растяжение или сжатие, зеркало 7 разворачивается вокруг вертикальной оси. С помощью шкалы 8 и окулярного микрометра 10 измеряют величину угла поворота зеркала. Изображение шкалы 8 проецируется в поле зрения окуляра 13 посредством объектива 9. В поле зрения окуляра наблюдаются также изображения шкалы 12 и биссектора 11.

Поле зрения окуляра МБНП представлено на рис. 48. В поле зрения видна освещенная естественным светом часть отраженной шкалы прибора 1, имеющей 150 делений, шкала окуляр-микрометра 3, имеющая 8 делений, биссектор 2 и крест нитей 5.

Отсчеты производятся относительно 3-, 4- и 5-го штрихов шкалы микрометра. Для этого головкой микрометра 4 крест нитей 5 или биссектор 2 наводят поочередно на штрихи основной шкалы, которые располагаются правее 3-, 4- и 5-го штрихов неподвижной шкалы микрометра 3. Отсчет делают в следующем порядке: записывают номер штриха подвижной шкалы прибора (25), далее — номер шкалы микрометра (4) и отсчет по головке микрометра (67). Таким же путем производят и отсчеты, расположенные правее 3- и 5-го штрихов шкалы. Полученные отсчеты приводят к штриху 4-му по формуле

$$u = A + \frac{4,00 - a}{K_6},$$

где A — номер штриха, отсчитываемый по шкале прибора; a — номер штриха, отсчитываемый по шкале окуляр-микрометра, и отсчет по шкале на головке микрометра; K_6 — коэффициент перевода делений шкалы окуляр-микрометра в деления шкалы прибора.

Коэффициент K_6 вводится потому, что расстояние между штрихами шкалы окуляр-микрометра (равное 100 делениям барабана) вследствие недостаточно точной юстировки прибора не соответствует расстоянию между штрихами основной шкалы. Величина K_6 определяется при лабораторных исследованиях. Из трех, приведенных к 4-му штриху, отсчетов берут среднее. Изменение атмосферного давления на 0,03 мбар вызывает поворот зеркала примерно на 20'. Изменение диапазона работы прибора производится поворотом винта 14 (см. рис. 47), изменяющего натяжение двойной цилиндрической пружины посредством U-образной плоской пружины 15.

Вычисление атмосферного давления по показаниям микробаро-

Техническая характеристика МБНП

Точность измерения разности (до 20 мбар) давления	0,03 мбар или 0,04 деления шкалы
Число делений шкалы	150
Цена C деления шкалы, мбар/дел.	0,70
Градиент цены деления, мбар/дел.	$2 \cdot 10^4$
Предел измерения давления для одного диапазона, мбар	105
Общий предел измерения давления, мбар	300
Предел измерения температуры прибора, °C	от -15 до +30
Масса прибора, кг	2,8

метров МБНП, МБ-63, ОМБ-1, ОМБ-3П производится по формуле

$$P_{\text{abc}} = P_0 + C u_i + \frac{\sigma}{2} (u_i^2 - n u_i) + [\Delta P_k - b C (u_i - u_k)] (t_i - t_0),$$

где P_0 — добавочная поправка (мбар или мм рт. ст.); C — значение цены деления шкалы прибора, соответствующее середине диапазона шкалы ($C = \Delta P / \Delta u$), мбар/дел.; σ — градиент цены деления, $\sigma = \Delta C / \Delta u$, мбар/дел²; u_i — отсчет по прибору в делениях шкалы; n — диапазон шкалы прибора в делениях (табл. 14); ΔP_k — температурная поправка (мбар/градус); b — коэффициент термоэластичности ($b = 0,0002 - 0,0004$); u_k — значение отсчета по шкале прибора, соответствующее среднему значению атмосферного давления при определении ΔP_k ; t_i — температура прибора в момент снятия отсчета u_i ; t_0 — среднее значение температуры прибора при определении C .

Все параметры, необходимые для вычисления абсолютного значения давления (P_0 , C , σ , ΔP_k , u_k , t_0 , b , K_6), определяются в результате эталонирования прибора в лабораторных условиях.

Основные технические данные отечественных микробарометров приведены в табл. 14.

III.6.23. Способы барометрического нивелирования

Наиболее распространенными способами производства барометрического нивелирования являются:

1. Способ ходов с опорой на одну станцию (прямолинейный ход прокладывается между двумя точками с твердыми отметками, ВБС — временная барометрическая станция размещается в любой точке хода).

2. Способ замкнутых полигонов с опорой на одну станцию в практике носит название «способ петли» (ход начинается и заканчивается на временной барометрической станции, проходя по замкнутому маршруту).

3. Способ с опорой на несколько станций (способ опорных треугольников).

Помимо названных способов, некоторое применение получили: способ передвижной станции, способ пространственных барических коэффициентов, способ натуральных барометрических ступеней, способ нивелирования с опорой на несколько барометрических станций (способ срочных отсчетов).

Наименование прибора	Число делений основной шкалы	Общее число делений отсчетного устройства	Цена деления основной шкалы, мбар
Микробаронивелир пружинный МБНИ	150	15 000	0,7
Микробарометр МБ-63-I	130	13 000	1,5
Микробарометр МБ-63-II	130	13 000	3,0
Оптический микробарометр ОМБ-1	400	4 000	0,25
Оптический микробарометр ОМБ-3П	18	1 800	3,0

Прибор ОМБ-3П заключен в сосуд Дьюара, масса каждого прибора, крошечная ошибка измерения разности давления для всех приборов составляет

Способ замкнутых полигонов применяется обычно для нивелирования площадей. Нивелирование ведется от опорной высотной точки — временной барометрической станции путем проложения одним или несколькими исполнителями замкнутых ходов, включающих определяемые точки. Замкнутые полигоны прокладывают с частичным перекрытием для контроля и так, чтобы они образовывали сплошную сеть. Назначение временной барометрической станции заключается в регистрации изменения давления и температуры окружающего воздуха.

Результаты измерения давления и температуры воздуха на станции наносят на график, по которому определяют поправки в давления, измеренные на определяемых точках.

Расчеты и опыт работ показывают, что в районах с максимальной разностью высот точек до 200 м при работе по методу замкнутых полигонов и при ожидаемой средней квадратической ошибке в превышении 0,5—0,6 м допустимое удаление средних точек хода от станции может достигать в зимнее время 2,5 км, в летнее — 3,5 км, при ожидаемой средней квадратической ошибке в превышении 1,0—1,2 м — соответственно 6 и 10 км.

На точность барометрического нивелирования оказывают влияние три группы источников ошибок: неточность барометрических формул, инструментальные и личные ошибки и ошибки за неравновесие атмосферы; обозначим их соответственно через Δ_K , $\Delta_{\text{л}}$, Δ_H .

Так как эти источники ошибок преимущественно носят случайный характер, то средняя квадратическая ошибка m_h в превышении

$$m_h^2 = m_K^2 + m_{\text{л}}^2 + m_H^2.$$

Подставив значения слагаемых с учетом, что $h = K/2(1 + \alpha t_{\text{ср}}) \times \Delta P/P_{\text{ср}}$, получим

ТАБЛИЦА 14

Точность отсчета, мбар	Средняя квадратическая ошибка измерения, мбар, $\Delta P < 10$ мбар	Диапазон без перестройки всего, мбар	Предел изме- рения темпе- ратуры, градус	Максимальная температурная поправка, градус
0,004	0,01—0,02	$\frac{100}{400}$	—15— +40	0,03
0,008	0,02—0,03	$\frac{200}{400}$	—45— +45	0,05
0,015	0,02—0,03	$\frac{400}{600}$	—45— +45	0,05
0,015	0,03—0,05	$\frac{100}{180}$	—30— +40	0,05
0,006	0,03—0,05	$\frac{60}{200}$	—30— +45	0,1

ме ОМБ-ЗП, — 4 кг, масса ОМБ-ЗП — 3 кг. Относительная средняя квадратическая ошибка измерения, мбар, $\Delta P < 10$ мбар, около $\pm 0,002$, или 0,2 % от измеряемой величины ΔP .

$$m_h^2 = \left(\frac{h}{K} K m \right)^2 + (h \alpha m_{t_{\text{ср}}})^2 + \left(\frac{h}{\Delta P} m_{\Delta P} \right)^2 + \left(\frac{h}{P_{\text{ср}}} m_{P_{\text{ср}}} \right)^2 + \left(\frac{h}{\Delta P} m_{g_s} \right)^2,$$

где g_s — ошибка в превышении за горизонтальный барический градиент.

Средняя квадратическая ошибка превышения, зависящая:

— от уклонения фактического коэффициента K от принятого при составлении таблиц, прямо пропорциональна величине самого превышения;

— от точности измерения средней температуры $t_{\text{ср}} (m_{t_{\text{ср}}})$, прямо пропорциональна величине самого превышения;

— от точности измерения разности давления $\Delta P (m_{\Delta P})$, остается постоянной при любых значениях превышения, так как отношение $h/\Delta P$ является постоянной величиной;

— от точности измерения среднего давления воздуха $P_{\text{ср}} (m_{P_{\text{ср}}})$, остается с некоторым приближением прямо пропорциональной величине превышения, так как и при значительном изменении превышения величина $P_{\text{ср}}$ изменяется мало;

— от точности определения горизонтального барического градиента $g_s (m_{g_s})$, прямо пропорциональна расстоянию между точками.

Подсчитаем m_h при работе микробарометрами для превышений, близких к 100 м. Если принять $m_K = 6$ единицам (с учетом, что в значение K введена поправка за влажность), $m_{t_{\text{ср}}} = 0,5$, $m_{\Delta P} = 0,03$ мм рт. ст., $m_{P_{\text{ср}}} = 0,5$ мм рт. ст., а m_{g_s} равным половине

среднемесячного значения градиента, т. е. $m_{gs} = 0,005$ мбар/км (0,004 мм рт. ст.), $\Delta P = 10$ мм рт. ст., $P_{ср} = 740$ мм рт. ст., $t_{ср} = +15^\circ\text{C}$; $s = 3$ км, то получим $m_h = 0,47$ м.

В настоящее время методом барометрического нивелирования определяют превышения в равнинных районах с ошибкой 0,3 м, в районах с перепадами высот 500 и 2000 м — соответственно с ошибками 0,5—1,0 м; 2—2,5 м. В горных районах следует применять специальные приемы организации работ и обработки материалов. Опыт показывает, что применение микробарографов на ВБС, непрерывно фиксирующих давление, значительно повышает точность определения превышения методом барометрического нивелирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. М., Недра, 1974.
2. Кулаков И. Н. Барометрическое нивелирование в предгорных и горных районах. М., Недра, 1968.
3. Нивелирование I и II классов (практическое руководство). М., Недра, 1982.
4. Прихода Г. А. Барометрическое нивелирование. М., Недра, 1972.
5. Черемисин М. С., Ардасенов В. Д., Кольцов В. П. Нивелиры с компенсаторами. М., Недра, 1978.

РАЗДЕЛ IV

ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

IV.1. МЕТОДЫ СГУЩЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ

IV.1.1. Полигонометрия

В. Г. Селиханович

A. РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

IV.1.1.1. Классификация полигонометрии

Геодезические сети сгущения развиваются на основе Государственной геодезической сети для производства крупномасштабных съемок и для решения инженерных задач при городском, промышленном и транспортном строительстве, гидротехнических изысканиях, геологической и геофизической разведках, в маркшейдерском деле. Геодезические сети сгущения создаются методами триангуляции и полигонометрии и подразделяются на два разряда.

В табл. 15 приведена классификация полигонометрии 1 и 2 разрядов и полигонометрии 4 класса. Полигонометрия строится в виде отдельных ходов и сетей, опирающихся на исходные пункты. Одиночный ход может быть разомкнутым или замкнутым. Замкнутый ход опирается на один исходный пункт с известными координатами и примыкает к исходным направлениям с известными дирекционными углами. Разомкнутый ход опирается концами на исходные пункты и примыкает к исходным направлениям. Если ход по форме близок к прямой линии, то он называется вытянутым, в противном случае его называют изогнутым. Следует стремиться к прокладыванию вытянутых ходов с примерно равными сторонами.

Система связанных между собой ходов образует полигонометрическую сеть. В сети имеются узловые пункты, в которых сходятся не менее трех ходов, замкнутые и разомкнутые полигоны. Отдельный ход между двумя узловыми пунктами или между исходным пунктом и узловой точкой называют звеном.

Свободная сеть полигонометрии в качестве исходных данных имеет только координаты исходного пункта и дирекционный угол исходного направления. Несвободная система опирается на не менее чем на два исходных пункта и исходные направления с них.

Принятые обозначения. n — число сторон в ходе; $n+1$ — число точек поворота в ходе, считая начальную и конечную точки хода; N — число ходов; s — средняя длина стороны; T_n , T_k — начальный и конечный исходные пункты в полигонометрии; α_n , α_k — начальный и конечный дирекционные углы; β — измеренные левые углы по ходу; L — длина замыкающей хода; θ — дирекционный угол замыкающей хода; m_β , m'_β — средняя квадратическая ошибка измеренного угла поворота (полная и собственно измерения); m_s — средняя квадратическая ошибка измеренной длины стороны; M' , m'_x , m'_y — средние квадратические ошибки положения конечной точки хода для случая предварительно не исправленных за угловую невязку углов

ТАБЛИЦА 15

Класс и разряд полигонометрии	Предельная длина хода, км			Предельный периметр полигона, км	Длина сторон хода, км			Число сторон в ходе, не более	Средняя квадратическая ошибка измерения угла (по невязкам в ходах и полигонах), не более	Угловая невязка хода или полигона (n—число углов в ходе), не более	Относительная невязка хода, не более
	отдельного	между исходной и узловой точкой	между узловыми точками		наибольшая	наименьшая	средняя расчетная				
4 класс	15	10	7	30	2,0	0,25	0,50	15	3"	$5''\sqrt{n}$	1:25 000
1 разряд	5	3	2	15	0,8	0,12	0,30	15	5	$10''\sqrt{n}$	1:10 000
2 разряд	3	2	1,5	9	0,35	0,08	0,20	15	10	$20''\sqrt{n}$	1:5 000

Примечания. 1. В отдельных случаях при привязке ходов полигонометрии к пунктам Государственной геодезической сети с использованием светодальномеров длины привязочных сторон хода могут быть увеличены до 30 %. 2. В порядке исключения в ходах полигонометрии 1 разряда длиной до 1 км и 2 разряда длиной до 0,5 км допускается абсолютная линейная невязка 10 см. 3. Число угловых и линейных невязок, близких к предельным, не должно превышать 10 %. 4. Допускается увеличение длины ходов полигонометрии 1 и 2 разрядов до 30 % при условии, что при продолжении полигонометрических ходов 1 и 2 разрядов протяженности больше указанной в табл. 15 определяют дирекционные углы сторон хода с точностью 5—7" не реже чем через 15 сторон и не реже чем через 3 км.

(общая и по осям координат); M, m_x, m_y — то же, но для углов, предварительно исправленных; m_{α_n} — средняя квадратическая ошибка исходного дирекционного угла; $m_{(x_H - x_K)}, m_{(y_H - y_K)}, m_{(n-k)}$ — средние квадратические ошибки конечного исходного пункта относительно начального (по осям координат и общая); D_{ij} — расстояния между пунктами с номерами i и j ; α — дирекционный угол стороны; ξ, η — центральные координаты; x_0, y_0 — координаты центра тяжести; f_x, f_y, f_s — невязки в приращениях координат и линейная невязка хода (вычисленные по предварительно уравненным углам); f'_x, f'_y, f'_s — то же, но по неуравненным углам; t — продольная невязка хода; u — поперечная невязка хода, вычисленная по уравненным за угловую невязку углам; u' — поперечная невязка хода, вычисленная по неуравненным углам; m_t — средняя квадратическая продольная невязка; m_u — средняя квадратическая поперечная невязка, вычисленная по предварительно исправленным углам; m'_u — то же, для случая неисправленных углов; $1/T$ — точность хода (относительная предельная ошибка или невязка); μ_0 и λ — соответственно коэффициенты случайного и систематического влияния в линейных измерениях; ω — коэффициент остаточного систематического влияния в линейных измерениях; p_β и p_s — соответственно вес измеренных угла и стороны; m_α — средняя квадратическая ошибка дирекционного угла стороны хода; φ — параллактический угол; m_φ — средняя квадратическая ошибка параллактического угла.

IV.1.1.2. Основные расчетные формулы

Угловая ошибка хода. В полигонометрическом ходе, опирающемся на исходные пункты T_H и T_K при измерении $n+1$ левых углов поворота, вследствие сопровождающих измерения ошибок, углы будут ошибочны на величины $d\beta_1, d\beta_2, \dots, d\beta_{n+1}$. При сравнении суммы измеренных углов с разностью известных дирекционных углов α_H и α_K возникает невязка в углах f_β :

$$f_\beta = \sum_1^{n+1} \beta - (\alpha_K - \alpha_H) - (n+1) 180^\circ. \quad (\text{IV.1.1})$$

Средняя квадратическая ошибка $m_{\Sigma\beta}$ суммы равноточно измеренных углов будет

$$m_{\Sigma\beta} = m_\beta \sqrt{n+1}. \quad (\text{IV.1.2})$$

При измерении углов имеют место источники ошибок как случайного, так и систематического характера. Поэтому каждая ошибка $d\beta$ складывается из случайной Δ_β и систематической σ_β частей.

Средняя квадратическая ошибка угла будет также включать в себя случайную и систематическую части:

$$m_\beta^2 = m_{\Delta\beta}^2 + m_{\sigma\beta}^2. \quad (\text{IV.1.3})$$

При наличии ошибок в исходных дирекционных углах $m_{\Sigma\beta}$ равна

$$m_{\Sigma\beta}^2 = m_\beta^2 (n+1) + m_{(\alpha_K - \alpha_H)}^2. \quad (\text{IV.1.4})$$

Предельная невязка в углах получится равной

$$\text{пред } f_{\beta} = \text{пред } d\beta \sqrt{n+1}$$

или, принимая $\text{пред } d\beta = 2m_{\beta}$,

$$\text{пред } f_{\beta} = 2m_{\beta} \sqrt{n+1}. \quad (\text{IV.1.5})$$

Линейная ошибка хода. При измерении в полигонометрическом ходе n сторон, вследствие неизбежных ошибок, стороны будут ошибочны на величины $ds_1, ds_2, \dots, ds_n$.

Для полигонометрического хода вытянутой формы можно записать

$$m_L^2 = m_{s_1}^2 + m_{s_2}^2 + \dots + m_{s_n}^2 = [m_s^2]. \quad (\text{IV.1.6})$$

Ошибка каждой линии складывается из случайной Δ_{s_i} и систематической σ_{s_i} частей:

$$ds_i = \Delta_{s_i} + \sigma_{s_i},$$

где $i=1, 2, \dots, n$. Средняя квадратическая ошибка линии равна

$$m_{s_i}^2 = m_{\Delta_{s_i}}^2 + m_{\sigma_{s_i}}^2. \quad (\text{IV.1.7})$$

Структура величин $m_{\Delta_{s_i}}$ и $m_{\sigma_{s_i}}$ зависит от метода измерения линий. При отсутствии систематической ошибки, т. е. при $\sigma_{s_i} = 0$

$$m_{s_i} = m_{\Delta_{s_i}}. \quad (\text{IV.1.8})$$

Систематическим влиянием можно пренебречь тогда, когда $m_{\sigma_{s_i}}$ не превышает $1/3 m_{\Delta_{s_i}}$. В этом случае m_{s_i} уменьшится всего на 5 %.

Продольная и поперечная ошибки хода. В полигонометрическом ходе любой формы невязки в приращениях координат f_x и f_y определяют по формулам

$$\left. \begin{aligned} f_x &= \sum_1^n \Delta x - (x_K - x_H), \\ f_y &= \sum_1^n \Delta y - (y_K - y_H). \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.1.9})$$

Абсолютная линейная невязка f_s в периметре хода будет равна

$$f_s = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}. \quad (\text{IV.1.10})$$

Средние квадратические значения невязок имеют вид

$$\left. \begin{aligned} m_{f_x}^2 &= \sum_1^n m_s^2 \cos^2 \alpha + \frac{1}{\rho^2} \sum_1^{n+1} m_\beta^2 (y_{n+1} - y)^2, \\ m_{f_y}^2 &= \sum_1^n m_s^2 \sin^2 \alpha - \frac{1}{\rho^2} \sum_1^{n+1} m_\beta^2 (x_{n+1} - x)^2. \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.1.11})$$

В вытянутом полигонометрическом ходе невязку в периметре f_s можно разложить на два компонента: компонент t вдоль хода по направлению замыкающей L и u — перпендикулярно к ней. Величина t , которую называют продольной невязкой, является следствием накопления ошибок линейных измерений, а u — поперечная невязка — следствием накопления ошибок измерения углов. Тогда

$$f_s = \sqrt{t^2 + u^2}.$$

В разделении влияния ошибок угловых и линейных измерений заключается одно из достоинств вытянутого хода.

Ошибки измерений сторон $dL = \sum_1^n ds$ составят величину продольной невязки.

$$t = dL = \sum_1^n ds.$$

Средняя квадратическая продольная невязка равна

$$m_t^2 = [m_s^2]. \quad (\text{IV.1.12})$$

Связь между поперечной невязкой u' и ошибками в углах $d\beta$ запишется так:

$$\begin{aligned} u' &= (s_1 + s_2 + \dots + s_n) \frac{d\beta_1}{\rho} + (s_2 + \dots + s_n) \frac{d\beta_2}{\rho} + \\ &+ \dots + s_n \frac{d\beta_n}{\rho}. \end{aligned}$$

Средняя квадратическая поперечная невязка при примерно равных сторонах хода будет равна

$$m_{u'}^2 = s^2 [n^2 + (n-1)^2 + \dots + 1^2] \frac{m_\beta^2}{\rho^2}$$

или

$$m_{u'}^2 = L \sqrt{\frac{(n+1)(2n+1)}{6n}} \cdot \frac{m_\beta}{\rho}, \quad (\text{IV.1.13})$$

а после небольших преобразований

$$m_{u'} = L \sqrt{\frac{n+1,5}{3}} \cdot \frac{m_\beta}{\rho}. \quad (\text{IV.1.13}')$$

При исправленных за невязку f_{β} углах величина m_u примет вид

$$m_u = L \sqrt{\frac{(n+2)(n+1)}{12}} \cdot \frac{m_{\beta}}{\rho}, \quad (\text{IV.1.14})$$

а преобразованная

$$m_u = L \sqrt{\frac{n+3}{12}} \cdot \frac{m_{\beta}}{\rho}. \quad (\text{IV.1.14}')$$

Средняя квадратическая ошибка положения конечной точки полигонометрического хода может быть определена по средним квадратическим невязкам

$$M^2 = m_t^2 + m_u^2$$

для хода вытянутой формы,

$$M^2 = m_{fx}^2 + m_{fy}^2$$

для хода любой формы.

Для вытянутых ходов с примерно равными сторонами для случая не исправленных за невязку f_{β} углов

$$M^2 = [m_s^2] + \frac{m_{\beta}^2}{\rho^2} L^2 \frac{n+1,5}{3}, \quad (\text{IV.1.15})$$

для предварительно исправленных углов

$$M^2 = [m_s^2] + \frac{m_{\beta}^2}{\rho^2} L^2 \frac{n+3}{12}. \quad (\text{IV.1.16})$$

Для хода любой формы соответственно

$$M^2 = [m_s^2] + \frac{m_{\beta}^2}{\rho^2} [D_{n+1,i}^2], \quad (\text{IV.1.17})$$

$$M^2 = [m_s^2] + \frac{m_{\beta}^2}{\rho^2} [D_{0,i}^2], \quad (\text{IV.1.18})$$

где $D_{n+1,i}$ — расстояние от последней до каждой точки; $D_{0,i}$ — расстояние от центра тяжести до каждой точки хода.

Величины $D_{n+1,i}$ и $D_{0,i}$ можно определить графическим путем по чертежу (рис. 49, а, б). Координаты центра тяжести хода находят также графическим путем или по формулам

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} x}{n+1}, \quad y_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} y}{n+1}.$$

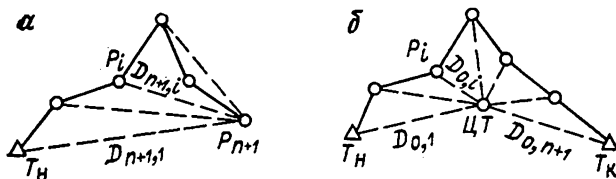


Рис. 49. Расстояния до каждой точки:
а — от последней точки; б — от центра тяжести

Если в исходных данных хода имели место заметные ошибки, то учитывается и их влияние. Тогда M' и M будут вычисляться соответственно по формулам

$$M'^2 = [m_s^2] + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} L^2 \frac{n+1,5}{3} + \frac{m_{\alpha_n}^2}{\rho^2} [s]^2 + m_{(n-k)}^2 \quad (\text{IV.1.19})$$

$$M^2 = [m_s^2] + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} L^2 \frac{n+3}{12} + \frac{m_{\alpha_n}^2}{\rho^2} \frac{[s]^2}{2} + m_{(n-k)}^2 \quad (\text{IV.1.20})$$

для вытянутого хода,

$$M'^2 = [m_s^2] + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} [D_{n+1,i}^2] + \frac{m_{\alpha_n}^2}{\rho^2} D_{n+1,1}^2 + m_{(n-k)}^2, \quad (\text{IV.1.21})$$

$$M^2 = [m_s^2] + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} [D_{0,i}^2] + \frac{m_{\alpha_n}^2}{\rho^2} (D_{0,1}^2 + D_{0,n+1}^2) + m_{(n-k)}^2 \quad (\text{IV.1.22})$$

для хода любой формы, где $D_{n+1,i}$ — расстояние от последнего определенного пункта до первого; $D_{0,1}$, $D_{0,n+1}$ — соответственно расстояния от центра тяжести до начальной и конечной точек хода.

Из формул (IV.1.15) — (IV.1.22) следует, что с увеличением числа пунктов второе слагаемое, учитывающее влияние ошибок угловых измерений, возрастает, а следовательно, уменьшается точность прокладываемого хода. Для уменьшения влияния ошибки угловых измерений на поперечную невязку необходимо или уменьшить число пунктов поворота хода, или определить дирекционный угол некоторых сторон хода например $P_i N$ (рис. 50) или $P_i P_{i+1}$. При этом в первом случае одновременно измеряют примычные углы β_{k1} и β_{k2} .

Наличие в ходе $k-1$ промежуточных дирекционных углов разбивает весь ход на k секций и формулы для M будут иметь вид

$$M^2 = [m_s^2] + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} L^2 \frac{n+3k}{12k^2} \quad (\text{IV.1.23})$$

для вытянутого хода с примерно равными сторонами и

$$M^2 = [m_s^2] + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} \{ [D_{0,i}^2]_{\text{I}} + [D_{0,i}^2]_{\text{II}} + \dots + [D_{0,i}^2]_k \} \quad (\text{IV.1.24})$$

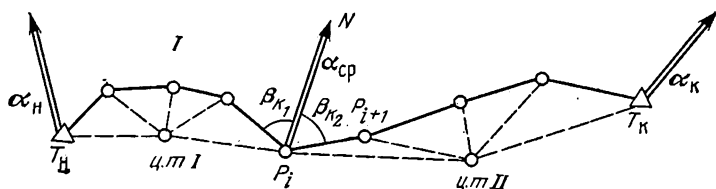


Рис. 50. Полигонометрический ход с измеренным азимутом

для хода любой формы, где $[D_{0,i}^2]_I, [D_{0,i}^2]_{II}, \dots, [D_{0,i}^2]_k$ — суммы квадратов расстояний от центра тяжести каждой секции до точек хода, входящих в секцию.

При наличии заметных ошибок в исходных данных формулы (IV.1.23), (IV.1.24) примут вид

$$M^2 = [m_s^2] + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} [s]^2 \frac{n^2 + 3nk + 2k^2}{12nk^2} + \frac{m_{\alpha_n}^2}{\rho^2} L^2 \frac{2k-1}{2k^2} + m_{(n-k)}^2, \quad (IV.1.25)$$

$$M^2 = [m_s^2] + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} \{ [D_{0,i}^2]_I + [D_{0,i}^2]_{II} + \dots + [D_{0,i}^2]_k \} + \\ + \frac{m_{\alpha_n}^2}{\rho^2} (D_{0I,1}^2 + D_{0II,1}^2 + \dots + D_{0k,n+1}^2) + m_{n-k}^2. \quad (IV.1.26)$$

Для замкнутого полигонометрического хода в виде правильного многоугольника величины M' и M соответственно будут равны

$$M'^2 = [m_s^2] + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} [D_{1,i}^2], \quad (IV.1.27)$$

$$M^2 = [m_s^2] + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} [s]^2 \frac{n}{40}. \quad (IV.1.28)$$

Из сравнения формул (IV.1.27) и (IV.1.17) следует, что величина $[D_{1,i}^2]$ будет меньше, чем $[D_{n+1,i}^2]$. Следовательно, при прочих равных условиях в замкнутом ходе надо ожидать среднюю квадратическую ошибку меньше, чем в соответствующем по периметру, числу углов поворота и точности угловых и линейных измерений в разомкнутом ходе, особенно если последний вытянутый. Кроме того, в замкнутом ходе ошибки исходных данных (исходного дирекционного угла и координат пункта) не оказывают влияния на величину невязки в периметре, а следовательно, и на величину M . Поэтому при расчетах в ходах замкнутой формы получаются завышенные по сравнению с действительными точностные результаты.

Азимутальный ход. Для полигонометрического хода любой формы с независимым определением дирекционного угла каждой линии, например из гиротеодолитных измерений, средняя квадратическая ошибка положения конечной точки равна

$$M^2 = [m_s^2] + \frac{m_\alpha^2}{\rho^2} [s^2]. \quad (IV.1.29)$$

При наличии ошибок в исходных координатах формула (IV.1.29) запишется в виде

$$M^2 = [m_s^2] + \frac{m_\alpha^2}{\rho^2} [s^2] + m_{(n-k)}^2. \quad (\text{IV.1.30})$$

Для ходов вытянутой формы с примерно равными сторонами формулы (IV.1.29) и (IV.1.30) запишутся так:

$$M^2 = [m_s^2] + \frac{m_\alpha^2}{\rho^2} L^2 \frac{1}{n}, \quad (\text{IV.1.31})$$

$$M^2 = [m_s^2] + \frac{m_\alpha^2}{\rho^2} L^2 \frac{1}{n} + m_{(n-k)}^2. \quad (\text{IV.1.32})$$

Применение расчетных формул. Оценка точности любого элемента полигонометрического хода выполняется при уравнивании и рассматривается в отделе уравнительных вычислений.

Полученные формулы для средней квадратической ошибки положения конечной точки полигонометрического хода обычно используются при проектировании для предварительных расчетов, когда требуется знать лишь ошибку наименее точно определенного пункта, и для вычисления допустимых абсолютных линейных невязок в периметре хода.

Зная M , можно вычислить среднюю квадратическую ошибку положения пункта, расположенного в слабом месте хода, т. е. обладающего наименьшей точностью. Если до уравнивания слабым местом является конечная точка хода (считая ход висячим), то после уравнивания слабым местом хода является его середина. Можно считать, что средняя квадратическая ошибка положения пункта, расположенного в слабом месте хода, будет равна половине M' или M . Величины средних квадратических ошибок линий m_s и углов m_β для вычисления M' и M берут из Инструкции.

По указанным формулам можно оценивать точность положения пункта и после проведения полевых измерений, используя фактически полученную точность измерения сторон, углов и учитывая ошибки исходных данных. В этом случае величины m_s и m_β вычисляются из достаточно большого числа однородных по условиям работы вытянутых ходов, используя продольные, поперечные и угловые невязки. Ошибки исходных данных m_{α_i} и $m_{(n-k)}$ вычисляют или по тем же невязкам, или по тем материалам, из которых получены эти исходные данные.

При использовании расчетных формул необходимо иметь в виду следующее.

1. Полигонометрические ходы могут считаться вытянутыми, если:
а) стороны хода отклоняются от направления замыкающей в обе стороны в среднем на 8° (а в пределе на 24°);

б) вершины хода отклоняются в обе стороны от линии, проведенной через центр тяжести параллельно замыкающей хода, в среднем на величину $1/24$ (а в пределе на $1/8$) длины самой замыкающей.

2. Величина $[m_s^2]$, входящая в формулы M' и M , определяется в зависимости от метода измерения сторон. Для расчетов можно принять следующие соотношения:

для полигонометрии с измерением сторон точными светодальномерами

$$[m_s^2] = nm_{ср}^2 \quad \text{или} \quad [m_s^2] = nm_s^2, \quad (\text{IV.1.33})$$

где $m_{ср}^2$ — средняя квадратическая ошибка средней стороны хода;

для полигонометрии с измерением сторон инвариантными проволоками

$$[m_s^2] = \mu_0^2 [s] + \lambda^2 L^2; \quad (\text{IV.1.34})$$

для полигонометрии с измерением сторон оптическими дальномерами

$$[m_s^2] = \left(\frac{m_s}{s} \right)^2 s_{ср}^2 n, \quad (\text{IV.1.35})$$

где m_s/s — относительная средняя квадратическая ошибка измерения расстояний дальномером — точность дальномера.

3. Ослабить влияние ошибок линейных измерений, входящих в первое слагаемое формул для M' и M , можно, уменьшив длину хода между исходными пунктами.

4. Для ходов, в которых число сторон n меньше 5, следует множители $n+1, 5/3$ и $n+3/12$ заменить соответственно следующими точными выражениями:

$$\frac{2n^2 + 3n + 1}{6n} \quad \text{и} \quad \frac{n^2 + 3n + 2}{12n}.$$

5. Если промежуточный дирекционный угол на данном пункте хода определяется не для стороны хода, а для какого-то другого направления, то этот пункт учитывается дважды: как конечный — для одной секции и начальный — для другой.

Б. ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВ

IV.1.1.3. Точные оптические теодолиты

Для угловых измерений в геодезических сетях сгущения применяют точные оптические теодолиты, к которым относят модели типа Т2, Т5, Т5К и новые унифицированные модели серии: 2Т, 2Т2, 2Т5, 2Т5К.

Теодолиты Т5, Т5К и 2Т5, 2Т5К имеют одностороннюю систему отсчитывания по кругам с помощью шкаловых микроскопов, а теодолиты Т2 и 2Т2 — двустороннюю по оптическому микрометру. В табл. 16 приведена характеристика этих теодолитов. Из теодолитов, выпускаемых Народным предприятием «Карл Цейсс», Йена (ГДР), для угловых измерений в полигонометрии рекомендуются теодолиты TheO 010A, TheO 020A, TheO 010B, TheO 020B, TheO 015B. Теодолиты TheO 020A и TheO 020B шкаловые, теодолиты TheO 010A, 010B, 015B микрометричные.

Оптические теодолиты приспособлены для измерения горизонтальных углов по трехштативной системе. Прибор устанавливают вертикально осью во втулку подставки и закрепляют. В ту же втулку подставки может быть установлена визирная марка. В алидадную часть прибора вмонтирован оптический центрир.

ТАБЛИЦА 16

Характеристика	Теодолиты					
	T2	T5	2T2	2T5	T5K	2T5K
Увеличение зрительной трубы, крат	25	25	27,5	27,5	27,5	27,5
Цена наименьшего деления отсчетного приспособления:						
горизонтального круга	1"	1'	1"	1'	1'	1'
вертикального круга	1"	1'	1"	1'	1'	1'
Точность отсчета	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Диаметр круга, мм:						
горизонтального	90	90	95	90	95	90
вертикального	65	70	70	70	70	70
Диапазон действия компенсатора					3,5'	3,5'
Точность компенсации					2"	2"
Масса прибора в футляре, кг	9,5	7,0	8,8	8,4	6,5	8,2
Средняя квадратическая ошибка измерения горизонтального угла	2"	5"	2"	5"	5"	5"

Отсчет по кругам теодолита T2 производят в следующем порядке.

1. Вращением головки микрометра совмещают изображения штрихов в верхней и нижней частях левого окна.

2. Записывают число градусов по верхнему изображению оцифрованного штриха слева от середины или непосредственно в середине окна.

3. В нижней части левого окна находят изображение оцифрованного штриха круга, отличающегося от прочитанного ранее на 180° , и считают число интервалов, заключающихся между этими штрихами. Это число равно числу десятков минут.

4. В правом окошке отсчитывают число единиц минут, секунд и десятые доли секунд.

5. Все три полученных числа складывают и получают полный отсчет по кругу $57^\circ 58' 02,4''$ (рис. 51).

Отсчет по кругу теодолита 2T2 производится несколько иначе. Так, после совмещения штрихов, так же как в T2:

1. В верхнем большом окошке отсчитывают число градусов, подписанных сверху, и отсчитывают количество десятков минут, равное цифре, расположенной под числом градусов.

В правом боковом окошке отсчитывают единицы минут, десятки, единицы и десятые доли секунд. На рис. 52 полный отсчет $17^\circ 25' 27,0''$.

Отсчеты по вертикальному и горизонтальному кругам теодолита 2T5K представлены на рис. 53 и равны соответственно $0^\circ 25,5'$ и $127^\circ 05,4'$.

Для повышения точности измерения угла применяют визирные марки. Установка их над закрепленными на местности пунк-

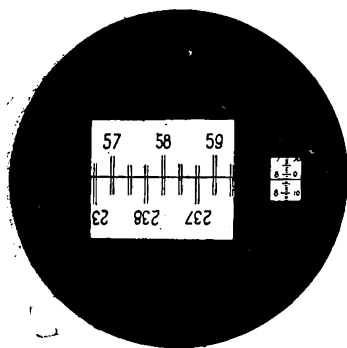


Рис. 51. Поле зрения отсчетного микроскопа теодолита Т2

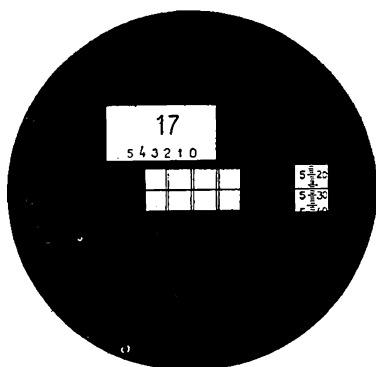


Рис. 52. Поле зрения отсчетного микроскопа теодолита 2Т2

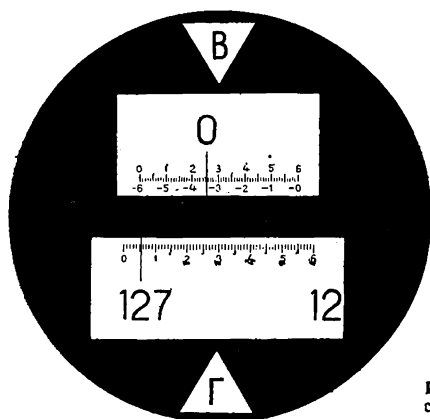


Рис. 53. Поле зрения отсчетного микроскопа теодолита 2Т5К

тами производится с помощью оптических центриров. Визирная марка должна удовлетворять двум условиям:

1. Ось круглого уровня должна быть параллельна оси вращения марки.
2. Ось симметрии визирной цели марки должна совпадать с осью вращения.

К теодолитам Т2 и 2Т2 изготавливаются оптические двусторонние центриры ОДО с ломаной зрительной трубой. Направление визирования вверх и вниз в этих центрирах изменяется переводом специальной рукоятки. Перед работой необходимо произвести поверки:

1. Оси цилиндрических уровней должны быть перпендикулярны к оси вращения центрира.
2. Визирная ось зрительной трубы оптического центрира должна совпадать с осью его вращения.

IV.1.1.4. Источники ошибок при измерении угла

Основными источниками ошибок при угловых измерениях являются:

- 1) ошибка, возникающая вследствие неточного положения визирных марок над центрами знаков, называется ошибкой редукции;
- 2) ошибка за счет неточного положения теодолита над центром знака — ошибка центрирования;
- 3) несовершенство угломерного прибора, вследствие чего возникают инструментальные ошибки;
- 4) ошибка собственно измерения угла, она состоит из ошибок визирования, отсчета и личной ошибки наблюдателя;
- 5) внешние условия — неблагоприятные условия среды, через которую проходит визирный луч;
- 6) ошибка исходных данных, она не оказывает влияния непосредственно на угловые измерения, а влияет на величину невязки.

Ошибки при угловых измерениях носят в основном случайный характер. Средняя квадратическая ошибка измеренного угла в вытянутом полигонометрическом ходе может быть подсчитана по формуле

$$m_{\beta} = \frac{m_u}{[s]} \rho \sqrt{\frac{12}{n+3}}.$$

При принципе равных влияний ошибок при линейных и угловых измерениях можно принять

$$\frac{\text{пред } u}{[s]} \leq \frac{1}{T \sqrt{2}}.$$

Предельная ошибка по нормативным документам в два раза больше средней квадратической, тогда

$$\frac{m_u}{[s]} \leq \frac{1}{2T \sqrt{2}}.$$

Для полигонометрии 4 класса с точностью $1/T \leq 1/25\,000$; при $n=20$; $s_{\text{ср}}=500$ м, длине хода 10 км получим $m_{\beta}=2,0''$, пред. $\Delta\beta=4''$. Среднюю квадратическую ошибку на один источник случайного характера можно вычислить по формулам

$$m_{\beta_{\text{случ}}} = \frac{2}{\sqrt{6}} = 0,8''; \quad \text{пред. } \Delta\beta_{\text{случ}} = 1,6''.$$

Для ошибки систематического характера

$$\text{пред. } \Delta\beta_{\text{сист}} = 0,4''.$$

Ниже приведены формулы, по которым можно вычислить среднюю квадратическую ошибку отдельных источников. Так

$$m_p^2 = \frac{e_1^2 \rho^2}{s^2}, \quad m_{\text{ц}}^2 = \frac{2e^2 \rho^2}{s^2}^*,$$

где e_1 , e — линейные элементы редукции и центрировки.

* Формула для $m_{\text{ц}}^2$ является строгой при $\beta=180^\circ$ и равенстве сторон, образующих угол.

Совместное влияние центрирования и редукции

$$m_{ц.р} = \frac{e\rho}{s} \sqrt{3} \text{ при } e_1 = e.$$

Приняв $m_{ц.р} = 0,8''$, для длины стороны $s = 500$ м вычислим линейный элемент центрировки e

$$e = \frac{0,8}{\sqrt{3}} \frac{500\,000}{206\,264} \approx 1,2 \text{ мм.}$$

Инструментальные ошибки и ошибки за влияние внешней среды рассмотрены в гл. III.2.

Ошибка собственно измерения m'_β состоит из ошибки визирования $m_{виз}$ и ошибки отсчета m_o . При благоприятных внешних условиях

$$m_{виз} = \frac{60''}{3v^x};$$

m_o для теодолитов типа Т2 можно принять равной $0,5''$. Среднюю квадратическую ошибку собственно измерения угла, зависящую только от ошибок визирования и отсчета m_β , можно вычислить по формуле

$$m'_\beta = \sqrt{\frac{1}{n} (m_{виз}^2 + m_o^2)},$$

где n — число приемов.

IV.1.1.5. Измерение углов в полигонометрии 4 класса, 1 и 2 разрядов

Основным способом измерения углов является способ круговых приемов. Этим способом измеряют углы на пунктах, где имеется более двух направлений. Если имеется только 2 направления, то произ-

ТАБЛИЦА 17

Типы приборов	Число приемов		
	4 класс	1 разряд	2 разряд
Т2, 2Т2 и им равноточные	6	2	2
Т5, Т5К и им равноточные	—	3	2

водят измерения влево или вправо лежащих по ходу углов способом отдельного угла (без замыкания горизонта). Измерение углов производится, как правило, по трехштативной системе. Необходимое число приемов измерения углов приведено в табл. 17.

Результаты измерений отдельных углов или направлений на пунктах полигонометрии должны находиться в пределах допусков, указанных в табл. 18.

Элементы измерений, к которым относятся допуски	Типы приборов	
	Т2, 2Т2 и им равноточные	Т5, Т5К и им равноточные
Расхождение между значениями одного и того же угла, полученного из двух полуприемов	8"	0,2'
Колебание значения угла, полученного из разных приемов	8	0,2
Расхождение между результатами наблюдений на начальное направление в начале и конце полуприема	8	0,2
Колебание значений направлений, приведенных к общему нулю, в отдельных приемах	8	0,2

IV.1.1.6. Оценка точности угловых измерений

а. По отклонениям от среднего в приемах

$$m'_{\beta_i} = \sqrt{\frac{[v_{\beta}^2]}{k-1}}, \quad (\text{IV.1.36})$$

где $v_{\beta_i} = \beta_i - \beta_{\text{ср}}$; $i = 1, 2, \dots, k$.

Если измерения выполнены в одинаковых условиях, то можно вычислить среднюю квадратическую ошибку для ряда пунктов

$$m'_{\beta} = \sqrt{\frac{\sum_1^i [v_{\beta}^2]_j}{(n+1)(k-1)}}, \quad (\text{IV.1.37})$$

где $[v_{\beta}^2]_j$ — сумма квадратов отклонений, полученная на пункте с номером j , $(n+1)$ — число пунктов.

Среднюю квадратическую ошибку окончательного значения угла M_{β} как среднее из k приемов получим по формуле

$$M_{\beta} = \frac{m'_{\beta}}{\sqrt{k}} = \sqrt{\frac{\sum_1^i [v_{\beta}^2]_j}{(n+1)k(k-1)}}. \quad (\text{IV.1.38})$$

б. По разностям двойных измерений.

Если на каждом пункте углы измерены двумя приемами, то

$$m'_{\beta_{\text{ср}}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{[d_{\beta}^{\prime 2}]}{n}}, \quad (\text{IV.1.39})$$

где $d'_{\beta_i} = d_{\beta_i} - \delta_{\beta_{\text{ср}}}$, $\delta_{\beta_{\text{ср}}}$ — средняя величина систематической ошибки,

$$\delta_{\beta_{\text{ср}}} = \frac{[d_{\beta}]}{n+1}.$$

в. По угловым невязкам ходов (N — число ходов)

$$m_{\beta_I} = \sqrt{\frac{\left[\frac{f_{\beta}^2}{n+1} \right]}{N}}. \quad (\text{IV.1.40})$$

г. По поперечным невязкам вытянутых ходов:

$$1) m_{\beta_{II}} = \rho \sqrt{\frac{\left[C \left(\frac{u}{L} \right)^2 \right]}{N}}, \quad (\text{IV.1.41})$$

где $C \approx \frac{12}{n+3}$, u — поперечные невязки, вычисленные по углам, исправленным за угловую невязку;

$$2) m_{\beta_{III}} = \rho \sqrt{\frac{\left[C \left(\frac{u'}{L} \right)^2 \right]}{N}}, \quad (\text{IV.1.42})$$

где $C \approx \frac{3}{n+1,5}$; u' — поперечные невязки, вычисленные по углам, исправленным за угловую невязку.

Если значения m_{β_I} , $m_{\beta_{II}}$, $m_{\beta_{III}}$ значительно расходятся между собой, то это свидетельствует о наличии заметных ошибок в координатах исходных данных. Наиболее близкую к действительному значению дает величина m_{β_I} .

В. ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНИЙ ИНВАРНЫМИ ПРОВОЛОКАМИ

IV.1.1.7. Базисные приборы

Мерные приборы с инварными проволоками получили у нас название базисных приборов. В настоящее время промышленность изготавливает базисные приборы трех видов: БП-1, БП-2, БП-3, БП-1 и БП-2 предназначены для измерения базисов, а также длин линий соответственно в полигонометрии 1 и 2 классов и в полигонометрии 3 и 4 классов. БП-3 служит для измерения базисных сторон и линий в полигонометрии 1 и 2 разрядов.

Инварная проволока изготавливается из сплава инвара, состоящего примерно из 35,5 % никеля, 64 % железа и 0,5 % различных примесей: углерода, кремния, марганца и других добавленных для придания инвару ряда свойств: тягучести, ковкости, твердости и т. п. Инвар почти не окисляется, обладает хорошей теплопроводностью, хорошо поддается обработке и полировке, он обладает также малым температурным коэффициентом линейного расширения ($0,5 \cdot 10^{-6}$). К недостаткам его относится изменение длины с течением времени под влиянием внешних воздействий или без очевидных причин (скачкообразно). Это заставляет подвергать инвар старению, так, проволоки прибора БП-3 выдерживаются в течение 3—4 месяцев. Инварные проволоки имеют длину 24 м и диаметр поперечного сечения 1,65 мм. На обоих концах проволоки расположены шкалы

с миллиметровыми делениями, нанесенные на жестких пластинах, имеющих треугольное сечение. Штрихи на шкалах наносят делительными машинами, в приборах БП-2 и БП-3 случайная ошибка штрихов не превышает 10 мкм. Подписи штрихов на обеих шкалах идут от 0 до 8 см. При изменении расстояний по шкалам производят отсчеты. Если обозначить отсчет по передней и задней шкалам соответственно буквами П и З, то длину интервала, измеренного проволокой, можно подсчитать по формуле

$$l = 24 \text{ м} + (П - З).$$

У проволоки, подвешенной и растянутой, расстояние между нулями номинально должно быть 24 м, отклонение от этой величины допускается не более 1 мм.

Блочный станок с грузами и другие приборы. С помощью блочного станка натягивают проволоку во время измерения. Он представляет собой штатив с несколько удлиненной передней ножкой, на верхней части которого крепится рама для блока. Масса грузов для натяжения проволоки не должна отличаться от номинального (10 кг) больше чем на 5 г для БП-1 и БП-2 и на 10 г для комплекта БП-3. Шкала проволоки должна находиться над целиком с крестообразной нарезкой, установленной на штативе. Одна черточка нарезки устанавливается вдоль шкалы проволоки, а другая, перпендикулярная к ней, является указателем для отсчитывания по шкале проволоки. Целики штативов и блочные станки снабжены устройствами, с помощью которых их можно устанавливать в должное положение.

Для выноса центра знака на высоту подвешенной проволоки служит оптический центрир. Для измерения расстояний, меньших 24 м, имеется инварная лента. Рейка для нивелирования целиков имеет длину 1,5 м и снабжена круглым уровнем, деления на черной стороне равны 10 мм, на красной — 11 мм.

IV.1.1.8. Нормальные меры и компарирование проволок

Сравнение длины проволоки с длиной эталона — нормальной мерой — называется *эталонированием* или *компарированием*.

Эталонирование проволок производится в метрологических лабораториях — компараторах. Наиболее совершенным из них является компаратор МИИГАиК. Этот компаратор создан в 1928 г. по инициативе Ф. Н. Красовского. В компараторе МИИГАиК для определения длины проволок служат трехметровые инварные жезлы № 541 или № 615, которые ежегодно сравниваются с подобным им жезлом Н-15, в свою очередь, сливаемым с эталоном — платиново-иридиевым метром № 28. Жезлы Н-15 и № 28 хранятся во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева.

Платиново-иридиевый метр № 28, с которым сравнивают все нормальные меры, является основным Государственным эталоном единицы длины в СССР.

Компаратор МИИГАиК расположен в полуподвальном помещении. Вдоль одной из стен на расстоянии 3 м от нее на девяти бетонных столбах, покоящихся на глубоких фундаментах, изолированных один от другого и от пола, укреплены на кронштейнах девять микроскопов, снабженных микрометрами. Расстояние между соседними микроскопами близко к 3 м, а между крайними — к 24 м. Оси микроскопов расположены в одной отвесной плоскости.

Под микроскопами, также на бетонных столбах, уложены два рельса, по которым на специальной тележке передвигается трехметровый жезл № 541.

Слева от первого и справа от девятого микроскопов имеются станки с блоками для подвешивания проволок. Конструкция блочных станков предусматривает возможность замены блоков компаратора блоками, применяющимися при полевых измерениях.

Средняя квадратическая ошибка эталонирования проволок на компараторе МИИГАиК, учитывая ошибку эталонирования трехметрового жезла № 541, составляет 10—15 мкм. Компарирование проволок выполняют четырьмя, а иногда и девятью приемами в зависимости от требуемой точности. Каждый прием состоит из определения длины компаратора трехметровым жезлом, определения длины проволок и повторного определения длины компаратора.

При компарировании на каждую проволоку выдается свидетельство, в котором выписывается уравнение проволоки при температуре t_0 вида

$$l = l_0 + \Delta l + \alpha l_0 (t - t_0) + \beta l_0 (t^2 - t_0^2) + \gamma l_0 (t^3 - t_0^3),$$

где l — длина проволоки при температуре t и натяжении, равном 98 Н; $l_0 = 24$ м — номинальная длина проволоки; Δl — поправка за компарирование при температуре t_0 ; α , β , γ — термические коэффициенты, причем β , γ учитываются только при высокоточных измерениях. Определение температурных коэффициентов проволок α и β производится на компараторе методом электронагрева (иногда определяют и коэффициент γ).

Рабочие мерные приборы для измерения сторон в полигонометрии 1 и 2 разрядов эталонируются на полевом компараторе, который разбивается в районе работ (на ровной, удобной для установки штативов местности с устойчивым грунтом).

Концы компаратора закрепляются грунтовыми знаками типа 6 г.р. Длина компаратора (120 или 240 м) определяется шестикратным измерением его двумя инварными проволоками (три измерения в прямом и три в обратном направлениях). Эталонирование рабочих проволок производится путем четырехкратного измерения им компаратора. Изменения в длине рабочей проволоки между смежным компарированием не должны превышать 0,3 мм.

IV.1.1.9. Способы измерения линий в полигонометрии

В полигонометрии 4 класса стороны измеряют двумя инварными проволоками в одном направлении или одной проволокой в прямом и обратном направлениях, способом отсчетов при трех сдвигах проволоки в пределах длины шкалы. В полигонометрии 1 разряда — одной инварной проволокой в одном направлении способом отсчетов при трех сдвигах проволоки, или способом фиксации; в полигонометрии 2 разряда — одной инварной проволокой в одном направлении способом фиксации.

Способ отсчетов. Над начальным и конечным центрами линии устанавливают на штативах оптические центры, которые центрируют над точками. Под штативы с оптическими центрами подставляют штативы с целиками так, чтобы пересечение штрихов целика совпало с крестом сетки нитей центра. На конечной точке, заменив в подставке оптический центр на теодолит (любой точности), выполняют вешение «на себя» всех штативов с целиками, предварительно расставленных вдоль линии через 24 м с помощью 24-метрового троса. После измерения первой части линии штативы переносят и расставляют во второй части, третьей и так до конца линии. Остаток — неполный пролет разбивают на 6-метровые интервалы.

Если остаток более 12 м, то за концом линии устанавливают дополнительный штатив и измеряют отрезок от этого штатива до штатива на конце линии. В этом случае остаток будет отрицательный и его при вычислении длины линии вычитают из полного пролета. Неполные пролеты могут образовываться не только в конце линии, но и в любом ее месте в том случае, если какое-то препятствие в створе не позволит установить штатив с целиком в конце целого пролета.

Измерение линии заключается в последовательном измерении инварными проволоками длины отдельных пролетов между пересечением штрихов соседних целиков. Отсчеты по шкалам проволоки с округлением до 0,1 мм производят два наблюдателя по команде руководителя работ, который записывает их в журнал; он же вычисляет разность П-З и контролирует их. Затем, дважды перемещая проволоку на несколько миллиметров, берут вторую и третью пары отсчетов. Колебание разности отсчетов не должно превышать 1 мм. Величина разности длин проволок при измерении двумя проволоками в одном направлении не должна отличаться более чем на 0,3 мм от разности длин этих проволок, вычисленной по результатам компарирования. Одновременно с измерением линии термометром-пращом измеряют в начале и конце каждой линии температуру с точностью 1 °С. Остатки измеряют инварной лентой; натяжение ленты осуществляют вручную.

Нивелирование штативов с целиками выполняют для приведения длины каждого пролета и остатка к горизонту. Нивелир устанавливают вблизи створа линии в таком месте, чтобы можно было взять отсчеты по рейке, последовательно устанавливаемой на несколько штативов (не более 6). Закончив наблюдения на первой станции, переходят на вторую, наблюдения начинают со штатива, являющегося последним на предыдущей станции.

Способ фиксации. При измерении линии этим способом штативы с целиками должны быть заменены на штативы с деревянными столбами или деревянными сегментами. Можно использовать и деревянные колья, прочно вбитые в землю на расстоянии одного уложения проволоки. При способе фиксации концов проволоки на штативах или деревянных кольях на каждом пролете фиксируют лишь передний конец проволоки в тот момент, когда задний конец ее будет совмещен или с точкой, являющейся началом линии, или с точкой, фиксированной ранее на заднем штативе. Фиксация осуществляется с помощью иглы. Контроль правильности фиксации производят путем одновременного отсчитывания по обеим шкалам мерной проволоки, принимая иголки за индексы. Разность отсчетов не должна превышать 1 мм. Точность отдельных операций при измерении указана в табл. 19.

ТАБЛИЦА 19

Наименование работ	Предельная ошибка, мм		
	4 класс	1 разряд	2 разряд
Натяжение проволок, кг	0,1	0,2	0,1
Вешение линий, см	4	5	5
Определение превышений концов пролетов длиной 24 м при превышении:			
до 1 м	3	4	5
от 1 до 5 м	2	3	4

IV.1.1.10. Источники ошибок подвесных мерных приборов

Основные ошибки при измерении линий инварными проволоками можно разделить на две группы: систематические и случайные. К систематическим относятся ошибки, вызываемые следующими источниками: неточным компарированием проволоки σ_1 , неточным вешением линий σ_2 , натяжением проволоки σ_3 , действием ветра σ_4 ; к случайным — ошибки, вызываемые наклоном мерного прибора Δ_5 , неточным определением температуры Δ_6 , неустойчивостью штативов Δ_1 , ошибки собственного измерения линии Δ_8 .

Предположив, что ход вытянутый, и применив принцип равных влияний — полагая, что при измерении углов и линий в ходе достигаются примерно одинаковые по точности результаты, можно считать, что влияние всех ошибок линейных измерений l , равно как и угловых u , не должно выходить за предел, определяемый формулой

$$\frac{\text{пред } l}{[s]} = \frac{\text{пред } u}{[s]} = \frac{1}{T \sqrt{2}}.$$

Величину влияния источников систематических или случайных ошибок при измерении длин сторон на положение конечной точки хода можно вычислить по формуле

$$\text{пред } \sigma = \text{пред } \Delta = \frac{[s]}{5,3T}.$$

Предельная ошибка одного уложения мерного прибора длиной l , если эта ошибка носит систематический характер, вычисляется по формуле

$$\text{пред } \Delta l_{\text{сист}} = \frac{l}{5,3T}, \quad (\text{IV.1.43})$$

а если случайный, то по формуле

$$\text{пред } \Delta l_{\text{случ}} = \frac{l}{5,3T} \sqrt{n'}, \quad (\text{IV.1.44})$$

где n' — число уложений мерного прибора в стороне хода.

Приняв для полигонометрии 4 класса $T=25\,000$; $l=24$ м; $[s]=10$ км; $n=20$; $s_{\text{ср}}=500$ м, определим по формулам (IV.1.43) и (IV.1.44)

$$\text{пред } \Delta l_{\text{сист}} \leq 0,18 \text{ мм} \approx 0,2 \text{ мм};$$

$$\text{пред } \Delta l_{\text{случ}} \leq 0,81 \text{ мм} \approx 0,8 \text{ мм}.$$

Вычислим допустимую величину ошибок от каждого источника на одно уложение мерного прибора по формулам (IV.1.43) и (IV.1.44) для тех же данных, которые были приняты при вычислениях $\text{пред } \Delta l_{\text{сист}}$ и $\text{пред } \Delta l_{\text{случ}}$.

Ошибка компарирования. Предельная допустимая ошибка при компарировании 24-метровой проволоки, как систематическая ошибка, не должна превышать 0,2 мм.

Ошибка за вешение. Это односторонне действующая систематическая ошибка,

$$\text{пред } \Delta l_{\text{веш}} = \frac{2e^2}{l},$$

где ε — отклонение концов мерного прибора от точного направления. Тогда

$$\begin{aligned} \text{пред } \varepsilon &\leq l \sqrt{\frac{1}{10,6T}}; \quad \text{пред } \varepsilon = \\ &= 24 \cdot 10^2 \sqrt{\frac{1}{10,6 \cdot 25 \cdot 10^3}} = 4,7 \text{ см} \approx 5 \text{ см;} \end{aligned}$$

для уменьшения влияния этой ошибки следует вешение линии производить не на глаз, а по теодолиту, тогда $\text{пред } \varepsilon \approx 1 \text{ см}$ (при $s = 500 \text{ м}$).

Ошибка за натяжение

$$\text{пред } \Delta l_{\text{нат}} = \left(\frac{\sigma l_0}{\rho} + \frac{\rho^2 l_0^3}{12F^2} \right) \Delta F.$$

Вес инварной проволоки диаметром 1,65 мм и длиной 1 м $\rho = 0,170 \text{ Н}$, растяжение единицы длины проволоки под действием веса $\sigma = 0,00051 \text{ мм}$. Длина проволоки без натяжения $l_0 = 24 \text{ м}$. Сила натяжения проволоки $F = 10 \text{ кг} = 98 \text{ Н}$. Тогда $\Delta l_{\text{нат}} = 0,104 \Delta F$.

$\text{Пред } \Delta l_{\text{нат}}$, как ошибка систематическая, должна быть $\leq 0,2 \text{ мм}$. С учетом этой величины определим $\Delta F = 1,92 \text{ Н}$, или в переводе на массу $\Delta F \approx 195 \text{ г}$.

Гири в блочных станках базисных приборов имеют ошибку массы не более 10 г, поэтому вполне могут обеспечить указанную точность.

Ошибка за влияние ветра. Ветер, особенно боковой, является источником систематического характера. Такой ветер действует как дополнительная масса проволоки, укорачивая длину ее хорды, а следовательно, увеличивая длину линии,

$$\text{пред } \Delta l_{\text{вет}} = - \frac{Q^2 l}{24F^2},$$

где Q — сила давления ветра на проволоку.

Чтобы $\Delta l_{\text{вет}} \leq 0,2 \text{ мм}$, сила давления ветра на проволоку должна быть равна 1,4 Н, а она возникает при скорости ветра 7–8 м/с.

Ошибка за наклон мерного прибора. Ошибка поправки за наклон носит случайный характер:

$$\text{пред } \Delta l_h = \frac{h}{l} \text{ пред } \Delta h.$$

В соответствии с (IV.1.44)

$$\text{пред } \Delta h = \frac{l^2 \sqrt{n_1}}{5,3Th}.$$

При $h = 2 \text{ м}$

$$\text{пред } \Delta h = \frac{24 \cdot 24 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{20}}{5,3 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 2} = 9,7 \text{ мм} \approx 10 \text{ мм}.$$

Чем больше превышение, тем точнее надо нивелировать головки целиков.

Ошибка за влияние температуры

пред $\Delta l_t \approx \alpha l_0$ пред Δt .

Можно считать, что эта ошибка носит систематический характер. Тогда при $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-6}$

$$\Delta t = \frac{0,20}{0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 24 \cdot 10^3} = 17^\circ.$$

Ошибка собственно измерения. Под этой ошибкой понимают ошибку фиксации концов линии с помощью оптического центрира и ошибку отсчитывания по шкалам. Обе эти ошибки не превышают 0,7 мм и, следовательно, не выходят за предел 0,8 мм.

Неустойчивость штативов. Влияние этой ошибки ослабляется при измерении линии в прямом и обратном направлениях.

IV.1.11. Вычисление длины линии

Длина стороны, приведенная к горизонту, при измерении способом отсчетов вычисляется по формуле

$$s' = n(l + \Delta l) + \sum_1^n (\Pi - 3)_{\text{ср}} + \Delta s_t + \Delta s_h + \Sigma r. \quad (\text{IV.1.45})$$

Здесь $n(l + \Delta l) + \sum_1^n (\Pi - 3)_{\text{ср}}$ — измеренное значение линии в n про-

летов; $(l + \Delta l)$ — длина мерной проволоки при температуре компарирования; $\Delta s_t = \alpha l(t_{\text{ср}} - t_0)n$ — поправка в длину линии за температуру мерной проволоки, где α — коэффициент линейного расширения; l — длина мерной проволоки; t_0 — температура компарирования; $t_{\text{ср}}$ — средняя температура мерной проволоки при измерении линии;

$\Delta s_h = \sum_1^n \Delta l_h$ — поправка за приведение к горизонту измеренных длин пролетов, где $\Delta l_h = -h^2/2l - h^4/8l^3$ — величина поправки, Δl_h может быть взята из таблиц.

Значение Σr берется из вычисления длин остатков. Длина каждого остатка r вычисляется по формуле

$$r = r' + \Delta r_h + \Delta r_t + \Delta r_h. \quad (\text{IV.1.46})$$

Здесь r' — измеренное значение остатка; $\Delta r_h = \frac{\Delta l}{l} r'$ — поправка за компарирование мерного прибора, где l — номинальная длина мерного прибора, которым измерялся остаток; Δl — поправка за компарирование на всю длину мерного прибора; $\Delta r_t = \alpha r'(t - t_0)$ — поправка в остаток за температуру; $\Delta r_h = -h^2/2r' - h^4/8r'^3$ — поправка за приведение измеренной длины остатка к горизонту, где h — превышение между целиками базисных штативов, на которых измерялся остаток.

Окончательную длину линии s получают по формуле

$$s = s' + \Delta s_H + \Delta s_y. \quad (\text{IV.1.47})$$

Здесь $\Delta s_H = -\frac{H_m}{R} s'$ — поправка за приведение линии к уровню моря, где H_m — средняя высота линии над уровнем моря; R — средний радиус кривизны поверхности эллипсоида; $\Delta s_y = s'(y_m^2/2R^2)$ —

поправка за приведение длины линии на плоскость в проекции Гаусса, где y_m — среднее расстояние линии от осевого меридиана зоны.

IV.1.1.12. Средняя квадратическая ошибка измерения линий. Оценка точности измерений

Измерение линии s_i проволоками сопровождается случайными и систематическими ошибками, и средняя квадратическая ошибка m_{s_i} может быть вычислена по формуле

$$m_{s_i}^2 = (\mu_0 \sqrt{s_i})^2 + (\lambda s_i)^2, \quad (\text{IV.1.48})$$

где μ_0 — средняя квадратическая ошибка измерения, приходящаяся на единицу длины, называется коэффициентом случайного влияния; λ — коэффициент систематического влияния.

Коэффициент μ_0 зависит от применяемых проволок, внешних условий и от навыков наблюдателя. При измерении линии стремятся так организовать работу, чтобы коэффициент λ составлял $1/25$ — $1/30$ от μ_0 .

Коэффициенты μ_0 и λ определяют:

1) по продольным невязкам вытянутых полигонов. Вначале определяют

$$\lambda = \frac{[t]}{[L]}, \quad (\text{IV.1.49})$$

а затем

$$\mu_0 = \sqrt{\frac{\left[\frac{1}{L} t_i'^2\right]}{N-1}} \quad \text{или приближенно} \quad \mu_0 = \sqrt{\frac{[t_i'^2]}{[L]}}, \quad (\text{IV.1.50})$$

где $t_i' = t_i - \lambda L_i$.

По формулам (IV.1.49) и (IV.1.50) надежно λ и μ_0 будут определены в том случае, если число продольных невязок достаточно велико ($N > 10$) и отсутствует ощутимое влияние ошибок координат исходных пунктов. При малом λ коэффициент μ_0 вычисляют по формулам

$$\mu_0 = \sqrt{\frac{\left[\frac{1}{L} t^2\right]}{N}} \quad \text{или приближенно} \quad \mu_0 = \sqrt{\frac{[t^2]}{[L]}};$$

2) Для вычисления μ_0 по разностям d_s двойных измерений определяют вначале остаточные систематические ошибки ω_{cp} ,

$$\omega_{cp} = \frac{[d_s]}{[s]},$$

коэффициент μ_0 для среднего арифметического из двух результатов измерений находят по формулам

$$\mu_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\left[\frac{1}{s} d_s'^2\right]}{n-1}} \quad \text{или приближенно} \quad \mu_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{[d_s'^2]}{[s]}}, \quad (\text{IV.1.51})$$

где n — число разностей. При малом $\omega_{\text{ср}}$ значения μ_0 определяют по формулам

$$\mu_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\left[\frac{1}{s} d_s^2 \right]}{n}} \quad \text{или приближенно} \quad \mu_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{[d_s^2]}{[s]}}.$$

Число d_s должно быть достаточно большим.

Если длина стороны в прямом и обратном направлениях измерялась в одно время, то d_s не отражает влияние ряда источников (компарирование, натяжение и др.), и значения μ_0 и λ будут преуменьшенными (μ_0 в 3—5 раз, а λ — и больше). Для более надежного определения μ_0 следует использовать двойные измерения длин, выполненные в разное время.

При измерении линий несколькими проволоками (например, базисов в государственных геодезических сетях) оценку точности можно выполнить по уклонениям от среднего.

Вычислив длину линии D_i для каждой проволоки отдельно, находят уклонения v_{D_i} от среднего арифметического значения $D_{\text{ср}}$:

$$v_{D_i} = D_i - D_{\text{ср}},$$

а по ним среднюю квадратическую ошибку m'_D измерения линии одной проволокой:

$$m'_D = \sqrt{\frac{[v_D^2]}{q-1}},$$

где q — число проволок.

Среднюю квадратическую ошибку окончательного результата M'_D определяют по формуле

$$M'_D = \frac{m'_d}{\sqrt{q}}.$$

Полученная величина M'_D , как средняя квадратическая ошибка собственно измерения линии, не дает возможности судить о точности измерения, так как она вычислена без учета влияния ряда источников ошибок и по малому числу q . Значение M'_D будет преуменьшенным. Для более надежной оценки точности необходимо учесть влияние ошибки нивелирования целиков штативов, ошибки определения температурных коэффициентов проволок, ошибки жезла, которым определяется длина компаратора, ошибки за счет изменения длины проволоки, ошибки измерения температуры проволоки.

Совместное влияние всех перечисленных ошибок подсчитывают по формуле

$$m_s = \sqrt{m_D^2 + m_{1h}^2 + m_{2tk}^2 + m_{3дж}^2 + m_{4дп}^2 + m_{5тп}^2}. \quad (\text{IV.1.52})$$

Показателем точности линейных измерений является относительная ошибка m_s/s . Величина ее зависит от класса геодезических сетей, в которых производится измерение линии,

**Г. ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНИЙ
ТОЧНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ДАЛЬНОМЕРАМИ
И ПАРАЛЛАКТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

IV.1.1.13. Дальномер Редта 002

Оптический редуционный тахеометр, «Карл Цейсс», Йена (ГДР), является дальномером с постоянным диастиметрическим углом и переменным базисом, позволяющим измерять по одной рейке горизонтальные проложения до 180 м с относительной предельной ошибкой 1 : 5000.

Тахеометром можно измерять и горизонтальные, и вертикальные углы со средней квадратической ошибкой 4—5".

Отсчетное устройство представляет шкаловой микроскоп. В поле зрения отсчетного микроскопа имеется еще шкала тангенсов, которая позволяет отсчитывать тангенсы углов наклона.

Оптическая схема дальномера представлена на рис. 54. В нижней части трубы помещен оптический компенсатор, состоящий из двух ахроматических клиньев 2 и 2', вращающихся при наклонах трубы в противоположных направлениях вокруг визирной оси. Клинья 2 и 2' образуют параллактический угол и редуцируют наклонные расстояния на горизонтальную плоскость. При наклоне зрительной трубы на угол α на этот же угол, но в разные стороны поворачиваются и клинья 2 и 2'. При горизонтальном положении оси визирования параллактический угол, образованный клиньями, имеет максимальное значение 34'22,6". Клинья компенсатора перекрывают нижнюю половину отверстия объектива 1. Клинь 3 с малым преломляющим углом позволяет сделать коэффициент дальномера равным 100 и является одновременно защитным стеклом. Верхняя половина объектива перекрывается ромб-призмой 4, поворачивающейся вокруг вертикальной оси и играющей роль плоскопараллельной пластинки. Ромб-призма вместе с головкой 5, на которой нанесена шкала с 20 делениями, образует оптический микрометр, повышающий точность отсчитывания по рейке.

Разделительное устройство в окулярной части состоит из би-призмы 6 и щелевой диафрагмы 7. Лучи, пройдя фокусирующую линзу и разделительное устройство, попадают в объектив 8, который строит прямое изображение в плоскости полевой диафрагмы 9, рассматриваемое через окуляр 10.

В комплект прибора входят две горизонтальные рейки с подставками. На рейке имеется основная шкала с 13 оцифрованными дециметровыми делениями, каждое из которых разделено на 5 частей (по 2 см), два верньера и две марки на расстоянии 2 м. Рейка с помощью специального устройства прикрепляется к металлической вертикальной штанге длиной 2,1 м. Для случая, показанного на рис. 55, горизонтальное положение до рейки в метрах получается так: имеем 50 — отсчет подписанного деления на рейке до нулевого штриха верньера; $1,5 \times 2 = 30$ — отсчет по верньеру; 135 — отсчет по шкале оптического микрометра. Полный отсчет равен 53,135 м.

Расстояние s_1 от оси вращения прибора до аналлатической точки, расположенной между двумя оптическими клиньями, и расстояние s_2 от передней плоскости рейки до оси штанги учтены в первом интервале основной шкалы рейки. Расстояние от аналлатической точки до оси вращения трубы автоматически не редуцируется и в случае необходимости вводится поправка, отсчитываемая в сантиметрах по шкале, расположенной на кожухе вертикального круга.

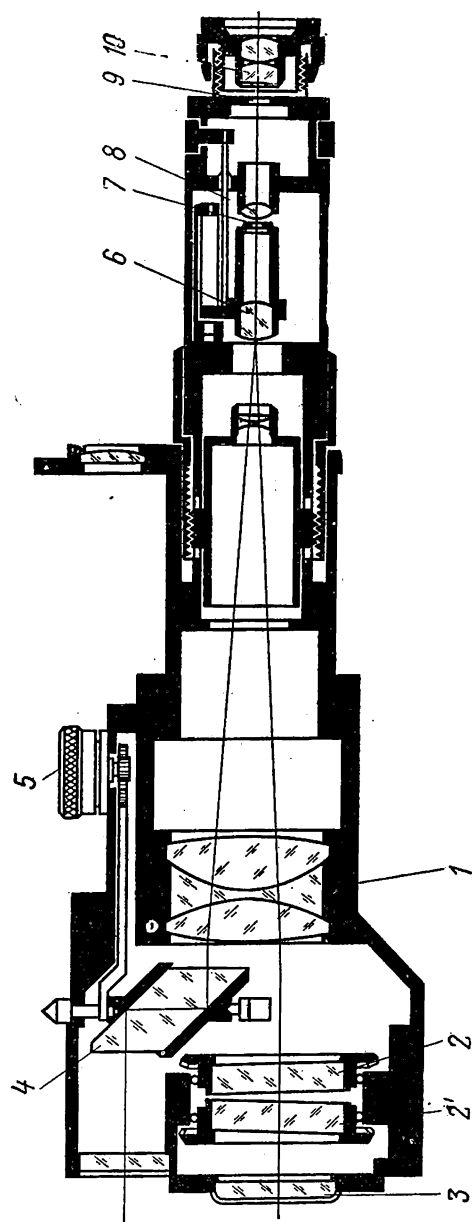


Рис. 54. Оптическая схема дальномера Редга 002

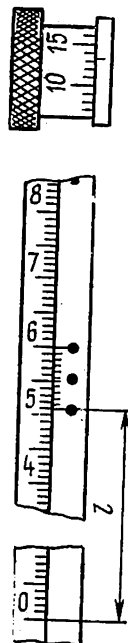


Рис. 55. Отсчет по рейке и оптическому микрометру

Параллактические звенья.

а. Звено треугольной формы (рис. 56)

$$s = b \frac{\sin(\varphi + \gamma)}{\sin \varphi} \quad \text{или} \quad s = b \cos \gamma + b \sin \gamma \operatorname{ctg} \varphi;$$

$$\left(\frac{m_s}{s}\right)^2 = \left(\frac{m_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{m_\varphi}{\varphi}\right)^2.$$

б. Звено ромбической формы с симметричным базисом (рис. 57, а)

$$s = s_1 + s_2 = \frac{b}{2} \left(\operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2} \right).$$

в. Звено ромбической формы с несимметричным базисом (рис. 57, б)

$$s = s_1 + s_2 = \frac{b + 2y}{2} \left(\operatorname{ctg} \frac{\varphi_1 + \Delta\varphi_1}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2 + \Delta\varphi_2}{2} \right)$$

или

$$s_1 = \frac{b}{2} \operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2} - \Delta s_y; \quad s_2 = \frac{b}{2} \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2} - \Delta s_y,$$

 где $\Delta s_y = y^2/s$; y — величина несимметрии базиса. Для звеньев, изображенных на рис. 57, б,

$$\left(\frac{m_s}{s}\right)^2 = \left(\frac{m_b}{b}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{m_\varphi}{\varphi_{\text{ср}}}\right)^2.$$

Параллактические звенья с коротким базисом. В качестве базиса используются инварные жезлы специальной конструкции длиной 2 или 3 м, имеющие на концах марки. Параллактические углы изме-

Рис. 56. Звено треугольной формы

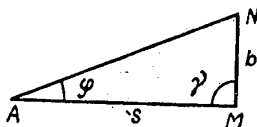
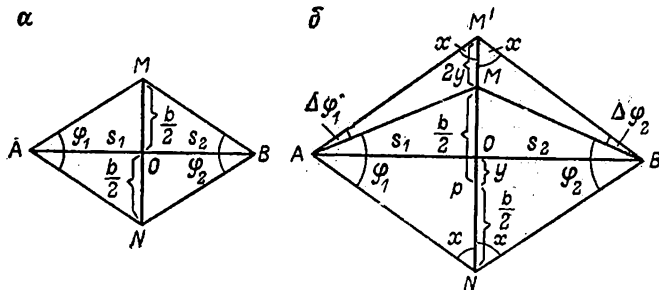


Рис. 57. Звенья ромбической формы:

а — с симметричным базисом; б — с несимметричным базисом



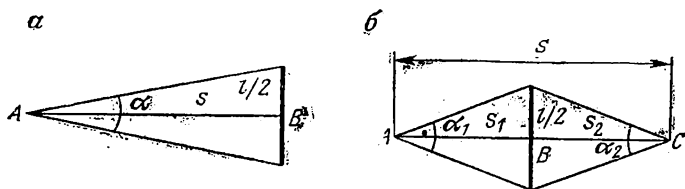


Рис. 58. Звено типа I:
а — треугольное; б — ромбическое

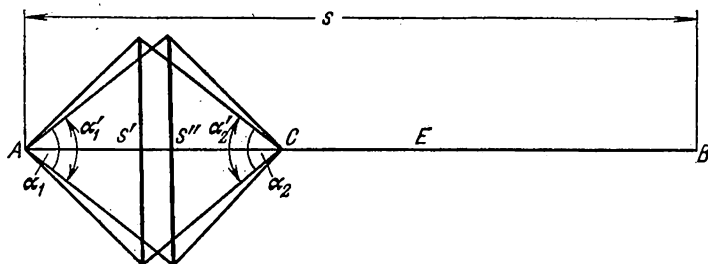


Рис. 59. Звено типа I-в

ряются теодолитами Т2, 2Т2 и им равноточными. Все параллактические звенья условно разделяются на три типа — I, II и III. Простые звенья относятся к типу I, сложные — к II и III. Каждая группа в зависимости от формы разделяется на виды, обозначаемые русскими буквами а, б, в.

Звено типа I-а (рис. 58, а)

$$s = \frac{l}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}; \quad \left(\frac{m_s}{s} \right)^2 = \left(\frac{m_l}{l} \right)^2 + \left(\frac{m_\alpha}{\alpha} \right)^2.$$

Звено типа I-б (рис. 58, б)

$$s = s_1 + s_2 = \frac{l}{2} \left(\operatorname{ctg} \frac{\alpha_1}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\alpha_2}{2} \right);$$

$$\left(\frac{m_s}{s} \right)^2 = \left(\frac{m_l}{l} \right)^2 + \left(\frac{sm_\alpha}{\sqrt{8lp}} \right)^2.$$

Звенья типа I-а и I-б применяются для измерения длин вспомогательных базисов в сложных звеньях.

Звено типа I-в (рис. 59). Расстояние s в каждом звене вычисляется так же, как в звене типа I-а, а затем берется среднее. При определении линии построением звена I-в ее делят на k отрезков, каждый из которых измеряют дважды с двойной установкой жезла:

$$s = \sum_{i=1}^k s_{\text{ср}};$$

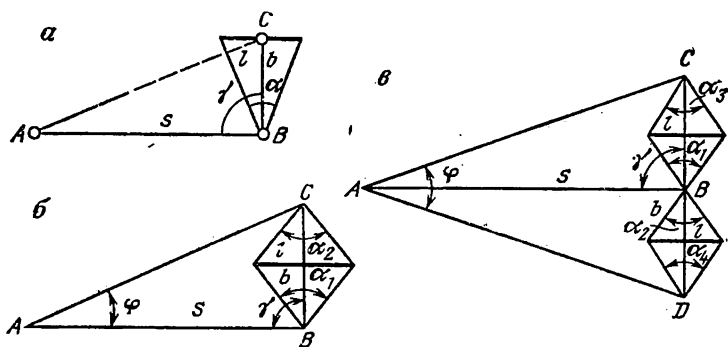


Рис. 60. Сложное звено:

a — типа II-а; b — типа II-б; c — типа II-в

$$\left(\frac{m_s}{s}\right)^2 = \left(\frac{m_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{s_k m_\alpha}{4ls} \sqrt{k}\right)^2,$$

где $s_k = s/k$.

В сложном звене типа II вспомогательный базис располагается на конце измеряемой линии, а в звене типа III — в середине измеряемой линии. Длина базиса вычисляется из одного или нескольких простых параллактических звеньев.

Звено типа II-а (рис. 60, а)

$$s = \frac{l}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg} \varphi; \quad \left(\frac{m_s}{s}\right)^2 = \left(\frac{m_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{bm_\alpha}{lp}\right)^2 + \left(\frac{sm_\varphi}{bp}\right)^2.$$

Наибольшая точность в этом звене будет обеспечена тогда, когда φ и α близки между собой. Это звено применяется в полигонометрии 1 разряда для измерения длин линий до 200 м ($l=2$ м) и до 300 м ($l=3$ м) и в полигонометрии 2 разряда.

Звено типа II-б (рис. 60, б). Длина вспомогательного базиса определяется из простого звена типа I-б.

$$s = \frac{1}{2} \left(\operatorname{ctg} \frac{\alpha_1}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\alpha_2}{2} \right) \frac{\sin(\varphi + \gamma)}{\sin \varphi};$$

$$\text{при } \gamma = 90^\circ \quad s = \frac{1}{2} \left(\operatorname{ctg} \frac{\alpha_1}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\alpha_2}{2} \right) \operatorname{ctg} \varphi,$$

$$(m_s/s)^2 = (m_l/l)^2 + (bm_\alpha/\sqrt{8}lp)^2 + (sm_\varphi/bp)^2.$$

Наивыгоднейшая длина $b = \sqrt{ls\sqrt{8}}$. Звено применяется в полигонометрии 1 разряда при s до 400 м ($l=2$ м) и до 600 м ($l=3$ м).

Звено типа II-в (рис. 60, в). Длина b определяется из двух звеньев типа I-б, $\gamma=90^\circ$, несимметрия базиса $y=CB-BD$ должна быть $y \leq 3 \cdot 10^{-3} s$,

$$s = \frac{l}{4} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} \sum_{i=1}^4 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2};$$

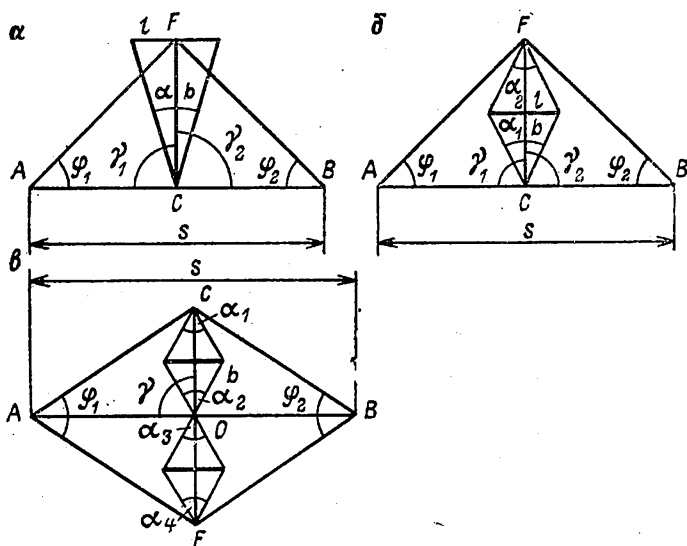


Рис. 61. Сложное звено:

а — типа III-а; б — типа III-б; в — типа III-в

$$\left(\frac{m_s}{s}\right)^2 = \left(\frac{m_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{bm_\alpha}{8lp}\right)^2 + \left(\frac{sm_\varphi}{bp}\right)^2.$$

Наивыгоднейшая длина $b = \sqrt{8ls}$. Звено применяется в полигонометрии I разряда при s от 400 ($l=2$ м) до 600 м ($l=3$ м).

Звено типа III-а (рис. 61, а). Длина b определяется из звена типа I-а. При $70^\circ < \gamma < 110^\circ$

$$s = \frac{l}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \left\{ \frac{\sin(\varphi_1 + \gamma_1)}{\sin \varphi_1} + \frac{\sin(\varphi_2 + \gamma_2)}{\sin \varphi_2} \right\}.$$

При $\gamma = 90^\circ$

$$s = \frac{l}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} (\operatorname{ctg} \varphi_1 + \operatorname{ctg} \varphi_2).$$

Наивыгоднейшая длина $b = \sqrt{\frac{ls}{V_8}}$.

$$\left(\frac{m_s}{s}\right)^2 = \left(\frac{m_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{bm_\alpha}{lp}\right)^2 + \left(\frac{sm_\varphi}{bp\sqrt{8}}\right)^2.$$

Звено применяется в полигонометрии I и II разрядов при s от 200 м до 400 ($l=2$ м) и до 600 м ($l=3$ м).

Звено типа III-б (рис. 61, б). Длина b определяется из звена типа I-б. При $70^\circ < \gamma < 110^\circ$

$$s = \frac{l}{2} \left(\operatorname{ctg} \frac{\alpha_1}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\alpha_2}{2} \right) \left\{ \frac{\sin(\varphi_1 + \gamma_1)}{\sin \varphi_1} + \frac{\sin(\varphi_2 + \gamma_2)}{\sin \varphi_2} \right\}.$$

При $\gamma = 90^\circ$

$$s = \frac{l}{2} \left(\operatorname{ctg} \frac{\alpha_1}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\alpha_2}{2} \right) (\operatorname{ctg} \varphi_1 + \operatorname{ctg} \varphi_2).$$

Наивыгоднейшая длина $b = \sqrt{l s}$.

$$\left(\frac{m_s}{s} \right)^2 = \left(\frac{m_l}{l} \right)^2 + \left(\frac{b m_\alpha}{l \rho \sqrt{8}} \right)^2 + \left(\frac{s m_\varphi}{b \rho \sqrt{8}} \right)^2.$$

Звено применяется в полигонометрии 1 разряда при s от 400 до 600 м.

Звено типа III-в (рис. 61, в). Длина b определяется из двух простых звеньев типа I-б.

Угол γ должен быть равен 90° , $y \leq 3 \cdot 10^{-3} \cdot s_1$, где s_1 — меньший по величине отрезок линии s от концов ее до базиса.

$$s = \frac{l}{4} \left(\operatorname{ctg} \frac{\varphi_1}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\varphi_2}{2} \right) \sum_1^4 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2};$$

$$\left(\frac{m_s}{s} \right)^2 = \left(\frac{m_l}{l} \right)^2 + \left(\frac{b m_\alpha}{8 l \rho} \right)^2 + \left(\frac{s m_\varphi}{b \rho \sqrt{8}} \right)^2.$$

Звено применяется в полигонометрии 1 разряда при длинах линий от 400 м и выше.

Д. УРАВНИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

IV.1.1.15. Общие положения уравнивания полигонометрических ходов и сетей

При уравнивании ходов и небольших сетей по методу наименьших квадратов с применением настольных вычислительных машин предпочтение отдают коррелятному способу, как способу, при котором приходится решать меньшее число нормальных уравнений. Для сокращения вычислений применяют двухгрупповое уравнивание, а для ходов вытянутой формы — трехгрупповое уравнивание.

Уравнивание больших сетей (с применением ЭВМ) выполняют или параметрическим способом, или коррелятным с дополнительными неизвестными.

Из отдельных способов уравнивания сетей предпочтение отдают способу последовательных приближений, как наиболее универсальному и наименее трудоемкому. Нестрогое уравнивание обычно применяют для сетей низшего разряда и для вычисления рабочих координат.

При предварительных вычислениях оценивают качество и точность произведенных измерений. Для этого полученные невязки сравнивают с допустимыми значениями, а также вычисляют средние квадратические ошибки измеренных углов и линий, используя угловые невязки ходов и поперечные и продольные невязки вытянутых ходов.

Предельную линейную невязку пред f_s определяют из соотношения пред $f_s = 2M$, где M — средняя квадратическая ошибка положения конечной точки полигонометрического хода. Подсчитанную $f_s/2s$ сравнивают с $1/T$ — точностью, которой должен удовлетворять прокладываемый ход или полигон.

IV.1.1.16. Уравнивание коррелятным способом хода любой формы, опирающегося на исходные пункты и направления

Число избыточных измерений r , равное разности между числом всех и числом необходимых измерений, для одиночного хода будет равно

$$r = 2n + 1 - 2n + 2 = 3^*,$$

где n — число сторон в ходе.

Три условных уравнения поправок: дирекционных углов, абсцисс и ординат, будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} [v_\beta] + f_\beta &= 0; \\ [\cos \alpha v_s] - \frac{1}{\rho} [(y_{n+1} - y) v_\beta] + f'_x &= 0; \\ [\sin \alpha v_s] + \frac{1}{\rho} [(x_{n+1} - x) v_\beta] + f'_y &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV. 1.53})$$

От условных уравнений поправок переходят к трем нормальным уравнениям коррелят вида

$$\left. \begin{aligned} q_\beta (n+1) k_1 - \frac{q_\beta}{\rho} [y_{n+1} - y] k_2 + \\ + \frac{q_\beta}{\rho} [(x_{n+1} - x)] k_3 + f_3 &= 0; \\ - \frac{q_\beta}{\rho} [(y_{n+1} - y)] k_1 + \left\{ \frac{q_\beta}{\rho^2} [(y_{n+1} - y)^2] + \right. \\ + [q_s \cos^2 \alpha] \Big\} k_2 - \left\{ \frac{q_\beta}{\rho^2} [(y_{n+1} - y) (x_{n+1} - x)] + \right. \\ + [q_s \cos \alpha \sin \alpha] \Big\} k_3 + f'_x &= 0; \\ \frac{q_\beta}{\rho} [(x_{n+1} - x)] k_1 - \left\{ \frac{q_\beta}{\rho^2} [(y_{n+1} - y) (y_{n+1} - x)] + \right. \\ + [q_s \cos \alpha \sin \alpha] \Big\} k_2 + \left\{ \frac{q_\beta}{\rho^2} [(x_{n+1} - x)^2] + \right. \\ + [q_s \sin^2 \alpha] \Big\} k_3 + f'_y &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV. 1.54})$$

Здесь q_s и q_β — обратные веса измеренных углов и линий.

Поправки в измеренные углы и линии находят из выражений

$$v_{\beta_i} = q_\beta \left\{ k_1 - \frac{1}{2} (y_{n+1} - y_i) k_2 + \frac{1}{\rho} (x_{n+1} - x_i) k_3 \right\}; \quad (\text{IV. 1.55})$$

$$v_{s_i} = q_s (\cos \alpha_i k_2 + \sin \alpha_i k_3). \quad (\text{IV. 1.56})$$

* При различных способах привязки, а также в ходах с промежуточным азимутом r может быть от двух до четырех.

Поправки в дирекционные углы вычисляют по формуле

$$v_{\alpha_i} = \sum_1^i v_{\beta}. \quad (\text{IV.1.57})$$

Уравненные углы, дирекционные углы и линии находят путем введения поправок v_{β} , v_{α} , v_s в значения β , α , s .

Уравненные приращения координат находят по уравненным дирекционным углам и линиям, заключительным контролем при этом являются равенства

$$[\Delta x_{\text{yp}}] = x_{\text{к}} - x_{\text{н}}; \quad [\Delta y_{\text{yp}}] = y_{\text{к}} - y_{\text{н}}. \quad (\text{IV.1.58})$$

Уравненные Δx и Δy можно получить другим путем, вычислив поправки $v_{\Delta x}$ и $v_{\Delta y}$ по дифференциальным формулам поправок в приращения координат,

$$\left. \begin{aligned} v_{\Delta x_i} &= \cos \alpha_i v_{s_i} - \Delta y_i \frac{v_{\alpha_i}}{\rho}; \\ v_{\Delta y_i} &= \sin \alpha_i v_{s_i} + \Delta x_i \frac{v_{\alpha_i}}{\rho} \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.1.59})$$

и введя их в соответствующие вычисленные приращения. В этом случае контролем будут равенства

$$[v_{\Delta x}] = -f'_x; \quad [v_{\Delta y}] = -f'_y. \quad (\text{IV.1.60})$$

Первый путь перед вторым имеет то преимущество, что позволяет проконтролировать вычисление невязок f'_x и f'_y .

Уравненные координаты получают по уравненным приращениям.

Для оценки точности уравненных значений линий, углов, дирекционных углов, абсцисс и ординат вычисляют соответствующие средние квадратические ошибки m_{F_i} по формуле

$$m_{F_i} = \mu \sqrt{\frac{1}{P_{F_i}}}, \quad (\text{IV.1.61})$$

где μ — средняя квадратическая ошибка единицы веса; P_{F_i} — вес соответствующего уравненного элемента.

Величину μ определяют по формуле

$$\mu = \sqrt{\frac{[p_{\beta} v_{\beta}^2] + [p_s v_s^2]}{r}}, \quad (\text{IV.1.62})$$

где p_{β} , p_s — веса измеренных углов и линий.

Функции для уравненных значений линий, углов, дирекционных углов, абсцисс и ординат имеют вид

$$F_{s_i} = s_{0,i} + v_{s_i}; \quad (\text{IV.1.63})$$

$$F_{\beta_i} = \beta_{0,i} + v_{\beta_i}; \quad (\text{IV.1.64})$$

$$F_{\alpha_i} = \alpha_{0,i} + [\beta]_1^i; \quad (\text{IV.1.65})$$

Наименование элемента	Угол β_i	Дирекционный угол α_i	Линия s_i	Абсцисса x_{i+1}	Ордината y_{i+1}
$[qFF]$	q_β	iq_β	q_{s_i}	$\frac{+q_\beta}{\rho^2} [(y_{i+1}-y)^2]_i^i + [q_s \cos^2 \alpha]_i^i$	$\frac{+q_\beta}{\rho^2} [(x_{i+1}-x)^2]_i^i + [q_s \sin^2 \alpha]_i^i$
$[qaF]$	q_β	iq_β	0	$\frac{-q_\beta}{\rho} [(y_{i+1}-y)]_i^i$	$\frac{+q_\beta}{\rho} [(x_{i+1}-x)]_i^i$
$[qbF]$	$\frac{+q_\beta}{\rho} (y_{n+1}-y_i)$	$\frac{-q_\beta}{\rho} [(y_{n+1}-y)-y]_i^i$	$q_{s_i} \cos \alpha_i$	$\frac{+q_\beta}{\rho^2} [(y_{n+1}-y)(y_{i+1}-y)]_i^i + [q_s \cos^2 \alpha]_i^i$	$\frac{-q_\beta}{\rho^2} [(y_{n+1}-y) \times (x_{i+1}-x)]_i^i + [q_s \cos \alpha \sin \alpha]_i^i$
$[qcF]$	$\frac{+q_\beta}{\rho} (x_{n+1}-x_i)$	$\frac{+q_\beta}{\rho} [(x_{n+1}-x)-x]_i^i$	$q_{s_i} \sin \alpha_i$	$\frac{-q_\beta}{\rho^2} [(x_{n+1}-x)(y_{i+1}-y)]_i^i + [q_s \sin \alpha \cos \alpha]_i^i$	$\frac{+q_\beta}{\rho^2} [(x_{n+1}-x) \times (x_{i+1}-x)]_i^i + [q_s \sin^2 \alpha]_i^i$

$$F_{x_i} = x_{0,i} + [\cos \alpha v_s]_1^i - \frac{1}{\rho} [(y_{n+1} - y) v_\beta]_1^i; \quad (\text{IV.1.66})$$

$$F_{y_i} = y_{0,i} + [\sin \alpha v_s]_1^i + \frac{1}{\rho} [(x_{n+1} - x) v_\beta]_1^i, \quad (\text{IV.1.67})$$

где $s_0, \beta_0, \alpha_0, x_0, y_0$ — начальное значение функции, полученное по измеренным значениям углов и линий.

Обратный вес функции уравненного элемента в общих обозначениях будет определяться выражением

$$\frac{1}{P_{F_i}} = [qFF \cdot r] = [qFF] - \frac{[qaF]^2}{[qaa]} - \frac{[gbF \cdot 1]^2}{[qbb \cdot 1]} - \frac{[qcF \cdot 2]^2}{[qcc \cdot 2]}. \quad (\text{IV.1.68})$$

Вычисления по формуле (IV.1.68) выполняют в дополнительных столбцах одновременно с решением нормальных уравнений коррелат (при решении их способом последовательного исключения неизвестных). Выражения для сумм $[qaF]$, $[qbF]$, $[qcF]$ и $[qFF]$ для различных элементов представлены в табл. 20.

Полную оценку точности всех уравненных элементов из-за громоздкости вычислений обычно не производят, ограничиваясь вычислением средних квадратических ошибок дирекционных углов и координат для наиболее слабого места хода — примерно его середины.

IV.1.1.17. Веса измеренных величин при уравнивании различных видов полигонометрии

Веса измеренных углов и линий в ходе в общем случае выражаются формулами

$$p_\beta = \frac{\mu^2}{m_\beta^2}; \quad p_{s_i} = \frac{\mu^2}{m_{s_i}^2}. \quad (\text{IV.1.69})$$

Целесообразно подбирая величину μ , можно получить формулы для весов измеренных углов и линий при уравнивании различных видов полигонометрии.

Светодальномерная полигонометрия. При $\mu = m_\beta$

$$p_\beta = 1; \quad p_{s_i} = \frac{m_\beta^2}{m_{s_i}^2}.$$

При незначительных отклонениях линий от их средней величины можно принять $p_s = \frac{m_\beta^2}{m_{s_{\text{ср}}}^2} = \text{const.}$ Для светодальномеров с постоянной m_s

$$p_s = \frac{m_\beta^2}{m_s^2}.$$

Полигонометрия с измерением линий инварными проволоками. При $\mu = \mu_0$

$$p_\beta = \frac{\mu_0^2}{m_\beta^2}; \quad p_{s_i} = \frac{1}{s_i}.$$

Дальномерная полигонометрия. Формулы для p_β и p_{s_i} при измерении линий дальномерами как с переменным, так и с постоянным параллактическим углом (принимая $\mu = m_\beta$) можно записать в виде

$$p_\beta = 1, \quad p_{s_i} = \frac{m_\beta^2 T^2}{s_i^2},$$

где $1/T$ — точность дальномера. В дальномере с постоянным параллактическим углом $1/T$ равна относительной средней квадратической ошибке отсчитывания по рейке m_i/l , в дальномере с переменным параллактическим углом $1/T$ равна относительной средней квадратической ошибке измерения параллактического угла m_β/β' . Величину $1/T$ определяют путем полевых исследований.

Короткобазисная параллактическая полигонометрия. В полигонометрии с измерением линий s_i построением k_i простых звеньев типа I-а формулы для p_β и p_{s_i} при $\mu = m_\beta$ примут вид

$$p_\beta = 1, \quad p_{s_i} = \frac{m_\beta^2 \alpha_i^2}{m_\alpha^2 k_i s_{k_i}}.$$

IV.1.1.18. Уравнивание двухгрупповым способом хода любой формы, опирающегося на исходные пункты и направления

Три условных уравнения поправок (IV.1.53) делят на две группы: в первую группу относят условное уравнение поправок дирекционных углов, во вторую — условные уравнения поправок абсцисс и ординат. Решая первое уравнение, находят первичные поправки в углы

$$v'_\beta = -\frac{f_\beta}{n+1}. \quad (IV.1.70)$$

По исправленным за первичную поправку углам находят невязки f_x и f_y — условные уравнений второй группы.

Далее переносят начало координат в центр тяжести вершин хода с координатами

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} x'}{n+1}; \quad y_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} y'}{n+1}, \quad (IV.1.71)$$

где x' , y' — условные координаты пунктов хода.

Определяют относительно нового начала центральные координаты ξ и η :

$$\xi_i = x'_i - x_0, \quad \eta_i = y'_i - y_0. \quad (IV.1.72)$$

За счет свойства центральных координат

$$[\xi] = 0, \quad [\eta] = 0 \quad (IV.1.73)$$

преобразуются коэффициенты условных уравнений второй группы, которые примут вид

$$\left. \begin{aligned} [\cos \alpha v_s] + \frac{1}{\rho} [\eta v''_{\beta}] + f_x &= 0; \\ [\sin \alpha v_s] - \frac{1}{\rho} [\xi v''_{\beta}] + f_y &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (IV.1.74)$$

где v''_{β} — вторичная поправка в измеренные углы.

По условным уравнениям (IV.1.74) составляют два нормальных уравнения коррелят, коэффициенты которых обозначают буквами A, B, C :

$$\left. \begin{aligned} Ak_2 + Ck_3 + f_x &= 0; \\ Ck_2 + Bk_3 + f_y &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (IV.1.75)$$

где

$$A = \frac{q_{\beta}}{\rho^2} [\eta^2] + [q_s \cos^2 \alpha];$$

$$C = -\frac{q_{\beta}}{\rho^2} [\eta \xi] + [q_s \cos \alpha \sin \alpha];$$

$$B = \frac{q_{\beta}}{\rho^2} [\xi^2] + [q_s \sin^2 \alpha].$$

Решив уравнения (IV.1.75), получают корреляты k_2 и k_3 , а через них — вторичные поправки в углы и поправки в линии:

$$\left. \begin{aligned} v''_{\beta_i} &= \frac{q_{\beta}}{\rho} (\eta_i k_2 - \xi_i k_3); \\ v_{s_i} &= q_{s_i} (\cos \alpha_i k_2 + \sin \alpha_i k_3). \end{aligned} \right\} \quad (IV.1.76)$$

Поправки в дирекционные углы вычисляют по поправкам v''_{β} по формуле (IV.1.70).

Уравненные значения углов, дирекционных углов, линий и координат находят теми же путями, что и в коррелятном способе.

Формула для средней квадратической ошибки единицы веса μ в этом способе примет вид

$$\mu = \sqrt{\frac{[p_{\beta} v'^2_{\beta}] + [p_{\beta} v''^2_{\beta}] + [p_s v_s^2]}{r}}. \quad (IV.1.77)$$

Составив для оценки точности уравненных элементов хода функции вида (IV.1.63) — (IV.1.67), определяют обратные веса $\frac{1}{P_F}$ из выражения

$$\begin{aligned} \frac{1}{P_F} &= [qFF] - \frac{[qaF]^2}{q_{\beta}(n+1)} - \frac{[qbF]^2}{A} - \\ &\quad - \frac{\left([qcF] - \frac{C}{A} [qbF] \right)^2}{B - \frac{C^2}{A}}. \end{aligned} \quad (IV.1.78)$$

ТАБЛИЦА 21

Наименование элементов	Угол β_i	Дирекционный угол α_i	Линия s_i	Абсцисса x_{i+1}	Ордината y_{i+1}
$[qFF]$	q_β	iq_β	q_{s_i}	$\frac{q_\beta}{\rho^2} [(y_{i+1}-y)^2]_1^i + [q_s \cos^2 \alpha]_1^i$	$\frac{q_\beta}{\rho^2} [(x_{i+1}-x)^2]_1^i + [q_s \sin^2 \alpha]_1^i$
$[qaF]$	q_β	iq_β	0	$-\frac{q_\beta}{\rho} [(y_{i+1}-y)]_1^i$	$-\frac{q_\beta}{\rho} [(x_{i+1}-x)]_1^i$
$[qbf]$	$\frac{+q_\beta}{\rho} \eta_i$	$\frac{+q_\beta}{\rho} [\eta]_1^i$	$q_{s_i} \cos \alpha_i$	$-\frac{q_\beta}{\rho^2} [(y_{i+1}-y) \eta]_1^i + [q_s \cos^2 \alpha]_1^i$	$+\frac{q_\beta}{\rho^2} [(x_{i+1}-x) \eta]_1^i + [q_s \sin \alpha \cos \alpha]_1^i$
$[qcf]$	$\frac{-q_\beta}{\rho} \xi_i$	$\frac{-q_\beta}{\rho} [\xi]_1^i$	$q_{s_i} \sin \alpha_i$	$+\frac{q_\beta}{\rho^2} [(y_{i+1}-y) \xi]_1^i + [q_s \cos \alpha \sin \alpha]_1^i$	$-\frac{q_\beta}{\rho^2} [(x_{i+1}-x) \xi]_1^i + [q_s \sin^2 \alpha]_1^i$

Суммы $[qFF]$, $[qaF]$, $[qbF]$ и $[qeF]$ для различных элементов представлены в табл. 21.

Среднюю квадратическую ошибку уравненных элементов вычисляют по формуле (IV.1.61).

IV.1.1.19. Уравнивание азимутального хода любой формы

Если известны из наблюдений дирекционные углы всех сторон хода, то условных уравнений поправок будет два (абсцисс и ординат) и они будут иметь вид

$$[\cos \alpha v_s] - \frac{1}{\rho} [\Delta y v_\alpha] + f_x = 0;$$

$$[\sin \alpha v_s] + \frac{1}{\rho} [\Delta x v_\alpha] + f_y = 0.$$

Нормальные уравнения коррелат, полученные по условным уравнениям поправок, примут вид

$$\left\{ [q_s \cos^2 \alpha] + \frac{1}{\rho^2} [q_\alpha \Delta y^2] \right\} k_1 + \left\{ [q_s \sin \alpha \cos \alpha] - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{\rho^2} [q_\alpha \Delta x \Delta y] \right\} k_2 + f_x = 0,$$

$$\left\{ [q_s \sin \alpha \cos \alpha] - \frac{1}{\rho^2} [q_\alpha \Delta x \Delta y] \right\} k_1 + \left\{ [q_s \sin^2 \alpha] + \right.$$

$$\left. \frac{1}{\rho^2} [q_\alpha \Delta x^2] \right\} k_2 + f_y = 0,$$

где $q_\alpha = m_\alpha^2 / \mu^2$.

Поправки v_{α_i} и v_{s_i} находят по формулам

$$v_{\alpha_i} = - \frac{q_\alpha}{\rho} (\Delta y_i k_1 - \Delta x_i k_2);$$

$$v_{s_i} = q_{s_i} (\cos \alpha_i k_1 + \sin \alpha_i k_2).$$

IV.1.1.20. Уравнивание хода вытянутой формы, опирающегося на исходные пункты и направления

После совмещения оси абсцисс с направлением замыкающей условные уравнения поправок (IV.1.74) абсцисс и ординат примут вид

$$\left. \begin{aligned} [v_s] + t &= 0; \\ - \frac{1}{\rho} [\xi' v_\beta] + u &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (IV.1.79)$$

Два нормальных уравнения коррелат, составленных по уравнениям (IV.1.79), разделятся на две самостоятельные группы:

$$[q_s] k_2 + t = 0;$$

$$\frac{q_\beta}{\rho^2} [\xi'^2] k_3 + u = 0.$$

В этом случае будем иметь трехгрупповое уравнивание хода, при котором, не составляя нормальных уравнений коррелат, можно определить непосредственно поправки v''_{β_i} и v_{s_i} по формулам

$$v''_{\beta_i} = \rho \frac{u}{[\xi'^2]} \xi'_i; \quad v_{s_i} = -\frac{t}{[q_s]} q_{s_i}. \quad (\text{IV.1.80})$$

В случае когда вытянутый полигонометрический ход имеет линии примерно равной длины, формулы поправок v''_{β_i} и v_{α_i} примут вид

$$v''_{\beta_i} = -\frac{u\rho}{[s]} \frac{6(n-2i+2)}{(n+1)(n+2)}, \quad v_{\alpha_i} = -\frac{u\rho}{[s]} \frac{6i(n-i+1)}{(n+1)(n+2)}.$$

При оценке точности уравненных элементов хода обратный вес их находят из выражения

$$\frac{1}{P_F} = [qFF] - \frac{[qaF]^2}{q_\beta(n+1)} - \frac{[qbF]^2}{A} - \frac{[qcF]^2}{B}, \quad (\text{IV.1.81})$$

где $A = [q_s]$, $B = \frac{q_\beta}{\rho^2} [\xi'^2]$.

Величины $[qFF]$, $[qaF]$, $[qbF]$ и $[qcF]$ для различных элементов будут иметь вид, представленный в табл. 22.

Формулы для средних квадратических ошибок уравненных элементов вытянутого хода с примерно равными сторонами будут следующие:

$$\begin{aligned} m_{\beta_i} &= m_\beta \sqrt{1 - \frac{1}{n+1} - \frac{3(n-2i+2)^2}{n(n+1)(n+2)}}; \\ m_{\alpha_i} &= m_\beta \sqrt{1 - \frac{i^2}{n+1} - \frac{3i^2(n-i+1)^2}{n(n+1)(n+2)}}; \\ m_{s_i} &= m_s \sqrt{1 - \frac{1}{n}}; \\ m_{t_i} &= m_s \sqrt{i - \frac{i^2}{n}}; \\ m_{u_i} &= \frac{m_\beta}{\rho} s \sqrt{\frac{i(i+1)(2i+1)}{6} - \frac{i^2(i+1)^2}{4(n+1)} - \frac{i^2(i+1)^2(3n-2i+2)^2}{12n(n+1)(n+2)}}. \end{aligned}$$

Здесь m_β и m_s — средние квадратические ошибки измеренных углов и линий.

IV.1.1.21. Уравнивание параметрическим способом хода, опирающегося на исходные пункты и направления

В качестве необходимых неизвестных (параметров) выбираются координаты определяемых пунктов, которые представляются в виде

$$x_i = x_{o,i} + \delta x_i; \quad y_i = y_{o,i} + \delta y_i, \quad (\text{IV.1.82})$$

где $x_{o,i}$, $y_{o,i}$ — приближенные значения координат; δx_i , δy_i — искоемые поправки,

ТАБЛИЦА 22

Наименование элемента	Угол β_i	Дирекционный угол α_i	Линия s_i	Абсцисса x_{i+1}	Ордината y_{i+1}
$[qFF]$	q_β	iq_β	q_s	$\frac{q_\beta}{\rho^2} [(y_{i+1}-y)^2]_1^i +$ $+ [q_s \cos^2 \alpha]_1^i$	$\frac{q_\beta}{\rho^2} [(x_{i+1}-x)^2]_1^i +$ $+ [q_s \sin^2 \alpha]_1^i$
$[qaF]$	q_β	iq_β	0	$-\frac{q_\beta}{\rho} [(y_{i+1}-y)]_1^i$	$+\frac{q_\beta}{\rho} [(x_{i+1}-x)]_1^i$
$[qbF]$	0	0	q_s	$[q_s \cos^2 \alpha]_1^i$	$[q_s \sin^2 \alpha]_1^i$
$[qcF]$	$-\frac{q_\beta}{\rho} \xi'_i$	$-\frac{q_\beta}{\rho} [\xi']_1^i$	0	$\frac{q_\beta}{\rho^2} [(y_{i+1}-y) \times \xi']_1^i$	$-\frac{q_\beta}{\rho^2} [(x_{i+1}-x) \xi']_1^i$

Параметрические уравнения поправок составляются для всех измеренных углов и для всех измеренных линий:

$$v_{\beta_k} = - \left\{ \frac{(a)_{kj}}{s_{kj}} - \frac{(a)_{ki}}{s_{ki}} \right\} \delta x_k - \left\{ \frac{(b)_{kj}}{s_{kj}} - \frac{(b)_{ki}}{s_{ki}} \right\} \delta y_k + \\ + \frac{(a)_{kj}}{s_{kj}} \delta x_j + \frac{(b)_{kj}}{s_{kj}} \delta y_j - \frac{(a)_{ki}}{s_{ki}} \delta x_i - \frac{(b)_{ki}}{s_{ki}} \delta y_i + l_{\beta_k}, \quad (\text{IV.1.83})$$

$$v_{s_{ik}} = - \cos \alpha_{o,ik} \delta x_i - \sin \alpha_{o,ik} \delta y_i + \cos \alpha_{o,ik} \times \\ \times \delta x_k + \sin \alpha_{o,ik} \delta y_k + l_{s_{ik}}, \quad (\text{IV.1.84})$$

где $(a) = -\rho \sin \alpha$; $(b) = \rho \cos \alpha$; индексы i и j обозначают левое и правое направления в угле с номером k .

Свободные члены l_{β_k} , $l_{s_{ik}}$ уравнений поправок вычисляют по формулам

$$l_{\beta_k} = (\alpha_{o,kj} - \alpha_{o,ki}) = \beta'_k, \\ l_{s_{ik}} = \sqrt{(x_{o,k} - x_{o,i})^2 + (y_{o,k} - y_{o,i})^2} - s'_{ik}.$$

Здесь β'_k и s'_{ik} — измеренные значения угла и линии.

От системы уравнений поправок переходят к нормальным уравнениям, число которых равно $2n'$, где n' — число пунктов с неизвестными координатами. Дальнейшее уравнивание и оценку точно-сти выполняют по общим правилам параметрического способа.

IV.1.1.22. Строгое уравнивание полигонометрических сетей

При уравнивании сети коррелятным способом число условий, возникающих в сети, определяется формулой

$$r = 3N + (Q_1 - 1) + 2(Q_2 - 1),$$

где N — число замкнутых полигонов в сети; Q_1 — число направлений, имеющих исходные дирекционные углы; Q_2 — число пунктов с исходными координатами. Число условных уравнений дирекционных углов r_α и координат r_{xy} из общего числа r уравнений соответственно равно

$$r_\alpha = N + Q_1 - 1; \quad r_{xy} = 2N + 2(Q_2 - 1).$$

По числу условий для каждого полигона составляют условные уравнения поправок дирекционных углов и координат вида (IV.1.53).

В сети кроме указанных выше условий могут возникать еще дополнительные условия: горизонта и угла. Введение этих условий в процесс уравнивания повышает веса уравненных элементов сети.

В остальном процесс уравнивания и оценки точности сети не отличается от процесса уравнивания и оценки точности хода.

При двухгрупповом способе уравнивания сети условные уравнения поправок дирекционных углов относят к первой группе, условные уравнения поправок абсцисс и ординат — ко второй группе, центральные координаты определяют для каждого полигона отдельно.

Двухгрупповой способ выгоднее применять к уравниванию сетей с исходными дирекционными углами на узловых пунктах. В этом

случае первичные поправки в углы вычисляют по формуле (IV.1.70) для каждого хода сети, соединяющего узловый пункт с исходным или узловыми пунктами. Для этих же ходов определяют и центральные координаты.

При уравнивании сети параметрическим способом в качестве необходимых неизвестных выбирают координаты всех определяемых пунктов сети и уравнения поправок вида (IV.1.83), (IV.1.84) составляют также для всех измеренных в сети углов и линий.

В коррелятном способе с дополнительными неизвестными неизвестными являются поправки дирекционных углов узловых направлений $\delta\alpha$ и координат узловых пунктов δx и δy .

В случае предварительно исправленных углов условные уравнения поправок для каждого хода сети будут иметь вид

$$\begin{aligned} [v_\beta''] + \delta\alpha''_{\text{нач}} - \delta\alpha''_{\text{кон}} &= 0; \\ [\cos \alpha_s] + \frac{1}{\rho} [\eta v_\beta''] + \frac{1}{\rho} \eta_{\text{нач}} \delta\alpha''_{\text{нач}} - \\ - \frac{1}{\rho} \eta_{\text{кон}} \delta\alpha''_{\text{кон}} + \delta x_{\text{нач}} - \delta x_{\text{кон}} + f_x &= 0; \\ [\sin \alpha_s] - \frac{1}{\rho} [\xi v_\beta''] - \frac{1}{\rho} \xi_{\text{нач}} \delta\alpha''_{\text{нач}} + \\ + \frac{1}{\rho} \xi_{\text{кон}} \delta\alpha''_{\text{кон}} - \delta y_{\text{нач}} + \delta y_{\text{кон}} + f_y &= 0. \end{aligned}$$

Нормальные уравнения коррелят составляются для ходов и узлов и с коэффициентами в общих обозначениях имеют вид: для ходов (назовем их первой группой)

$$\begin{aligned} [qaa] k_{1j} + [qab] k_{2j} + [qac] k_{3j} + \alpha_1 \delta\alpha''_{1,\text{нач}} + \\ + \beta_1 \delta\alpha''_{1,\text{кон}} + \dots + \theta_1 \delta y_{m,\text{кон}} &= 0; \\ [qab] k_{1j} + [qbb] k_{2j} + [qbc] k_{3j} + \alpha_2 \delta\alpha''_{1,\text{нач}} + \\ + \beta_2 \delta\alpha''_{1,\text{кон}} + \dots + \theta_2 \delta y_{m,\text{кон}} &= 0; \\ [qac] k_{1j} + [qbc] k_{2j} + [qcc] k_{3j} + \alpha_3 \delta\alpha''_{1,\text{нач}} + \\ + \beta_3 \delta\alpha''_{1,\text{кон}} + \dots + \theta_3 \delta y_{m,\text{кон}} &= 0; \end{aligned}$$

для узлов (назовем их второй группой)

$$\begin{aligned} \alpha_1 k_{1j} + \alpha_2 k_{2j} + \alpha_3 k_{3j} &= 0 \\ \beta_1 k_{1j} + \beta_2 k_{2j} + \beta_3 k_{3j} &= 0 \\ \theta_1 k_{1j} + \theta_2 k_{2j} + \theta_3 k_{3j} &= 0. \end{aligned}$$

Решая эти уравнения, находят все дополнительные неизвестные, а затем и все корреляты.

Во всех способах раздельного уравнивания сначала уравнивают углы сети, а затем по уравненным углам и измеренным длинам линий вычисляют приращения координат и уравнивают отдельно приращения абсцисс и ординат.

Способ узлов В. В. Попова. При таком уравнивании составляют схематический чертеж сети. Узловые и исходные пункты изображают кружками диаметром около 3 см, причем последние двойными кружками. В кружках на исходных пунктах выписывают названия пунктов или их номера, значения исходных дирекционных углов, в кружках на узловых пунктах — номера, приближенные значения дирекционных углов, полученные от ближайших исходных пунктов. На сторонах хода располагается небольшой прямоугольник, в котором записывают: номер хода, сумму углов по ходу $[\beta]$, число углов $(n+1)$, вес, вычисленный как величина, обратно пропорциональная числу углов.

Затем подсчитывают по ходам

$$v_i = \alpha_n + [\beta]_1^{n+1} - 180^\circ (n+1) - \alpha_k$$

и произведение $v_i p_i$, которое с его знаком подписывают в конце соответствующего хода.

Для каждой узловой точки подсчитывают $P=[p]$, $V=[pv]$ по всем примыкающим к данной точке ходам. Если ход идет к точке, то произведение берется со своим знаком. Эти величины записывают внутри соответствующего кружка.

Для каждой узловой точки составляют нормальное уравнение. Неизвестными в нем являются поправки к принятым приближенным значениям узловых дирекционных углов. Коэффициент при поправке, номер которой совпадает с номером уравнения, будет всегда положителен и равен величине P для узловой точки.

Коэффициенты при остальных поправках будут отрицательными и равными весам p ходов, соединяющих соответствующую узловую точку с той, для которой составляют уравнение. Если такого хода нет, то коэффициент равен нулю.

Свободными членами в уравнениях будут величины V для соответствующих узловых точек, взятые с обратными знаками.

Затем решают систему нормальных уравнений. Полученные поправки прибавляют к полученным приближенным значениям и находят уравненные значения узловых дирекционных углов. Вычисления продвигают на той же схеме в соответствующих кружках.

Уравняв углы во всех ходах, вычисляют дирекционные углы сторон и приращения координат. Затем подсчитывают суммы приращений координат по ходам, находят их веса, вычисляют приближенные значения координат узловых точек и невязки ходов. Все величины выписывают на схематический чертеж и составляют нормальные уравнения точно так же, как это делалось при уравнивании углов.

Решив нормальные уравнения, находят поправки к приближенным значениям координат и окончательные значения координат.

Способ последовательных приближений. Способ узлов В. В. Попова получил большое распространение в варианте с решением составляемых нормальных уравнений способом последовательных приближений. Уравнивание выполняют в таком порядке. Для узловых дирекционных углов получают первое приближение, вычислив его как среднее весовое из найденных от исходных дирекционных углов значений или передав от одного исходного дирекционного угла.

Для каждого узлового дирекционного угла находят последовательно вторые приближения как весовые средние из всех полученных значений и от исходных и от смежных пунктов, для последних принимают значения, найденные из первых приближений или из вторых, если они были уже получены.

Затем для всех узловых дирекционных углов находят последовательно третьи, четвертые и т. д. приближения и, убедившись, что последующие приближения не вносят изменений, больших чем точность вычислений, прекращают вычисления. Найденные из последнего приближения значения принимают за окончательные и подсчитывают с ними угловые невязки. Если невязки допустимы, их распределяют с противоположным знаком поровну во все углы хода, после чего вычисляют дирекционные углы сторон ходов и приращения координат.

Далее, подсчитав суммы приращений координат для каждого хода, вычисляют раздельно способом последовательных приближений уравненные значения абсцисс и ординат узловых точек, аналогично тому, как это делали для дирекционных углов. Имея окончательные значения координат узловых точек, уравнивают приращения координат по каждому ходу, а затем вычисляют координаты всех остальных точек.

Оценка точности при раздельном уравнивании. Ошибку единицы веса для уравненного элемента определяют по формулам

$$\mu_{\alpha} = \sqrt{\frac{[p_{\alpha} v_{\alpha}^2]}{n-k}}; \quad \mu_x = \sqrt{\frac{[p_x v_x^2]}{n-k}}; \quad \mu_y = \sqrt{\frac{[p_y v_y^2]}{n-k}},$$

где $p_{\alpha_i} = \frac{c}{n_i + 1}$; $p_{x_i} = p_{y_i} = \frac{c}{[s]_i}$. При более строгом подсчете весов при уравнивании необходимо для p_x и p_y пользоваться формулами

$$p_{x_i} = p_{y_i} = \frac{c}{M_i^2},$$

где M_i — средняя квадратическая ошибка положения конечной точки хода.

Оценка точности уравненных элементов производится по формулам

$$M_{\alpha} = \frac{\mu_{\alpha}}{\sqrt{P_{\alpha}}}; \quad M_x = \frac{\mu_x}{\sqrt{P_x}}; \quad M_y = \frac{\mu_y}{\sqrt{P_y}}; \quad M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}.$$

Для получения весов P_{α} , P_x , P_y оцениваемых элементов можно использовать способ эквивалентной замены (см. раздел «Нивелирование»).

Е. ПРИВЯЗОЧНЫЕ РАБОТЫ

IV.1.1.24. Снесение координат. Засечки

Снесение координат с вершины знака на землю (на пункт T_1 поставить прибор нельзя, рис. 62).

Определить координаты пункта $P(x_{P_y P})$, если известны координаты пунктов T_1, T_2, T_2 , измерены углы $\alpha_1, \beta_1; \alpha_2, \beta_2; \gamma_1, \gamma_2$ и

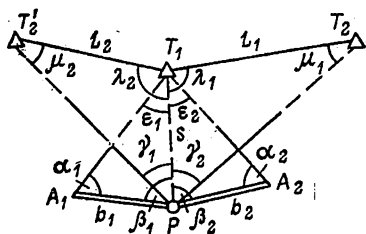


Рис. 62. Передача координат с вершины знака на землю

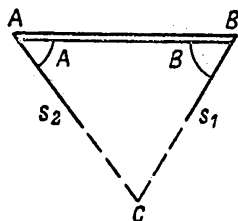


Рис. 63. Прямая засечка

базисы b_1, b_2 . Обозначим: длина стороны $T_1P=s$, дирекционный угол ее $(T_1P)=\varphi$.

Формулы:

$$1. T_1P=s=\frac{b \sin \alpha}{\sin (\alpha+\beta)} ;$$

$$2. \operatorname{tg} (T_1T_2)=\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1} ;$$

$$3. T_1T_2=L=\frac{y_2-y_1}{\sin (T_1T_2)}=\frac{x_2-x_1}{\cos (T_1T_2)} ;$$

$$4. \sin \mu=\frac{s \sin \gamma}{L} ;$$

$$5. \lambda=180^{\circ}-(\gamma+\mu) ;$$

$$6. (T_1P)=\varphi=(T_1T_2) \pm \lambda ;$$

$$7. x_P=x_1+s \cos \varphi ; \quad y_P=y_1+s \sin \varphi .$$

Контроль: $\operatorname{tg} (PT_2)=\frac{y_2-y_P}{x_2-x_P} ; \quad \mu=(T_1T_2)-(PT_2) .$

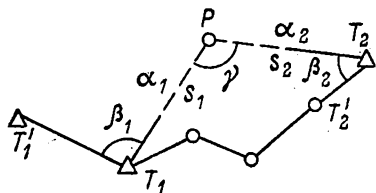


Рис. 64. Прямая засечка (при вычислении по формулам Гаусса)

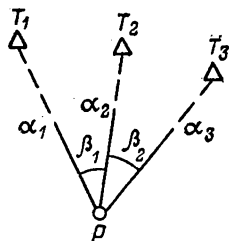


Рис. 65. Обратная засечка

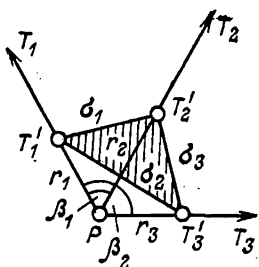


Рис. 66. Обращенный треугольник

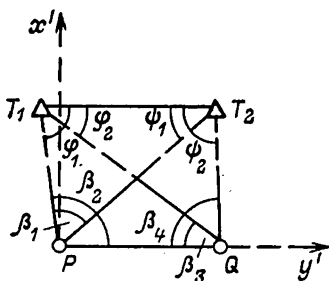


Рис. 67. Определение пары точек

Оценка точности. Средняя квадратическая ошибка стороны из одного треугольника при $m_\alpha = m_\beta$

$$m_s^2 = \left(\frac{m_b}{b}\right)^2 s^2 + \{(\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \epsilon)^2 + \operatorname{stg}^2 \epsilon\} \frac{m_\beta^2}{\rho^2} s^2.$$

пред $(s_1 - s_2) = 2 \sqrt{m_{s_1}^2 + m_{s_2}^2}.$

Средняя квадратическая ошибка стороны $s = \frac{s_1 + s_2}{2}$ составит

$$M_s = \frac{1}{2} \sqrt{(m_{s_1}^2 + m_{s_2}^2)}.$$

Дирекционный угол $(T_1P) = \varphi$ будет получен дважды: при использовании координат T_2 и T_2' . Примем $m_{\varphi_1} = m_{\varphi_2} = m_\varphi$, тогда

пред $(\varphi_1 - \varphi_2) = 2m_\varphi \sqrt{2}; \quad M_\varphi = \frac{m_\varphi}{\sqrt{2}}.$

Ошибка положения пункта P_2

$$M_P^2 = M_s^2 + \frac{M_\varphi^2}{\rho^2} s^2.$$

Если исходный пункт, к которому производится привязка, доступен для угловых, но не доступен для линейных измерений, то величина примычного угла λ получается путем непосредственного измерения и задача сводится к вычислению неприступного расстояния T_1P , которое определяется из решения двух треугольников — PA_1T_1 и PA_2T_1 . При привязке этим способом ходов повышенной точности можно рекомендовать уравнивать углы треугольников с учетом базисного условия, применяя метод двух групп.

Прямая однократная засечка (рис. 63). Определить координаты пункта $C(x_{сус})$, если известны координаты пунктов $A(x_A, y_A)$ и $B(x_B, y_B)$ и измерены углы A и B .

$$\begin{aligned} 1. \operatorname{tg}(AB) &= \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A}; \quad a = (x_B - x_A) \sec(AB) = \\ &= (y_B - y_A) \operatorname{cosec}(AB); \end{aligned}$$

$$2. AC = \frac{a}{\sin(A+B)} \sin B = a \operatorname{cosec}(A+B) \sin B;$$

$$3. BC = \frac{a}{\sin(A+B)} \sin A = a \operatorname{cosec}(A+B) \sin A;$$

$$4. (AC) = (AB) + < A; \quad (BC) = (BA) - < B;$$

$$5. \Delta x_{AC} = AC \cos(AC); \quad \Delta y_{AC} = AC \sin(AC);$$

$$6. \Delta x_{BC} = BC \cos(BC); \quad \Delta y_{BC} = BC \sin(BC);$$

$$7. x_C = x_A + \Delta x_{AC} = x_B + \Delta x_{BC}; \quad y_C = y_A + \Delta y_{AC} = y_B + \Delta y_{BC}.$$

Формулы Ф. Гаусса (рис. 64). Определить координаты пункта $P(x_P y_P)$, если известны координаты пунктов $T_1(x_1 y_1)$ и $T_2(x_2 y_2)$ и измерены углы β_1 и β_2 .

$$1. (T_1 P) = \alpha_1 = (T_1 T'_1) + \beta_1, \quad (T_2 P) = \alpha_2 = (T_2 T'_2) + \beta_2;$$

$$2. x_P = \frac{x_1 \operatorname{tg} \alpha_1 - x_2 \operatorname{tg} \alpha_2 + (y_2 - y_1)}{\operatorname{tg} \alpha_1 - \operatorname{tg} \alpha_2};$$

$$3. y_P = y_1 + (x_P - x_1) \operatorname{tg} \alpha_1; \quad y_P = y_2 + (x_P - x_2) \operatorname{tg} \alpha_2.$$

Для удобства можно использовать формулы вида

$$x_P - x_1 = \frac{(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1) \operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1 - \operatorname{tg} \alpha_2};$$

$$x_P - x_2 = \frac{(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1) \operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_1 - \operatorname{tg} \alpha_2}.$$

Среднюю квадратическую ошибку в положении пунктов, полученного прямой однократной засечкой, вычисляют по формуле

$$M = \frac{m_\beta \sqrt{s_1^2 + s_2^2}}{\rho \sin(\alpha_1 - \alpha_2)} = \frac{m_\beta}{\rho \sin \gamma} \sqrt{s_1^2 + s_2^2}.$$

Обратная однократная засечка (рис. 65). Определить координаты пункта $P(x_P y_P)$, если известны координаты пунктов $T_1(x_1 y_1)$; $T_2(x_2 y_2)$; $T_3(x_3 y_3)$ и измерены углы β_1 ; β_2 .

$$1. \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{(y_2 - y_1) \operatorname{ctg} \beta_1 + (y_1 - y_3) \operatorname{ctg} \beta_2 + (x_3 - x_2)}{(x_2 - x_1) \operatorname{ctg} \beta_1 + (x_1 - x_3) \operatorname{ctg} \beta_2 - (y_3 - y_2)};$$

$$2. \alpha_2 = \alpha_1 + \beta_1; \quad \alpha_3 = \alpha_1 + \beta_2;$$

$$3. x_P - x_3 = \frac{(x_1 - x_3) \operatorname{tg} \alpha_1 - (y_1 - y_3)}{\operatorname{tg} \alpha_1 - \operatorname{tg} \alpha_3};$$

$$x_P - x_1 = \frac{(x_1 - x_3) \operatorname{tg} \alpha_3 - (y_1 - y_3)}{\operatorname{tg} \alpha_1 - \operatorname{tg} \alpha_3};$$

$$4. y_P - y_3 = (x_P - x_3) \operatorname{tg} \alpha_3; \quad y_P - y_1 = (x_P - x_1) \operatorname{tg} \alpha_1.$$

Контроль:

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{y_2 - y_P}{x_2 - x_P}.$$

Полученный угол α_2 может отличаться на 180° от значения, найденного по формуле $\alpha_2 = \alpha_1 + \beta_1$. В этом случае значения α_1 и α_2 также должны быть изменены на 180° . Средняя квадратическая ошибка положения точки, определяемой обратной однократной засечкой, может быть получена по формуле

$$M_P = \frac{m_\beta}{2F} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}.$$

Если при определяемой точке измерение углов велось способом круговых приемов, то

$$M_P = \frac{m_{\text{напр}}}{2F} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}.$$

Величины F , σ_1 , σ_2 , представляющие соответственно площадь и две стороны, лежащие против измеренных углов β_1 и β_2 инвертного (обращенного) треугольника T_1, T_2, T_3 , берут с чертежа (рис. 66).

Для построения инвертного треугольника на направлениях, очерченных с учетом углов β_1 и β_2 из определяемой точки P на пункты T_1, T_2 и T_3 , откладывают в удобном масштабе градиенты направлений

$$r_i = \frac{\rho''}{s_i} \quad (i = 1, 2, 3)$$

и полученные точки T_1', T_2' и T_3' соединяют прямыми линиями. Величины σ_1 и σ_2 берут с чертежа. Для оценки точности надо знать m_β — среднюю квадратическую ошибку измерения углов.

Определение положения двух пунктов по двум исходным (задачи Ганзена). Координаты точек P и Q могут быть определены, если в точках P и Q измерить углы, образуемые направлениями на два исходных пункта T_1 и T_2 и соответственно на точки Q и P (рис. 67). Для решения задачи приведем способ условных координат. Примем точку P за начало условных координат $x'y'$, а направление PQ — за положительное направление оси ординат. Расстояние PQ примем условно равным 10 000,000 м. Тогда условные координаты точек P и Q будут $x_P = 0$; $y_P = 0$; $x_Q = 0$; $y_Q = 10\,000,000$ м. По видоизмененным формулам Юнга из треугольников PQT_1 и PQT_2 найдем координаты точек $T_1(x_1'y_1')$ и $T_2(x_2'y_2')$:

$$x_1' = \frac{x_P \operatorname{ctg} \beta_3 + x_Q \operatorname{ctg} \beta_2 - y_P + y_Q}{\operatorname{ctg} \beta_2 + \operatorname{ctg} \beta_3};$$

$$y_1' = \frac{y_P \operatorname{ctg} \beta_3 + y_Q \operatorname{ctg} \beta_2 + x_P - x_Q}{\operatorname{ctg} \beta_2 + \operatorname{ctg} \beta_3};$$

$$x'_2 = \frac{x'_P \operatorname{ctg} \beta_4 + x'_Q \operatorname{ctg} (\beta_2 - \beta_1) - y'_P + y'_Q}{\operatorname{ctg} (\beta_2 - \beta_1) + \operatorname{ctg} \beta_4};$$

$$y'_2 = \frac{y'_P \operatorname{ctg} \beta_4 + y'_Q \operatorname{ctg} (\beta_2 - \beta_1) + x'_P - x'_Q}{\operatorname{ctg} (\beta_2 - \beta_1) + \operatorname{ctg} \beta_4}.$$

Вычислив условный дирекционный угол $(T_1 T_2)'$, вычисляют все углы, образованные направлениями с точек T_1 и T_2 на точки P и Q :

$$\varphi_1 = (T_1 P)' - (T_1 T_2)', \quad \psi_1 = (T_2 T_1)' - (T_2 P)',$$

где

$$\angle (T_1 P)' = (PQ)' - \beta_2 + 180^\circ, \quad (T_2 P)' = (PQ)' - (\beta_2 - \beta_1) + 180^\circ.$$

Здесь $(PQ)'$ — исходный условный дирекционный угол направления PQ ; $(T_1 P)'$ и $(T_2 P)'$ — вычисленные исходные дирекционные углы направлений $T_1 P$ и $T_2 P$.

В отыскании углов при точках T_1 и T_2 и состояла цель введения условных координат. Из треугольника $T_1 T_2 P$ найдем координаты точки P :

$$x_P = \frac{x_2 \operatorname{ctg} \varphi_1 + x_1 \operatorname{ctg} \psi_1 - y_2 + y_1}{\operatorname{ctg} \varphi_1 + \operatorname{ctg} \psi_1};$$

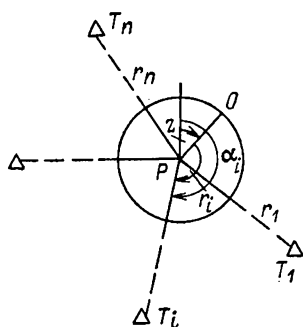
$$y_P = \frac{y_2 \operatorname{ctg} \varphi_1 + y_1 \operatorname{ctg} \psi_1 + x_2 - x_1}{\operatorname{ctg} \varphi_1 + \operatorname{ctg} \psi_1}.$$

Из треугольника $T_1 Q P$ можно найти координаты точки Q . Наибольшая точность определения координат точек P и Q будет тогда, когда образованный четырехугольник по форме близок к квадрату.

IV.1.1.25. Многократные засечки

Засечки, в которых для получения координат пункта используют избыточное число пунктов и направлений, называют многократными. Наличие избыточных измерений в многократных засечках приводит к уравнительным вычислениям, которые выполняют параметрическим способом, так как неизвестных при этом всего два — координаты x и y искомого пункта.

Обратная многократная засечка (уравнивание по направлениям). Определить координаты пункта $P(xy)$, если известны координаты не менее четырех исходных пунктов $T_1(x_1 y_1)$; $T_2(x_2 y_2)$; ...; $T_n(x_n y_n)$ и измерено не менее четырех направлений $r_1, r_2, \dots, r_n$ (рис. 68).



В качестве необходимых неизвестных выбирают координаты x, y определяемого пункта и ориентирующий угол; неизвестные представляют в виде

$$x = x_0 + \delta x;$$

$$y = y_0 + \delta y;$$

$$z = z_0 + \delta z,$$

Рис. 68. Обратная многократная засечка

где x_0, y_0, z_0 — приближенное значение выбранных неизвестных; $\delta x, \delta y, \delta z$ — искомые поправки. x_0, y_0 находят из решения обратной однократной засечки, z_0 — по формуле

$$z_0 = \frac{[\alpha_0 - r']}{n}.$$

Приближенным значениям координат соответствуют приближенные значения дирекционных углов $\alpha_{0,1}, \alpha_{0,2}, \dots, \alpha_{0,n}$.

Параметрическое уравнение поправок, например для направления i , будет иметь вид

$$v_i = a_i \delta x + b_i \delta y - \delta z + l_i. \quad (\text{IV.1.85})$$

В уравнении (IV.1.85) коэффициенты a_i, b_i и свободный член l_i равны

$$a_i = -\frac{(a)_i}{s_i}; \quad b_i = -\frac{(b)_i}{s_i}; \quad (\text{IV.1.86})$$

где $(a)_i = -\rho \sin \alpha_i$; $(b)_i = \rho \cos \alpha_i$, $l_i = \alpha_{0,i} - r'_i - z_0$.

Применив прием, исключаяющий неизвестное δz (фактически и ненужное) из уравнения (IV.1.85), приходят к уравнению поправок вида

$$A_i \delta x + B_i \delta y + l_i = v_i, \quad (\text{IV.1.87})$$

которое называют приведенным или редуцированным.

Аналогично можно получить уравнения поправок для всех имеющихся направлений от 1 до n .

В приведенных уравнениях вида (IV.1.87) коэффициенты получают по формулам

$$A_i = a_i - \frac{[a]}{n}, \quad B_i = b_i - \frac{[b]}{n}.$$

По уравнениям поправок составляют два нормальных уравнения

$$[AA] \delta x + [AB] \delta y + [Al] = 0;$$

$$[AB] \delta x + [BB] \delta y + [Bl] = 0,$$

решив которые находят $\delta x, \delta y$, а затем искомые координаты. Уравненные направления r_i получают путем прибавления найденных по формуле (IV.1.87) соответствующих поправок v_i к значениям r'_i .

Заключительным контролем уравнивания является вторичное получение r_i по формуле

$$r_i = \alpha_i - z,$$

где

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{y_i - y}{x_i - x}; \quad z = \frac{[\alpha - r]}{n}.$$

Оценку точности производят по формулам

$$m_r = \sqrt{\frac{[v^2]}{n - k}}; \quad m_x = \frac{m_r}{\sqrt{P_x}}; \quad m_y = \frac{m_r}{\sqrt{P_y}}.$$

Веса неизвестных P_x и P_y находят из выражений

$$P_x = \frac{D}{[BB]}; \quad P_y = \frac{D}{[AA]},$$

где $D = [AA][BB] - [AB]^2$.

Прямая многократная засечка. Определить координаты пункта $P(x, y)$, если известны координаты не менее трех исходных пунктов и углы β_i засечки на определяемый пункт.

Необходимые неизвестные представляют в виде суммы двух слагаемых

$$x = x_0 + \delta x; \quad y = y_0 + \delta y. \quad (\text{IV.1.88})$$

Составляют параметрические уравнения поправок вида

$$v_i = a_i \delta x + b_i \delta y + l_i, \quad (\text{IV.1.89})$$

где $i = 1, 2, \dots, n$. Коэффициенты a_i, b_i находят по формулам (IV.1.86), изменив в этих формулах знак плюс на знак минус, свободный член l_i — из разности

$$l_i = \alpha_{i,0} - \alpha'_i,$$

где $\alpha_{i,0}$ — приближенные значения дирекционных углов с исходных пунктов на определяемый; $\alpha'_i = \alpha_{\text{исх}} + \beta_i$.

Составляют нормальные уравнения

$$[aa] \delta x + [ab] \delta y + [al] = 0;$$

$$[ab] \delta x + [bb] \delta y + [bl] = 0,$$

из решения которых находят $\delta x, \delta y$, а затем по формулам (IV.1.88) — уравненные x, y . Уравненные α'_i вычисляют, прибавив к $\alpha_{i,0}$ соответствующие поправки v_i , найденные из уравнения (IV.1.89).

Заключительным контролем является вторичное получение дирекционных углов α_i из решения обратных геодезических задач по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{y - y_i}{x - x_i}.$$

Оценку точности выполняют по формулам

$$m_\beta = \sqrt{\frac{[v^2]}{n - k}}; \quad m_x = \frac{m_\beta}{\sqrt{P_x}}; \quad m_y = \frac{m_\beta}{\sqrt{P_y}},$$

где $P_x = \frac{D}{[bb]}; \quad P_y = \frac{D}{[aa]}; \quad D = [aa][bb] - [ab]^2.$

IV.1.2. Триангуляция 1 и 2 разрядов.

Съемочные сети

В. В. Баканова

IV.1.2.1. Триангуляция 1 и 2 разрядов

Триангуляция 1 и 2 разрядов развивается в открытой и горной местности, когда нецелесообразно прокладывать полигонометрию тех же разрядов, с целью сгущения государственных геодезических сетей до плотности, обеспечивающей создание съемочного обоснования топографических съемок крупного масштаба.

ТАБЛИЦА 23

Характеристика триангуляции	Разряды	
	1	2
Длина стороны треугольника, км, не более	5	3
Минимальный угол в сплошной сети, градус:	20	20
связующий в цепочке треугольников	30	30
во вставке	30	20
Число треугольников между исходными пунктами и сторонами, не более	10	10
Минимальная длина выходной стороны, км	1	1
Средняя квадратическая ошибка угла, вычисленная по невязкам в треугольниках, с	5	10
Допустимая невязка в треугольнике, с	20	40
Относительная ошибка выходной (базисной) стороны	1:50 000	1:20 000
Относительная ошибка определения длины стороны в слабом месте	1:20 000	1:10 000

В зависимости от расположения и густоты исходных пунктов (государственные геодезические сети 1—4 классов для 1 разряда и пункты триангуляции и полигонометрии 1 разряда для 2 разряда) на объекте съемки триангуляция 1 разряда развивается в виде сплошных сетей, цепочек треугольников и вставок отдельных пунктов в треугольники, образованных пунктами сетей 2—4 классов. Триангуляция 2 разряда развивается в виде сетей, отдельных пунктов или групп между пунктами сетей 2—4 классов и 1 разряда. Каждый пункт триангуляции 1 и 2 разрядов определяется из треугольников, в которых измерены все углы, или засечками не менее 3-х направлений. Сплошная сеть триангуляции 1 и 2 разрядов должна опираться не менее чем на 3 исходных геодезических пункта и не менее чем на 2 выходные стороны. Цепочка треугольников должна опираться на два исходных пункта и две выходные стороны. В качестве выходных сторон рекомендуется использовать стороны триангуляции или полигонометрии 3—4 классов и создаваемой триангуляции не короче 1 км, измеренные с точностью не ниже 1:50 000 и 1:20 000 соответственно для 1 и 2 разрядов.

Триангуляция 1 и 2 разрядов должна удовлетворять требованиям Инструкции [4], приведенным в табл. 23.

Перед созданием на местности триангуляции 1 и 2 разрядов на картах в масштабах 1:25 000 или 1:10 000 составляется проект, на котором намечаются места установки пунктов. Пункты должны располагаться на возвышенных местах, должны быть легко доступны, хорошо опознаваться на местности и обеспечивать долговременную сохранность центров и знаков, а также чтобы можно было их использовать в качестве точек съемочной сети.

Между пунктами триангуляции 1 и 2 разрядов желательно обеспечить взаимную видимость с земли. При проектировании предусматривается определение засечками важных предметов местности: вышек, колоколен, труб, мачт, шахт, высоких зданий и т. д.

Наименование параметров	Т2		Т5	
	1 разряд	2 разряд	1 разряд	2 разряд
Число приемов	3	2	4	3
Замыкание горизонта	8"	8"	0,2'	0,2'
Колебание в направлениях, полученных из разных приемов	8"	8"	0,2'	0,2'

Затем проводится рекогносцировка и закрепление пунктов.

Углы в триангуляции 1 и 2 разрядов измеряются методом круговых приемов теодолитами типа Т2 и Т5 числом приемов, предусмотренным в табл. 24 [4]. Если углы измеряются с пунктов, являющихся примычными, то в измерения нужно включать не менее одного направления исходной сети.

Теодолит центрируют над пунктом триангуляции 1 и 2 разрядов с помощью оптического центрира с точностью не менее 2 мм.

Уравнивание триангуляционных сетей 1 и 2 разрядов производят по фигурам коррелятным способом. Наиболее распространенным приближенным способом уравнивания является метод раздельного уравнивания. Однако существенным недостатком раздельного уравнивания является то, что нельзя строго произвести оценку точности. Наиболее подходящей формой раздельного уравнивания служит метод последовательного уравнивания триангуляционных сетей. В нем каждую группу условных уравнений решают независимо от других, но с соблюдением ранее выполненных условий.

Сущность этого упрощенного уравнивания сводится к тому, что все простейшие уравнения выделяют в одну группу и путем совместного решения их получают готовые формулы для вычисления первичных поправок. Эти поправки соответствуют строгому решению уравнений первой группы. Во вторую группу относят остальные условные уравнения, при решении которых допускают, что вторичные поправки связывающих углов в каждом треугольнике равны по величине, но противоположны по знаку, чтобы после введения вторичных поправок не нарушалось условие фигур. Уравнивание приближенным способом выполняют в следующем порядке:

— вычисляют невязки в треугольниках, а для геодезического четырехугольника — сумму всех внутренних углов;

— определяют первичные поправки и распределяют их между углами;

— находят логарифмы синусов исправленных углов и изменения логарифмов синусов нечетных и четных углов на $1''$ (α и β). Определяют свободный член полюсного условия;

— вычисляют корреляту, соответствующую полюсному условию, и, умножая ее на сумму $(\alpha + \beta)$, находят вторичные поправки в углы. Затем получают вторичные поправки в логарифмы синусов углов, умножая вторичные поправки в углы на изменение логарифмов синусов на $1''$. Поправки в логарифмы синусов углов вводят: для четных углов — со знаком свободного члена, для нечетных — с обратным знаком;

— по логарифмам синусов окончательных углов вычисляют логарифмы сторон, а по ним — стороны. После этого вычисляют координаты всех пунктов триангуляции по отдельным звеньям, исключая повторяющиеся.

Для определения высот пунктов триангуляции 1 и 2 разрядов прокладывают нивелирование IV класса или техническое. В горной местности с высотой сечения рельефа через 2 и 5 м определение высот пунктов производится тригонометрическим нивелированием.

IV.1.2.2. Съёмочные сети

Съёмочные геодезические сети или геодезическое съёмочное обоснование создается для сгущения геодезической сети с целью обеспечения производства топографических съёмок.

Съёмочное обоснование развивается от пунктов государственных геодезических сетей, геодезических сетей сгущения и технического нивелирования. Съёмочные сети создаются построением съёмочных триангуляционных сетей, проложением теодолитных, тахеометрических и мензульных ходов, прямыми, обратными и комбинированными засечками. Как правило, одновременно определяется плановое и высотное положение точек.

Пункты планово-высотной съёмочной сети закрепляются на местности долговременными знаками так, чтобы на каждом планшете было порядка трех точек при съёмке в масштабе 1 : 5000 и двух точек при съёмке в масштабе 1 : 2000.

Средние ошибки в плановом положении точек съёмочной сети (с учетом ошибок опознавания на аэрофотоснимках) относительно ближайших пунктов геодезической сети не должны превышать 0,1 мм в масштабе создаваемых планов и карт топографической съёмки открытых районов и 0,15 мм — лесных районов.

Предельные ошибки положения пунктов урванного планового обоснования (и плановых опознаков) относительно пунктов государственной геодезической сети и геодезических сетей сгущения не должны превышать 0,2 мм в масштабе плана в открытой местности и 0,3 мм в закрытой местности.

Средние ошибки высот точек съёмочного обоснования относительно ближайших пунктов государственных геодезических сетей (реперов и марок) не должны превышать в равнинных районах 1/10, а в горных и предгорных районах — 1/5 высоты сечения рельефа [4].

Высоты точек съёмочной сети определяют нивелированием горизонтальным лучом нивелиром, теодолитом или кипрегелем с уровнем при трубе или тригонометрическим нивелированием. Невязки в ходах и полигонах съёмочной сети по высоте не должны превышать: 5 см $\sqrt{L}$ при техническом нивелировании; 10 см $\sqrt{L}$ — при нивелировании теодолитом или кипрегелем с горизонтальным лучом; 20 см $\sqrt{L}$ — при тригонометрическом нивелировании, где L — длина хода в км.

Густота и способы создания съёмочного обоснования зависят от метода съёмки. При мензульной съёмке расположение точек съёмочного обоснования определяется целесообразным выбором стоянок мензулы для съёмки рельефа и ситуации, а при съёмке на фотопланах густота точек и схема обоснования определяется расположением плановых опознаков, необходимых для создания фотопланов. Для съёмки местности на фотоплане съёмочную сеть строят более редкой, чем для мензульной съёмки. При стереотопографической съёмке плотность и расположение точек геодезического обоснования определяются технологией съёмки, высотой фотографирования и масштабом аэрофотосъёмки.

Пункты съёмочной сети в основном закрепляются временными знаками: металлическими костылями, штырями, кованными гвоздями и трубками, деревянными столбами и кольями, а также гвоздями,

ТАБЛИЦА 25

Масштаб съемки	Допустимая ошибка в определении координат, м	
	открытая местность	закрытая местность
1:500	0,10	—
1:1000	0,16	0,30
1:2000	0,30	0,60
1:5000	0,60	1,50

вбитыми в пни деревьев. Количество точек съемочного обоснования на 1 км² незастроенных территорий должно быть не менее

4 при съемке в масштабе 1:5000,
 12 » » » » 1:2000,
 16 » » » » 1:1000.

Плотность точек съемочного обоснования на незастроенной территории при съемке в масштабе 1:500 и на застроенной территории при съемках в масштабах 1:5000—1:500 определяется при рекогносцировке.

Допустимые ошибки в определении координат пунктов съемочной сети не должны превышать величин, приведенных в табл. 25.

При определении координат плановых точек съемочного обоснования (опознаков) аналитическим методом по данным стереофотограмметрических измерений приведенные в табл. 25 допуски увеличиваются в 1,5 раза.

В закрытой местности съемочное обоснование развивается теодолитными и тахеометрическими ходами. Расчет точности теодолитного хода проводится по формуле

$$M^2 = [m_s^2] + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} L^2 \frac{n+3}{12}, \quad (\text{IV.1.90})$$

где $[m_s^2]$ вычисляется в зависимости от используемых приборов при измерении линий:

$[m_s^2] = n \left(\frac{s_{\text{ср}}}{1500} \right)^2$ — дальномерными насадками типа ДН-8, ДНР-5 и др.,

$[m_s^2] = n \left(\frac{s_{\text{ср}}}{2000} \right)^2$ — лентой,

$[m_s^2] = n \left(\frac{s_{\text{ср}}}{5000} \right)^2$ — дальномером Д-2, Редта.

m_β — средняя квадратическая ошибка измерения угла, принимается равной 15—30".

Если средняя квадратическая ошибка в положении конечной точки хода окажется более 0,2 мм в масштабе ($M > 0,2$ мм), т. е. более предельной ошибки в положении точки (планового опознака), то нужно уменьшить среднюю квадратическую ошибку измерения угла или увеличить длины сторон хода и расчет произвести вновь или использовать другой метод привязки. Для уменьшения средней квадратической ошибки положения точки можно запроектировать

еще один дополнительный ход к точке (опознаку), чтобы получить систему ходов с узловой точкой. Тогда среднюю квадратическую ошибку в положении точки можно определить по формуле

$$M = \frac{C}{\sqrt{\left[\frac{1}{m_i^2} \right]}}, \quad (\text{IV.1.91})$$

где m_i — средние квадратические ошибки в положении конечных точек ходов, сходящихся в узловой точке, C — некоторое постоянное число.

Плановые опознака могут быть включены узловыми точками в сеть теодолитных ходов с двумя узлами и более, тогда ошибка в плановом положении определяется по формуле

$$M = \sqrt{\frac{C}{p}}, \quad (\text{IV.1.92})$$

где p — значения весов ходов, определяемые по формулам из способа наименьших квадратов:

$$p_i = \frac{C}{m_i^2}; \quad m_i^2 = \left(\frac{[s]}{2T} \right)^2. \quad (\text{IV.1.93})$$

или по приближенным формулам В. П. Козлова:

$$p_i = [p]_i - \frac{p_{a,i}^2}{[p]_a} - \frac{p_{b,i}^2}{[p]_b} - \dots - \frac{p_{k,i}^2}{[p]_k}, \quad (\text{IV.1.94})$$

где $[p]_i$ — сумма весов ходов, сходящихся в узловой точке; $p_{a,i}, p_{b,i}, \dots, p_{k,i}$ — веса измеренных линий отдельных ходов, являющихся связующими между узловой точкой i и соседними узловыми точками; $[p]_a, [p]_b, \dots, [p]_k$ — сумма весов измеренных расстояний по ходам, сходящимся в узловой точке, с которыми узловая точка i имеет связующие ходы.

Расчет точности определения высот в теодолитном ходе производится по формулам

$$m_h = s \frac{m_v}{\rho} \quad (\text{IV.1.95})$$

для одной стороны хода и

$$\bullet \quad m_{\Sigma h} = \frac{m_v}{\rho} s \sqrt{n} \quad \text{или} \quad m_{\Sigma h} = \frac{m_v}{\rho} \sqrt{s_{\text{ср}}} L \quad (\text{IV.1.96})$$

для всего хода, где s — длина стороны хода; $\rho = 3438'$; m_h — средняя квадратическая ошибка определения превышения; m_v — средняя квадратическая ошибка измерения угла наклона ($m_v = 30''$); n — число сторон хода; L — периметр хода, $L = n \cdot s_{\text{ср}}$; $m_{\Sigma h}$ — средняя квадратическая ошибка суммы превышений хода (не более 0,4 м).

По формулам (IV.1.96) можно предвычислить среднюю квадратическую ошибку измерения угла наклона m_v и определить наиболее рациональный метод измерения вертикальных углов в теодолитном ходе.

В открытой местности вместо теодолитных ходов прокладывают сети триангуляции в виде цепочек, центральных систем, геодезических четырехугольников или вставок отдельных пунктов. Триангуляция, включающая более двух определяемых пунктов, должна опираться не менее чем на две исходные стороны. Исходными сторонами служат стороны триангуляции и полигонометрии 1 и 2 разрядов или специально измеренные базисные стороны с точностью 1 : 5000. Между исходными сторонами допускается не более

20	треугольников	для съемки	в масштабе	1 : 5000,
17	»	»	»	» 1 : 2000,
15	»	»	»	» 1 : 1000,
10	»	»	»	» 1 : 500.

Углы в треугольниках не должны быть менее 20°, а стороны не менее 150 м. Измерение углов производят теодолитом 30-секундной точности двумя круговыми приемами. Расхождения в значениях углов из разных приемов не должны превышать 45". Невязки в треугольниках не должны быть более 1,5'. В измеренные углы вводят поправку за центрировку и редукцию, если величина линейных элементов превышает 1 : 10 000 длины сторон.

Определение точек прямой засечкой проводят не менее чем с трех пунктов, а обратной — по четырем пунктам. Углы засечек должны быть не менее 30° и не более 150°.

Визирными целями на пунктах триангуляции с длиной сторон до 500 м служат марки, установленные на штативах, и вешки, а при больших расстояниях — вежи и пирамиды облегченного типа.

Высоты точек пунктов триангуляции для обеспечения съемок с сечением рельефа через 2 и 5 м, а в некоторых случаях 1 м определяют тригонометрическим нивелированием в прямом и обратном направлениях одним приемом по трем нитям или двумя приемами по одной нити. Колебания места нуля на станции и вертикальных углов, полученных из разных направлений, не должны превышать 45". Расхождения между прямым и обратным превышениями не должны быть больше 4 см на 100 м, а допустимая невязка по ходу вычисляется по формуле

$$f_{h_{\text{доп}}} = \left(\frac{0,04 \Sigma s_m}{\sqrt{n}} \right) \text{ см} \quad (\text{IV.1.97})$$

и распределяют ее пропорционально длинам сторон.

Высоты точек съемочного обоснования могут быть получены из ходов технического нивелирования. Допустимые длины ходов приведены в табл. 26.

ТАБЛИЦА 26

Характеристика линии	Длина ходов в км при сечении рельефа, м		
	0,25	0,5	1 и более
Между двумя исходными пунктами	2,0	8	16
Между исходным пунктом и узловой точкой	1,5	6	12
Между двумя узловыми точками	1,0	4	8

Используются технические нивелиры с увеличением более 20 $\times$, с ценой деления уровня менее 45'' на 2 мм. Рейки шашечные с сантиметровыми или двухсантиметровыми делениями, двусторонние и односторонние.

Нивелирование проводится в одном направлении. Отсчеты берутся по рейке, установленной на башмаки, костыли или вбитые в землю колья, по средней нити. Порядок работы на станции следующий: отсчеты по черной и красной сторонам задней рейки; отсчеты по черной и красной сторонам передней рейки. При односторонних рейках изменяют горизонт инструмента не менее чем на 10 см. Расхождения в превышениях, вычисленных по черным и красным сторонам реек или на разных горизонтах, не должны быть больше 5 мм. Расстояния от нивелира до реек измеряют по крайним нитям дальномера или шагами. Нормальная длина визирного луча 120 м, а в благоприятных условиях — до 200 м.

Допустимые невязки в нивелирных ходах не должны превышать

$$f_{h_{\text{доп}}} = 50 \text{ мм} \sqrt{L_{\text{км}}}. \quad (\text{IV.1.98})$$

На местности с большими углами наклона, когда число станций на 1 км хода более 25, допустимую невязку вычисляют по формуле

$$f_{h_{\text{доп}}} = 10 \sqrt{n} \text{ мм}, \quad (\text{IV.1.99})$$

где n — число штативов в ходе.

Для определения точности планового положения точек, полученных засечками, на карте транспортиром определяют дирекционные углы направлений с определяемого пункта на исходный или с исходных пунктов на определяемый и измеряют расстояния до них.

Для определения высоты точки, полученной засечкой, превышение измеряют тригонометрическим нивелированием и вычисляют по формуле

$$h = s \operatorname{tg} v + i - v + f, \quad (\text{IV.1.100})$$

где s — горизонтальное проложение; v — вертикальный угол; i — высота прибора; v — высота визирования; f — поправка за кривизну Земли и рефракцию. Вертикальные углы измеряют тремя приемами при двух положениях круга. Колебания значений вертикальных углов и места нуля не должны превышать 15''.

Среднюю квадратическую ошибку определения высоты по одному направлению вычисляют по формуле (IV.1.95). Средняя квадратическая ошибка определения высоты точки как среднее весовое будет

$$M_H = \frac{\mu}{\sqrt{P_H}}, \quad (\text{IV.1.101})$$

где $P_H = [p_i]$, P_H — вес высоты определяемой точки;

$$M_H = \frac{m_v}{\rho \sqrt{\left[\frac{1}{s^2} \right]}},$$

откуда

$$m_v = M_H \rho \sqrt{\left[\frac{1}{s^2} \right]}. \quad (\text{IV.1.102})$$

Если $M_H \leq 1/10$ высоты сечения рельефа, то вычисленное значение m_v дает возможность выбрать необходимый прибор для измерения угла наклона.

В качестве метода передачи высот используются высотные ходы с применением теодолита, тахеометра или кипрегеля, а также технического нивелирования. Предельная ошибка в слабом месте хода — середине (средняя квадратическая ошибка суммы превышений высотного хода) после уравнивания определяется по формуле

$$m_{\Sigma h} = M_H (m) = K \sqrt{L_{\text{км}} s_{\text{км}}}, \quad (\text{IV. 1. 103})$$

где K — коэффициент, зависящий от углов наклона местности.

Значение K выбирается по среднему значению угла наклона для хода, которое определяется по карте с помощью графика заложения:

Угол наклона	$0 \leq v \leq 3^\circ$	$3 \leq v \leq 6^\circ$	Свыше 6°
K	0,15	0,21	0,33

Предельная ошибка в слабом месте урванного хода технического нивелирования равна $25 \text{ мм} \sqrt{L_{\text{км}}}$.

Если $M > 0,1$ высоты сечения рельефа, то для определения высоты точки (опознака) нужно использовать систему ходов. В качестве узловой точки можно наметить определяемую точку, тогда высоте точки получают как среднее весовое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баканова В. В. Геодезия. М., Недра, 1980.
2. Большаков В. Д., Гайдаев П. А. Теория математической обработки геодезических измерений. М., Недра, 1979.
3. Захаров А. И. Новые теодолиты и оптические дальномеры. М., Недра, 1982.
4. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. М., Недра, 1982.
5. Маслов А. В., Гордеев А. В., Батраков Ю. Г. Геодезия. М., Недра, 1980.
6. Селиханович В. Г., Логинова Г. П., Козлов В. И. Практикум по геодезии. М., Недра, 1978.
7. Селиханович В. Г. Геодезия, ч. II. М., Недра, 1981.

IV.2. ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СЪЕМКИ

В. В. Баканова

IV.2.1. Топографические карты и крупномасштабные планы

Карта и план — это уменьшенное плоское изображение горизонтальных проекций участков земной поверхности. Карта отличается от плана (подобного изображения) тем, что изображение горизонтальных проекций больших участков земной поверхности искажено вследствие влияния кривизны Земли и построено в определенной картографической проекции.

Карты и планы имеют определенное назначение, от которого зависит их содержание. На картах и планах изображаются все объекты местности, которые входят в их содержание и могут быть изображены в масштабе, т. е. имеют размеры не менее предельной точности масштаба (0,1 мм). Однако на местности всегда имеются предметы, которые по своим размерам не соответствуют предельной

точности масштаба, но по своему назначению должны быть отображены на карте или плане (например, колодцы, заводы, склады, километровые столбы и т. д.), поэтому предметы местности в зависимости от масштаба карты и плана могут изображаться масштабными или внесмачтабными условными знаками. Если размеры предметов значительные, то они изображаются в масштабе карты или плана контурами, подобными контурам на местности. С уменьшением масштаба некоторые детали контуров опускаются или объединяются с другими, т. е. производится обобщение или генерализация предметов.

К топографическим картам относятся карты в масштабах 1 : 100 000 и крупнее. Карты в масштабах 1 : 100 000 и 1 : 50 000 имеются на всю территорию СССР. Эти карты составляются камерально по картам в масштабах 1 : 25 000 и 1 : 10 000 путем уменьшения последних в соответствии с установленными требованиями.

Топографические съемки на территории СССР выполняются в масштабах 1 : 25 000, 1 : 10 000, 1 : 5000, 1 : 2000, 1 : 1000 и 1 : 500 Главным управлением геодезии и картографии при Совете Министров СССР и организациями различных министерств и ведомств, согласно Инструкциям [3] и [4], которые устанавливают основные технические требования и технологические схемы производства съемок и предусматривают создание на их основе топографических карт и планов с обязательным применением условных знаков [10].

Топографические съемки в масштабах 1 : 25 000 и 1 : 10 000 производятся с целью создания государственных топографических карт, используемых для изучения природных ресурсов; проектирования инженерных сооружений; разного вида изысканий; выполнения работ по развитию народного хозяйства; обороны страны. Карты в этих масштабах являются основой для составления топографических карт более мелких масштабов, тематических и специальных карт. Кроме топографических карт могут создаваться и фотокарты.

Топографические карты в масштабе 1 : 5000 и крупнее называются крупномасштабными. С целью решения различных инженерных задач в разных отраслях народного хозяйства создаются специализированные топографические планы. При составлении специализированных планов может быть изображена не вся ситуация местности, а только необходимая, применены нестандартные сечения рельефа, может быть предъявлена более высокая или несколько заниженная точность изображения контуров и рельефа местности. Например, для мелиоративных работ предусматривается увеличение числа пикетов на 1 дм² с 10—15 до 30; повышены требования к дешифрированию и к точности изображения рельефа. Даются более подробные характеристики водотоков мостов линий электропередач и других объектов. Для геологических работ повышены требования к точности геодезических работ на различных стадиях геолого-геофизических исследований. Технические требования к специализированным съемкам излагаются в ведомственных Инструкциях, согласованных с ГУГК. Требования, не предусмотренные ведомственными Инструкциями, согласовываются с органами Государственного геодезического надзора ГУГК. В зарамочном оформлении специализированного плана предусматривается указывать назначение плана, метод и точность съемки.

Основным методом топографической съемки в масштабах 1 : 25 000 и 1 : 10 000 является стереотопографический. Комбинированный способ используется при съемках в масштабе 1 : 10 000 для равнинных районов, покрытых растительностью.

Топографические съемки в масштабах 1 : 5000, 1 : 2000, 1 : 1000

и 1 : 500 выполняются методами: стереотопографическим, комбинированным аэрофототопографическим, наземным фототопографическим (фототеодолитная съемка), мензульным, тахеометрическим, теодолитным, нивелированием поверхностей. Основными методами являются стереотопографический и комбинированный. Мензульная и тахеометрическая съемки применяются в основном в масштабах 1 : 1000, 1 : 500 и при невозможности использования аэрофотосъемки в масштабах 1 : 2000 и 1 : 5000 — на небольших территориях. Фото-теодолитная съемка используется для составления планов горных и всхолмленных районов. На небольших участках она может быть использована как самостоятельная съемка, а при картографировании больших площадей — в сочетании с другими видами съемок в горных районах и городах. Теодолитная съемка выполняется на городских и промышленных территориях. Нивелирование поверхности используется для вертикальной планировки территорий. Способы тахеометрической и теодолитной съемок используются при съемке застроенных территорий и при съемках подземных коммуникаций.

Топографические планы в масштабах 1 : 5000—1 : 500 увеличиваются фотомеханическим путем с планов в масштабах 1 : 10 000—1 : 1000, если для изыскательских и проектных работ требуется меньшая точность плана, чем предусмотрено Инструкцией [4].

Топографические планы составляются графически или в виде цифровой модели местности. Цифровая модель местности строится путем математической обработки на ЭВМ результатов геодезических или фотограмметрических измерений и преобразования в графическое изображение с помощью автоматического координатографа (графопостроителя).

Топографические карты и планы размножаются изготовлением с полевых и составительских оригиналов или готовятся к изданию средствами офсетной печати.

Топографические карты и планы создаются в зональной равноугольной поперечно-цилиндрической проекции К. Ф. Гаусса, вычисленной по элементам референц-эллипсоида Ф. Н. Красовского в принятой общесоюзной системе координат в 6-градусной зоне, а для планов в масштабе 1 : 5000 и крупнее — в 3-градусной зоне. Высоты точек определяются в абсолютной Балтийской системе от нуля Кронштадтского футштока.

Топографические карты являются многolistными картами. На каждом листе изображается часть территории. Система нумераций (обозначений) отдельных листов топографических карт называется номенклатурой, а разделение топографических карт на листы определяется разграфкой. За начало разграфки принимается лист карты в масштабе 1 : 1 000 000, номенклатура которой состоит из буквы ряда (параллелями через 4° по широте изображение земной поверхности делится на ряды, обозначаемые буквами латинского алфавита к северу и югу от экватора) и номера колонны (меридианами через 6° по долготе изображение земной поверхности разбивается от гринвичского меридиана на 60 колонн, которые обозначаются арабскими цифрами на восток от 180°). Если нумерация ведется от 0°, то 6-градусные двугрульники называются зонами. Счет зон от колонн отличается на 30, например колонна 38, а зона 8.

Для получения листов карты в масштабе 1 : 100 000 лист карты в масштабе 1 : 1 000 000 делят на 144 части и обозначают арабскими цифрами.

Одному листу карты в масштабе 1 : 100 000 соответствует 4 листа карты в масштабе 1 : 50 000, которые обозначаются прописными

Масштаб карты	Размер листа по		Пример номенклатуры
	широте	долготе	
1:1 000 000	4°	6°	М-45
1:100 000	20'	30'	М-45-103
1:50 000	10'	15'	М-45-103-А
1:25 000	5'	7'30"	Е-45-103-А-6
1:10 000	2'30"	3'45"	М-45-103-А-6-3
1:5 000	1'15"	1'52,5"	М-45-103-(216)
1:2 000	25"	37,5"	М-45-103-(216-и)

буквами русского алфавита А, Б, В, Г. Каждый лист карты в масштабе 1:50 000 содержит 4 листа карты в масштабе 1:25 000, которые обозначаются строчными буквами русского алфавита а, б, в, г. Лист карты в масштабе 1:25 000 делится на 4 листа карты в масштабе 1:10 000, обозначаемые арабскими цифрами.

Лист карты в масштабе 1:100 000 содержит 256 листов карт в масштабе 1:5000, которые обозначаются арабскими цифрами. Лист карты в масштабе 1:5000 делится на 9 листов, образуя листы карт в масштабе 1:2000, обозначаемые строчными буквами русского алфавита: а, б, в, г, д, е, ж, з, и.

Примеры номенклатуры различных масштабов и размеры листов топографических карт приведены в табл. 27.

На картах и планах проводится прямоугольная километровая сетка координат через 10 см для масштабов 1:10 000 и крупнее через 4 см — на листах карты в масштабе 1:25 000.

Для топографических планов, создаваемых на участках площадью менее 20 км², используется прямоугольная разграфка с размерами рамок для масштаба 1:5000 40×40 см; для масштабов 1:2000 — 1:500 — 50×50 см. За основу разграфки принимается лист в масштабе 1:5000, обозначаемый арабскими цифрами. Листу плана в масштабе 1:5000 соответствует 4 листа в масштабе 1:2000, обозначаемые заглавными буквами русского алфавита (А, Б, В, Г). Листу плана в масштабе 1:2000 соответствует 4 листа в масштабе 1:1000, обозначаемые римскими цифрами, и 16 листов в масштабе 1:500, обозначаемых арабскими цифрами.

При создании топографической карты масштаб съемки определяет содержание и точность топографических деталей. Масштаб съемки оказывает влияние на густоту и точность геодезической основы, технологию производства съемки, сроки и эффективность ее выполнения. Выбрать оптимальный масштаб топографической съемки — это значит определить необходимое содержание и точность карты.

Масштаб съемки зависит от назначения съемки, размера участка, полноты отображения элементов местности, точности изображения, стадии проектирования и других факторов.

Для удовлетворения нужд промышленного и гражданского строительства используется масштабный ряд от 1:500 до 1:10 000. Для отдельных стадий проектирования устанавливается обычно два или три масштаба съемки и плана.

Согласно данным СНиП II-9—78 при инженерно-геодезических изысканиях устанавливают следующие масштабы съемок и высоты

ТАБЛИЦА 28

Характеристика рельефа и максимально преобладаю- щий угол наклона	Масштаб карты или плана				
	1:25 000	1:10 000	1:5000	1:2000	1:1000; 1:500
Равнинный с углами на- клона до 2°	2,5	1,0—2,0	1,0	0,5—1,0	0,5
Всхолмленный с углами наклона до 4°	2,5—5,0	2,0 (2,5)	2,0	1,0	0,5
Пересеченный с углами наклона до 6°	5,0	2,0 (2,5)	2,0	2,0	0,5
Горный и предгорный с углами наклона более 6°	5,0—10,0	5,0	5,0	2,0	1,0

сечения рельефа: при 1 : 10 000 — 5; 2; 1 м; 1 : 5000 — 5; 2; 1; 0,5 м; 1 : 2000 — 2; 1; 0,5 м; 1 : 1000 — 1; 0,5 м; 1 : 500 — 1; 0,5 м.

Выбор масштаба топографической съемки и высоты сечения рельефа рекомендуется производить с учетом требований, изложенных в Инструкции [5] по инженерным изысканиям для соответствующих видов строительства в зависимости от назначения планов и в Основных положениях [6].

Съемку населенных пунктов выполняют в два этапа: первый для создания планов и карт в масштабах 1 : 2000 — 1 : 10 000, второй — 1 : 500 и 1 : 1000. Для городов рекомендуется использовать следующие масштабы планов: 1 : 10 000, 1 : 5000, 1 : 2000, 1 : 500 — для крупнейших городов; 1 : 5000 — 1 : 500 — для крупных, больших и средних городов; 1 : 2000 — 1 : 500 и в случае необходимости 1 : 5000 — для остальных населенных пунктов.

В табл. 28 приведены значения высоты сечения рельефа в метрах, установленные в зависимости от масштаба топографической карты или плана и характера местности, соответствующие требованиям Инструкций [3] и [4].

В порядке исключения топографические съемки крупного масштаба могут производиться с высотой сечения рельефа через 0,25 м на предварительно подготовленных и спланированных территориях и с максимально преобладающими углами наклона менее 2°. Необходимость данного сечения должна быть обоснована в техническом проекте или задании.

Проведение дополнительных и полугоризонталей предусматривается на участках, где расстояние между горизонталями на плане превышает 2,5 см.

При создании крупномасштабных планов путем увеличения высота сечения рельефа может оставаться той же, если заложение горизонталей, соответствующее максимально преобладающему углу наклона, более 2 мм.

Определенные требования к точности топографических съемок предъявляют Инструкции [3], [4] и [5]. Так, средние ошибки в положении на плане предметов и контуров местности с четкими очертаниями относительно ближайших точек съемочной сети не должны превышать 0,5 мм, а в горных и залесенных районах — 0,7 м. На участках с капитальной и многоэтажной застройкой предельные ошибки во взаимном положении на плане точек близлежащих важных контуров (капитальных сооружений, аданий и т. д.) не должны превышать 0,4 мм.

Угол наклона местности α , °	Высота сечения рельефа, м			
	0,5	1,0	2,0	5,0
	Средние ошибки, м			
0—2	0,12	0,25	—	—
2—6	0,17	0,33	0,67	—
Свыше 6	—	—	1,0	2,5

Средние ошибки съемки рельефа относительно ближайших точек съемочных геодезических сетей не должны превышать по высоте 1/4 принятой высоты сечения рельефа при углах наклона местности до 2°; 1/3 принятой высоты сечения рельефа при углах наклона от 2 до 6° для планов в масштабах 1:5000, 1:2000 и до 10° для планов в масштабах 1:1000 и 1:500; 1/3 — при сечении рельефа через 0,5 м на планах в масштабах 1:5000 и 1:2000. Средние ошибки для различных высот сечения рельефа приведены в табл. 29.

В залесенной местности указанные допуски увеличиваются в 1,5 раза. На участках с углами наклона свыше 6° для планов в масштабах 1:5000 и 1:2000 и свыше 10° для планов в масштабах 1:1000 и 1:500 число горизонталей должно соответствовать разности высот, определенных на перегибах скатов, а средние ошибки высот, определенные на характерных точках рельефа, не должны превышать 1/3 принятой высоты сечения рельефа.

Средние ошибки высот характерных точек, подписываемых на карте в масштабах 1:10 000 и 1:25 000, не должны превышать 75 % от средних ошибок съемки рельефа, а в горных и высокогорных не должны превышать 1/2 высоты сечения рельефа.

Точность карт и планов оценивается по расхождениям положения контуров и высот точек, рассчитанных по горизонталям, с данными контрольных измерений. Предельные расхождения не должны превышать удвоенных значений средних ошибок, приведенных в табл. 20, а их количество не должно превышать 10 % от общего числа контрольных измерений. Предельные расхождения не более 5 % включаются при вычислении средней ошибки.

На крупномасштабных топографических планах изображаются: пункты государственной геодезической основы; здания и постройки; промышленные объекты, линии электропередач и связи; сети подземных коммуникаций; железные, шоссейные, грунтовые дороги и сооружения при них; гидрография; сооружения гидротехнические и водного транспорта; объекты водоснабжения; растительность; грунты и микроформы земной поверхности; границы.

Контуры растительности и грунтов изображаются на плане, если в определенном масштабе они занимают площадь [5]:

- 4 мм² и более — имеющие значение ориентиров;
- 10 мм² и более — ценные в хозяйственном отношении;
- 25 мм² и более — прочие контуры.

Архитектурные выступы и уступы зданий и сооружений снимаются, если по величине они более 0,5 мм в масштабе плана [4].

Минимальная площадь контуров, снимаемых в масштабах 1:5000—1:500, устанавливаемая Инструкцией [5], — 20 мм² на планах для хозяйственно-ценных угодий или расположенных внутри них участков, не имеющих хозяйственного значения; 50 мм² на планах для участков, не имеющих хозяйственного значения.

В масштабах 1:2000—1:500 снимаются все опоры и столбы электролиний высокого и низкого напряжений и линий связи, а в масштабе 1:5000 — только опоры и поворотные столбы этих линий.

Съемка рек, ручьев, каналов и пр. при ширине их изображения на плане более 3 мм проводится по двум берегам, а при ширине до 3 мм — по одному берегу. Через 15 см на плане подписываются высоты урезов воды с указанием даты их определения.

При съемке леса определяются: порода, средняя высота деревьев, толщина их на высоте груди человека, средние расстояния между деревьями; контуры вырубков, гарей, полян и сельскохозяйственных угодий, находящихся в лесу. Съемке подлежат отдельно стоящие деревья и отдельные деревья толщиной более 5 см в масштабах 1:1000 и 1:500.

На планах застроенных территорий в масштабах 1:5000—1:500 не показываются переносные и временные сооружения, находящиеся внутри проездов и дворов (ларьки, палатки, киоски и т. д.); временные заборы и сооружения на строительных площадках.

На планах застроенных территорий в масштабе 1:5000 не показываются нежилые строения площадью менее 1,5 м² на плане; границы и заборы владений внутри кварталов, приусадебные огороды; палисадники, тротуары; линии связи и электропередач низкого напряжения; выходы подземных коммуникаций в городах и на промышленных площадках; стенные марки и реперы.

Рельеф местности изображается горизонталями в сочетании с высотами точек и условными знаками оврагов, скал, воронок, ям, обрывов, оползней и др. При изображении характерных форм рельефа (гор, котловин, хребтов, лощин, седловин) проводятся полугоризонтالي и вспомогательные горизонтالي.

На планах с изображением строений, шоссейных и грунтовых дорог горизонтالي проводятся пунктиром.

На планах территории с плотной застройкой в масштабе 1:500 рельеф характеризуется высотами точек. Изрытые участки, карьеры и т. д. при съемке оконтуриваются, а высоты точек подписываются внутри и по контуру.

Предусматривается определение высот точек на плотинах, на мостах, на верху и подшоше насыпей, на шлюзах, пересечениях дорог, на колодцах и т. д.

При высоте сечения рельефа более 1 м пикеты вычисляются до 0,01 м и подписываются на плане до 0,1 м. При высоте сечения рельефа менее 1 м высоты точек вычисляются и подписываются на плане до 0,01 м. На каждом дм² плана подписывается не менее 5 высот характерных точек местности.

На топографических картах и планах подписываются названия населенных пунктов, улиц, железнодорожных станций, пристаней, рек, озер, источников, болот, лесов, солончаков, вершин, перевалов; долин, оврагов, балок и других географических объектов.

Топографические карты в масштабах 1:25 000 и 1:10 000 применяются: в сельском и лесном хозяйствах; при мелиорации, разработке нефтяных и газовых месторождений; в геологической разведке; гидротехническом, линейном, промышленном, городском, поселковом и сельском строительстве.

Топографические планы в масштабе 1:5000 используются для: разработки генеральных планов городов и проектов размещения объектов строительства; составления проектов планировки промышленных районов; транспортных развязок; составления технических проектов промышленных и горнодобывающих предприятий; предварительной и детальной разведки месторождений; земельного кадастра

и землеустройства колхозов и совхозов; составления технических проектов и рабочих чертежей орошения; камерального трассирования автомобильных дорог; проектирования трасс воздушных линий электропередач, железных и автомобильных дорог, гидроузлов, магистральных каналов и их строительства. Эти планы служат основой для составления топографических и специализированных планов и карт более мелких масштабов.

Топографические планы в масштабе 1:2000 используются для: разработки генеральных планов малых городов, поселков и сельских населенных пунктов; составления проектов детальной планировки и эскизов застройки, исполнительных планов горнопромышленных предприятий; детальных разведок месторождений; составления технических проектов портов, электростанций, гидротехнических сооружений, орошения, плотин, каналов; составления рабочих чертежей осушения закрытым дренажем, под вертикальную планировку орошаемых земель, площадок под гидротехнические сооружения, жилищное строительство; проектирования железных и автомобильных дорог на стадии технического проекта.

Кроме перечисленного, топографические планы в масштабах 1:5000 и 1:2000 составляются для отображения шельфовой зоны морей, океанов и внутренних водоемов.

Топографические планы в масштабе 1:1000 предназначаются для: составления технических проектов и рабочих чертежей застройки, зданий ГЭС; вертикальной планировки и проектов озеленения; разработки проектов переустройства существующих и рабочих чертежей новых железнодорожных станций и узлов; детальных разведок и подсчета запасов полезных ископаемых; проектирования трубопроводов, гидротехнических сооружений, площадок под строения и строительства горнодобывающих и обогательных предприятий; геологического обслуживания горных предприятий.

Топографические планы в масштабе 1:500 используются для: составления исполнительного, генерального плана участка строительства и рабочих чертежей многоэтажной капитальной застройки с густой сетью подземных коммуникаций, промышленных предприятий, планов подземных сетей и сооружений; рабочих чертежей плотин, шахт, трубопроводов, зданий ГЭС, туннелей; решения задач вертикальной планировки.

Необходимость топографической съемки в масштабе 1:500 должна быть обоснована инженерными расчетами. Топографические планы в масштабах 1:1000 и 1:500 предназначаются для учета подземных коммуникаций и должны отображать точное плановое и высотное положение всех подземных коммуникаций с указанием их основных технических характеристик.

IV.2.2. Теодолитная съемка

Общие положения. Теодолитная съемка (горизонтальная) — съемка контуров, поэтому на плане изображается только ситуация. Теодолитную съемку выполняют в крупных масштабах на равнинной местности со сложной ситуацией: населенные пункты, застроенные участки, железнодорожные станции, аэропорты и т. д.

Теодолитная съемка выполняется с пунктов теодолитных ходов, представляющих собой системы сомкнутых или разомкнутых многоугольников, в которых измерены углы техническим теодолитом и стороны — мерной лентой или дальномером соответствующей точности (рис. 69, а, б). В результате продолжения теодолитных ходов на местности получают ряд пунктов, имеющих координаты.

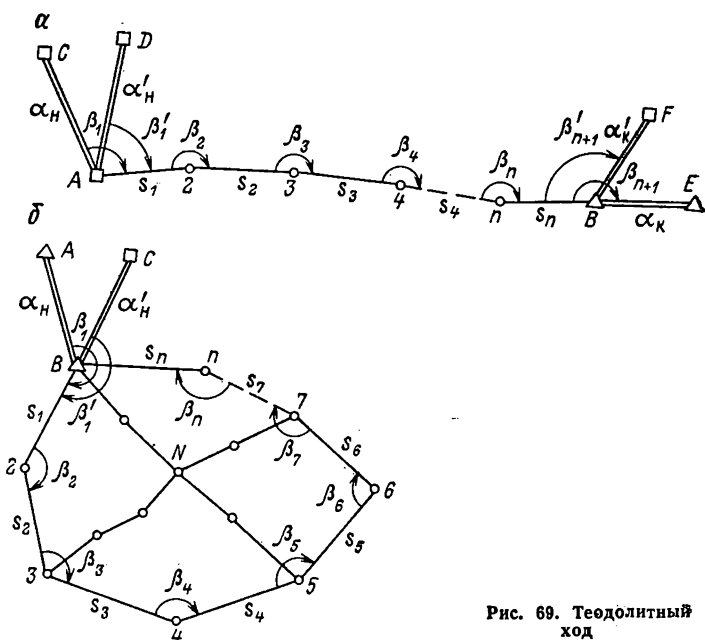


Рис. 69. Теодолитный ход

Теодолитные ходы находят широкое применение не только как геодезическое съемочное обоснование для производства съемки, но и для решения различных инженерных задач, например, при строительстве гидротехнических сооружений, дорог, мостовых переходов, электросетей, промышленных и гражданских комплексов и т. д.

Иногда пунктов сомкнутых или разомкнутых ходов бывает недостаточно для решения поставленных задач, тогда прокладывают дополнительные (диагональные) ходы между пунктами теодолитного хода, образуя систему ходов с одной или несколькими узловыми точками (рис. 69, б).

Закрепляют пункты теодолитных ходов в зависимости от времени их сохранения на местности: колышками на 2—3 года, деревянными столбами или железобетонными монолитами на 4—5 лет.

При проложении теодолитных ходов целесообразно иметь примерно равные стороны, чтобы не изменять фокусировку зрительной трубы. Длины сторон не должны быть менее 20 м и более 350 м на застроенных участках и менее 40 м и более 350 м на незастроенных территориях. Коротких сторон нужно избегать, чтобы влияние ошибок центрирования и редукции было минимальным. Длинные стороны измеряют по частям. Стороны теодолитных ходов для контроля измеряют дважды в прямом и обратном направлениях. Точность проложения теодолитных ходов характеризуется предельными относительными ошибками порядка 1 : 3000, 1 : 2000 и 1 : 1000.

Координаты пунктов теодолитных ходов вычисляют в принятой системе координат. С этой целью теодолитные ходы должны быть привязаны к пунктам государственной геодезической сети или геодезических сетей сгущения. Если при привязке исходные пункты

ТАБЛИЦА 30

Масштаб съёмки	$m_s=0,2$ мм			$m_s=0,3$ мм	
	1:3000	1:2000	1:1000	1:2000	1:1000
	Допустимая длина хода между исходными пунктами, км				
1:5000	6,0	4,0	2,0	6,0	3,0
1:2000	3,0	2,0	1,0	3,0	1,5
1:1000	1,8	1,2	0,6	1,5	1,5
1:500	0,9	0,6	0,3	—	—

расположены на значительном расстоянии от последнего пункта теодолитного хода, то привязку можно осуществить с помощью решения обратной засечки, для чего на конечном пункте хода нужно измерить примычные углы на три видимых пункта с известными координатами.

Прокладывая разомкнутые теодолитные ходы, получают обоснование для съёмки узкой полосы в радиусе 150—200 м. Для расширения полосы съёмки заранее намечают в стороне ряд боковых пунктов и в них устанавливают вехи. Для получения координат боковых пунктов нужно сделать засечку с двух, а для контроля — с трех опорных пунктов.

Предельную длину теодолитного хода можно рассчитать по формуле

$$[s]_{\text{пред}} = f_{s\text{пред}} MT, \quad (\text{IV.2.1})$$

где $f_{s\text{пред}}$ — невязка в уравненном ходе (0,4—0,6 мм); T — знаменатель предельной относительной ошибки измерения сторон хода; M — знаменатель масштаба съёмки.

Например, для съёмки в масштабе 1:5000 допустимая длина теодолитного хода, длины сторон в котором измерены с точностью 1:3000, не должна превышать 6 км (0,4 мм $\times$ 5000 $\times$ 3000). При определении допустимой длины теодолитного хода можно руководствоваться данными, приведенными в табл. 30, согласно требованиям Инструкции [4]. Допустимые длины ходов между узловыми точками или между исходным пунктом и узловой точкой в системах теодолитных ходов рекомендуется уменьшать на 30 % по сравнению с приведенными в табл. 30.

При проложении теодолитных ходов на застроенных участках обязательному определению подлежат координаты углов капитальных зданий и сооружений, расположенных на углах кварталов, улиц, перекрестков и внутри кварталов, а также в районах со свободной планировкой, но не реже чем через 300 м [5].

При съёмках в масштабах 1:5000—1:2000 в теодолитных ходах длиной до 250 м на застроенной территории и при съёмках в масштабах 1:1000 и 1:500 до 150 м допускаются следующие величины невязок [5]:

1:5000 и 1:2000	0,25 м
1:1000	0,15 м
1:500	0,10 м

При съёмке на застроенных и незастроенных участках допускается проложение висячих теодолитных ходов, длины которых в метрах не должны превышать величин, указанных в табл. 31.

ТАБЛИЦА 31

Масштаб съемки	Участки	
	застроенные	незастроенные
1:5000	350	500
1:2000	200	300
1:1000	150	200
1:500	100	150

В висиячих теодолитных ходах число сторон должно быть не более четырех на застроенных участках и не более трех — на незастроенных.

Перед проложением теодолитных ходов предварительно составляется проект на карте наиболее крупного масштаба. Изучив местность, намечают точки теодолитных ходов, которые должны располагаться в таких местах, чтобы с них было хорошо видно и удобно измерять. На карте должны быть намечены пункты, к которым предполагается привязывать ходы. После составления проекта производят рекогносцировку, т. е. уточнение на местности местоположения каждой точки и всего хода в целом. Одновременно проводится закрепление хода. Если предполагается стороны хода измерять мерной лентой, то нужно выбирать места, удобные для измерения сторон: по обочинам дорог, пойме, лугу и т. д. Теодолитные ходы не должны пересекать стороны полигонометрических ходов.

Затем приступают к измерению горизонтальных углов техническим теодолитом типа Т15 и Т30 с точностью не менее 30" одним полным приемом с перестановкой лимба. Результаты измерения угла контролируют по сходимости, полученной из двух полуприемов при круге право (КП) и лево (КЛ), в пределах 1,5 точности отсчетного устройства теодолита или 45" [4].

При привязке теодолитных ходов измеряются два примычных угла на исходные пункты. Сумма измеренных примычных углов согласно Инструкции [4] не должна отличаться от примычного угла, полученного по исходным данным, более чем на 1'.

Центрирование теодолита и установка визирных целей производится с помощью оптического центра или отвеса со средней квадратической ошибкой не более 3 мм.

Допустимые (предельные) угловые невязки в теодолитных ходах не должны быть более величин, вычисленных по формуле

$$f_{\text{пред}} = 1' \sqrt{n+1}, \quad (\text{IV.2.2})$$

где n — число сторон в ходе; $n+1$ — число углов в ходе.

Длины сторон в теодолитных ходах рекомендуется измерять светодальномерными насадками, электронными тахеометрами ТЭ, редукционными тахеометрами типа ТД, оптическими дальномерами двойного изображения Д-2, ДН-8, ДНР-5, дальномером АД, стальной 20-метровой лентой или рулеткой. Мерные приборы компарируются на полевой компараторе.

Поправка за наклон линии к горизонту вводится в длину стороны теодолитного хода при углах наклона местности более 1,5°, поэтому одновременно с горизонтальными углами измеряются вертикальные углы одним приемом.

Приборы. Теодолит Т15 повторительный со шкаловым отсчетным микроскопом. Корпус зрительной трубы изготовлен совмест-

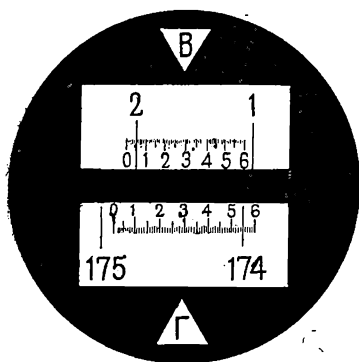


Рис. 70. Поле зрения шкалового микроскопа теодолита Т15

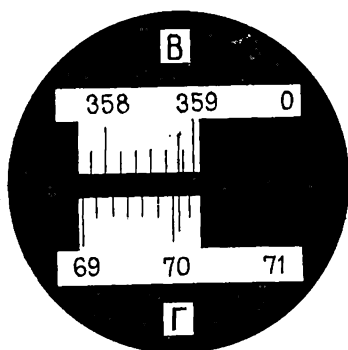


Рис. 71. Поле зрения отсчетного микроскопа теодолита Т30

но с горизонтальной осью, имеющей на концах цапфы, при помощи которых она устанавливается в лагерах алидадной части теодолита — колонке. По обе стороны трубы расположены оптические визиры для предварительного наведения на цель.

Зрительная труба и алидада горизонтального круга имеют курковые закрепительные устройства. В пустотелой цилиндрической вертикальной оси теодолита расположен объектив оптического центра, а его окуляр закреплен в алидадной части теодолита.

В поле зрения шкалового микроскопа (рис. 70) видны изображения горизонтального и вертикального кругов и шкалы, награвированной на пластине с таким увеличением, чтобы длина шкалы в n делений была равна изображению одного деления лимба. Шкалы для отсчитывания по кругам разделены на 60 частей. Поскольку круг оцифрован через 1° , то каждое деление шкалы микроскопа соответствует $1'$. Точность отсчитывания по шкале микроскопа соответствует $1'$. Точность отсчитывания по шкале микроскопа $0,1'$. На рис. 70 отсчет по горизонтальному кругу равен $174^\circ 55,0'$, по вертикальному кругу — $2^\circ 05,2'$.

Оптический теодолит Т30 — повторительный теодолит с цилиндрической вертикальной осью. Трегер теодолита наглухо прикреплен к основанию, служащему дном футляра, в котором хранится теодолит.

Вертикальная ось теодолита (ось алидады) полая, что дает возможность центрировать его над точкой местности с помощью зрительной трубы. Для этого на окуляры трубы и микроскопа надевают специальные насадки, а трубу поворачивают объективом вниз. Окуляр отсчетного устройства расположен рядом с окуляром зрительной трубы.

Отсчетное устройство — штриховой микроскоп, в котором интервал между штрихом лимба и индексом оценивается на глаз до десятих долей деления лимба. В поле зрения микроскопа видно изображение горизонтального и вертикального кругов, так что отсчитывание производится по одному штриху-индексу на обоих кругах (рис. 71). Отсчеты берутся по одной стороне кругов с точностью до $1'$. На рис. 71 отсчет по горизонтальному кругу равен $70^\circ 04'$, по вертикальному кругу — $358^\circ 48'$.

Измерение углов в теодолитном ходе выполняют после проведения поверок ряда геометрических условий взаимного расположения частей теодолита. Если обнаруживают, что геометрические условия не выполняются, то производят юстировку (исправление) теодолита.

Последовательность выполнения поверок теодолита следующая.

1. Ось цилиндрического уровня на алидаде горизонтального круга должна быть перпендикулярна к вертикальной оси теодолита.

Выполнение условия необходимо для установки вертикальной оси вращения теодолита в отвесное положение при помощи уровня. При выполнении условия ось цилиндрического уровня займет горизонтальное положение, т. е. пузырек уровня расположится в нуль-пункте, а при повороте алидады с уровнем на 180° ось уровня останется горизонтальной.

2. Визирная ось зрительной трубы должна быть перпендикулярна к горизонтальной оси вращения трубы.

Условие необходимо для образования проектирующей коллимационной плоскости. Если условие не выполнено, то труба опишет две конические поверхности с общей вершиной на оси вращения трубы.

3. Горизонтальная ось трубы должна быть перпендикулярна к вертикальной оси теодолита.

Выполнение условия необходимо для установки коллимационной плоскости в отвесное положение.

4. Вертикальный штрих сетки нитей должен находиться в коллимационной плоскости. Условие нужно для удобства работы. Если при измерении углов вертикальный штрих занимает отвесное положение, то по нему можно контролировать правильность постановки вехи.

5. Визирные оси оптических визиров должны быть параллельны визирной оси зрительной трубы.

Наводят зрительную трубу на точку, удаленную на расстояние порядка 150—200 м. Отведя глаз от визира на расстояние 20 см, наблюдают одновременно светлое перекрестие визира и точку. Если перекрестие совпадает с наблюдаемой точкой, то условие выполнено.

6. Визирная ось оптического центра должна совпадать с вертикальной осью теодолита.

Поверка оптического центра у теодолита Т15 производится наблюдением за положением изображения точки местности, над которой установлен теодолит относительно перекрестия сетки нитей при вращении алидады вокруг вертикальной оси.

Стальная 20-метровая мерная лента имеет ширину от 10 до 15 мм, а толщину — от 0,2—0,4 мм. По всей длине ленты пробиты небольшие отверстия через каждые 10 см; каждое пятое отверстие закреплено металлической пластиной диаметром 5 мм. В конце каждого метра с обеих сторон ленты приклепаны пластинки, на которых выдавлены порядковые номера метров, отсчитываемых от обоих концов ленты.

При измерении длин сторон теодолитного хода ленту укладывают непосредственно на земле, а концы ее отмечают шпильками, изготавливаемыми из стальной проволоки длиной 40 см, диаметром 3—4 мм. В мерный комплект входят лента и десять шпилек.

Длинномером типа АД измеряют длины сторон теодолитного хода по количеству оборотов мерного диска, прокатываемого по натянутой между концами линии некомпарированной стальной проволоке, положение которой относительно точек хода фиксируется с помощью закрепленных на ней шкал.

Измерение длин сторон производится одним приемом прямо и

обратно с точностью 1 : 5000. Прямо считается то измерение, которое выполняется по направлению возрастания отсчетов на счетчике длиномера, а обратно — по направлению убывания отсчетов.

При измерении длины стороны фиксатор длиномера совмещают с нулем задней (передней) шкалы и берут начальный отсчет по длиномеру N_1 , затем освобождают мерный диск и прокатывают длиномер по проволоке от одного конца измеряемой стороны; совмещают фиксатор с нулем передней (задней) шкалы и берут отсчет по длиномеру N_2 . Освобождают мерный диск и, поддерживая длиномер, одновременно берут отсчеты по задней и передней шкалам n_1 и n_2 . Затем совмещают шкалы в пределах их делений и также измеряют длину стороны в обратном направлении. Измеренную длину стороны вычисляют по формуле

$$s_{\text{пр}} = N_2 - N_1 + n_1 + n_2. \quad (\text{IV.2.3})$$

Расхождение между прямым и обратным измерениями не должно превышать 1 : 7000. Окончательное значение длины стороны определяют по формуле при применении двух шкал

$$s = \frac{1}{p} \sum_1^p (N_2 - N_1 n_1 + n_2) + C + \Delta_r + \Delta_T + \Delta_f; \quad (\text{IV.2.4})$$

при использовании одной шкалы

$$s = \frac{1}{p} \sum_1^p (N_2 - N_1 + n) + \Delta_r + \Delta_T + \Delta_f; \quad (\text{IV.2.5})$$

при совмещении шкалы с точкой хода

$$s = \frac{1}{p} \sum_1^p (N_2 - N_1) + \Delta_r + \Delta_T + \Delta_f, \quad (\text{IV.2.6})$$

где p — число полуприемов; C — расстояние между фиксаторами прибора (постоянная величина для данного прибора); Δ_r , Δ_T и Δ_f — поправки за компарирование мерного диска, его температуру и провес проволоки.

Поправки вычисляют по формулам

$$\left. \begin{aligned} \Delta_r &= s(K - 1); \\ \Delta_T &= \alpha s(T - T_0); \\ \Delta_f &= \Delta_{f_T} \cos^2 \delta, \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.2.7})$$

где K — коэффициент, определяемый при компарировании длиномера; α — коэффициент линейного расширения стали ($\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$); T_0 — температура диска при компарировании; T — температура диска при измерении длины стороны; Δ_{f_T} — поправка за провес горизонтально натянутой проволоки; δ — угол наклона хорды.

Согласно ГОСТ 22549—77 дальномеры двойного изображения делятся на следующие типы:

Д-2 — с переменным параллактическим углом, предназначен для измерения расстояний по горизонтальной или вертикальной рейкам с относительной ошибкой не более 1 : 5000;

ТАБЛИЦА 32

Параметры	Типы дальномеров		
	Д-2	ДНР-5	ДН-8
Диапазон измерений, м	40—400	20—120	50—700
Средняя квадратическая ошибка измерения на 100 м, см	2	5	8
Диапазон работы для углов наклона, градус, не менее	±20	±20	±30
Диапазон автоматического редуцирования, градус, не менее	—	±10	—
Посадочный диаметр насадки, мм	—	46	46
Увеличение зрительной трубы, крат, не менее	25	—	—
Длина рейки, м, не более	2,2	1,5	1,2
Цена деления уровня дальномера, с	45—5	—	—
Цена деления рейки, мин	5—1	5—1	10—1
Масса, кг, не более	4	0,6	0,6

ДНР-5 — редуционный дальномер в виде насадки на зрительную трубу теодолита с постоянным параллактическим углом; используется для измерения горизонтальных проложений линий по вертикальной рейке с относительной ошибкой $1 : 1000—1 : 2000$;

ДН-8 — в виде насадки с переменным параллактическим углом; используется для измерения линий по горизонтальной рейке с относительной ошибкой $1 : 1000$.

Основные параметры и размеры перечисленных дальномеров приведены в табл. 32.

При работе с дальномерами необходимо выполнять следующие требования:

- рен отсчетного устройства дальномеров Д-2 и ДН-8 не должен превышать 0,1 цены деления отсчетной шкалы;

- дальномер типа Д-2 должен иметь вертикальный круг с ошибкой отсчитывания не более $1'$;

- горизонтальные рейки должны иметь визиры, обеспечивающие их расположение перпендикулярно к измеряемой стороне с ошибкой не более $20'$;

- ошибка нанесения штриха основной шкалы у реек ДНР-5 не должна превышать $0,07 \sqrt{n}$ мм, где n — число дециметров от начального до исследуемого штриха;

- штрихи верньера должны быть параллельны штрихам основной шкалы дальномерной рейки. Допускаются расхождения не более $30''$;

- ошибка нанесения штриха шкалы верньера не должна превышать 0,05 мм;

- относительная ошибка определения базы на рейке не должна быть более $1 : 4000$ для ДН-8 и $1 : 8000$ для Д-2;

- стрелка прогиба рейки и отклонение оси подставки относительно рейки не должны превышать 5 мм;

- дальномеры должны обеспечивать возможность измерения длин сторон хода при температуре воздуха от -40 до $+50^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха 95 %;

- крепление дальномерных насадок на оправе объектива зри-

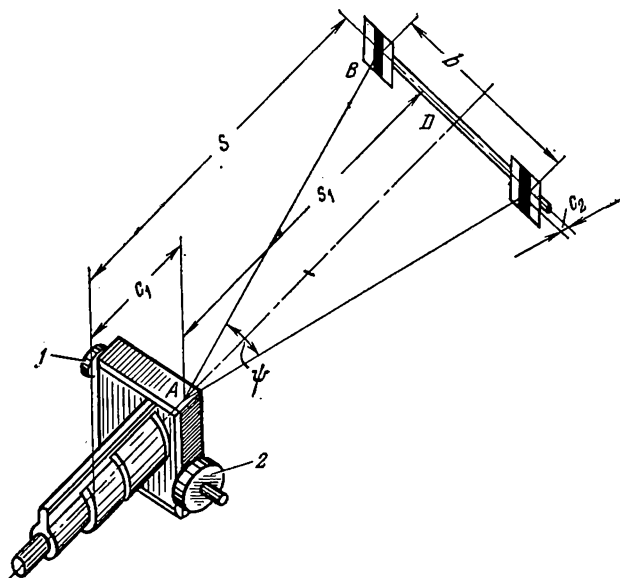


Рис. 72. Схема измерения расстояний дальномером с переменным параллактическим углом

тельных труб теодолитов должно обеспечивать неизменным положение насадки при измерении длин сторон хода;

— дальномеры с горизонтальной рейкой должны быть приспособлены для измерения расстояний по трехштативной системе.

Схема измерения расстояний дальномером с переменным параллактическим углом показана на рис. 72. Расстояние с учетом постоянных слагаемых дальномера определяют по формуле

$$s = s_1 + c_1 + c_2. \quad (\text{IV.2.8})$$

где $s_1 = \frac{1}{2} b \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} = \frac{b\rho}{\varphi} = \frac{K}{\varphi}$; K — коэффициент дальномера;

φ — параллактический угол, измеряемый с помощью шкалового микроскопа; c_1 — расстояние от вершины параллактического угла до вертикальной оси теодолита; c_2 — расстояние от оси штанги до плоскости марок.

Оптическая схема зрительной трубы теодолита Т15 с насадкой ДН-8 и микроскопом показана на рис. 73. Перед объективом зрительной трубы 1 помещены две длиннофокусные линзы. Линзовый компенсатор состоит из двух пар полулинз: положительных 4 и 3 и отрицательных 2 и 5. Полулинзы закреплены в отдельных оправках. Оправа с полулинзами 2, 3 перемещается установочной рукояткой 1 (см. рис. 72), а с полулинзами 4, 5 (см. рис. 73) — измерительной рукояткой 2 (см. рис. 72). К измерительному компенсатору прикреплена шкала 8 (см. рис. 73), оцифрованная через 5 делений от 0 до 120, изображение которой объективами 9, 10 микроскопа передается в поле зрения окуляра 12 на пластину со шкалой 11. Десять деле-

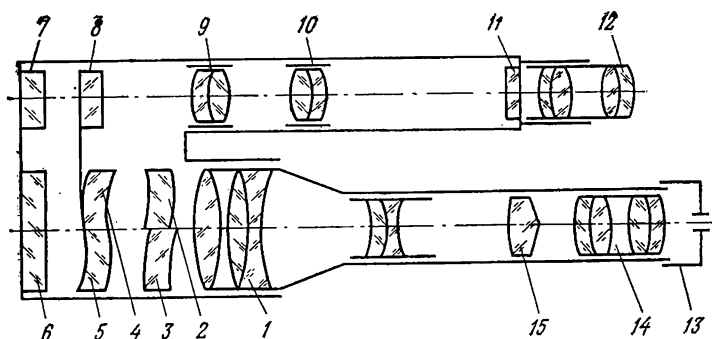


Рис. 73. Оптическая схема трубы теодолита с насадкой ДН-8

ний неподвижной шкалы 11 микроскопа соответствуют одному делению шкалы компенсатора. Шкала 8 и полулинзы компенсатора закрыты стеклами 6 и 7.

В поле зрения трубы видны два изображения марок: одно дает измерительный компенсатор, другое — установочный. Для повышения точности совмещения изображений в окулярную часть трубы поставлено разделительное устройство в виде бипризмы 15 и щелевой диафрагмы 13, навинченной на окуляр 14. Бипризма установлена на место сетки нитей и раздваивает изображения, а щелевая диафрагма разрезает их, т. е. одна половина является продолжением другой.

Рейка представляет комбинацию из двух баз (рис. 74). Две большие марки 2 и 2' укреплены на штанге 1 из алюминия на расстоянии 102 см и две малые марки 3 и 3' — на расстоянии 55 см друг от друга. На рейке установлен круглый уровень 5 с ценой деления 5—8' для установки рейки в горизонтальное положение и оптический визир 6 для установки рейки перпендикулярно к измеряемой стороне хода. В подставку рейки устанавливают марку 4 для измерения углов. В комплект дальномера входят две рейки.

Насадка закрепляется на объективе зрительной трубы так, чтобы нижняя грань корпуса была параллельна горизонтальной оси вращения трубы. Ребро бипризмы и щель диафрагмы устанавливают параллельно горизонтальной оси. Насадку надевают на объектив трубы при круге лево.

Проверки дальномерного комплекта.

1. Разделительное ребро бипризмы должно быть параллельно горизонтальной оси вращения трубы.

Разделительное ребро бипризмы наводят на точку, вращая наводящим винтом алидады, и смотрят, не смещается ли ребро с точки. Если условие не выполнено, то исправляют поворотом оправы бипризмы.

2. Щель диафрагмы, навинченной на окуляр, должна быть параллельна разделительному ребру бипризмы.

Установку щелевой диафрагмы осматривают на глаз. Исправляют ее поворотом, если наблюдаются побочные изображения, то нарушен размер щели, размер которой должен быть равен 0,75 мм.

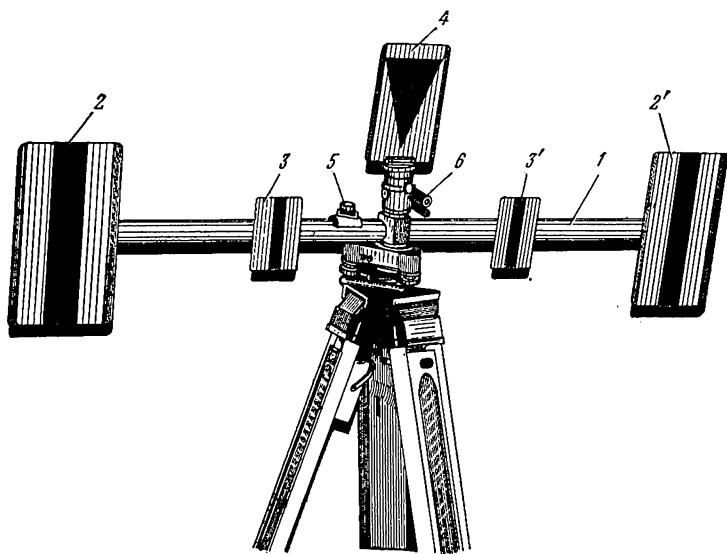


Рис. 74. Рейка дальномерной насадки ДН-8

3. Изображения марок, разделенные ребром бипризмы, не должны быть растянуты по высоте или сжаты.

Проверка выполняется до установки бипризмы. Изображения марок должны быть на одной высоте. Юстировку производят исправительными винтами оправы измерительного компенсатора.

4. Одно деление шкалы должно быть равно 10 делениям отсчетной шкалы.

Если рен более 0,25 делений шкалы, то исправляют перемещением линзы объектива микроскопа.

5. Ось круглого уровня на дальномерной рейке должна быть параллельна оси вращения втулки подставки.

Проверяют и исправляют так же, как цилиндрический уровень у теодолита.

6. Визирная ось трубки визира должна быть перпендикулярна к плоскости щитков марок рейки.

На расстоянии 40—50 м на ровной местности разбивают теодолитом прямой угол и на сторонах его устанавливают вехи. В вершину прямого угла вместо теодолита ставят рейку и визируют с помощью коллиматора на веху, стоящую в одной точке угла. Смотря вдоль верхних срезов марок, нужно увидеть веху, стоящую в другой точке угла. Исправление производят винтами визира, поворачивая его по горизонту до совмещения изображения визира с перекрестием сетки нитей.

7. Ось марки для угловых измерений должна совпадать с осью втулки подставки.

Устанавливают теодолит и рейку. К штативу с рейкой подвешивают отвес; смотрят в окуляр теодолита — ось марки и нить отвеса должны располагаться на одной линии.

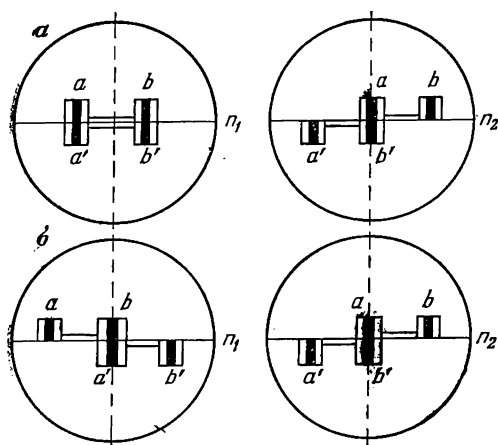


Рис. 75. Схема измерения параллактического угла насадкой ДН-8

Дальномерной насадкой ДН-8 расстояния от 100 до 180 м измеряют по малому базису, а от 200 до 700 м — по большому базису. При расстояниях менее 100 м измеряют половину угла по малому базису.

Рукояткой измерительного компенсатора 2 устанавливают отсчет по шкале микроскопа вблизи 60, а рукояткой установочного компенсатора 1 (см. рис. 72) совмещают изображения марок (рис. 75, а) и берут отсчет по шкале микроскопа n_1 . Рукояткой измерительного компенсатора перемещают изображения марок навстречу друг другу и берут отсчет n_2 . По разности отсчетов $n_2 - n_1 = \psi/2$ вычисляют половину параллактического угла. Необходимо таких приемов делать от 4 до 6. Перед каждым приемом немного сдвигают изображения рукояткой установочного компенсатора, а рукояткой измерительного компенсатора снова совмещают изображения марок. Допустимые расхождения между приемами не должны превышать 0,15 деления шкалы.

Полный параллактический угол измеряют по схеме, показанной на рис. 75, б. Параллактический угол вычисляют как разность отсчетов $n_2 - n_1 = \psi$.

Горизонтальное проложение линии, измеренной насадкой ДН-8, вычисляют по формуле

$$s = \frac{K}{\psi} + C + \Delta S_T - \Delta S_v. \quad (\text{IV.2.9})$$

Коэффициент дальномера K определяют на базе 24-метровой лентой или проволокой с точностью 1:5000 в прямом направлении на расстояниях 216, 240, 264, 360 м и в обратном направлении — 240, 264, 288, 360 м для больших марок. Измеряют расстояния длиной 72, 96, 120 м в прямом направлении и 96, 120, 144 м — в обратном направлении для малых марок. Коэффициент дальномера вычисляют по формуле

$$K = (s - C) \psi, \quad (\text{IV.2.10})$$

где s — длина базиса в метрах.

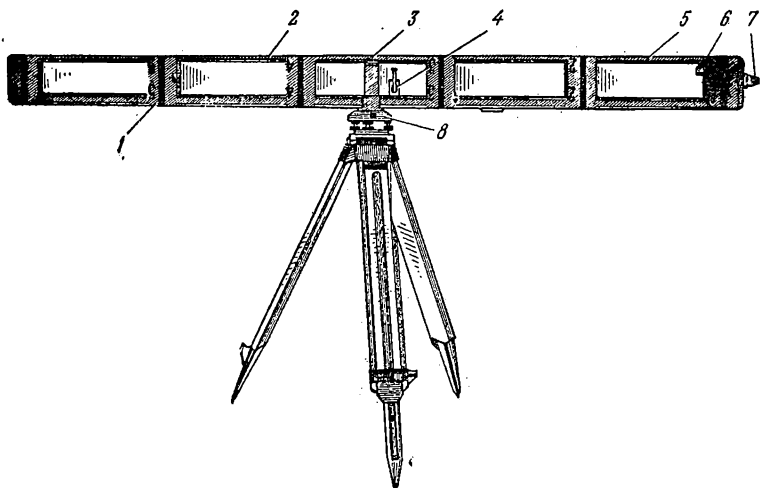


Рис. 76. Рейка дальномера Д-2

Коэффициент дальномера для больших марок равен 21 000, для малых марок — 11 000. Постоянное слагаемое дальномера $C=0,10$ м.

Поправку за наклон линии вычисляют по формуле

$$\Delta S_v = 2S \sin^2 v/2, \quad (\text{IV.2.11})$$

где S — измеренное по рейке расстояние.

Угол наклона определяют теодолитом при наведении средней горизонтальной нити на середину штанги рейки.

Поправку за температуру вычисляют по формуле

$$\Delta S_T = (K/\psi) 16 \cdot 10^{-6} (T - T_0), \quad (\text{IV.2.12})$$

где T — температура, при которой измерялась сторона хода; T_0 — температура, при которой определялся коэффициент дальномера; $16 \cdot 10^{-6}$ — коэффициент расширения стекла и материала, из которого изготовлена рейка ($\alpha_p = 23 \cdot 10^{-6}$ — дюралюминий, $\alpha_{ст} = 7 \cdot 10^{-6}$ — стекло).

Температуру измеряют термометром, который помещен внутри штанги рейки.

Дальномер Д-2 в отличие от насадки ДН-8 сконструирован в виде самостоятельного прибора двойного изображения с переменным параллактическим углом и снабжен оптическим комбинированным компенсатором, расположенным перед длиннофокусными линзами, закрывающим половину поля зрения трубы и позволяющим измерять параллактические углы до $5200''$. Оптический компенсатор состоит из перекидного оптического клина, позволяющего попеременно включать верхнюю или нижнюю часть дальномера.

Рейка дальномера Д-2 (рис. 76) состоит из каркаса 2 из дюралюминиевых труб, по обе стороны которого расположены марки 1 в виде желтых пластин с черной полосой. На рейке расположено по шесть оцифрованных марок, расстояния между штрихами марок образуют базы: 0,4; 0,8; 1,2; 1,6 и 2 м. Рейка снабжена двумя круг-

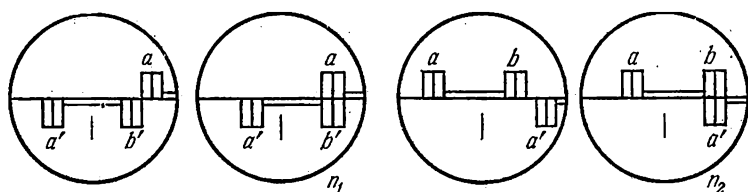


Рис. 77. Схема измерения параллактического угла дальномера Д-2

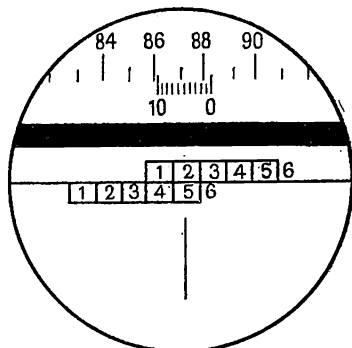


Рис. 78. Поле зрения шкалового микроскопа и трубы дальномера Д-2

лыми уровнями 3 и 6 для установки ее в горизонтальное и вертикальное положения и оптическим визиром 4 для установки рейки перпендикулярно к визирной оси дальномера. В верхней трубке каркаса помещен термометр 5 для измерения температуры при определении длины стороны теодолитного хода. С помощью цилиндрической втулки 7 рейку на штативе можно устанавливать в горизонтальном и вертикальном положениях. Подставка 8 снабжена оптическим центриром.

Для измерения параллактического угла поворачивают рычаг перекидного клина вверх и рукояткой измерительного компенсатора совмещают изображения марок (рис. 77); берут отсчет n_1 по дальномерной шкале и записывают число малых баз N_1 между номерами совмещенных марок. Затем поворачивают рычаг вниз до упора и рукояткой измерительного компенсатора совмещают марки, берут отсчет n_2 и записывают разность N_2 между номерами совмещенных марок. Разность отсчетов $n_2 - n_1 = \psi_k$ составляет переменную часть параллактического угла. Предусмотрено уменьшение вдвое цены деления дальномерной шкалы, чтобы значение параллактического угла не делить пополам. На рис. 78 в поле зрения трубы видно совмещение марок реек, а в поле зрения отсчетного микроскопа — отсчет, равный 88,14. Расхождения в значениях углов, полученных из 4—6 приемов, не должны превышать 1,5 деления шкалы микроскопа. Количество малых баз определяют как среднее $N = (N_1 + N_2)/2$. При измерении расстояний стремятся к равенству баз $N_1 = N_2$, тогда совмещение изображений марок производится в середине поля зрения. Расстояние, измеренное по другой стороне рейки, приводят к масштабу первой стороны рейки $\psi_2 = \psi_1 + 0,01$.

Параллактические углы можно измерять различными методами. Если работает клиновой компенсатор, отклоняющий луч на посто-

янный угол и образующий постоянную часть параллактического угла ψ_k , то совмещение марок осуществляется с помощью оптического клина. Переменная часть параллактического угла ψ_n измеряется линзовым компенсатором (как у насадки ДН-8). В целом параллактический угол является переменной величиной $\psi = \psi_k + \psi_n$.

Горизонтальное проложение определяют по формуле

$$s = \frac{NK}{\psi_k \pm \psi_n} + C + \Delta S_T - \Delta S_v. \quad (\text{IV.2.13})$$

Коэффициент дальномера определяют для одной малой базы. Постоянное значение параллактического угла определяют на базе длиной 360 м, разделенном на 12 интервалов, измеряемых мерной проволокой с точностью 1 : 20 000. При разнице температур измерения сторон и определения коэффициента дальномера более 5 °С вводят поправку за температуру ΔS_T . Измеряют угол наклона для определения поправки за наклон линии ΔS_v .

При работе комбинированного оптического компенсатора достигаются следующие преимущества: при измерении больших значений параллактического угла основную часть параллактического угла измеряют оптическим клином, а небольшую — линзовым компенсатором, поэтому не возникает необходимости значительно раздвигать линзы компенсатора; совмещение изображения марок производится в середине поля зрения трубы, поэтому симметричные наблюдения повышают точность измерений;

попеременное включение оптического клина обеспечивает симметричное совмещение штрихов марок, снижение инструментальных ошибок и устранение влияния дополнительного увеличения системы клиньев; сокращается время измерения параллактического угла.

Дальномерный комплект насадки редукционный ДНР-5 состоит из насадки, устанавливаемой на объектив зрительной трубы теодолита, противовеса, двух вертикальных реек с приставками. Рейки (рис. 79) двусторонние, штриховые, шкалы нанесены на инварной полосе и оцифрованы: одна — от 2 до 9, другая — от 1 до 9. На рейках неподвижно прикреплены к шкалам обратные верньеры 1, причем на одной стороне рейки верньер прикреплен по отношению к шкале так, что постоянное слагаемое дальномера $C=0$, а на другой стороне верньер сдвинут на величину, соответствующую $C=111,11$ м. Рейка снабжена круглым уровнем 5, двумя съемными подпорками 3 и съемной подставкой 4 длиной 0,5 м. Для проверки уровня на рейке имеются откидные штырь и крючок для подвешивания отвеса. Подпорки имеют рукоятки с накаткой 2, при вращении которых длина подпорок плавно изменяется, позволяя быстро и точно устанавливать рейку по уровню.

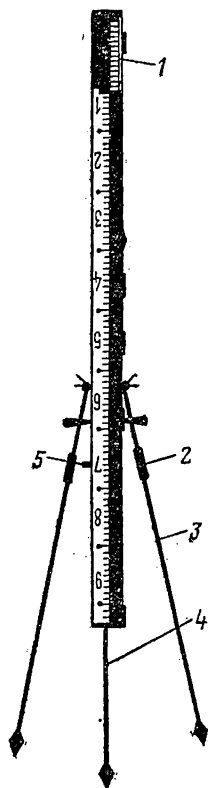


Рис. 79. Дальномерная рейка ДНР-5

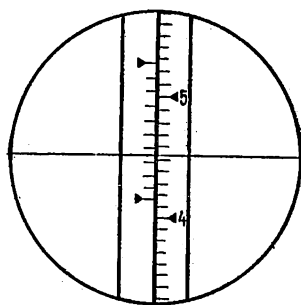
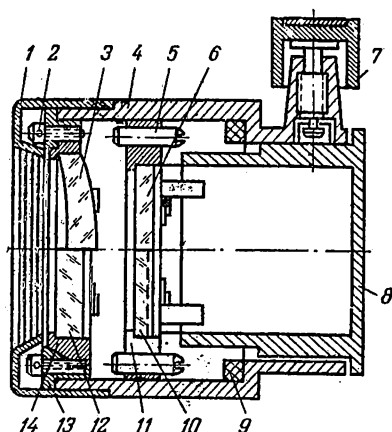


Рис. 81. Поле зрения ДНР-5

Рис. 80. Разрез дальномерной насадки ДНР-5

На рис. 80 показан разрез дальномерной насадки (вид сверху). В корпусе насадки 4 расположены оптический компенсатор и телескопическая линза. Оптический компенсатор состоит из неподвижного оптического клина 12 и качающегося редуцирующего клина 10, закрывающих половину поля зрения трубы. Телескопическая линза 3 и плоскопараллельная пластина 6 закрывают вторую половину поля зрения. Оптический клин 12 и телескопическая линза 3 склеены и заключены в оправу 14. Оправа соединена с обоймой 13 и скреплена с ней четырьмя юстировочными винтами 2. С помощью этих винтов оправу можно наклонять и тем самым изменять значение коэффициента дальномера во время его исправления. Юстировочные винты закрыты колпачком 1. Редуцирующий клин 10 склеен по торцу с плоскопараллельной пластиной 6 и заключен в оправу 11. Оправа подвешена в корпусе на двух полуосях и может покачиваться на них. Положение редуцирующего клина регулируется балансировочными винтами 5. Поролоновые подушечки 9 предохраняют редуцирующий клин от повреждения при наклоне зрительной трубы.

Насадка со зрительной трубой скреплена винтом 7. После снятия насадки посадочное отверстие закрывается заглушкой 8, являющейся арретиром редуцирующего клина.

Дальномерная насадка автоматически преобразует измеренные наклонные расстояния в горизонтальные проложения. Это достигается за счет компенсатора, который во время наклона трубы, оставаясь в отвесном положении, изменяет отсчет по дальномерной рейке, автоматически вводя в отсчет поправку за наклон измеряемой линии.

Изменение параллактического угла, необходимое для редуцирования наклонных расстояний, должно обеспечиваться изменением угла отклонения редуцирующего клина при изменении наклона визирного луча. Редуцирующий механизм уменьшает расстояние пропорционально $\cos^2 \nu$. Угловое увеличение телескопической линзы $\nu = 110/111$.

Насадка имеет разделительное устройство, состоящее из бипризмы и щелевой диафрагмы, которое дает возможность совмещать изображения штриховой рейки и верньера с большей точностью.

Отсчет по рейке снимается непосредственно в метрах, дециметрах, сантиметрах от верхнего штриха верньера. Например, отсчет по рейке на рис. 81 равен 52,565. Измеренное расстояние выражается суммой двух отсчетов из одного приема плюс постоянное слагаемое дальномера.

Перед началом работы с дальномерной насадкой ДНР-5 проверяется комплект и выявленные нарушения исправляются.

1. Если отсчет по рейке изменяется более чем на 0,02—0,03 деления шкалы, то результатом этого служит параллакс изображения шкалы и верньера. Для исправления нужно заменить компенсатор или работать, тщательно располагая глаз прямо перед окуляром.

2. При нечетком изображении рейки (окраски по краям) необходимо ослабить винты, оставить насадку на 1—2 дня в таком положении, после чего на базисе установить коэффициент дальномера.

3. Неисправность подшипников обнаруживается при расхождении выше допуска в измеренных расстояниях на разных углах наклона и устраняется механиком в мастерской.

4. Если 10 деления верньера не соответствуют 11 делениям на рейке, то измерять расстояния нельзя.

Камеральная обработка результатов полевых измерений. После измерения углов и сторон теодолитного хода тщательно проверяют все полевые журналы и приступают к увязке углов и вычислению дирекционных углов сторон хода. Значения углов поворота и дирекционных углов вычисляют до 0,1'.

В разомкнутом ходе (см. рис. 69, а) находят сумму всех измеренных углов вместе с примычными $\sum_{i=1}^{n+1} \beta_{изм}$ и сумму теоретическую по формулам для левых углов поворота

$$\sum_{i=1}^{n+1} \beta_{теор} = \alpha_n - \alpha_n + 180^\circ (n + 1), \quad (IV.2.14)$$

для правых углов поворота

$$\sum_{i=1}^{n+1} \gamma_{теор} = \alpha_n - \alpha_n + 180^\circ (n + 1), \quad (IV.2.15)$$

где α_n — дирекционный угол начальной стороны; α_n — дирекционный угол конечной стороны; β — измеренные левые по ходу лежащие углы; γ — измеренные правые по ходу лежащие углы. Невязку в углах находят по формуле

$$f_\beta = \sum_{i=1}^{n+1} \beta_{изм} - \sum_{i=1}^{n+1} \beta_{теор} \quad (IV.2.16)$$

и сравнивают ее с допустимой $f_{\beta доп}$ найденной по формуле (IV.2.2). Если полученная невязка не превышает допуска, то ее распределяют поровну на все углы, включая и примычные, с обратным знаком. Контроль: сумма поправок должна быть равна невязке с обратным знаком. По исправленным углам последовательно вычисляют дирекционные углы сторон хода:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \alpha_n \pm 180^\circ + \beta_1 \\ \alpha_2 &= \alpha_1 \pm 180^\circ + \beta_2 \\ &\text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \end{aligned} \quad (IV.2.17)$$

$$\alpha_n = \alpha_{n-1} \pm 180^\circ + \beta_n$$

$$\alpha_k = \alpha_n \pm \beta_{n+1} \text{ (контроль).}$$

В замкнутом теодолитном ходе (см. рис. 69, б) теоретическая сумма углов определяется по формуле

$$\sum_1^n \beta_{\text{теор}} = 180^\circ (n - 2). \quad (\text{IV.2.18})$$

Полученная угловая невязка f_β должна быть равна нулю или отличаться от нуля в пределах допуска. Дирекционные углы вычисляются из соотношений

$$\alpha_1 = \alpha_n \pm 180^\circ + \beta'_1 \text{ (поправка в примычный угол не вводится)}$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 \pm 180^\circ + \beta_2 \text{ (исправленный)}$$

$$\alpha_3 = \alpha_2 \pm 180^\circ + \beta_3 \quad (\text{IV.2.19})$$

— — — — —

$$\alpha_n = \alpha_{n-1} \pm 180^\circ + \beta_n$$

$$\alpha_1 = \alpha_n \pm 180^\circ + \beta_1 \text{ (контроль).}$$

Вычислив дирекционные углы и горизонтальные проложения сторон хода, последовательно решая прямую задачу на координаты, вычисляют прямоугольные координаты пунктов теодолитного хода с точностью до 0,01 м. Для чего вычисляют приращения координат по формулам

$$\Delta x = s \cos \alpha; \quad \Delta y = s \sin \alpha. \quad (\text{IV.2.20})$$

Для разомкнутого теодолитного хода подсчитывают суммы вычисленных приращений координат и, сравнивая их с теоретическими, вычисляют невязки по осям координат

$$\left. \begin{aligned} f_x &= \sum_1^n \Delta x_{\text{выч}} - (x_K - x_H); \\ f_y &= \sum_1^n \Delta y_{\text{выч}} - (y_K - y_H). \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.2.21})$$

Находят невязку в периметре хода по формуле

$$f_s = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}, \quad (\text{IV.2.22})$$

ее относительную ошибку и сравнивают с допустимой величиной

$$\frac{f_s}{\sum_1^n s} \leq \frac{1}{N}, \quad (\text{IV.2.23})$$

где $1/N = 1 : 3000$, $1 : 2000$ и $1 : 1000$.

Если полученная невязка допустима, то вычисляют поправки в приращения координат пропорционально длинам сторон

$$v\Delta x_i = -\frac{f_x}{\sum_1^n s} s_i; \quad v\Delta y_i = -\frac{f_y}{\sum_1^n s} s_i. \quad (\text{IV.2.24})$$

Сумма всех введенных поправок должна быть равна соответствующей невязке с обратным знаком. На практике вычисляют поправку на 100 м, а затем умножают ее на длину стороны. По исправленным приращениям координат вычисляют координаты всех пунктов:

$$\begin{array}{ll} x_2 = x_H + \Delta x_1 & y_2 = y_H + \Delta y_1 \\ x_3 = x_2 + \Delta x_2 & y_3 = y_2 + \Delta y_2 \\ \text{---} & \text{---} \\ x_n = x_{n-1} + \Delta x_{n-1} & y_n = y_{n-1} + \Delta y_{n-1} \\ x_K = x_n + \Delta x_n \text{ (контроль)} & y_K = y_n + \Delta y_n \text{ (контроль)}. \end{array} \quad (\text{IV.2.25})$$

В сомкнутом ходе сумма приращений координат теоретическая должна быть равна нулю как сумма проекций на координатные оси, и тогда невязки определяют по формулам

$$f_x = \sum_1^n \Delta x_{\text{выч}}; \quad f_y = \sum_1^n \Delta y_{\text{выч}}, \quad (\text{IV.2.26})$$

а координаты по формулам (IV.2.25):

$$\begin{array}{ll} x_2 = x_H + \Delta x_1 & y_2 = y_H + \Delta y_1 \\ x_3 = x_2 + \Delta x_2 & y_3 = y_2 + \Delta y_2 \\ x_4 = x_3 + \Delta x_3 & y_4 = y_3 + \Delta y_3 \\ \text{---} & \text{---} \\ x_n = x_{n-1} + \Delta x_{n-1} & y_n = y_{n-1} + \Delta y_{n-1} \\ x_H = x_n + \Delta x_n \text{ (контроль)} & y_H = y_n + \Delta y_n \text{ (контроль)}. \end{array}$$

Если невязка в теодолитном ходе окажется недопустимой, то необходимо искать ошибку в вычислениях или вновь проводить полевые измерения. Для облегчения определения ошибки в ходе можно использовать способ нахождения места в ходе, в котором допущен промах, по невязкам координат.

Если ошибка допущена в длине стороны, то невязка в периметре хода будет иметь направление такое же, как и направление стороны, в которой допущен промах. Нужно вычислить дирекционный угол невязки в периметре хода по формуле

$$\text{tg } \varepsilon = \frac{f_y}{f_x}. \quad (\text{IV.2.27})$$

В координатной ведомости находят дирекционные углы, близкие к ε или отличающиеся на 180° , и проверяют длины сторон у этих углов.

Если ошибка допущена при измерении угла, то направление невязки будет примерно перпендикулярное к направлению, в котором допущен промах. Вычисляют дирекционный угол ε по формуле (IV.2.27) и в координатной ведомости находят дирекционные уг-

лы, отличающиеся от ϵ на 90 или 270°. В этих вершинах надо искать ошибку в измерениях углов.

Методы теодолитной съемки. Теодолитная съемка производится с пунктов геодезических сетей, точек и сторон съемочных теодолитных ходов. Густота пунктов съемочного обоснования при съемке застроенных территорий на 1 км² не должна быть менее 8 для масштаба 1:2000, 16 — для масштаба 1:1000 и 32 — для 1:500.

Способ перпендикуляров используется для съемки объектов ситуации, расположенных вблизи сторон теодолитных ходов или створных линий между пунктами геодезической основы. Положение контурной точки определяется путем измерения рулеткой (стальной) или оптическим дальномером длины перпендикуляра (ординаты), опущенного из точки на сторону хода, и стальной лентой расстояния (абсцисса) от начала стороны до основания перпендикуляра с точностью до 0,1 м. Створные точки определяются промерами от соответствующих пунктов с точностью не менее 1:2000. Короткие перпендикуляры строят на глаз или при помощи ленты или рулетки, более длинные — эккером.

Эккер представляет собой трехгранную призму, две грани которой — зеркала, служат для восстановления и опускания перпендикуляров на стороны теодолитного хода.

Средняя относительная точность построения перпендикуляра 1:350. Предельные длины перпендикуляров для различных масштабов съемки приведены в табл. 33.

При съемке застроенных территорий способами перпендикуляров и засечек расстояния между створными точками не должны превышать величин, приведенных в табл. 34.

ТАБЛИЦА 33

Масштаб съемки	Предельная длина перпендикуляра, м построенного	
	на глаз	оптическим эккером
1:2000	8	60
1:1000	6	40
1:500	4	20

При контроле съемки методом перпендикуляров необходимо обмерять габариты всех зданий и сооружений, фасадную линию.

Способ линейных засечек используется при съемке объектов с четкими очертаниями. От известных точек хода рулеткой (лентой) измеряют расстояния до определяемой точки, причем

ТАБЛИЦА 34

Масштаб съемки	Расстояние между створными точками, м, измеренное	
	рулеткой (лентой)	оптическим дальномером
1:2000	80	120
1:1000	60	80
1:500	40	50

ТАБЛИЦА 35

Масштаб съемки	Расстояния до контуров, м	
	четких	нечетких
1:2000	400	1200
1:1000	200	600
1:500	100	300

длина засечек не должна превышать длины мерного прибора (20—50 м). Углы кварталов, опорных зданий и других важных контуров определяют с контролем тремя засечками.

Перпендикуляры длиннее указанных в табл. 33 подкрепляются линейными засечками.

Способ створов состоит в определении положения объектов относительно створной линии, которой являются стороны теодолитного хода или очертания крупных зданий. Способ створов сочетают с методами перпендикуляров и линейных засечек. Его широко используют при внутриквартальной съемке, а также при полевом контроле составленных планов.

Метод угловых засечек используется в тех случаях, когда трудно измерить расстояние. Из двух известных точек хода измеряют углы между стороной хода и направлениями на определяемую точку одним полуприемом с точностью 1'. Угол засечки не должен быть менее 30 и более 150°, а расстояния до определяемых точек — не более величин, указанных в табл. 35.

Метод обхода или обмера используют при съемке участков площадной формы, для чего прокладывают съемочный теодолитный ход по контуру участка местности с привязкой к пунктам плановой основы. При обмере строений измеряются также расстояния между углами соседних зданий и строений, которые используются как контрольные промеры.

При съемке одновременно с обмерами ведут абрис, в котором указывают все данные промеров и ситуации в соответствующих условных знаках, карандашом в произвольном масштабе на плотной бумаге. На абрисе подписывают названия улиц, переулков, площадей, номера отдельных домов, этажность, назначение и материал построенного здания; обозначаются больницы, школы, клубы, производственные склады. При сложной застройке на абрисе применяется штриховка зданий в зависимости от материала постройки. Кроме обмеров строений по фасаду, в абрисе с точностью до 0,1 м записывают промеры, которые делают между углами строений.

Метод полярных координат состоит в измерении теодолитом одним полуприемом с точностью до 1' горизонтального угла и расстояния стальной лентой, оптическим или нитяным дальномером со станции хода до реечной точки с точностью до 0,1 м. С точек, полученных полярным способом, как и со сторон теодолитного хода, можно вести съемку методами прямоугольных координат или линейных засечек. При съемке методом полярных координат на абрисе вычерчивают таблицу, в которую заносят данные измерений. Ориентирование лимба проверяется в конце съемки на каждой станции и расхождения между начальным и конечным ориентированием не должны быть более 3'.

Контроль съемки выполняется выборочно путем повторной съемки одной и той же точки другим способом.

ТАБЛИЦА 36

Масштаб съемки и метод определения расстояний	Расстояния до контуров, м	
	четких	нечетких
Нитяным дальномером		
1 : 2000	100	150
1 : 1000	60	100
1 : 500	40	80
Лентой или оптическим дальномером		
1 : 2000	250	300
1 : 1000	180	200
1 : 500	120	150

Графоаналитический способ используется при съемке застроенных территорий и выполняется в следующем порядке: определение координат углов кварталов и отдельных капитальных зданий и сооружений в результате проложения теодолитных ходов и нанесение этих точек на план;

обмер габаритов зданий рулеткой;

съемка строений и других контуров с помощью мензулы с пунктов геодезической основы и съемочных сетей; измерение расстояний до объектов дальномером, рулеткой или лентой.

При съемке полярным и графоаналитическим способами предельные расстояния от прибора до контуров не должны быть более величин, указанных в табл. 36 [4].

Съемка проездов делится на съемку ситуации, обмер фасадов и контрольные промеры. После зарисовки объектов в абрисе производятся угловые измерения на выбранные точки ситуации при одном положении круга. Обмеры фасадов выполняют до начала инструментальной съемки или после нее. Контрольные измерения производят выборочно между снятыми точками противоположных сторон фасадов. Такие измерения выполняют на углах кварталов. Поперечные промеры делают в местах излома фасадных линий. Контрольными промерами засекают выходы подземных коммуникаций, капитальные здания. На перекрестках улиц с помощью рулетки производят промеры между зданиями по диагоналям, которые записывают в абрис; в дальнейшем они служат контролем накладки углов кварталов по координатам.

Съемка проездов производится с точек съемочных теодолитных ходов вдоль улиц. Проложение висячих ходов не допускается. Вместо съемочных ходов в населенных пунктах с прямолинейными улицами разбиваются створные линии. Съемку проездов не разрешается производить с переходных точек и пунктов мензульных ходов.

Съемка внутри кварталов выполняется, как правило, после съемки проездов теми же способами с точек съемочных ходов и створных линий. При съемке ведут абрис и производят обмер строений и контуров. Углы поворотов ходов с помощью стальной рулетки привязывают не менее чем тремя промерами к четырем контурам фасадной линии.

При съемке застроенных территорий подлежат изображению здания с архитектурными выступами, изломы фасадной линии, трамвайные пути, мачты, мосты, памятники, скверы, смотровые колодцы, пункты съемочного обоснования, закрепленные долговременными знаками, и другие постоянные сооружения. Не подлежат съемке пе-

ТАБЛИЦА 37

Масштаб съемки	Допустимая длина висячего хода, м	Максимальное число сторон в ходе
1:2000	200	3
1:1000	150	2
1:500	100	2

реносные и временные сооружения, находящиеся на проездах и внутри кварталов (киоски, стенды, мусорные ящики и т. д.).

Если с точек съемочного обоснования нельзя произвести съемку внутри квартала из-за различных препятствий, то допускается [4] выполнение съемки с точек висячих теодолитных ходов, опирающихся одним концом на исходную точку. Допустимая длина и максимальное число сторон в висячих ходах не должны быть более величин, указанных в табл. 37.

Составление плана. При помощи линейки Ф. В. Дробышева строят координатную сетку в виде системы квадратов со сторонами 10 см. По координатам наносят исходные пункты и точки теодолитных ходов. Точки контуров и объектов местности наносят на план при помощи транспортира или хордоугломера или по координатам в соответствии с абрисом в том же порядке, как выполнялась съемка: закоординированные точки углов кварталов и капитальных строений, проезды, внутри кварталов. От точек и сторон теодолитного хода перпендикулярами и засечками наносят определяемые точки контуров и объектов местности.

На план сначала наносят все основные строения и объекты, имеющие значения ориентиров, затем застройку проездов и внутри кварталов, после чего — контуры, определенные с висячих ходов. Правильность нанесения контуров на план контролируется в процессе составления по контрольным промерам, выполненным при съемке. При съемке способом полярных координат, если расстояния до четких контуров превышают 30 м в масштабе 1:500, 60 м в масштабе 1:1000 и 120 м в масштабе 1:2000, то нанесение их производят по координатам. План оформляют условными знаками и надписями. Составленный план проверяют на местности сравнением с натурой и проведением контрольных измерений. Расхождения между расстояниями, взятыми с плана и полученными при контрольных промерах, не должны превышать 0,4 мм в масштабе плана. При наличии недопустимых расхождений проверяют наладку точек и, если не обнаружат ошибку, то повторяют измерения на местности. Если в процессе составления плана обнаруживается несоответствие в измерениях или отсутствуют необходимые обмеры, то уточнение производят непосредственно на местности. При камеральной обработке результатов теодолитной съемки рекомендуется использовать ЭВМ и автоматический координатограф (АК).

Вертикальная съемка застроенных территорий в равнинных районах выполняется нивелирами или горизонтальным лучом теодолита и кипрегеля с уровнем при трубе, а на всхолмленной местности — наклонным лучом. Вертикальная съемка выполняется после теодолитной (горизонтальной) съемки или одновременно со съемкой контуров. Весь участок съемки покрывают высотными пикетами не реже чем через 20 м при съемке в масштабе 1:500, 30 м при 1:1000, 40 м при 1:2000 и 100 м при 1:5000. Кроме того, пикеты должны быть определены и в характерных местах.

Нивелирные ходы должны быть привязаны к пунктам нивелирования I—IV классов и технического нивелирования. В порядке исключения допускается прокладывать висячие ходы в прямом и обратном направлениях. Допустимые невязки в нивелирных ходах или полигонах не должны превышать $f_h = 50\sqrt{L}$ мм, а в ходах короче 2 км $f_h = 10\sqrt{n}$ мм, где L — длина хода, в км; n — число станций в ходе.

При нивелировании определяют по двум сторонам реек высоты люков колодцев, цоколей зданий, бетонированных лотков, настилов мостов и верха труб на дорогах. В остальных случаях высоты точек определяют по одной стороне рейки. Длина визирного луча не должна быть более 150 м.

При нивелировании поперечных профилей определяют высоты у фасадной линии, на оси проезда, на бровке и дне кюветов. Расстояния между нивелируемыми точками поперечных профилей не должны быть более 40 м на плане в масштабе 1 : 2000 и 20 м — на планах в масштабах 1 : 1000 и 1 : 500.

Нивелирование проездов выполняют для получения высотного плана проезда, продольного и поперечных профилей, необходимых для решения инженерных задач, связанных с их проектированием и строительством. При нивелировании кварталов пикеты намечают у зданий, контуров ситуации и предметов местности и в характерных точках рельефа.

Для контроля вертикальной съемки на каждой станции определяют высоты не менее чем двух контрольных пикетов, которые расположены в полосе перекрытий и могут быть получены с другой станции. Расхождения между контрольными высотами, полученными с разных станций, не должны превышать 20 мм.

Рисовка рельефа производится непосредственно в процессе съемки или камерально по составленным абрисам. На участках с плотной застройкой допускается не проводить горизонтالي, а подписывать высоты точек. Одновременно с составлением плана проездов и внутри кварталов на план выписывают высоты пикетов с точностью 0,1 м.

IV.2.3. Тахеометрическая съемка

Тахеометрическая съемка выполняется при создании планов небольших участков в крупных масштабах как самостоятельный вид съемки, так и в сочетании с другими видами, когда:

проведение стереотопографической или мензульной съемок экономически нецелесообразно или технически неосуществимо; выполняется только вертикальная съемка на застроенной местности;

используется съемка узких полос местности при изысканиях железных и автомобильных дорог, высоковольтных линий передач, трасс трубопроводов и т. д. В результате тахеометрической съемки получают топографический план местности с изображением предметов, контуров и рельефа.

Тахеометрическую съемку выполняют одновременно с прокладкой тахеометрического хода (быстрее) или после прокладки и увязки хода (надежнее). Требования, предъявляемые к тахеометрическим ходам, приведены в табл. 38.

Тахеометрические ходы прокладывают так же, как и теодолитные, только кроме измерения горизонтальных углов и сторон хода измеряют превышения тригонометрическим нивелированием. Превы-

ТАБЛИЦА 38

Масштаб съемки	Максимальное значение		
	длины хода, м	длины сторон, м	числа сторон в ходе
1:5000	1200	300	6
1:2000	600	200	5
1:1000	300	150	3
1:500	200	100	2

шения вычисляют по формулам тригонометрического нивелирования (IV.1.11) и

$$h = \frac{1}{2} S \sin 2v + i - v + f, \quad (\text{IV.2.28})$$

где S — расстояние, измеренное дальномером по рейке;
и

$$h = D \sin v + i - v + f, \quad (\text{IV.2.29})$$

где D — измеренное (светодальномером) наклонное расстояние.

Если наведение зрительной трубы осуществляют на рейку, где отмечена высота прибора и расстояние до рейки не более 300 м, то формулы (IV.2.28) и (IV.2.29) имеют вид

$$h = \frac{1}{2} S \sin 2v; \quad h = D \sin v.$$

Если известно горизонтальное проложение линии s_0 , то в этом случае

$$h = s_0 \operatorname{tg} v.$$

Горизонтальные углы в тахеометрических ходах измеряют одним полным приемом тахеометром или теодолитом. Угловые невязки в ходах не должны превышать соответственно $f_{\beta \text{ доп}} = 0,5' \sqrt{n+1}$ и $f_{\beta \text{ доп}} = 1' \sqrt{n+1}$, где $n+1$ — число углов в ходе. Допустимая невязка в периметре хода вычисляется по формуле

$$f_s = \frac{s}{400 \sqrt{n}}, \quad (\text{IV.2.30})$$

где s — длина хода в м; n — число сторон в ходе.

Стороны в тахеометрических ходах измеряют любым дальномером и только при съемке в масштабе 1:500 — лентой.

Рулеткой измеряют высоту прибора с точностью 0,01 м.

Измеряют прямые и обратные превышения, расхождения между которыми не должны превышать 4 см на 100 м хода. Для увязки превышений в разомкнутом ходе суммируют все средние превышения и находят невязку по формуле

$$f_h = \sum_1^n h_{\text{ср.выч}} - (H_K - H_N). \quad (\text{IV.2.31})$$

Сравнивают ее с предельной, вычисленной по формуле

$$f_{\text{пред}} = \frac{0,04s}{\sqrt{n}} \text{ (см)}. \quad (\text{IV.2.32})$$

Если невязка получилась допустимая, то ее распределяют пропорционально длинам сторон. По увязанным превышениям вычисляют высоты точек хода. В сомкнутом ходе $H_{\text{н}} = H_{\text{к}}$ и $\sum_1^n h_{\text{теор}} = 0$, тогда

$$f_h = \sum_1^n h_{\text{выч}}.$$

При определении углов наклона для вертикального круга с односторонним отсчетным устройством и делениями на круге, подписанными по ходу часовой стрелки, к отсчету при круге лево прибавляют 180° , и формулы имеют вид

$$\begin{aligned} \text{МО} &= (\text{П} + \text{Л} + 180^\circ)/2; & \nu &= [\text{П} - (\text{Л} + 180^\circ)]/2; \\ \nu &= \text{МО} - (\text{Л} + 180^\circ); & \nu &= \text{П} - \text{МО}. \end{aligned} \quad (\text{IV.2.33})$$

У теодолита ТЗ0 на вертикальном круге деления подписаны против хода часовой стрелки, поэтому используют формулы (к малым отсчетам надо прибавлять 360°)

$$\begin{aligned} \text{МО} &= (\text{П} - \text{Л} + 180^\circ)/2; & \nu &= \text{Л} - \text{МО}; \\ \nu &= \text{МО} - \text{П} - 180^\circ; & \nu &= (\text{Л} - \text{П} - 180^\circ)/2. \end{aligned} \quad (\text{IV.2.34})$$

Вертикальный круг теодолитов 2Т5К и Т15К имеет секторную оцифровку, позволяющую отсчитывать углы наклона без дополнительных вычислений. Вертикальный круг разделен на четыре сектора: два противоположных имеют положительную оцифровку, а два других — отрицательную. Цифры, расположенные в отрицательных секторах, имеют знак минус, в положительных секторах нет знака. Шкала вертикального круга теодолита Т15К также имеет две оцифровки (рис. 82). Верхняя оцифровка шкалы используется для отсчета положительных вертикальных углов, когда в ее пределах находится штрих вертикального круга, не имеющий знака перед оцифровкой. Нижняя оцифровка шкалы служит для отсчета отрицательных

углов, если вертикальный штрих имеет знак минус. Цена деления шкалы соответствует $1'$. На рис. 82 в поле зрения отсчетного микроскопа теодолита Т15К отсчет по шкале вертикального круга равен $-0^\circ 24,0'$.

У теодолита Т15К основное положение вертикального круга слева от наблюдателя, поэтому формулы для вычисления углов наклона имеют вид

$$\text{МО} = (\text{П} + \text{Л})/2;$$

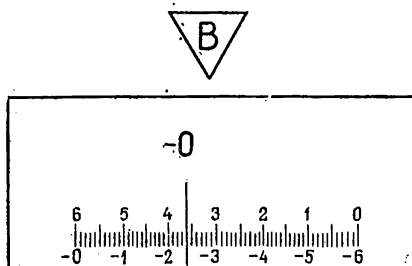


Рис. 82. Оцифровка вертикального круга теодолита Т15К

$$\begin{aligned} v &= \text{Л} - \text{МО}; \quad v = (\text{Л}^{012} - \text{П})/2; \\ v &= \text{МО} - \text{П}. \end{aligned} \quad (\text{IV.2.35})$$

Основное требование, предъявляемое к вертикальному кругу, — постоянство места нуля. Для удовлетворения этого требования необходимо, чтобы вертикальный круг был жестко скреплен с трубой, уровень — с алидадой вертикального круга, а визирная ось должна занимать неизменное положение при измерении угла. Проверяется это условие путем многократного определения МО на разных расстояниях. Если колебания МО окажутся более двойной точности отсчетного устройства, то нужно найти причину и устранить ее. При постоянном значении МО, но отличающемся от величины 0°, для удобства вычислений углов наклона приводят МО к значению, близкому 0°. Для чего определяют значение МО и устанавливают его на вертикальном круге наводящим винтом трубы. Наводящим винтом алидады совмещают нуль отсчетного устройства с нулем вертикального круга, при этом пузырек уровня уйдет из нуль-пункта. Исправительными винтами уровня приводят пузырек уровня на середину. Или можно определить значение МО и оставить трубу наведенной на точку при круге право. Вычисляют значение угла наклона и наводящим винтом алидады вертикального круга устанавливают его, вследствие чего пузырек уровня уйдет из нуль-пункта. Исправительными винтами уровня приводят пузырек уровня в нуль-пункт.

У теодолитов 2Т5К, Т15К и других вместо уровня на вертикальном круге имеется самоустанавливающийся оптический компенсатор места нуля, который освобождает наблюдателя от необходимости установки пузырька уровня в нуль-пункт перед каждым отсчетом по вертикальному кругу.

Проверка оптического компенсатора заключается в том, что компенсатор должен обеспечивать неизменность отсчета по вертикальному кругу при отклонении вертикальной оси теодолита от отвесной линии на величину до 3'.

Устанавливают теодолит на расстоянии 200—500 м от точки так, чтобы линия, соединяющая два подъемных винта, была перпендикулярна к линии визирования, а третий подъемный винт расположен по направлению линии визирования. Приводят пузырек уровня на алидаде горизонтального круга в нуль-пункт и берут отсчет по вертикальному кругу. Наклоняют теодолит подъемными винтами подставки в сторону визирной цели на 2—3', т. е. на 4—5 делений уровня, и берут отсчет по вертикальному кругу. Затем наклоняют теодолит на 2—3' в противоположную сторону и вновь берут отсчет. Проверяют компенсатор также по направлению двух других подъемных винтов и берут отсчеты по вертикальному кругу. Расхождения между отсчетами не должны превышать 0,1', если больше, то исправление производят в мастерской.

При измерении расстояний в тахеометрических ходах используют любой дальномер, в том числе и нитяный, который имеется во всех зрительных трубах геодезических приборов. Нитяный дальномер относится к оптическим дальномерам с постоянным параллактическим углом ($\Psi = 34,38'$). Расстояние определяют по формуле

$$s = 100l + p, \quad (\text{IV.2.36})$$

где l — отсчет между дальномерными нитями; p — поправка.

Значение поправки p определяют опытным путем на базисе длиной 100—150 м. На базисе разбивают отрезки по 10 или 20 м, которые измеряют лентой дважды с ошибкой не менее 1 : 3000, и закрепляют колышками. На каждой точке последовательно устанавли-

ливают рейку и берут отсчеты по трем нитям. Контролем служит сходимость разности отсчетов между дальномерными нитями с отсчетом по средней горизонтальной нити. Каждое наведение на рейку с отсчетами по трем нитям составляет один прием. При последующих приемах визирную ось несколько перемещают наводящим винтом трубы, чтобы отсчеты брать на разных частях рейки. Измерения выполняют не менее трех раз на каждом отрезке. Предельные расхождения в отсчетах по дальномерным нитям в приемах не должны превышать 0,5 см. На каждое расстояние получают свою поправку:

$$p_{10} = 10 \text{ м} - 100l_1;$$

$$p_{20} = 20 \text{ м} - 100l_2;$$

$$p_{30} = 30 \text{ м} - 100l_3,$$

• • • • •

и составляют таблицу поправок, которой пользуются при вычислении расстояний. Точность измерения расстояний нитяным дальномером порядка 1:400.

Тахеометры служат для измерения горизонтальных и вертикальных углов, длин линий и превышений и делятся в зависимости от используемых в них дальномеров на следующие типы.

ТЭ — электрооптический с автоматической регистрацией результатов измерений на световом табло в цифровом виде и на перфокарте в условном коде. Тахеометры имеют светодальномерное устройство для измерения расстояний, кодовые горизонтальный и вертикальный круги для измерения углов, электронное устройство для автоматической выдачи результатов измерений. Передающее и приемное устройства дальномера и оптическое устройство зрительной трубы объединены в одну систему. Компенсатор вместо уровня на алидаде вертикального круга должен работать при наклоне прибора в пределах 1,5°.

ТВ — тахеометр внутрибазный, используется для определения расстояний, приведенных на горизонтальную плоскость, и превышений по измеренному углу наклона на местный предмет или специальную марку.

ТН — тахеометр номограммный, используется для определения расстояний, редуцированных на горизонтальную плоскость, и для определения превышений при помощи номограммы, видимой в поле зрения трубы по вертикальной рейке.

ТД — тахеометр с редуцированным дальномером двойного изображения, применяется для определения превышений и расстояний по горизонтальной рейке. Тахеометры типов ТН и ТД с использованием вертикальной рейки и нитяного дальномера с коэффициентом 100 позволяют измерять расстояния до 350 м.

Из зарубежных тахеометров наибольшее распространение в нашей стране получили редуцированный тахеометр Редта 002, Дальта 020, Дальта 010 и 010А, BRT 006 и др. Основные показатели тахеометров приведены в табл. 39.

Тахеометр ТД с постоянным параллактическим углом имеет угломерную часть прибора, выполненную на базе теодолита Т5К, поэтому на алидаде вертикального круга отсутствует уровень и его роль выполняет оптический компенсатор. Оптический компенсатор состоит из двух кольцообразных клиньев, расположенных в подставке трубы, и работает как дальномер, а при повороте компенсатора на 90° — как высотомер. Смена режима работы компенсатора осу-

Показатели	Типы тахеометров			
	ТД	ТВ	BRT006	Дальта 010А
Увеличение зрительной трубы, крат, не менее	27	15,7	15	25
Наименьшее расстояние визирования зрительной трубы, м	2	2	1,8	3
Средняя квадратическая ошибка измерения угла из приема:				
горизонтального, с	5	30	15	5
вертикального, с	10	40	30	6
Диапазон измерения расстояний, м	20—180	60—180	60—180	20—350
Коэффициент дальномера	100	200	200	100, 200
Средняя квадратическая ошибка измерения расстояний на 100 м, см, не более	4	10	6	10—20
Коэффициенты кривых превышений	100	—	—	10, 20, 50, 100
Средняя квадратическая ошибка определения превышения на 100 м, см, не более	5	4	4	3, 5, 10, 15
Диапазон работы редуцирующего устройства, градус	±45	±45	±45	±45
Длина рейки, м	2,1	0,6	0,6	3
Масса, кг	5,7	7,5	6,7	4,7

ществляется рукояткой. Компенсатор работает при углах наклона прибора в пределах 3' с ошибкой самоустановки до 2".

В комплект тахеометра ТД входят две рейки со штангами и рейкодержателями и три штатива с подставками. Рейка тахеометра ТД (рис. 83) с двухсантиметровыми делениями имеет три верньера. По среднему отсчитывают расстояния от 20 до 180 м и превышения в пределах ± 90 м, по правому верньеру — расстояния от 90 до 180 м и превышения от +90 до +180 м, по левому — отрицательные превышения от —90 до —180 м. По рейке отсчитывают расстояния с помощью одного из обратных верньеров и оптического микрометра, роль которого выполняет телескопическая полулинза, создающая дополнительное увеличение в системе $\Gamma=110/111$. Средняя квадратическая относительная ошибка измерения расстояния порядка 1:5000.

Параллактический угол у тахеометра ТД изменяется пропорционально косинусу угла наклона автоматически, в результате чего получаются горизонтальные проложения измеренных расстояний.

Тахеометр ТВ относится к дальномерам двойного изображения с переменной базой внутри прибора. Параллактический угол изменяется в зависимости от угла наклона, поэтому происходит автоматическое редуцирование наклонных расстояний.

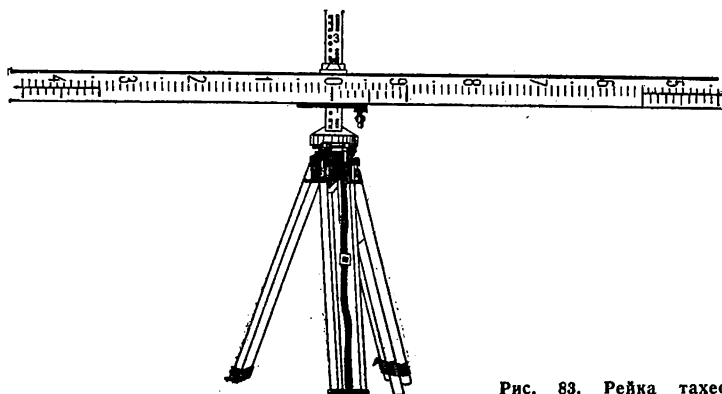


Рис. 83. Рейка тахеометра ТД

Компенсатор у тахеометра ТВ состоит из двух кольцеобразных клиньев, один из которых служит одновременно вертикальным кругом с делениями через $10''$. С помощью блока призм и ромб-призмы изображение штрихов вертикального круга передается в поле зрения окуляра зрительной трубы. Изображение штрихов горизонтального круга передается микроскопом, расположенным на корпусе тахеометра.

Дальномерная рейка представляет собой горизонтальную штангу, на которой укреплены три марки. Расстояние от среднего до крайнего штриха марок 300 мм. Штанга имеет визир, с помощью которого наводят на веху. Тахеометром ТВ измеряют расстояния от 2 до 60 м без рейки, а от 60 до 180 м — по рейке с точностью 1:1000. Тахеометр используют при тахеометрической съемке труднодоступных участков, открытых горных выработок, в городах в условиях интенсивного движения транспорта, а также в автодорожном и транспортном строительстве.

Внутрибазный редуцирующий тахеометр BRT 006 (ГДР) автоматически редуцирует наклонные расстояния, позволяет отсчитывать по горизонтальному и вертикальному кругам с помощью шкалового микроскопа, имеет рукоятку для установки лимба и зрительную трубу, которая переводится через зенит. Точность измерения расстояний порядка 1:1600. Тахеометр используется для производства тахеометрической съемки в городах со сплошной застройкой и в труднодоступных местах. Тахеометр BRT 006 может быть использован с мензульным столиком Карти-250, тогда непосредственно полуавтоматическим путем получается план местности.

Тахеометр Дальта 020 (ГДР) — оптический теодолит повторительного типа с дисковым

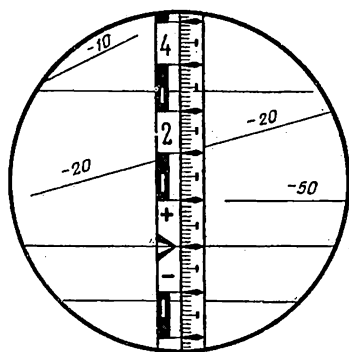


Рис. 84. Поле зрения трубы Дальта 020

повторительным приспособлением и тахеометр с номограммой. Вертикальный круг с градусными делениями наглухо прикреплен к оси вращения трубы и вращается вместе с ней. Второй вертикальный круг соединен с осью вращения трубы и закреплен относительно колонки трубы неподвижно. На этом круге нанесены кривые номограммы дальномера и высотомера. В поле зрения трубы видны кривые номограммы и дальномерные нити с коэффициентом $K=200$ (рис. 84). Для отсчетов по вертикальному и горизонтальному кругам служат шкаловой микроскоп с ценой деления $1'$, окуляр которого расположен рядом с окуляром зрительной трубы. При вращении трубы номограмма остается неподвижной, а против отверстия трубы при разных ее наклонах будут приходиться разные точки кривых номограммы. При отсчитывании по рейке основную кривую номограммы наводят на специальную марку на рейке, расположенную на высоте прибора или на высоте 1,4 м от основания рейки, и делают отсчеты по кривым расстояний и превышений, как по дальномерным нитям. На рис. 84 отсчет по кривой горизонтальных проложений $l_s=25$ см, а по кривой превышений с коэффициентом $K'=-20$, $l_h=18,1$ см. Вычисляя по формулам

$$s = Kl_s \text{ и } h = K' l_h, \quad (\text{IV.2.37})$$

получим $s=100 \times 25 \text{ см} = 25 \text{ м}$; $h = -20 \times 18,1 = -0,36 \text{ м}$.

Кривая горизонтальных проложений действует в интервале от $+45^\circ$ до -45° с коэффициентом 100. Кривые превышений имеют коэффициенты: ± 10 , ± 20 , ± 50 и ± 100 . В комплект входят четырехметровые рейки с выдвижным концом, чтобы уравнивать высоту прибора и визирования.

Тахеометр Дальта 010А является модификацией тахеометра Дальта 020. По конструкции вертикальный и номограммный круги разделены. Окуляр микроскопа расположен слева от трубы. Все операции выполняются в одном месте и одной рукой, что при наборе пикетов дает существенную экономию времени и меньше утомляет наблюдателя. В конструкции тахеометра применены: лучший оптический визир, более совершенное демпфирование индекса вертикального круга, выгодное цветовое выделение отсчетов кругов, что повышает производительность работ.

ТАБЛИЦА 40

Масштаб съемки	Высота сечения рельефа, м	Допустимое расстояние		
		между пикетами, м	от прибора до рейки при съемке рельефа, м	от прибора до рейки при съемке контуров, м
1:5000	0,5	60	250	150
	1,0	80	300	150
	2,0	100	350	150
	5,0	120	350	150
1:2000	0,5	40	200	100
	1,0	40	250	100
	2,0	50	250	100
1:1000	0,5	20	150	80
	1,0	30	200	80
1:500	0,5	15	100	60
	1,0	15	150	60

и высоты точек тахеометрического хода до 0,01 м, вычисляют высоты всех пикетов на станции до 0,1 м.

План тахеометрической съемки составляют на планшете размером 60×60 см. На плане разбивают координатную сетку; по координатам наносят пункты геодезических сетей и тахеометрических ходов. С помощью транспортира, масштабной линейки и измерителя или автоматического координатографа наносят реечные точки: ситуации и рельефа, проводят горизонтالي.

Контролируют съемку, определяя некоторые пикеты дважды с разных станций или разными методами. Каждый план до вычерчивания в туши корректируют и проверяют в поле путем сопоставления рельефа и ситуации, изображенных на плане, с местностью.

IV.2.4. Нивелирование поверхности

Нивелирование поверхности производится с целью получения крупномасштабных планов местности с малой высотой сечения рельефа на равнинной местности. При нивелировании поверхности на местности создается сеть точек, положение которых определяют в плановом и высотном отношении. Плановое положение точек определяется с помощью проложения теодолитных ходов, а высотное — техническим нивелированием. Существует несколько способов нивелирования поверхности: по квадратам, параллельным линиям, полигонам и др.

При съемке с высотами сечения рельефа через 0,25; 0,5 и 1 м в равнинной местности нивелирование поверхности выполняют по квадратам. Сначала разбивают сетку со сторонами 200—400 м (рис. 86). Затем разбивают квадраты внутри сетки со сторонами 40 м для масштаба 1:2000 и 20 м для съемок в масштабах 1:1000 и 1:500. При разбивке квадратов ведут горизонтальную съемку ситуации и полученные данные заносят в абрис. На абрисе (см. рис. 86) стрелками показывают направления скатов. Вершины всех квадратов закрепляют колышками со сторожками.

По внешним сторонам сетки квадратов прокладывают теодолитные и нивелирные ходы, которые привязывают к пунктам государственной геодезической сети. Квадраты со сторонами по 100 м нивелируют каждый отдельно. С нивелиром встают посередине первого квадрата, а рейки последовательно устанавливают на все его вершины и делают отсчеты. Затем переходят в середину второго квадрата и также нивелируют его вершины. Вначале нивелируют в наружных квадратах, а затем во внутренних. Отсчеты записывают на схеме внутри квадрата у соответствующих точек. Контроль проводят следующими способами: на стороне каждого квадрата суммы накрест лежащих отсчетов равны между собой,

$$a_1 + b_2 = a_2 + b_1 \text{ или } a_1 - b_1 = a_2 - b_2, \quad (\text{IV.2.38})$$

по разностям горизонтов инструментов на соседних станциях

$$H_{yII} - H_{yI} = b_1 - a_1; \quad H_{yII} - H_{yI} = b_2 - a_2$$

$$\text{или } a_2 - a_1 = b_2 - b_1. \quad (\text{IV.2.39})$$

Если расхождения не превышают 5 мм, то вычисляют превышение между угловыми точками внешних сторон квадратов и записывают их средние значения. В сомкнутом полигоне сумма средних превышений должна быть равна нулю. Если полученная невязка не превышает допустимой величины, вычисленной по формуле

$$f_{\text{ндоп}} = 10 \sqrt{n} \text{ мм},$$

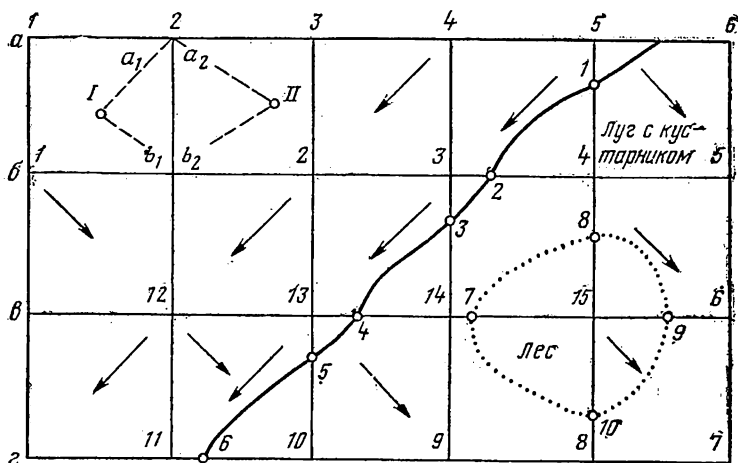


Рис. 86. Журнал и абрис нивелирования по квадратам

где n — число превышений, то полученную невязку распределяют по ровну на все превышения. По уравненным превышениям вычисляют высоты связующих точек (вершин внешних квадратов), высоты вершин остальных квадратов определяют как промежуточные точки — через горизонт инструмента.

Нивелирование поверхности способом параллельных линий или проложением нивелирных ходов по всем характерным линиям рельефа с разбивкой поперечников применяют в открытой и закрытой местности с равнинным рельефом. Параллельные ходы связываются между собой перемычками не реже чем через 1000 м при съемке в масштабе 1 : 2000 и через 600 м при съемках в масштабах 1 : 1000 и 1 : 500. В обе стороны от параллельных нивелирных ходов разбивают поперечники через 40 м при съемке и в масштабе 1 : 2000 и через 20 м — при съемках в масштабах 1 : 1000 и 1 : 500. Длины поперечников не должны превышать соответственно 500 и 300 м [5]. Пикетаж разбивают по профильным линиям и в местах перегибов скатов обозначают плюсовые точки. К порядковому номеру поперечника присоединяют номер пикета для определения, к какому профилю относится реечная точка. Поперечники нивелируют каждый в отдельности или одновременно два и более.

Вместе с разбивкой пикетажа по нивелирным ходам и поперечникам производят съемку ситуации одним из способов теодолитной съемки, по результатам которой составляют абрис. Высоты определяют нивелирами типа Н-10 и (Н-10КЛ).

Способ полигонов применяют в открытой местности с явно выраженными формами рельефа. Для нивелирования поверхности по характерным линиям рельефа прокладывают теодолитные и нивелирные ходы с разбивкой пикетажа и поперечных профилей.

Полярный способ нивелирования поверхности используют в полукрытой местности при крутизне скатов, позволяющей проводить геометрическое нивелирование. Для чего применяют нивелир с горизонтальным кругом или наклонной линией визирования. Вершины

такого теодолитно-нивелирного хода являются станциями, с которых производят съемку характерных точек ситуации и рельефа, расположенных в радиусе 100—150 м. Результаты съемки записывают в журнал и ведут абрис.

IV.2.5. Мензульная топографическая съемка

Сущность метода. Мензульная съемка — это углоначертательный способ съемки. Она основана на графическом определении на планшете взаимного положения точек местности между собой и относительно пунктов геодезической основы при использовании полярного и биполярного способов. Установив плоскость мензульной доски в горизонтальное положение, строят графические изображения углов и линий местности с помощью кипрегеля.

Мензульная съемка выполняется на небольших участках в крупных масштабах, когда отсутствуют материалы аэрофотосъемки или нецелесообразно использовать аэрофотосъемку, а также в сочетании с другими видами съемок. Мензульная съемка выполняется с помощью мензулы и кипрегеля на планшетах с квадратной разграфкой и позволяет непосредственно на местности составлять топографический план. Достоинством мензульной съемки является наглядность, так как в процессе съемки план может быть сопоставлен с местностью. Недостатком является то, что основная часть работ проходит в полевых условиях, невозможность работы зимой и в дождливую погоду, громоздкость оборудования.

Планшеты изготавливают из высококачественной чертежной бумаги, наклеенной или припрессованной на алюминий или малодеформирующийся пластик. Такую основу прибивают к мензульной доске.

На планшетах с помощью штангенциркуля, координатографа или линейки Дробышева разбивают сетку квадратов со сторонами 10 см, получая квадрат 50×50 см для съемок в масштабах 1:2000, 1:1000 и 1:500 и 40×40 см — для масштаба 1:5000. Расстояние от рамки квадрата до края планшета не должно быть менее 5 см для масштабов 1:2000, 1:1000, 1:500 и 10 см — для масштаба 1:5000. Контролем правильности построения координатной сетки служат следующие показатели:

— диагонали и стороны всех квадратов должны быть соответственно равны между собой (проверяют измерителем); сумма сторон трех квадратов и более не должна отличаться от теоретической более 0,3 мм;

— длины сторон квадратов прямоугольной сетки не должны отличаться от вычисленных размеров более 0,2 мм.

По вычисленным прямоугольным координатам наносят вершины рамки трапеции на планшет и все известные пункты геодезической основы от ближайших линий сетки с контролем по расстояниям между ними. Величина расхождения не должна превышать 0,2 мм. Если расхождения больше, то работу следует переделать заново, проверив накладку пунктов, а затем и построение координатной сетки.

Для ориентирования планшета по линии длина ее должна быть не менее 5 см на плане, а исходные пункты должны располагаться на одном планшете. Если линия между известными точками короче или точки попадают на смежные планшеты, то до начала работ следует удлинить линию аналитическим путем, т.е. определить координаты выходов ориентировочной линии. Выходы ориентировочных линий прочерчивают карандашом и на них подписывают названия направлений.

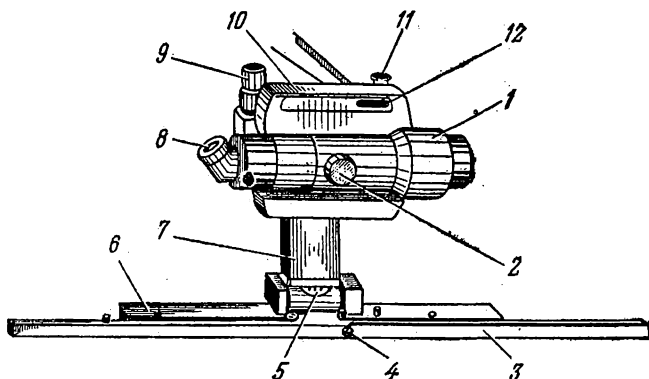


Рис. 87. Кипрегель КН

У западной или восточной рамки трапеции карандашом отмечают место для установки буссоли; над северной рамкой подписывают номенклатуру планшета.

После выполнения указанных работ составляют кальку высот. Накладывают кальку на планшет и копируют на нее рамку трапеции, линии координатной сетки в пределах трапеции, пункты геодезической основы, выходы ориентировочных линий и подписывают их названия и номенклатуру трапеции. Все оформление кальки ведется в ту же в тех же обозначениях, что и на планшете.

Мензульный комплект. Одновременно с подготовкой планшета проверяют мензульный комплект. Для мензульной съемки рекомендуется использовать мензулы и кипрегели типов КБ, КБ-1, КА-2. Мензула представляет собой небольшой столик, состоящий из штатива, подставки и доски (планшета). В настоящее время для мензульной съемки широко используют два типа мензул: универсальные (МУ) и облегченные (МО) с металлическими подставками.

Согласно ГОСТ 20778—75 «Кипрегель номограммный» установлен один тип кипрегеля с номограммами по всему полю зрения трубы в двух вариантах: КН с уровнем при вертикальном круге и КН-К с компенсатором. Кипрегель КН показан на рис. 87, его технические данные следующие:

Увеличение зрительной трубы, не менее	25×
Поле зрения трубы, не менее	1°20′
Диаметр объектива, мм	46
Диаметр окуляра, мм	1,5
Наименьшее расстояние визирования зрительной трубой, м	5
Пределы измерения вертикальных углов	±45°
Диапазон работы номограмм расстояний и превы- шений	±40°
Коэффициент номограмм расстояний	100—0,2
	200—0,2
Коэффициент номограмм превышений	10—0,2
	20—0,2
	100—0,2

Длина линейки кипрегеля, см:	
основной	35
дополнительной	50
Цена деления уровней на 2 мм:	
при вертикальном круге	30—6"
при основной линейке	60—12"
Средняя квадратическая ошибка измерения расстояния на 100 м, см, не более	20
Средняя квадратическая ошибка измерения превышения на 100 м, см, не более при коэффициенте номограммы:	
$K = \pm 10$	3
$K' = \pm 20$	6
$K' = \pm 100$	15
Средняя квадратическая ошибка измерения вертикального угла из одного приема, не более	45"
Размеры, мм, не более	550×145×225
Масса, кг, не более	3

Кипрегель КН состоит из трех основных частей: зрительной трубы 1, колонки 7 и линейки: основной 6, служащей основанием кипрегеля, и дополнительной 3, шарнирно соединенной с основной и позволяющей наносить на планшет снимаемые точки без передвижения всего прибора. Съёмные масштабные линейки расположены на дополнительной линейке, имеется паз, по которому перемещается штифт 4, наносящий на планшет снимаемые точки.

Зрительная труба расположена в верхней части колонки и вращается на 360° относительно вертикального круга; дает прямое изображение: для удобства наблюдения снабжена ломаным окуляром 8. Фокусирование осуществляется кремальерой 2.

Колонка 7 соединяет зрительную трубу с линейкой. В верхней части колонки закреплена осевая система вертикального круга и зрительной трубы. Нижняя часть колонки прикреплена к основной линейке 6, на которой расположен цилиндрический уровень 5, служащий для приведения плоскости планшета в горизонтальное положение. На колонке расположен наводящий винт трубы 9, совмещенный с закрепительным винтом, и наводящий винт вертикального круга 11, используемый для установки лимба на нулевой отсчет.

Цилиндрический уровень 10, соединенный с вертикальным кругом, служит для установки нуля круга. Уровень 12 при трубе реверсивный, позволяет использовать кипрегель в качестве нивелира, что облегчает набор пикетов в равнинной местности.

Кипрегель КН позволяет определять вертикальные углы: расстояния и превышения, редуцированные на горизонтальную плоскость, при одном наведении зрительной трубы на вертикальную рейку.

Мензульный комплект с кипрегелем КН состоит из подставки, несущего диска, посредством водильца и наводящего винта соединенного с планшетом размером 60×60 см, перемещающегося по азимуту в пределах 8—10° с помощью наводящего устройства (нижняя часть подставки соединяется с верхней закрепительным винтом); подставку закрепляют на штативе с раздвижными ножками типа ШР-120 тремя болтами, вмонтированными в головке штатива вместо станкового винта; двух реек с выдвигной пяткой, облегчающей наведение начальной кривой номограммы на высоту прибора; буссоли и центрировочной вилки.

При определении расстояний или превышений начальную кривую номограммы наводят на нуль рейки. Измерения производят при круге лево. Перед снятием отсчетов по рейке пузырек уровня на вертикальном круге должен быть приведен в нуль-пункт. Вместо специальной рейки можно использовать обыкновенную нивелирную рейку. Горизонтальное проложение и превышение вычисляют по формулам (IV.2.37) или

$$s = K(l_s - l_0); \quad h = K'(l_h - l_0), \quad (\text{IV.2.40})$$

где l_0 — отсчет по начальной кривой.

На рис. 88 показано поле зрения трубы кипрегеля КН, $l_s - l_0 = 32,1$ см, а $l_h - l_0 = 12,5$ см. Вычислив по формулам (IV.2.40), получаем $s = 32,1$ м, $h = -1,25$ м.

Поверки мензулы.

1. Мензула должна быть устойчивой в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Трубу кипрегеля, установленного на мензульной доске наводят на точку и слегка нажимают рукой по мензульной доске с боков. В этот момент изображение точки сходит с пересечения сетки нитей. По прекращении постукивания изображение точки должно вернуться в прежнее положение. Если этого нет, то условие не выполняется.

Трубу кипрегеля наводят на точку и слегка постукивают сверху доски. Условие выполнено, если мензула пружинит, т.е. после прекращения нагрузки на доску труба остается наведенной на точку. Если условие не выполнено, то следует проверить крепление доски к подставке, подставки к головке штатива, наконечников на концах ножек штатива. Проверяют, нет ли люфта в подъемных винтах и в головке штатива. В случае необходимости регулируют вращение подъемных винтов и заворачивают барашки, которыми удерживается головка штатива. Если и после этого мензула остается неустойчивой, то ее следует отдать в ремонт.

2. Верхняя поверхность мензульной доски должна быть плоской.

Проверка производится поверенной линейкой кипрегеля. Прикладывают скошенный край линейки к доске в двух взаимно перпендикулярных направлениях и смотрят, нет ли просветов между ребром линейки и поверхностью доски. Если просветы более 0,5 мм, то доску следует исправлять в столярной мастерской.

3. Верхняя плоскость мензульной доски планшета должна быть перпендикулярна к оси вращения мензулы.

У исправной мензулы после ее нивелирования ось вращения займет отвесное положение. Открыв закрепительный винт подставки, медленно вращают доску. Если пузырек уровня на линейке кипрегеля отклоняется от нуль-пункта не более чем на 2—3 деления, то условие выполнено. В противном случае мензулу следует ремонтировать в мастерской.

Поверки кипрегеля.

1. Скошенный край линейки кипрегеля должен быть прямой линией.

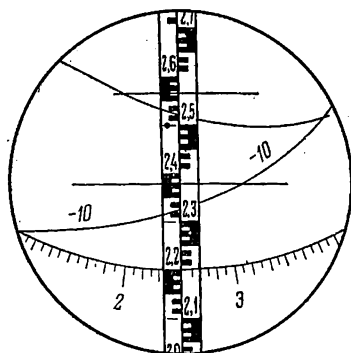


Рис. 88. Поле зрения трубы кипрегеля КН

На прикрепленной к доске бумаге, прочерчивают карандашом линию вдоль скошенного ребра линейки кипрегеля. Затем поворачивают кипрегель на 180° ; прикладывают скошенное ребро линейки к прочерченной линии с другой стороны и еще раз прочерчивают линию. Если линии совпадают или отклоняются в пределах $0,1$ мм, то условие выполнено. При больших отклонениях линейку кипрегеля нужно исправлять в мастерской.

2. Нижняя поверхность линейки кипрегеля должна быть плоской.

Проверяют прикладыванием линейки кипрегеля к какой-либо выверенной поверхности, принимаемой за плоскость. Если концы линейки несколько выгнуты вверх, то поставленный на доску кипрегель менее устойчив и линейку следует исправлять в мастерской. Небольшая вогнутость концов линейки книзу значения не имеет, так как под тяжестью кипрегеля, поставленного на доску, она устраняется.

3. Подвижная линейка, находясь на разных расстояниях от основной, должна перемещаться параллельно самой себе.

При неподвижном положении кипрегеля на планшете устанавливают дополнительную линейку на нескольких различных расстояниях от основной линейки и каждый раз прочерчивают вдоль скошенного ребра линию. Измерителем сравнивают в разных местах расстояния между двумя прочерченными линиями. Если условие выполнено, то эти расстояния должны быть одинаковыми (колебания не более $0,2$ мм). В противном случае линейку исправляют в мастерской.

4. Ось цилиндрического уровня на линейке кипрегеля должна быть параллельна нижней плоскости линейки.

Линейку кипрегеля устанавливают в середине мензульной доски по направлению двух подъемных винтов, вращением которых пузырек уровня приводят в нуль-пункт, и прочерчивают линию. Затем поворачивают кипрегель и прикладывают его к этой линии с другой стороны. Если пузырек уровня остался в нуль-пункте, то условие выполнено. В противном случае пузырек уровня нужно переместить на половину дуги отклонения в сторону нуль-пункта с помощью исправительных винтов уровня. Поверку и юстировку повторяют до выполнения условия. Затем горизонтируют планшет, добиваясь, чтобы при любом положении кипрегеля пузырек уровня на его линейке отклонялся от нуль-пункта на величину не более двух делений.

5. Визирная ось трубы должна быть перпендикулярна к оси вращения трубы.

Трубу кипрегеля наводят на удаленную точку и прочерчивают линию вдоль скошенного края линейки кипрегеля. Затем трубу переводят через зенит, прикладывают линейку кипрегеля к точке на линии и визируют на ту же цель. После этого вдоль ребра линейки снова прочерчивают линию. Если линии совпадут, то условие выполнено, если между ними образуется угол, то нужно провести биссектрису и к ней приложить линейку кипрегеля. Перекрестие сетки нитей сместится с изображением точки, тогда боковыми исправительными винтами сетки нитей передвигают его до совпадения с изображением точки.

6. Ось вращения трубы должна быть параллельна нижней плоскости линейки кипрегеля.

Поверяется так же, как третья поверка теодолита.

7. Одна из нитей сетки должна лежать в коллимационной плоскости трубы.

Поверяется так же, как у теодолита.

8. Коллимационная плоскость трубы должна проходить через скошенный край линейки кипрегеля или быть ему параллельной.

Наводят трубу на удаленную точку местности и прочерчивают линию. На этой линии ставят две иглы и смотрят, находят ли иголки и точка, на которую наведена труба, на одной линии. Если нет, то исправить нельзя. На построение углов на планшете эта ошибка не влияет, так как все прочерченные направления будут повернуты на один и тот же угол. Невыполнение условия отражается лишь на ориентировании планшета. При ориентировании планшета с помощью буссоли эту ошибку необходимо учитывать: на ее величину изменится склонение магнитной стрелки.

9. Ось реверсивного уровня на кожухе вертикального круга должна быть параллельна визирной оси трубы.

Наводят трубу на рейку, расположенную на расстоянии 100—150 м, приводят трубу в горизонтальное положение по цилиндрическому уровню и отсчитывают по рейке при двух положениях вертикального круга. Среднее значение из двух отсчетов по рейке, на которое нужно навести визирную ось трубы, соответствует горизонтальному положению оси трубы. Исправительными винтами реверсивного уровня приводят пузырек уровня в нуль-пункт. В этот момент отсчет по кругу должен быть равен 90° , а отсчет по кривой превышений — нулю.

10. Место нуля вертикального круга должно быть постоянным и равно 90° .

Место нуля для кипрегеля КБ-1 вычисляют по формуле

$$MO = \frac{\Pi - 180^\circ + \Pi}{2}, \quad (IV.2.41)$$

а для КН по формуле

$$MO = \frac{\Pi - \Pi}{2}; \quad v = \frac{\Pi - \Pi}{2}; \quad v = \Pi - MO = \Pi + MO. \quad (IV.2.42)$$

11. Проверка положения номограммы: при горизонтальном положении визирной оси трубы кривые превышений с коэффициентами $+10$ и -10 должны пересекаться в точке пересечения основной кривой и вертикальной нити.

На вертикальном круге устанавливают отсчет, равный месту нуля при положении пузырька уровня на середине. Юстируют исправительными винтами номограммы, находящимися над цилиндрическим уровнем, устанавливают номограмму в нужное положение.

12. Определение фактических значений коэффициентов кривой горизонтальных проложений и кривых превышений.

Фактическое значение K_ϕ коэффициента кривой горизонтальных проложений линии, полученного при помощи номограммы и вычисленного по результатам измерения лентой, определяют по формуле

$$K_\phi = 100 s_{\text{лент}} / s_{\text{ном}}. \quad (IV.2.43)$$

Если K_ϕ отличается от 100 более чем на 0,2, то в измеренные величины нужно вводить поправки.

Фактическое значение коэффициентов кривых превышений K'_ϕ определяют путем сравнения превышений, полученных из геометрического нивелирования и с помощью номограммы, по формуле

$$K'_\phi = K' h_{\text{нив}} / h_{\text{ном}}. \quad (IV.2.44)$$

Если расхождения между фактическими и номинальными (± 10 и ± 20) значениями коэффициентов не превышают соответственно 0,1 и 0,2, то при съемке можно пользоваться данными значениями кривых превращений. Для $K'=100$ отклонения не должны превышать 0,4.

При работе с мензулой ее устанавливают над точкой: центрируют с предельной ошибкой, определенной по формуле

$$\Delta_{\text{ц}} = 0,05 \text{ мм} \times M, \quad (\text{IV.2.45})$$

где M — знаменатель масштаба съемки.

Как видно, точность центрирования для масштаба 1:10 000—0,5 м, поэтому можно центрировать на глаз, а для масштаба 1:5000—0,25 м, 1:2000—0,10 м, 1:1000—0,05 м, т. е. для масштабов 1:5000 и крупнее центрировать нужно с помощью центрировочной вилки.

Ориентируют планшет не менее чем по двум удаленным точкам, при этом в процессе работы и после окончания ее ориентирование проверяют.

Для производства мензульной съемки, как правило, требуется густая съемочная сеть. Она в зависимости от условий местности и требуемой точности может создаваться аналитически (засечки, теодолитные и тахеометрические ходы) или графически (геометрическая сеть, засечки, мензульные и буссольные ходы). Основой для развития съемочной сети являются пункты государственной геодезической основы: триангуляции, полигонометрии и реперы нивелирования I—IV классов, а также пункты геодезических сетей сгущения: триангуляции и полигонометрии 1 и 2 разрядов. Густота точек съемочного обоснования должна быть достаточной для продолжения съемочных ходов и производства съемки и вместе с исходными данными должна быть порядка:

Масштаб съемки . . .	1:10 000	1:5000	1:2000	1:1000	1:500
Густота точек на					
1 км ²	10—15	12—22	22—50	48—80	80—140

В открытой местности строят геометрическую сеть, для развития которой на планшете должна быть сеть исходных пунктов, нанесенных по координатам. С каждой точки геометрической сети должно быть не менее 2—3 пунктов геодезической основы или точек геометрической сети. Пункты геометрической сети нужно располагать так, чтобы на местности они образовывали сеть треугольников (близких к равносторонним) со сторонами 0,3—1 км. Геометрическая сеть треугольников, получаемых на планшете графическим путем, разрешается для съемки в масштабах 1:10 000 и 1:5000 на небольших участках при наличии густой сети исходных данных. Пункты следует выбирать на возвышенных местах, чтобы с них раскрывалась видимость местности для съемки и чтобы каждый пункт сети надежно определялся прямыми засечками не менее чем с трех точек, а углы между направлениями засечек были не менее 40° и не более 140°. Допускается треугольник погрешности со сторонами 0,4 мм. При наблюдении пунктов геометрической сети обязательно встают с мензулой на каждом из них для измерения превращений. Порядок работы на станции: центрирование мензулы, нивелирование планшета, ориентирование планшета; измерение высоты прибора с точностью до 0,01 м; определение склонения магнитной стрелки с точностью до 0,2°; визирование на точки геометрической сети, прочерчивание направлений на все видимые точки (для определения

планового положения точек использовать наиболее длинные направления, для высотного — короткие) и отсчитывание по вертикальному кругу при положении круга лево; отсчитывание при положении круга право; вычисление места нуля, углов наклона и превышений.

Когда плановое положение точек геометрической сети получено, то сразу же в поле вычисляют прямые и обратные превышения по формуле (IV.1.17). Расстояния между точками определяют с планшета по масштабной линейке с точностью до 1 м. Вычисление величин $h' = \text{tg } v$ и f производят по таблицам превышений для горизонтальных проложений с точностью до 0,01 м. Расхождения между прямым и обратным превышениями не должны превышать 4 см на каждые 100 м. Если расхождения более, то вначале проверяют записи в полевом журнале, определение расстояний на планшете, а затем полевые измерения. Невязку в суммах превышений подсчитывают для каждого треугольника или полигона, образованного сторонами сети. Она не должна превышать

$$f_{\text{доп}} = 0,2 \text{ м } \sqrt{L}, \quad (\text{IV.2.4})$$

где L — число км в периметре треугольника или полигона.

Для контроля нужно вычислять невязки в превышениях по ходовым линиям, образуемым сторонами треугольников геометрической сети между исходными пунктами, имеющими высоты из геометрического нивелирования. Допустимая невязка не должна превышать

$$f_{\text{доп}} = 0,3 \text{ м } \sqrt{L}. \quad (\text{IV.2.47})$$

Увязку превышений в геометрической сети выполняют способом сравнения невязок в смежных треугольниках. В основе способа лежат два правила:

1. Если невязки в двух смежных треугольниках имеют одинаковые знаки, то в превышение по смежной стороне этих треугольников вводят наименьшую поправку.

2. Если невязки в двух смежных треугольниках имеют разные знаки, то на смежную сторону этих треугольников вводят наибольшую поправку, ибо при этом одновременно уменьшаются невязки в обоих полигонах.

Мензульные ходы. Мензульные ходы прокладывают для сгущения съемочного обоснования в застроенной и залесенной местности до начала съемки. Допустимую длину мензульных ходов можно определить по формуле

$$[s]_{\text{доп}} = 0,8 \times M \times 300 = (240 \times M) \text{ м} \quad (\text{IV.2.48})$$

или определить из табл. 41.

ТАБЛИЦА 41

Масштаб съемки	Допустимая величина		
	длины хода, м	длины стороны, м	числа сторон в ходе
1:10 000	2000	250	10
1:5000	1000	250	5
1:2000	500	200	5
1:1000	250	100	3
1:500	200	100	2

Расстояния между точками мензульного хода измеряют нитяным дальномером в прямом и обратном направлениях, расхождения между которыми не должны превышать $1/200$ длины стороны хода. При углах наклона более 3° определяют горизонтальное проложение линии. При съемке в масштабе $1:500$ длины сторон измеряют лентой или дальномерными насадками. Вершины хода закрепляют на местности деревянными кольями со сторожками и окапывают небольшой канавкой. Порядок работы на станции: мензулу устанавливают в исходной точке хода (центрируют, нивелируют, ориентируют); измеряют высоту прибора до $0,01$ м; прикладывают кипрегель к точке стояния на планшете и визируют на рейку, установленную в первой точке хода, прочерчивают направление на планшете и отрезки за рамками трапеции; измеряют нитяным дальномером расстояние по одной стороне рейки и откладывают его в масштабе на планшете по прочерченному направлению; при двух положениях круга измеряют вертикальные углы (контролем служит постоянство места нуля); вычисляют превышение. В последней точке хода устанавливают мензулу для измерения обратного расстояния и превышения. Относительная ошибка в периметре хода не должна превышать $1/300$, а линейная ошибка не более $0,8$ мм. Плановую невязку распределяют графическим методом параллельных линий.

Допустимую высотную невязку определяют по формуле (IV.2.46) и полученную невязку распределяют пропорционально длинам сторон. По требованиям Инструкции [4] допустимая невязка по высоте в мензульном ходе не должна превышать допуска, приведенного ниже:

Высота сечения рельефа, м	0,25	0,5	1,0	2,0	5,0
Допустимая невязка, м	0,08	0,15	0,20	0,50	1,0

Переходные точки. Места для переходных точек выбирают так, чтобы с них можно было хорошо видеть снимаемую местность. Густота переходных точек должна быть такой, чтобы обеспечить съемку без пробелов и разрывов. Положение переходных точек можно получить прямыми, обратными и комбинированными засечками, промерами лентой по линии створа между пунктами геодезической основы, решением задачи Потенота для съемки в масштабе $1:10\,000$ (определение на планшете 4-й точки по трем данным) или полярным способом, как первую точку мензульного хода. В закрытой местности положение переходных точек определяют проложением съёмочных мензульных и буссольных ходов.

При определении переходных точек методом засечек длина визирного луча не должна быть более удвоенного значения длины стороны хода.

Высоты переходных точек мензульных ходов и съёмочных пикетов при съемках с высотой сечения рельефа через $0,25$; $0,5$ и 1 м определяют геометрическим нивелированием, а при высоте сечения рельефа через 2 и 5 м — тригонометрическим нивелированием.

Съемка ситуации и рельефа. Съемку местности можно начинать с любой точки съёмочного обоснования. На каждой съёмочной станции мензулу устанавливают, определяют место нуля вертикального круга, измеряют высоту прибора. Намечают реальные точки, расстояния до которых не должны превышать допуска, приведенного в табл. 40, а для масштаба $1:10\,000$ при высоте сечения рельефа до 1 м — 300 м, для большей высоты сечения рельефа — 400 м.

Съемку объектов и контуров местности выполняют в основном полярным способом с измерением расстояний по дальномеру кипре-

геля при одном положении круга. При съемке отдельных точек ситуации разрешается [4] использовать метод засечек не менее чем с 3-х съёмочных точек (угол засечки не менее 60°). При съемке четких контуров определяют вершины углов с точностью 0,4 мм на плане, а затем соединяют линиями. При съемке дорог пикеты берут по одной стороне, измеряют ширину дороги и наносят параллельно вторую сторону, если ширина дороги выражается в масштабе, или по оси, если ширина дороги не выражается в масштабе и изображается условным знаком. При обходе контура ситуации рейку устанавливают на всех границах контура. Названия рек, ручьев и каналов должны быть подписаны на плане, а направления течений показаны стрелками.

Рельеф изображается горизонталями, которые проводят на глаз по высотам пикетов. Высоты пикетов при углах наклона местности до 3° рекомендуется определять горизонтальным лучом кипрегеля с уровнем на трубе или нивелиром, установленным рядом с мензулой. При съемке рельефа нужно определять линии водоразделов и тальвегов, для чего берут высоты вершин и подошв скатов, устьев ложин, на перегибах седловин и скатов, в котловинах, у берегов рек, озер, прудов на уровне воды. Кроме высот пикетов, необходимых для проведения горизонталей на плане, нужно определять высоты плотин, дамб, шлюзов, мостов, труб, пересечения дорог, углов кварталов, верха и подошвы насыпи и выемки, курганов, канав, колодцев и т. д. Урезы воды определяют дважды горизонтальным или наклонным лучом в зависимости от угла наклона местности и записывают с датой определения в журнал и на план через 10—12 см. При высоте сечения рельефа 1 м и более высоты пикетов вычисляют до 0,01 м и выписывают на план с округлением до 0,1 м. При высоте сечения рельефа менее 1 м высоты пикетов вычисляют и выписывают на план до 0,01 м.

В процессе съемки составляют кальку высот и контуров для масштабов 1:10 000, 1:5000 и 1:2000 с допускаемым разрывом во времени от съемки не менее трех дней. Кальку вычерчивают тушью. Для планов в масштабах 1:1000 и 1:500 кальку можно не составлять. На местности, бедной контурами, можно вести совмещенную кальку. На кальку наносят всю ситуацию и отдельные предметы местности, вместо заполнения контуров условными знаками допускается подписывать их названия. На кальку наносят все пикеты и точки съёмочного обоснования с подписями их номеров и высот.

На планах в масштабах 1:5000 и 1:2000 подписывают не менее 10 высот на 1 дм^2 плана, а на планах в масштабах 1:1000 и 1:500 — высоты всех пикетов. Контроль съемки осуществляют в результате полевой проверки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баканова В. В. Крупномасштабные топографические съемки. М., Недра, 1983.
2. Ганьшин В. Н., Коськов Б. И., Хренов Л. С. Справочное руководство по крупномасштабным съемкам. М., Недра, 1977.
3. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:10 000 и 1:25 000. Полевые работы. М., Недра, 1978.
4. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500. М., Недра, 1982.
5. Инструкция по топографо-геодезическим работам при инженерных изысканиях для промышленного, сельскохозяйственного, городского и поселкового строительства. СН 212—73. М., Стройиздат, 1974.

6. *Основные положения по выбору масштаба и высоты сечения рельефа топографических съемок населенных пунктов.* М., Недра, 1980.
7. *Практикум по геодезии, ч. 1,* под редакцией В. В. Бакановой, М., Недра, 1983.
8. *Руководство по топографическим съемкам в масштабах 1 : 5000, 1 : 2000, 1 : 1000, 1 : 500.* Наземные съемки. М., Недра, 1977.
9. *Рытов А. В., Спиридонов А. И.* Геодезические приборы для крупномасштабных топографических съемок. М., Недра, 1977.
10. *Справочное руководство по инженерно-геодезическим работам.* Под редакцией В. Д. Большакова и Г. П. Левчука. М., Недра, 1980.

IV.3. ФОТОТОПОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СЪЕМКИ

Г. П. Левчук

IV.3.1. Элементы ориентирования снимков

Элементы внешнего ориентирования. Элементами внешнего ориентирования называют величины, определяющие положение аэроснимка относительно системы координат местности. Таких элементов шесть: три угловых и три линейных, а именно:

1) координаты центра проектирования $X_S, Y_S, Z_S(H_S)$ (рис. 89) в геодезической системе координат;

2) два угла, определяющие направление S_0 (главного направления) — азимут направления A и угол наклона аэроснимка α ;

3) угол поворота аэроснимка в своей плоскости κ .

В стереофотограмметрии вместо общего угла наклона α обычно рассматривают его проекции на продольную и поперечную плоскости, называя их продольным и поперечным углами наклона.

Элементы внешнего ориентирования могут быть определены по опорным геодезическим и фотограмметрическим точкам путем решения обратной пространственной фотограмметрической засечки. Эти элементы также можно найти по данным, зафиксированным в полете: координаты центра проектирования — по измерениям радиогеодезических систем и показателям радиовысотомера; угловые элементы ориентирования — с помощью гировертикали и по фотоснимкам линии горизонта или звездного неба.

Элементы внутреннего ориентирования. Координаты главной точки снимка x_0 и y_0 и фокусное расстояние камеры f , определяющие положение задней узловой точки объектива как центра проектирования относительно аэроснимка, называются элементами внутреннего ориентирования.

При тщательной юстировке аэрофотоаппарата координаты x_0 и y_0 не превышают нескольких сотых долей миллиметра, и за главную точку практически принимают точку пересечения линий, соединяющих координатные метки. Из лабораторных исследований с высокой точностью определяют и фокусное расстояние аэрокамеры.

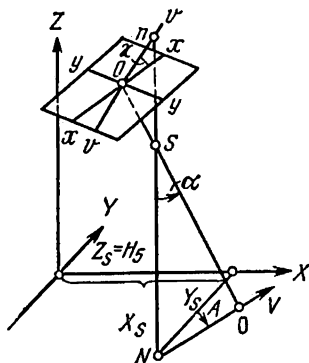


Рис. 89. Элементы внешнего ориентирования

IV.3.2. Анализ аэроснимка

IV.3.2.1. Элементы центральной проекции

На топографическом плане контуры местности изображаются в ортогональной проекции, в которой углы передаются без искажения независимо от рельефа местности, а масштаб изображения сохраняется постоянным во всех направлениях. Проектирующие лучи в этой проекции являются вертикалями, а центр проектирования отнесен в бесконечность.

Аэроснимок представляет собой центральную проекцию (перспективу) местности. Центром проектирования здесь слу-

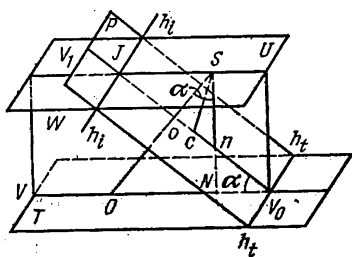


Рис. 90. Элементы центральной проекции

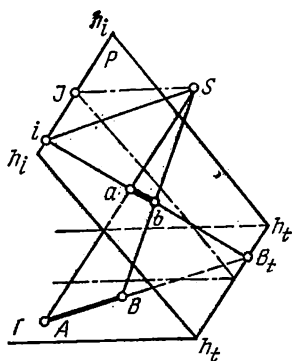


Рис. 91. Перспектива прямой

жат узловые точки объектива аэрофотоаппарата. Только при строго отвесной аэрофотосъемке ($\alpha=0$) и горизонтальной местности центральная проекция будет тождественна ортогональной, т.е. аэроснимок будет планом местности.

На рис. 90 показаны основные элементы центральной проекции. Предметная плоскость (плоскость местности) T пересекается с картинной плоскостью (аэроснимком) P по линии $h_i h_t$, называемой линией основания картины. Точка S — центр проектирования (оптический центр объектива). Луч So , перпендикулярный к плоскости аэроснимка, называется главным лучом, а его основание точка o — главной точкой снимка. Длина перпендикуляра So равна фокусному расстоянию камеры f .

Отвесное расстояние SN определяет удаление центра проектирования от предметной плоскости и является высотой фотографирования H . След луча SN на плоскости аэроснимка (точка n) называется точкой надира. Главный луч SO образует с отвесной линией SN угол α , равный углу между предметной и картинной плоскостями, т.е. углу наклона аэроснимка. Биссектриса Sc угла α в пересечении с плоскостью P дает точку нулевых искажений c .

Вертикальная плоскость W , проходящая через лучи SO и SN , перпендикулярна к плоскостям P и T и называется плоскостью главного вертикала. В пересечении этой плоскости с картинной плоскостью образуется главная вертикаль $V_0 V_1$ и с предметной плоскостью — линия направления съемки NO .

Плоскость U , проведенная через центр проектирования параллельно предметной плоскости, пересекается с картинной плоскостью по линии истинного горизонта $h_i h_t$. Эта линия в пересечении с главной вертикалью дает главную точку схода J . Очевидно, что основные точки снимка J , o , c , n лежат на главной вертикали. Расстояние между этими точками определяется по формулам

$$\left. \begin{aligned} on &= f \operatorname{tg} \alpha; & oc &= f \operatorname{tg} \alpha/2; & oJ &= f/\operatorname{tg} \alpha; \\ Jc &= JS = f/\sin \alpha; & JV_0 &= H/\sin \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.3.1})$$

При $\alpha=0$ получим $oc=0$ и $on=0$, т.е. на строго горизонтальном снимке точка надира и точка нулевых искажений совпадают с главной точкой снимка. Кроме того, в этом случае

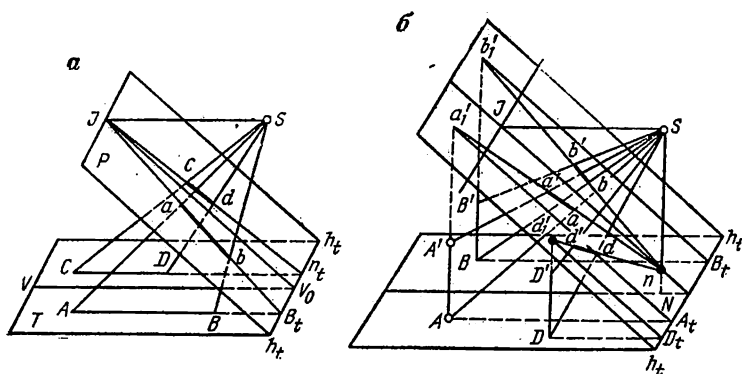


Рис. 92. Перспектива:

a — параллельных линий; b — перпендикулярных линий предметной плоскости

$oJ = \infty$ и $JV_0 = \infty$ и, следовательно, линия горизонта и линия основания картины находятся в бесконечности.

Для построения перспективного изображения прямой AB (рис. 91), расположенной в предметной плоскости, необходимо проложить прямую до пересечения с линией основания картины (точка B_i). Проведя из центра проектирования S , параллельно прямой AB , линию Si до встречи с линией горизонта в точке i , получим в картинной плоскости прямую $B_i i$, являющуюся перспективой бесконечной прямой AB . Проектирующие лучи SA и SB отсекут на линии $B_i i$ отрезок ab , который и будет искомым перспективным изображением предметной прямой AB .

Из правила построения перспективы прямых следует, что параллельные линии, лежащие в предметной плоскости, будут изображаться на снимке сходящимися в точке схода i на линии горизонта. Если же линии в предметной плоскости параллельны направлению съемки VV_0 , то они изобразятся сходящимися в главной точке схода J (рис. 92).

Прямые, перпендикулярные к направлению съемки, т.е. параллельные линии основания картины, изобразятся на снимке также перпендикулярными к главной вертикали. Они называются горизонталями. Горизонталь $h_0 h_0$, проходящая через главную точку, называется главной горизонталью. Горизонталь $h_c h_c$, проходящая через точку нулевых искажений, называется линией неискаженных масштабов.

Прямые, перпендикулярные к предметной плоскости, изображаются в картинной плоскости сходящимися в точке надира снимка (рис. 92, б). Это очень важное свойство точки надира. Оно используется для построения в этой точке направлений, не искажаемых рельефом местности.

IV.3.2.2. Связь координат точек аэроснимка и местности

Примем за ось ординат на аэроснимке главную вертикаль, а на местности — линию направления съемки. Ось абсцисс направим по горизонтали. При известных элементах ориентирования α , f , H ко-

ординаты точек местности X и Y и соответственных точек аэро-
снимка x и y связаны зависимостями:

а) начало координат в главной точке снимка o и ее про-
екции на местности O

$$\left. \begin{aligned} X_O &= \frac{H}{f} \frac{x_o}{\left(\cos \alpha - \frac{y_o}{f} \sin \alpha\right)}; \\ Y_O &= \frac{H}{f} \frac{y_o}{\left(\cos \alpha - \frac{y_o}{f} \sin \alpha\right) \cos \alpha}; \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.3.2})$$

б) начало координат в точке нулевых искажений c и
ее проекции на местности C

$$\left. \begin{aligned} X_C &= \frac{H}{f} \frac{x_c}{(1 - y_c \sin \alpha / f)}; \\ Y_C &= \frac{H}{f} \frac{y_c}{(1 - y_c \sin \alpha / f)}; \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.3.3})$$

в) начало координат в точке надира снимка n и ее про-
екции на местности N

$$\left. \begin{aligned} X_N &= \frac{H}{f} \frac{x_n}{(1/\cos \alpha - y_n \sin \alpha / f)}; \\ Y_N &= \frac{H}{f} \frac{y_n}{(1/\cos \alpha - y_n \sin \alpha / f) 1/\cos \alpha}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.3.4})$$

Формулы общей зависимости между координатами точ-
ки местности и аэрофотоснимка имеют вид

$$\left. \begin{aligned} X - X_S &= (Z - Z_S) \frac{a_1(x - x_o) + a_2(y - y_o) - a_3 f}{c_1(x - x_o) + c_2(y - y_o) - c_3 f}; \\ Y - Y_S &= (Z - Z_S) \frac{b_1(x - x_o) + b_2(y - y_o) - b_3 f}{c_1(x - x_o) + c_2(y - y_o) - c_3 f}; \\ x - x_o &= -f \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}; \\ y - y_o &= -f \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}, \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.3.5})$$

где

$$a_1 = \cos \alpha \cos \kappa - \sin \alpha \sin \omega \sin \kappa; \quad a_2 = -\cos \alpha \sin \kappa - \\ - \sin \alpha \sin \omega \cos \kappa; \quad a_3 = -\sin \alpha \cos \omega;$$

$$b_1 = \cos \omega \sin \kappa; \quad b_2 = \cos \omega \cos \kappa; \quad b_3 = -\sin \omega;$$

$$c_1 = \sin \alpha \cos \kappa + \cos \alpha \sin \omega \sin \kappa; \quad c_2 = -\sin \alpha \sin \kappa + \\ + \cos \alpha \sin \omega \cos \kappa; \quad c_3 = \cos \alpha \cos \omega;$$

$X_S, Y_S, Z_S, \alpha, \omega, \kappa$ — элементы внешнего ориентирования; x_o, y_o, f —
элементы внутреннего ориентирования снимка.

IV.3.2.3. Масштабы аэроснимков

Масштаб строго горизонтального аэроснимка ($\alpha=0$) и горизонтальной плоскости местности равен

$$1/M = f/H \quad (IV.3.6)$$

и одинаков на всей площади снимка.

На аэроснимках, имеющих некоторый угол наклона ($\alpha \neq 0$), масштаб изображения в разных точках и разных направлениях разный, но сохраняет свое постоянство по горизонталям.

Масштаб произвольного бесконечно малого отрезка (точки) аэроснимка равен

$$\frac{1}{M} = \frac{f}{H} \times \frac{(\cos \alpha - y \sin \alpha / f)^2}{\sqrt{\sin^2 \varphi + [x \sin \varphi \sin \alpha / f + \cos \varphi (\cos \alpha - y \sin \alpha / f)]^2}}, \quad (IV.3.7)$$

где x, y — координаты точки (за начало координат принята главная точка аэроснимка); φ — угол, составляемый взятым направлением с перпендикуляром к главной вертикали.

Если направление проходит через главную точку снимка, то $y \cos \varphi = x \sin \varphi$ и, следовательно,

$$\frac{1}{M_0} = \frac{f}{H} \cdot \frac{(\cos \alpha - y \sin \alpha / f)^2}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha \cos^2 \varphi}}. \quad (IV.3.8)$$

Из формул (IV.3.7) и (IV.3.8) получим выражение масштаба: по горизонтали ($\varphi=0^\circ$)

$$\frac{1}{M_h} = \frac{f}{H} \left(\cos \alpha - \frac{y \sin \alpha}{f} \right); \quad (IV.3.9)$$

по вертикали ($\varphi=90^\circ, x=0$)

$$\frac{1}{M_v} = \frac{f}{H} \left(\cos \alpha - \frac{y \sin \alpha}{f} \right)^2. \quad (IV.3.10)$$

Для главной точки $y=0$, и масштаб по главной горизонтали

$$1:M_{h_0} = f \cos \alpha / H. \quad (IV.3.11)$$

В этой же точке по направлению вертикали

$$1:M_{v_0} = f \cos^2 \alpha / H. \quad (IV.3.12)$$

Для точки нулевых искажений $y = -f \operatorname{tg} \alpha / 2$, и масштаб по горизонтали, проходящей через эту точку,

$$1:M_{h_c} = f/H,$$

т. е. равен масштабу строго горизонтального аэрофотоснимка. Поэтому горизонталь точки нулевых искажений называется линией неискаженных масштабов.

В этой же точке по направлению вертикали масштаб также не искажается:

$$1:M_{v_c} = f/H.$$

Для точки надира $y = -f \operatorname{tg} \alpha$, и масштаб по горизонтали, проходящей через точку надира,

$$1:M_{h_n} = f/H \cos \alpha, \quad (\text{IV.3.13})$$

а в этой точке по направлению вертикали

$$1:M_{v_n} = f/H \cos^2 \alpha. \quad (\text{IV.3.14})$$

Из этих формул видно, что масштаб аэроснимка уменьшается по направлению к линии горизонта, где $1:M = 0$ ($y = f/\operatorname{tg} \alpha$), и увеличивается по направлению к основанию картины, где $1:M = 1$.

IV.3.2.4. Смещение точек на аэроснимках

Смещение точек на аэроснимке относительно того положения, которое они занимали бы на плане, зависит от ряда факторов, связанных с природой самого аэроснимка как центральной проекции местности (влияние наклона снимка и рельефа местности), условиями съемки (сдвиг изображения в полете, влияние кривизны Земли и рефракции), качеством аппаратуры и фотоматериалов (дисторсия объектива, выравнивание аэропленки в плоскость, деформация пленки).

Сдвиг изображения. Сдвиг («смаз») изображения происходит вследствие движения самолета во время экспонирования местности. Величина этого сдвига может быть подсчитана по формуле

$$\delta = v\tau/H, \quad (\text{IV.3.15})$$

где v — скорость полета в м/с; τ — продолжительность экспозиции в секундах.

Чтобы сдвиг изображения не превышал точности фотограмметрических измерений (0,02—0,03 мм), расчетная величина экспозиции τ не должна превышать

$$\tau \leq \frac{\delta H}{vf}.$$

При $\delta = 0,02$ мм, $f = 70$ мм, $H = 1500$ м, $v = 360$ км/ч = 100 м/с получим $\tau \leq 1/230$ с.

Дисторсия. Дисторсия объектива аэрофотоаппарата вызывает смещение точек аэроснимка по направлениям, проходящим через главную точку. В зависимости от характера дисторсии (бочкообразной или подушкообразной) величина смещения может быть или положительной, или отрицательной.

Для симметричной дисторсии величина смещения определяется формулой

$$\delta_d = Er^3, \quad (\text{IV.3.16})$$

где E — коэффициент дисторсии; r — расстояние от центра аэроснимка.

В современных объективах аэрофотоаппаратов величина дисторсии обычно не превышает 0,02—0,04 мм. Дисторсия вызывает систематические

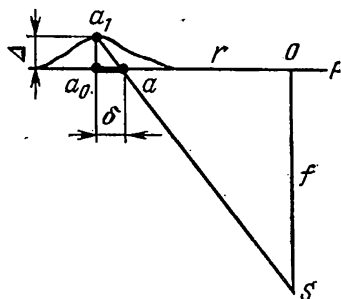


Рис. 93. Искажения из-за невыравнивания пленки

ошибки в координатах и высотах точек, которые могут быть устранены при ориентировании аэроснимков по опорным точкам.

Выравнивание аэропленки в плоскость. Значительные искажения на аэроснимках возникают из-за недостаточного выравнивания аэропленки в плоскость в момент экспонирования местности. Если пленка отклонится от плоскости на величину Δ (рис. 93), то точка местности изобразится на аэроснимке в точке a (вместо a_0), исказив расстояние r на величину

$$\delta_B = \Delta \cdot r / f. \quad (\text{IV.3.17})$$

Контроль за выравниванием пленки производится по изображению на аэроснимке особых меток или нитей.

Деформация аэропленки. Под влиянием фотолабораторных процессов происходит деформация аэропленки равномерная, неравномерная вдоль и поперек фильма (или, как ее называют, разностная), случайная.

При равномерной деформации коэффициент уменьшения пленки постоянный по всем направлениям, т.е. изменяется масштаб изображения, что легко учитывается в фотограмметрических работах.

Разностная деформация вдоль и поперек фильма в пределах рабочей части аэроснимка (80—90 мм) обычно не превышает 0,03—0,05 мм. Случайная деформация аэропленок составляет в среднем 0,02—0,03 мм.

Аэрофотоснимки, полученные современными АФА, имеют изображения сетки крестов, позволяющие учитывать влияние невыравнивания и деформации аэропленки.

Влияние кривизны Земли и рефракции. Под влиянием кривизны Земли точки местности изображаются на аэроснимке смещенными по направлению к точке надира. При плановой аэрофотосъемке это смещение может быть подсчитано по формуле

$$\delta_r = r^2 H / 2f^2 R, \quad (\text{IV.3.18})$$

где r — расстояние от точки надира снимка до наблюдаемой точки; R — радиус Земли; H — высота фотографирования; f — фокусное расстояние камеры.

Дополнительное смещение изображений имеет место под влиянием рефракции.

Смещение точек за кривизну Земли и рефракцию носит систематический характер, его необходимо учитывать при развитии фотограмметрических сетей на большие расстояния.

Наклон аэроснимка. Если с одного и того же центра проектирования произвести строго горизонтальную аэрофотосъемку и наклонную, то некоторые точки местности изобразятся на горизонтальном аэроснимке в точках a_0 , b_0 , ... (рис. 94), а на наклонном — в точках a , b , ... Линейное смещение точек $\delta_{r\alpha}$ за наклон аэроснимка определяется по формуле

$$\delta_{r\alpha} = - \frac{r^2 \sin \alpha \sin \varphi}{f - r \sin \alpha \sin \varphi}, \quad (\text{IV.3.19})$$

где r — длина радиуса-вектора, проведенного из точки нулевых искажений; φ — угол, составляемый радиусом-вектором с горизонталью; α — угол наклона аэроснимка.

Для плановой аэросъемки, когда $\alpha < 3^\circ$, пользуются упрощенной формулой

$$\delta_{r\alpha} = - \frac{r^2 \sin \alpha \sin \varphi}{f}. \quad (\text{IV.3.20})$$

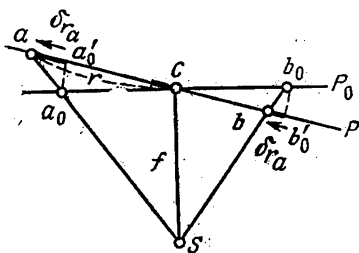


Рис. 94. Линейное смещение за наклон аэрофотоснимка

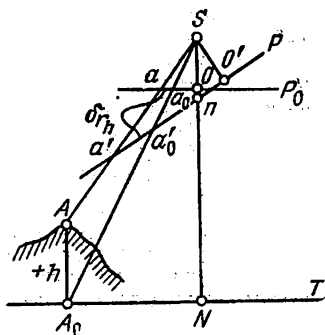


Рис. 95. Линейное смещение за рельеф

На горизонтали неискаженных масштабов $h_c h_c$ косинус угла φ меняет свой знак, и все точки, расположенные выше этой линии, под влиянием угла наклона приближаются к точке нулевых искажений c , а находящиеся ниже, наоборот, удаляются. Отсюда следует важный вывод: длина линии, проходящей через главную точку планового аэроснимка и делящаяся в этой точке пополам, не искажается наклоном снимка.

Средняя квадратическая величина линейного искажения за наклон планового аэроснимка может быть подсчитана по формуле

$$m_{r\alpha} = r^2 \alpha' / \sqrt{2} f p', \quad (\text{IV.3.21})$$

где угол α и радиан p выражены в минутах.

Для каждого отдельного аэроснимка искажения за наклон имеют систематический характер. Однако в маршруте, где наклоны снимков, как правило, различны по величине и знаку, общее влияние этого источника ошибок носит случайный характер.

Влияние рельефа местности. Так как изображение на аэроснимке строится по законам центрального проектирования, то по сравнению с ортогональной проекцией (планом) контурные точки на снимке имеют смещение, вызванное рельефом местности. Это смещение происходит по направлениям, проходящим через точку надира снимка. При положительных формах рельефа (над средней плоскостью) точки на аэроснимке удаляются от надира, при отрицательном рельефе — приближаются (рис. 95).

Величина линейного искажения за рельеф

$$\delta_{rh} = \frac{rh}{H} \left(1 - \frac{r}{2f} \sin \varphi \sin 2\alpha \right), \quad (\text{IV.3.22})$$

где h — превышение над средней плоскостью.

Для планового аэроснимка можно принять

$$\delta_{rh} = rh/H. \quad (\text{IV.3.23})$$

Из формулы (IV.3.22) видно, что даже на строго горизонтальном аэроснимке (при $\alpha=0$) остается влияние рельефа местности. Лишь в точке надира, где $r=0$, смещение за рельеф отсутствует независимо от величины h .

IV.3.2.5. Искажение направлений на аэроснимках

Искажение направлений, вызванное наклоном аэроснимка. Между углом на аэроснимке φ_P , составленным горизонталью и некоторым направлением, проведенным из точки, расположенной на главной вертикали, и соответствующим углом φ_T в предметной плоскости существует следующая зависимость:

$$\operatorname{tg} \varphi_T = \frac{\operatorname{tg} \varphi_P}{\cos \alpha - y \sin \alpha / f}, \quad (\text{IV.3.24})$$

при этом за начало координат принята главная точка, а ось ординат направлена по главной вертикали.

Для направлений, проведенных из главной точки ($y=0$),

$$\operatorname{tg} \varphi_T = \operatorname{tg} \varphi_P / \cos \alpha. \quad (\text{IV.3.25})$$

При вершине угла в точке нулевых искажений ($y = -f \operatorname{tg} \alpha / 2$)

$$\operatorname{tg} \varphi_T = \operatorname{tg} \varphi_P,$$

т.е. углы в точке нулевых искажений равны соответствующим углам на местности, независимо от величины углов наклона аэроснимка.

Для направлений из точки надира ($y = -f \operatorname{tg} \alpha$)

$$\operatorname{tg} \varphi_T = \operatorname{tg} \varphi_P \cos \alpha. \quad (\text{IV.3.26})$$

В главной точке угловое искажение направления, вызванное наклоном планового аэроснимка, может быть подсчитано по формуле

$$\delta_{\varphi_{\alpha}} = \rho' \sin^2 \alpha / 2 \cdot \sin 2\varphi, \quad (\text{IV.3.27})$$

где ρ' — радиан, выраженный в минутах.

Средняя квадратическая величина этого искажения равна

$$m'_{\varphi_{\alpha}} = (\rho' \sin^2 \alpha / 2) / \sqrt{2} \quad (\text{IV.3.28})$$

или, если угол наклона выразить в градусах,

$$m'_{\varphi_{\alpha}} = 0,2 \alpha^{\circ^2}. \quad (\text{IV.3.28}')$$

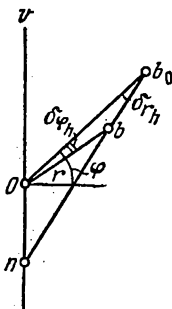


Рис. 96. Угловое искажение за рельеф

Для направлений, проходящих через точку нулевых искажений s , величина m_{φ} равна нулю. Искажения направлений, проведенных из точки надира n , по величине такие же, как и в главной точке [формула (IV.3.27)], но обратны по знаку.

Искажение направлений, вызванное влиянием рельефа. Линейное смещение контурных точек на аэроснимке под влиянием рельефа местности вызывает угловые искажения направлений. Пусть на местности измерено направление с главной точки на точку B , причем последняя имеет превышение h над первой. На аэроснимке (рис. 96) точка B изобразится в точке b , а ее ортогональная проекция — в точке b_0 . Угол bob_0 и будет угловым искажением за рельеф.

Все направления, проходящие через точку надир аэроснимка, не искажаются рельефом местности, так как линейное смещение точек за рельеф происходит вдоль этих направлений. Направления, проведенные из всех других точек аэроснимка, будут иметь искажения за рельеф, в том числе и на строго горизонтальных аэроснимках.

Для направлений, проведенных из главной точки планового аэроснимка, угловое искажение равно

$$\delta'_{\varphi_h} = \rho' \frac{hf}{Hr} \operatorname{tg} \alpha \cos \varphi. \quad (\text{IV.3.29})$$

Величина среднего квадратического искажения направлений может быть подсчитана по формуле

$$m'_{\varphi_h} = \rho' \frac{h_{\text{ср}}}{H} \frac{f}{r} \frac{\alpha'}{\sqrt{2}}, \quad (\text{IV.3.30})$$

где $h_{\text{ср}}$ — среднее значение превышения над некоторой средней плоскостью; α' — угол наклона аэроснимка в минутах.

IV.3.3. Комбинированный метод аэрофотосъемки

IV.3.3.1. Схема комбинированного метода

Чтобы создать план местности по наклонным и разномасштабным аэроснимкам, необходимо каждый снимок трансформировать, т.е. преобразовать в горизонтальный заданного масштаба. Из трансформированных аэроснимков монтируют фотопланы.

Для трансформирования и монтажа фотопланов каждый аэроснимок должен быть обеспечен четырьмя ориентирующими (трансформационными) точками. Это контурные, хорошо опознаваемые на аэроснимке точки, плановое положение которых известно. Координаты некоторых из этих точек (опознаков) определяют геодезическими методами при полевой привязке аэроснимков. Положение на плане остальных точек получают в камеральных условиях путем развития по аэроснимкам фототриангуляции или фотополигонометрии.

На репродукциях с составленных фотопланов методом мензульной съемки рисуют в поле рельеф, дешифрируют контуры и производят съемку предметов, не изобразившихся на аэроснимках (например подземных сооружений), а также устанавливают наименования населенных пунктов, рек и др.

Создание топографической карты комбинированным методом состоит из следующих этапов:

- 1) летносъёмочные и фотолабораторные работы;
- 2) построение геодезической основы. Плановая привязка аэроснимков;
- 3) развитие фототриангуляции;
- 4) трансформирование аэроснимков. Монтаж фотопланов;
- 5) сгущение высотного съёмочного обоснования. Съёмка рельефа на фотопланах и дешифрирование контуров;
- 6) вычерчивание и оформление оригинала карты.

Основы фототриангуляции. Фототриангуляция является камеральным методом сгущения опорной сети при помощи аэроснимков. Различают пространственную фототриангуляцию, при которой определяются все три координаты точек, и плановую, или плоскостную, дающую лишь плановое положение точек.

В основе плановой фототриангуляции лежит то свойство аэроснимка как центральной проекции что направления, проведенные из точки надира на любые точки снимка, свободны от искажений, вызываемых рельефом местности, а направления, исходящие из точки нулевых искажений, не искажаются наклоном аэроснимка. На горизонтальных аэроснимках точка надира и точка нулевых искажений почти совпадают с главной точкой, следовательно, направления, проведенные из последней, будут равны одноименным направлениям на местности. Используя эти направления, по перекрывающимся аэроснимкам можно строить триангуляционные сети различной формы.

При перекрытии аэроснимков более 50 % на каждом из них изображаются главные точки соседних снимков. Направления на эти точки называются начальными направлениями. По ним передается ориентирование (азимут) сторон сети.

Хотя на плановых аэроснимках точка надира и точка нулевых искажений не совпадают с главной точкой (на величину $f\alpha'/\rho'$ и $f\alpha'/2\rho'$) и искажения, проведенные из главной точки, несколько искажаются рельефом местности и наклоном снимка, значение этих искажений в равнинной местности обычно не превосходит нескольких минут, и ошибки построения фототриангуляционной сети не выходят за пределы графической точности построения плана.

Способы развития фототриангуляции. Наиболее широкое распространение получила ромбическая фототриангуляция, развиваемая в пределах одного маршрута при продольном перекрытии около 60 %. Для построения сети используют связующие контурные точки, расположенные на тройном перекрытии (на рис. 97 точки $a_2, b_2, a_3, b_3, \dots$). В этом способе масштаб сети передают дважды через тройные засечки нижнего и верхнего ряда связующих точек. Ориентируют сеть по начальным направлениям. Трансформационные точки $x_1, x_2, x_3, \dots$ находят в углах рабочей площади аэроснимка прямой засечкой с базиса.

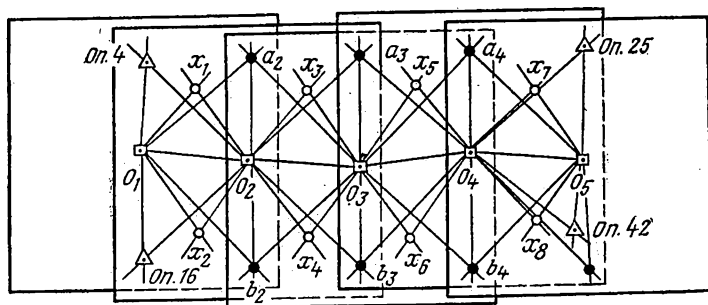


Рис. 97. Ромбическая фототриангуляция

Ромбическую фототриангуляцию можно развивать аналитическим или графическим способом.

В аналитическом способе на особом стереоскопическом приборе — радиал-триангуляторе — измеряют по аэроснимкам направления на главные точки, связующие точки, опознаки, трансформационные точки. Сеть уравнивают строгими или приближенными методами и при условном азимуте и произвольной длине исходного базиса вычисляют условные координаты точек сети. Зная координаты двух точек в государственной и условной системах, преобразуют координаты всех точек сети.

Аналитический способ развития плановой фототриангуляции требует большого объема вычислительных работ. В настоящее время в связи с ростом электронной вычислительной техники становятся рентабельными аналитические способы фототриангуляции.

В графической фототриангуляции направления на главные, связующие, трансформационные и опорные точки переносят графически с аэроснимков (негативов) на прозрачную основу — восковку направлений. По этим восковкам в произвольном масштабе развивают сеть и одновременно засекают опорные геодезические точки (опознаки). По опознакам (минимум двум) сеть редуцируют на особом оптико-механическом приборе — фоторедукторе, т. е. приводят ее к заданному масштабу и придают ей геодезическую ориентировку.

Редуцирование плановой фототриангуляции. Фоторедуктор состоит из проекционной камеры, передвигающейся по вертикальным направляющим, и горизонтального неподвижного экрана. Главная плоскость объектива и плоскость кассеты, в которую укладывается сводная восковка сети, параллельны экрану. При изменении масштаба сети резкость изображения на экране обеспечивается при помощи масштабного ромбического инверсора, механически решающего основное уравнение оптики

$$1/d_1 + 1/d_2 = 1/F, \quad (\text{IV.3.31})$$

где d_1 , d_2 — расстояния соответственно от кассеты до объектива и от объектива до экрана; F — фокусное расстояние объектива фоторедуктора.

При этом длина рычагов инверсора (рис. 98) должна удовлетворять уравнению

$$ab = m^2 - n^2 = F^2. \quad (\text{IV.3.32})$$

Коэффициент редуцирования на приборе может меняться от 0,5 до 2.

При редуцировании в кассету фоторедуктора укладывают сводную восковку, а на экран — планшет с опорными точками, нанесенными в необходимом масштабе. Вращая штурвал инверсора, т. е. изменяя масштаб изображения, добиваются совмещения проектируемых и нанесенных на планшет опорных точек. После этого на планшете отмечают изображение всех центральных и трансформационных точек.

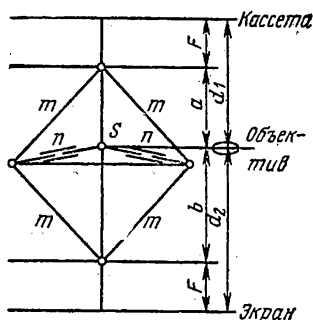


Рис. 98. Схема масштабного инверсора

Точность плановой фототриангуляции. На точность плановой фототриангуляции влияют главным образом ошибки определения направлений и ошибки собственно развития сетей. При графическом способе построения фототриангуляции в равнинной местности по плановым аэрофотоснимкам суммарная средняя квадратическая ошибка построенного направления составляет около 5'.

Средняя квадратическая ошибка в середине ромбического ряда, редуцированного по крайним точкам, может быть подсчитана по формуле Г. П. Жукова

$$m = 0,35bR \sqrt{n^3 + 11n + 33} \cdot m'_e / \rho', \quad (\text{IV.3.33})$$

где b — длина базиса на аэрофотоснимке; m'_e — средняя квадратическая ошибка направления на восковке; R — коэффициент редуцирования, равный отношению знаменателей масштабов аэроснимка и создаваемого плана; n — число базисов в ромбическом ряду между опознаками.

В сети, состоящей из нескольких ромбических рядов, положение общих трансформационных точек двух смежных маршрутов определяется как среднее из результатов независимого редуцирования каждого ряда в отдельности. Поэтому ошибка в середине сети равна

$$m_{\text{ср}} = m / \sqrt{2} = 0,25bR \sqrt{n^3 + 11n + 33} \cdot m'_e / \rho'. \quad (\text{IV.3.34})$$

По этим формулам можно рассчитать, через сколько базисов необходимо определять опорные точки, чтобы ошибка в самом слабом месте фототриангуляционной сети не превышала 0,5 мм.

В аналитической фототриангуляции отождествление точек выполняется на стереоприборе и точность этого процесса повышается примерно в три раза. Кроме того, в этом способе не участвуют ошибки графических построений. Поэтому аналитический способ точнее графического.

IV.3.3.3. Трансформирование аэроснимков

Условия фототрансформирования. Трансформирование аэроснимков производится с целью устранения искажений, вызванных наклоном снимков, и приведения последних к масштабу составляемого плана. На рис. 99: S — центр проектирования; P — аэроснимок; E — плоскость трансформирования; T — горизонтальная предметная плоскость.

При рассмотрении рисунка ясно, что на трансформированных аэроснимках остается смещение точек за рельеф. Для уменьшения влияния рельефа горизонтальную плоскость T , от которой отсчитывается высота фотографирования, нужно выбирать на средней отметке участка, чтобы положительные и отрицательные превышения точек местности были примерно равны.

Если при этом смещения точек за рельеф на трансформированном аэроснимке достигают недопустимой величины, то трансформирование ведут по 30 н а м, в каждой из которых устанавливают свою высоту горизонтальной плоскости.

Трансформирование аэроснимков может быть выполнено различными способами: графическим, графо-механическим, фотомеханическим, оптико-графическим. На производстве получили распространение последние два способа.

Фотомеханическое трансформирование аэроснимков осуществляется на сложных приборах — фототрансформаторах. По конструкции различают фототрансформаторы I и II родов.

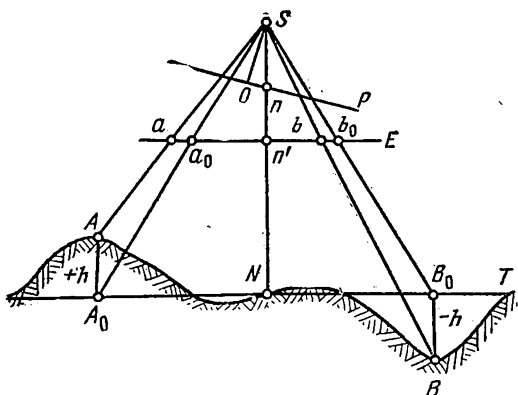


Рис. 99. Принцип трансформирования аэрофотоснимка

В фототрансформаторах I рода восстанавливается связка проектирующих лучей, подобная существовавшей в момент аэросъемки, т. е. в приборе сохраняются элементы внутреннего ориентирования снимка. В фототрансформаторах II рода подобие восстановленной связки лучей нарушается, однако изображение в плоскости трансформирования получается без искажения, т. е. таким же, как на приборах I рода.

На производстве применяются фототрансформаторы II рода с нарушенной связкой проектирующих лучей. Чтобы при этом не искажалось изображение контуров на экране прибора, необходимо соблюдение следующих геометрических условий (рис. 100):

1. Новый центр проектирования S_1 должен находиться в плоскости главного вертикала аэроснимка и располагаться на окружности, проведенной из точки схода J радиусом $JS = f/\sin \alpha$.

2. Плоскость экрана E_1 должна быть параллельна плоскости, проходящей через линию горизонта и новый центр проектирования, т. е. линии JS_1 .

3. Расстояние от главной точки схода до линии пересечения плоскости экрана с плоскостью аэроснимка должно равняться $H/M_T \sin \alpha$, где H — высота фотографирования; M_T — заданный масштаб фотоплана.

Кроме геометрических условий, при фототрансформировании должны быть соблюдены два оптических условия, обеспечивающие резкость изображения при изменениях коэффициента трансформирования и наклона экрана. Для обеспечения первого условия — оптического сопряжения точек на аэроснимке и экране в плоскостях, перпендикулярных к главной оптической оси объектива прибора, — необходимо соблюдение основного уравнения оптики (IV.3.31). В фототрансформаторах это условие выполняется автоматически при помощи масштабного инверсора.

Чтобы выполнить второе условие — сохранить оптическое сопряжение плоскостей аэроснимка, экрана и главной плоскости объектива при трансформировании изображения на экран, наклоненный к оптической оси объектива, — плоскость аэроснимка и плоскость экрана должны проходить через две сопряженные точки и

По вертикальным направляющим перемещаются каретки: негативная и объективная. Экран по высоте не перемещается, он только может наклоняться вокруг горизонтальной оси под действием правого ножного диска. Кассета (аэронегатив) наклоняется около оси и вращается в своей плоскости при помощи рукоятки.

Главная плоскость объектива занимает горизонтальное положение. Первое оптическое условие выполняется двумя прямоугольными масштабными инверсорами. С изменением коэффициента трансформирования при помощи левого ножного диска перемещаются главная плоскость объектива и плоскость аэронегатива в соответствии с уравнением оптики $ab = F^2$.

Второе оптическое условие осуществляется линейным перспективным инверсором. При наклоне экрана автоматически наклоняется плоскость негатива в такое положение, чтобы линия их пересечения лежала в главной плоскости объектива, как это и требуется для получения резкого изображения.

Необходимая децентрация негатива вводится в продольном и поперечном направлениях при помощи рукояток.

Фототрансформатор ФТМ. Малый фототрансформатор предназначен для преобразования плановых аэроснимков с увеличением от 0,7 до 2,5 раза. Фокусное расстояние объектива $F = 180$ мм. В этом приборе плоскость кассеты всегда горизонтальна. Для оптического сопряжения плоскостей экран наклоняется на угол $(\varphi_e + \varphi_p)$, а главная плоскость объектива — на угол φ_p , что автоматически выполняется тангенциально-перспективным инверсором. Негатив смещается на величину децентрации (продольной и поперечной). Масштабное сопряжение по конструктивной оси осуществляется при помощи ленточного инверсора в соответствии с основным уравнением оптики, при этом экран по высоте не перемещается, а двигается объективная каретка.

Трансформирование по опорным точкам. Для трансформирования аэрофотоснимков необходимо иметь пять опорных (трансформационных, или ориентирующих) точек. Эти точки должны быть наколоты на аэронегативе и нанесены на планшете. Четыре точки выбирают на углах рабочей площади аэроснимка; дополнительно в центре снимка определяют пятую, избыточную точку.

Так как точки на аэроснимке смещены под влиянием рельефа местности, то для перспективного соответствия в положение трансформационных точек должны быть введены поправки за рельеф. Обычно их вводят в положение точек на планшете, при этом знак поправки берут обратный.

Процесс фототрансформирования состоит в совмещении изображения трансформационных точек аэронегатива с их положением на опорном планшете и изготовлении исправленного фотографического отпечатка. Совмещение изображений трансформационных точек аэронегатива с их положением на плане выполняется методом приближений. Негатив укладывают в кассету прибора эмульсионной стороной вниз и вращают кассету так, чтобы трансформационные точки, расположенные по диагонали снимка, проектировались на экран примерно по оси его вращения. Перемещая на экране опорный планшет и действуя масштабным инверсором, добиваются совмещения точек по диагонали. Наклоняя экран и повертывая кассету с аэронегативом в своей плоскости, устраняют несовпадение остальных точек. Величина несовмещения точек допускается не более 0,4 мм. При необходимости вводят продольную или поперечную децентрацию негатива.

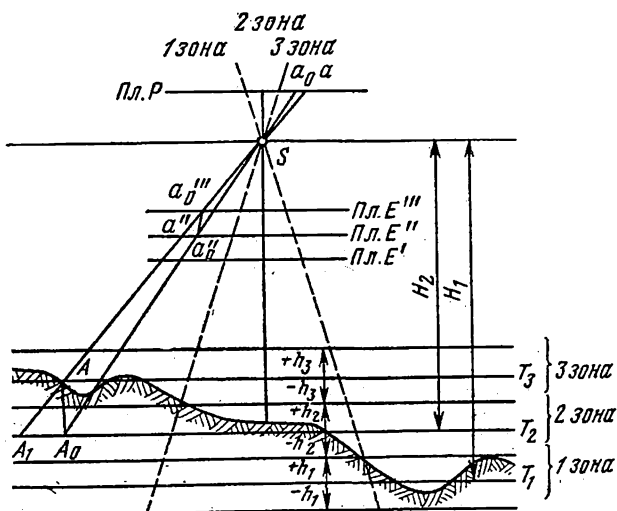


Рис. 102. Схема трансформирования по зонам

Трансформирование по зонам. При значительном рельефе местности трансформирование ведут по зонам на несколько плоскостей, допуская в каждой зоне смещение точек на плане за рельеф δ_{rh} не более 0,4 мм. Высота зоны может быть подсчитана по формуле (рис. 102)

$$Q_m = 2h = 2fM_T \delta_{rh} / 1000r = 0,0008fM_T / r, \quad (\text{IV.3.39})$$

где Q_m — высота зоны в м; $1:M_T$ — масштаб плана; r — расстояние от центральной точки до угла рабочей площади аэроснимка.

На аэроснимке границы зон трансформирования намечают по имеющейся карте или по данным стереоскопических измерений. Одну из зон принимают за начальную. Относительно средней плоскости этой зоны вычисляют поправки за рельеф и вводят их в положение трансформационных точек, по которым и трансформируют аэроснимок.

К следующим зонам переходят путем простого изменения масштаба изображения. Для этого в положение двух наиболее удаленных трансформационных точек на планшете вводят поправки за рельеф относительно средней плоскости второй зоны, масштабным инверсором совмещают эти точки с их изображением и делают отпечаток. Так поступают и для последующих зон. Для монтажа фотоплана используют только площадь зоны, в которой аэроснимок трансформирован.

Дифференциальное фототрансформирование. Для устранения влияния рельефа местности на плановое положение точек аэроснимка трансформирование выполняют при помощи особых стереоприборов с проектирующими щелевыми приспособлениями. В фототрансформаторе ФТЩ-2 модель местности создается тремя проекто-

рами. Для стереоскопического измерения этой модели служит измерительный столик, перемещающийся вдоль осей прибора по взаимно перпендикулярным направляющим. На два экрана столика проектируются снимки, которые рассматриваются через стереоскоп. Перемещение измерительной марки по высоте учитывается по счетчику высот.

Движения измерительного столика передаются на каретку щелевого проектора, оптическая система которого проектирует изображение среднего снимка через узкую щелевую диафрагму на светочувствительный фотоматериал. Таким образом, путем последовательного сканирования модели по параллельным маршрутам с одновременным проектированием изображения через щель на светочувствительную фотобумагу получают точную ортогональную проекцию аэроснимка — ортофотоснимок.

IV.3.3.4. Составление фотосхем и фотопланов

Монтаж фотосхем. Фотосхема представляет собой соединение (монтаж) рабочих площадей плановых аэроснимков одного или нескольких маршрутов. Так как фотосхема составляется из нетрансформированных аэроснимков, то масштаб в разных ее частях будет несколько различаться.

Фотосхемы можно монтировать по контурным точкам и начальным направлениям. В первом способе на середине перекрытия соседних аэроснимков выбирают две контурные точки, по которым и соединяют снимки. Тонкой иглой перекалывают точки с верхнего снимка на нижний и проверяют их сходимость. Закрепив снимки грузиками, разрезают их примерно по средней линии перекрытия острым ланцетом и приклеивают центральные части на картон. Так же монтируют остальные аэроснимки, в том числе и соседних маршрутов.

Более точные результаты дает монтаж фотосхем по начальным направлениям. В этом способе на каждом аэроснимке накалывают центральную точку (в окружности радиуса $f/50$ из главной точки) и проводят начальные направления. Фотосхему монтируют, совмещая начальные направления соседних аэроснимков, при этом последние передвигают вдоль направлений до совпадения некоторой одноименной точки, лежавшей в середине перекрытия. Аэроснимки разрезают, подклеивают и оформляют в фотосхему.

Средний масштаб фотосхем $1:M_\phi$ может быть определен по расстоянию между точками на схеме l_ϕ и соответственно на карте l_k известного масштаба $1:M_k$

$$1:M_\phi = l_\phi:(l_k M_k). \quad (IV.3.40)$$

Монтаж фотопланов. Фотопланом называют фотографическое изображение местности, составленное из рабочих площадей трансформированных аэроснимков. Фотопланы монтируют по трансформационным точкам и опознакам, имеющимся на планшете. На трансформированных аэроснимках эти точки пробивают пуансоном.

Аэроснимки укладывают помаршрутно на планшет, совмещая центры отверстий с опорными точками. Отклонения допускают не более 0,4 мм. Одновременно проколом иглы проверяют сходимость четких контуров на перекрытиях.

Затем производят порезы аэроснимков вдоль продольных и поперечных перекрытий, приклеивают их к планшету и оформляют трапецию.

Для оценки точности монтажа производят корректуру фотоплана. Устанавливают отклонения в трансформационных точках и опознаках, а также расхождения контуров по линиям пореза, измеряя их до десятых долей миллиметра. По этим отклонениям определяют ошибку монтажа по формулам двойных измерений.

IV.3.3.5. Привязка аэроснимков

Понятие о привязке аэроснимков. Привязкой аэроснимков называют комплекс работ по опознаванию на местности контурных точек, изобразившихся на аэроснимках, и по определению геодезических координат этих точек. Контурная точка аэроснимка, геодезические координаты которой определяются на местности, называются опорной точкой, или опознаком. В зависимости от назначения различают:

1) плановую привязку аэроснимков, в результате которой определяют абсциссы и ординаты точек;

2) планово-высотную привязку аэроснимков, при которой в натуре определяют все три геодезические координаты;

3) высотную привязку аэроснимков, в результате которой на местности определяют лишь высоты точек.

Привязку аэроснимков называют сплошной, если в процессе полевых работ определяют все опорные точки, необходимые для обработки каждой стереопары, и разреженной, если опознаки определяются через несколько стереопар как основа для камерального сгущения точек.

К выбору опознаков предъявляются следующие требования.

1. Контурная точка, выбранная в качестве опознака, должна четко изображаться и уверенно опознаваться на перекрывающихся частях всех аэроснимков. Ошибка ее опознавания на снимке не должна превышать 0,1 мм.

2. Точка должна быть удобной для геодезического определения ее координат, при этом ошибка в плановом положении точки по отношению к пунктам геодезической основы не должна превышать 0,2 мм в масштабе плана, а по высоте — $1/10$ принятого сечения рельефа.

3. Выбранный контур должен лежать по возможности близко к средней поверхности местности. Нельзя за опознаки брать высокие предметы и точки, расположенные на дне оврагов, склонах и т. д.

В качестве опознаков обычно выбирают точки пересечения линейных контуров: дорог, тропинок, канав, границ угодий, ограждений, а также отдельные кусты, камни, углы сараев и другие предметы, которые с достаточной точностью опознаются на аэроснимках.

В районах, где мало естественных четких контуров, перед выполнением аэрофотосъемочных работ производят маркировку контурных точек, т. е. создают искусственные контурные точки.

Как плановая, так и высотная привязки аэроснимков состоят из следующих процессов:

- а) составление проекта привязки аэроснимков;
- б) выбор контурных точек на местности и отождествление их на аэроснимках;
- в) накалывание и оформление точек на аэроснимках;
- г) закрепление опознаков на местности;
- д) геодезические измерения для определения координат и высот точек;
- е) вычисление координат и высот опознаков;
- ж) контроль опознавания точек.

Плановая привязка аэроснимков. Проект плановой привязки составляют по накидному монтажу, на который предварительно наносят рамки трапеций и все существующие и вновь запроектированные пункты геодезической основы.

Рассчитав необходимую густоту опознаков, по накидному монтажу и аэроснимкам производят их наиболее целесообразное размещение, при этом стремятся наметить опознаки в зоне тройного продольного перекрытия аэроснимков, а также по возможности в средней части поперечного перекрытия между маршрутами. Во всех случаях расстояние от опознака до края аэроснимка не должно быть меньше 1 см. Особое внимание уделяется обеспечению опознаками границ съемочного участка.

В проекте намечают примерные геодезические построения, обеспечивающие с требуемой точностью определение координат опознаков.

Полевые работы по привязке аэроснимков начинают с рекогносцировки, в процессе которой на местности находят указанные в проекте зоны, выявляют наличие видимости на ближайшие пункты геодезической основы и окончательно устанавливают наиболее удобный способ геодезических измерений для определения координат опознаков.

В намеченной по проекту зоне выбирают на местности выделяющую контурную точку, четко изобразившуюся на всех перекрывающихся частях аэроснимков, и аккуратно накалывают ее тонкой иглой.

Наколотую точку обводят с обратной стороны аэроснимка кружком и подписывают ее номер. На этой же стороне аэроснимка в поле составляют в увеличенном масштабе абрис опознака.

Пункты триангуляции, построенные до проведения аэрофотоъемки, обычно хорошо опознаются на снимке по окружающим их канавам и теням. Если почему-либо опознать и точно наколоть на аэроснимке пункт триангуляции нельзя, то в качестве опознака выбирают ближайшую контурную точку и определяют ее координаты.

На местности опознаки закрепляют деревянными столбиками или другими знаками и окапывают канавой.

Координаты опознаков предпочитают определять посредством различного рода засечек, задачи Ганзена, простых триангуляционных построений. Если опознак находится недалеко от пункта геодезической основы, то его координаты определяют полярным способом, т. е. измеряют расстояние между ними и примычный угол между направлениями на соседний пункт и опознак. Так как этот способ бесконтрольный, то дополнительно измеряют два примычных угла, а построение выполняют в виде одного или двух треугольников (рис. 103, а, б, в).

Особенно выгодно применять для привязки обратную засечку, при которой на опознаке измеряют направления на четыре пункта. Если непосредственно с опознака нет видимости на такое количество пунктов, то выбирают вспомогательную точку, которая определяется обратной засечкой, а уже к ней привязывают опознак. Смежные опознаки, определяемые обратной засечкой по трем пунктам, связывают между собой взаимным направлением (рис. 103, г).

В закрытой местности для привязки аэроснимков приходится прокладывать полигонометрические ходы.

Высотная привязка аэроснимков. Работы по высотной привязке снимков во многом аналогичны плановой привязке. Проект составляют при внимательном стереоскопическом просмотре аэро-

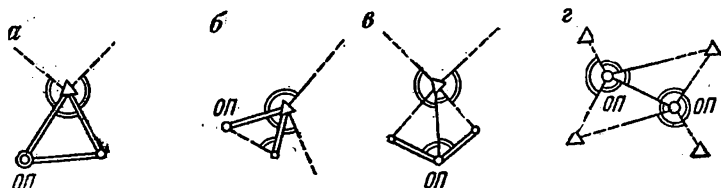


Рис. 103. Схемы плановой привязки аэроснимков

снимков. Часть высотных опознаков дополнительно намечают у урез-
зов водотоков.

На накидном монтаже отмечают пункты нивелирной основы, а также все пункты триангуляции и полигонометрии, высоты которых известны, намечают нивелирные (высотные) ходы. Проект уточняют при рекогносцировке местности.

Высотные опознаки также опознают на местности и накаль-
вают на аэроснимках. Абрис на них не составляют, а дают краткое
описание расположения опознака с указанием высоты окружающей
растительности.

В плоскоравнинных районах высоту опознаков определяют гео-
метрическим нивелированием. На пересеченной местности целесооб-
разно применять тригонометрическое нивелирование.

Для планово-высотной привязки аэроснимков в горных районах
хорошие результаты дает метод наземной стереофотограмметриче-
ской съемки.

IV.3.3.6. Топографическое дешифрирование

Дешифрированием называют опознавание объектов мест-
ности на аэроснимках. В процессе дешифрирования на фотопланах
или отдельных аэроснимках опознают и вычерчивают условными зна-
ками предметы и контуры местности, границы угодий и другие эле-
менты ситуации, необходимые для составления топографической
карты. При аэрофотосъемке в крупном масштабе большинство
предметов и контуров местности могут быть выявлены по их изо-
бражению в камеральных условиях (камеральное дешифри-
рование). При этом пользуются альбомами-эталонами,
составленными из ряда типовых для данной местности аэроснимков,
на которых опознаны наиболее важные и характерные элементы си-
туации. Сравнивая изображение на дешифрируемом аэроснимке и
эталоне, удается по аналогии опознать тот или иной объект.

Существуют объекты местности, которые трудно различить на
снимке: подземные сооружения, малые мосты и дорожные трубы, ко-
лодцы и др. Кроме того, ряд элементов карты вообще не может
быть изображен на аэроснимке (географические названия, числовые
характеристики, административные границы). Поэтому камеральное
топографическое дешифрирование дополняется полевым дешиф-
рованием, в процессе которого фотографическое изображение
аэроснимка сливается непосредственно с натурой.

Основными дешифровочными признаками являются
форма и размеры объекта; тон и структура изображения; тень, от-
брасываемая объектом; взаимная связь в расположении отдельных
элементов ситуации. Возможность камерального дешифрирования по-

вышается при производстве спектрозональной и цветной аэрофото- съемок, использовании перспективных снимков.

При комбинированной аэрофотосъемке полевое дешифрирование ведут обычно вместе с рисовкой рельефа на фотопланах, имея запасной комплект снимков для стереоскопического изучения местности. Одновременно производят обобщение мелких контуров — генерализацию, а также съемку топографическими методами объектов, появившихся после аэрофотосъемки или не изобразившихся на снимках. При этом используют как точки съемочного обоснования, так и резкие контурные точки.

При сочетании камерального дешифрирования с полевым вначале под стереоскопом изучают модель местности и камерально дешифрируют предметы и контуры, надежность которых не вызывает сомнений. Затем намечают маршруты полевого обследования и дешифрируют в натуре все сомнительные места.

IV.3.3.7. Съемка рельефа на фотопланах

При рисовке рельефа на фотопланах съемочное обоснование развивают путем проложения ходов геометрического (в плоскоравнинной местности) или тригонометрического нивелирования. Точки ходов стараются выбирать на опознаваемых резких контурах или в местах, где эти точки могут быть легко нанесены на фотоплан промерами от ближайших контурных точек.

Ориентирование фотоплана на местности значительно упрощается, так как, установив планшет над какой-либо контурной точкой, его можно ориентировать по любой другой контурной точке, видимой на местности и изображенной на фотоплане. Наличие же на фотоплане изображения гидрографической сети и таких элементов рельефа, как тальвеги, бровки оврагов, обрывы, возвышенные и пониженные места, улучшает качество рисовки рельефа и уменьшает необходимое количество пикетных точек. Кроме того, при определении высоты пикета, совпадающего с хорошо видимой контурной точкой, нет необходимости посылать на нее рейку. Расстояние до точки можно определить по фотоплану, а угол наклона измерить непосредственно под контур на землю. Съемку рельефа на фотопланах обычно начинают на открытых местах, а затем дорисовывают закрытые участки.

IV.3.4. Стереоскопический метод измерений. Элементы ориентирования снимков

IV.3.4.1. Стереоскопические измерения

Понятие о стереоскопических измерениях. В основе стереофотограмметрических методов измерений лежит стереоскопическое зрение, т.е. способность глаз наблюдателя ощущать объемность пространства.

Для получения стереоскопического эффекта при рассмотрении двух изображений одного и того же объекта необходимо, чтобы левым глазом наблюдался только левый снимок, а правым — правый и чтобы снимки были правильно один относительно другого ориентированы. Если снимки поменять местами, то будет наблюдаться обратный стереоэффект, т.е. возвышенности будут казаться впадинами, а впадины — возвышенностями. При повороте снимков на 90° относительно глазоного базиса рельефная картина исчезает и изображение становится плоским (нулевой стереоэффект). Два перекры-

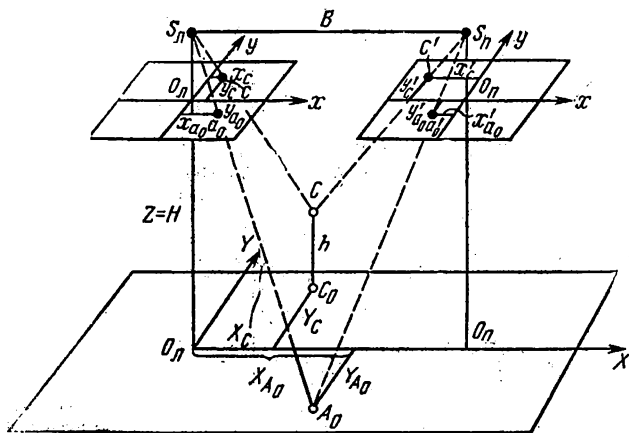


Рис. 104. Система координат стереопары

вающихся фотоснимка называются стереопарой. По результатам наблюдений стереопары можно определить не только плановое положение точек, но и их высоты.

При стереофотограмметрической съемке измеряют модель местности, создаваемую при помощи стереопар аэроснимков. Каждая точка модели получается прямой засечкой с некоторого базиса фотографирования $S_L S_R$ (рис. 104) парой восстановленных проектирующих лучей, существовавших в момент аэрофотосъемки местности. Плоскость, проходящая через базис фотографирования, называется базисной плоскостью. Очевидно, что в момент съемки базисные плоскости одноименной точки левого и правого аэроснимков совпадают и проходят через эту же точку на местности.

Принятая в стереофотограмметрии система координат показана на рис. 104. Следы отвесной базисной плоскости на аэроснимках и местности приняты за оси абсцисс (соответственно x и X). В качестве осей ординат на снимке y и местности Y приняты следы отвесной плоскости, перпендикулярной к базису фотографирования и содержащей главное направление левого аэроснимка. За ось аппликаты Z принято главное направление левого снимка.

Разность абсцисс одноименных точек левого и правого аэроснимков (с учетом их знаков) называется продольным параллаксом точки и обозначается буквой p :

$$p = x - x'. \quad (\text{IV.3.41})$$

Для определения высот точек аэроснимка особое значение имеет разность продольных параллакс Δp_a наблюдаемой точки a и точки, лежащей в исходной плоскости, параллакс которой равен базису b (рис. 105),

$$\Delta p_a = x_a - x'_a - b. \quad (\text{IV.3.42})$$

Основная формула определения превышения наблюдаемой точки над исходной имеет вид

$$h = \frac{H \Delta p}{b + \Delta p}. \quad (\text{IV.3.43})$$

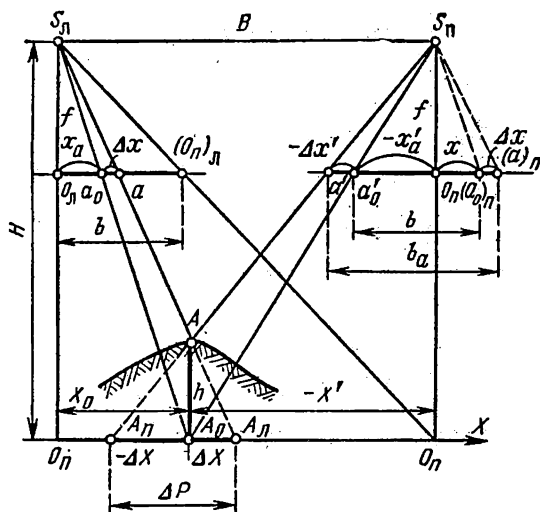


Рис. 105.
Определение
превышений
по стереопаре

Из основной формулы (IV.3.43) следует, что

$$\Delta p = \frac{bh}{H - h}. \quad (\text{IV.3.44})$$

Так как величины H , b и Δp определяются по независимым измерениям, то, пренебрегая малой величиной Δp в знаменателе формулы (IV.3.43), согласно теории ошибок получим среднюю квадратическую ошибку фотограмметрического определения превышения

$$m_h^2 = \left(\frac{H}{b}\right)^2 m_{\Delta p}^2 + \left(\frac{h}{H}\right)^2 m_H^2 + \left(\frac{h}{b}\right)^2 m_b^2. \quad (\text{IV.3.45})$$

При строго горизонтальной аэрофотосъемке, когда аэроснимки и базис фотографирования горизонтальны, следы базисных плоскостей параллельны следу вертикальной базисной плоскости, принятой за ось абсцисс. В этом случае ординаты одноименных точек на левом и правом снимках равны ($y_{aл} = y_{aп}$) независимо от рельефа местности. При наличии углов наклона аэроснимков или линии базиса это равенство нарушается и возникает поперечный параллакс q , равный разности ординат одноименных точек,

$$q_a = y_{aл} - y_{aп}. \quad (\text{IV.3.46})$$

Для измерения координат точек стереомодели в оптических системах применяются особые марки в виде точек, буквы T , баллончиков, нитей и др.

Стереоскопическое зрение имеет разрешающую способность примерно в два раза выше, чем монокулярное.

IV.3.4.2. Стереоскопы

Простейшими приборами для стереоскопических наблюдений являются стереоскопы. Широкое распространение получил складной зеркально-линзовый стереоскоп, предназначенный для

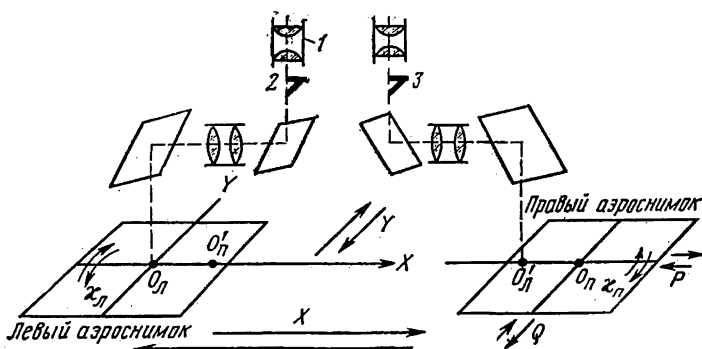


Рис. 106. Схема стереокомпаратора

рисовки рельефа на аэроснимках по известным высотным точкам, для дешифрирования, выбора направления трасс и т. д.

В стереоскопе малые зеркала и соответственно параллельные им большие зеркала расположены под углом 45° к плоскости экрана. Между зеркалами установлены плоско-выпуклые сменные линзы, что позволяет изменять увеличение одной из ветвей стереоскопа и рассматривать разномасштабные аэроснимки. Для наблюдений аэроснимки располагают на столике под большими зеркалами прибора таким образом, чтобы идентичные точки лежали на линиях, параллельных зрительному базису, и передвигают их вдоль этого направления до получения отчетливого стереоэффекта.

Для дешифрирования аэроснимков применяют измерительные стереоскопы. Наблюдательная система в этих приборах выполнена в виде бинокулярной насадки с переменным увеличением и снабжена измерительной маркой.

Аэроснимки укладываются на каретках, и они могут перемещаться в продольном и поперечном направлениях. Эти перемещения (параллаксы) измеряются микрометренными винтами с точностью отсчетов 0,01 мм.

IV.3.4.3. Стереокомпараторы

Стереокомпаратор — высокоточный стереофотограмметрический прибор, служащий для измерения прямоугольных координат и параллаксов точек аэроснимков. Принципиальная схема прибора показана на рис. 106.

Стереоскопические наблюдения ведутся при помощи бинокулярной системы 1. По оси X перемещаются фотоснимки, вдоль оси Y — бинокуляр.

Стереоскопические измерения выполняются при помощи двух марок 2 и 3, расположенных в фокальной плоскости бинокуляра. Наблюдатель видит одну пространственную марку, которую совмещает с поверхностью рельефной модели в измеряемой точке. Для этого одновременным перемещением обоих аэроснимков вдоль оси абсцисс и движением бинокуляра вдоль оси ординат монокулярно наводят левую марку на выбранную точку левого снимка. Затем наблюдают двумя глазами и, перемещая параллактическим винтом P правый аэроснимок, добиваются касания пространственной марки поверхности модели в этой точке. При наличии поперечного параллакса, т. е. двоения марки по оси ординат, его устраняют винтом Q.

Для измерений на стереокомпараторе снимки (негативы) закладывают в соответствующие кассеты. Главные точки o_n и o_n (см. рис. 106) совмещают с центрами кассет и штурвалами X и Y наводят левую марку на главную точку левого снимка o_n , а движениями X и Q — правую марку на главную точку правого снимка o_n , располагая обе главные точки по оси абсцисс и ориентируя снимки по начальным направлениям. В современных автоматизированных стереокомпараторах точность измерений составляет 1—2 мкм. Результаты наблюдений автоматически выдаются на печать и кодируются на перфоленте. Для точной идентификации связующих точек смежных маршрутов имеются фоторегистраторы, фиксирующие фотоабрисы с изображением наблюдаемой точки и марки.

IV.3.4.4. Определение элементов взаимного ориентирования и углов наклона аэроснимков

Элементы ориентирования пары аэроснимков. В разделе IV.3.1 рассмотрены элементы внешнего ориентирования одиночного аэроснимка. В стереофотограмметрии принято ориентировать стереопары. При этом вначале ориентируют второй снимок относительно первого, условно принятого за горизонтальный, т. е. производят взаимное ориентирование аэроснимков, создавая модель местности. Затем эту модель ориентируют относительно системы координат местности (внешнее ориентирование).

Элементов взаимного ориентирования пять (рис. 107): три угловых элемента, характеризующих относительный продольный $\Delta\alpha_x$ и поперечный $\Delta\omega$ углы наклона аэроснимков и относительный поворот снимков в своей плоскости $\Delta\chi$, и два угловых элемента ν и τ , устанавливающих направление базиса в пространстве, причем

$$\operatorname{tg} \nu = b_z / b_x; \quad \operatorname{tg} \tau = b_y / b_x,$$

где b_x , b_y , b_z — проекции базиса b на соответствующие координатные плоскости.

Если элементы взаимного ориентирования определены и установлены точно, то на всех точках полученной модели будет отсутствовать поперечный параллакс, а при соблюдении элементов внутреннего ориентирования она будет подобна местности, но при этом она останется произвольно ориентированной в пространстве и будет иметь неопределенный масштаб.

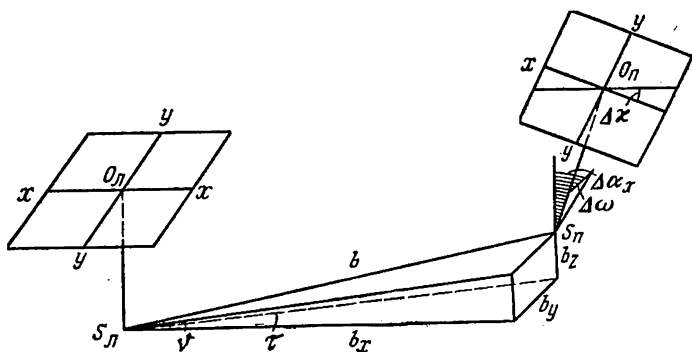


Рис. 107. Элементы взаимного ориентирования стереопары

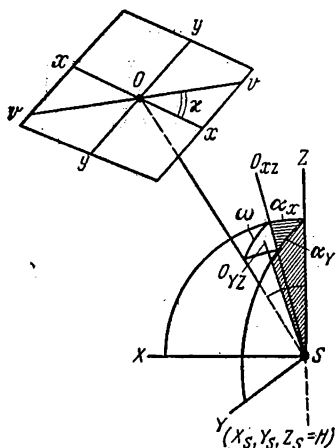


Рис. 108. Элементы внешнего ориентирования стереопары

Для перехода к геодезической системе координат необходимо знать координаты центра проектирования $X_S, Y_S, Z_S = H$ (рис. 108); задать масштаб модели $1/M = b/B$; определить абсолютные углы наклона правого (левого) аэроснимка: продольный α_x — угол наклона проекции главного направления S_0 в плоскости XZ , поперечный α_y — угол наклона проекции главного направления в плоскости YZ и χ — угол поворота снимка в своей плоскости. Иногда вместо α_y берут ω — угол между главным направлением S_0 и его проекцией S_{0xz} на плоскость XZ .

Указанные семь элементов являются элементами внешнего, или геодезического, ориентирования пары аэроснимков.

Такая система элементов ориентирования принята при обработке аэроснимков универсальным методом. При аналитическом решении задачи ориентирования аэроснимков и построении одиночных моделей на приборах используется так называемая базисная система, в которой положение снимков стереопары определяется относительно базиса съемки, условно принятого горизонтальным, и главной базисной плоскости левого аэроснимка следующими пятью угловыми элементами (рис. 109): $\tau_L, \tau_P, \varepsilon, \kappa_L$ и κ_P .

Углы τ_L и τ_P определяют направление главных лучей в своих базисных плоскостях и измеряются от нормали к базису до главного луча; ε — угол между главными базисными плоскостями левого и правого аэроснимков; κ_L и κ_P — углы поворота снимков в своих плоскостях между осью абсцисс (начальным направлением) и следом главной базисной плоскости.

Ориентирование стереопары относительно геодезической системы координат определяется, как и в первой системе, семью элементами (рис. 110): тремя углами A, ν и μ , где A — азимут линии базиса, образованный отвесной базисной плоскостью с плоскостью XZ геодезической системы координат; ν — угол наклона базиса, измеряемый в главной базисной плоскости левого аэроснимка между линией базиса и горизонтальной плоскостью; μ — угол между отвесной базисной плоскостью и главной базисной плоскостью левого аэроснимка: тремя координатами центра проектирования левого аэроснимка $X_{S_L}, Y_{S_L}, Z_{S_L}$ и масштабом модели $1:M$.

Обе системы ориентирования аэроснимков связаны зависимостями

$$\Delta\alpha_X = \tau_P - \tau_L; \quad \varepsilon = \omega_P - \omega_L.$$

Взаимное ориентирование аэроснимков является ведущим процессом в стереофотограмметрии. Оно дает возможность создавать и измерять модели местности из ряда стереопар и только затем

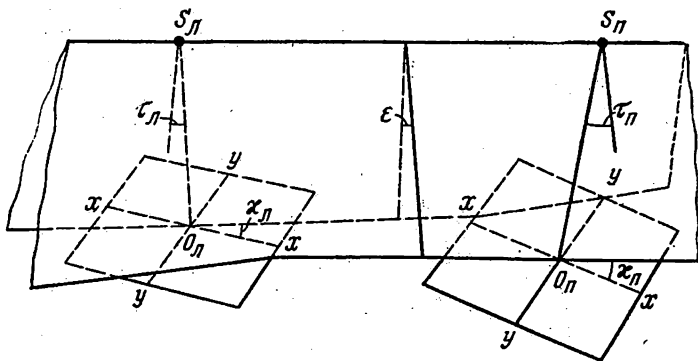


Рис. 109. Базисная система координат

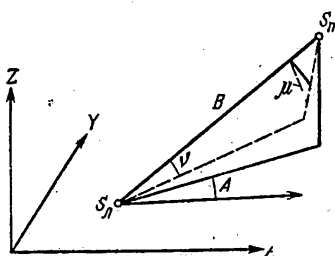


Рис. 110. Геодезическое ориентирование

внешне ориентировать весь ряд по геодезическим точкам, находящимся на крайних аэроснимках.

Определение элементов взаимного ориентирования. При элементах взаимного ориентирования, равных нулю, ординаты идентичных точек на левом и правом аэроснимках стереопары равны и, следовательно,

$$y_{\text{л}} - y_{\text{п}} = 0.$$

Если же элементы ориентирования не равны нулю, то под их влиянием ординаты аэроснимка получают некоторое искажение и в идентичных точках появляется поперечный параллакс q . В этом случае

$$y_{\text{л}} - y_{\text{п}} \neq 0 = q.$$

Величина поперечного параллакса q зависит от координат точки и значения элементов ориентирования; в базисной системе координат она равна (ρ — радиан в минутах)

$$q = -\frac{x_{\text{л}} y_{\text{п}}}{f\rho} \tau_{\text{л}} + \frac{x_{\text{п}} y_{\text{л}}}{f\rho} \tau_{\text{п}} - \left(\frac{y_{\text{л}} y_{\text{п}}}{f} + f \right) \frac{\varepsilon}{\rho} - \\ - \frac{x_{\text{л}}}{\rho} \kappa_{\text{л}} + \frac{x_{\text{п}}}{\rho} \kappa_{\text{п}}. \quad (\text{IV.3.47})$$

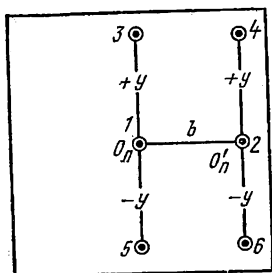


Рис. 111. Стандартная схема расположения точек

меряют на аэроснимках.

Таким образом, для определения элементов взаимного ориентирования необходимо произвести независимые измерения на пяти точках стереопары и совместно решить пять уравнений.

Чтобы достигнуть наибольшей точности решения задачи, точки выбирают в таких местах снимков, где под влиянием того или иного элемента ориентирования возникает максимальный поперечный параллакс. Кроме того, для облегчения решения системы уравнений точки намечают с таким расчетом, чтобы некоторые коэффициенты в уравнении (IV.3.48) равнялись нулю. Для контроля дополнительно выбирают шестую точку. Получается стандартная схема расположения точек, показанная на рис. 111.

Точки 1 и 2 совпадают с главными точками аэроснимков; точки 3, 4, 5 и 6 лежат на перпендикулярах к линии базиса, восстановленных в главных точках и удаленных от этих точек на равные расстояния.

Подставляя значения координат в уравнение (IV.3.48), получают две группы по три уравнения — первая группа для точек 1, 3 и 5 включает неизвестные τ_n , κ_n и ϵ вторая группа для точек 2, 4 и 6 включает неизвестные τ_l , κ_l и ϵ , т.е. система решается раздельно по три уравнения. Элемент ϵ получается дважды, из каждой группы, что является контролем решения задачи. Из решения уравнений находят

$$\tau_l = -\frac{f\rho}{2by} (q_4 - q_6) = -\frac{f\rho}{2by} Q_1; \quad (IV.3.49)$$

$$\tau_n = -\frac{f\rho}{2by} (q_3 - q_5) = -\frac{f\rho}{2by} Q_2; \quad (IV.3.50)$$

$$\epsilon' = -\frac{f\rho}{2y^2} (q_3 + q_5 - 2q_1) = -\frac{f\rho}{2y^2} Q_3'; \quad (IV.3.51)$$

$$\epsilon'' = -\frac{f\rho}{2y^2} (q_4 + q_6 - 2q_2) = -\frac{f\rho}{2y^2} Q_3''; \quad (IV.3.51')$$

$$\epsilon = (\epsilon' + \epsilon'')/2;$$

$$\kappa_l = -\frac{f}{b} \epsilon - \frac{q^2}{b} \rho; \quad (IV.3.52)$$

В первом приближении можно принять, что $y_n \approx y_l = y$, и уравнение взаимного ориентирования представить в виде

$$q = -\frac{x_l y}{f\rho} \tau_l + \frac{x_n y}{f\rho} \tau_n - \left(\frac{y^2}{f} + f \right) \frac{\epsilon}{\rho} - \frac{x_l}{\rho} \kappa_l + \frac{x_n}{\rho} \kappa_n. \quad (IV.3.48)$$

В этом уравнении неизвестны пять элементов взаимного ориентирования: τ_l , τ_n , ϵ , κ_l и κ_n ; координаты точек и поперечные параллаксы из-

$$x_{\Pi} = -\frac{f}{b} \varepsilon - \frac{q_1}{b} \rho. \quad (\text{IV.3.53})$$

В производстве обычно точку 2 принимают за начальную и q_2 считают равным нулю; кроме того, элементы x_{Π} и x_{Π} не вычисляют.

Формулы (IV.3.49)—(IV.3.53) приближенные, в них сохранены величины первого порядка малости. Ими пользуются при малых углах наклона аэроснимков и в равнинной местности. В более строгих формулах принимают, что

$$y_{\Pi} = y_{\Pi} - q; \quad (\text{IV.3.54})$$

$$x_{\Pi} = x_{\Pi} - (b + \Delta\rho),$$

и сохраняют члены второго порядка малости.

Точность определения элементов взаимного ориентирования может быть подсчитана по следующим приближенным формулам:

$$m_{\tau_{\Pi}} \approx m_{\tau_{\Pi}} = \sqrt{2} f \rho m_q / 2by; \quad (\text{IV.3.55})$$

$$m_{e_{\text{ср}}} = \sqrt{3} f \rho m_q / 2y^2, \quad (\text{IV.3.56})$$

где $m_{\tau_{\Pi}}$, $m_{\tau_{\Pi}}$, m_e — средние квадратические ошибки соответствующих элементов; m_q — средняя квадратическая ошибка измерения поперечных параллаксов (при f , равном 75—100 мм, принимают $m_q = 0,03$ мм, при $f \geq 200$ мм $m_q = 0,02$ мм).

Определение поправки к разностям продольных параллаксов. Основная формула определения превышения стереофотограмметрическим методом

$$h = \frac{H \Delta\rho}{b + \Delta\rho} \quad (\text{IV.3.57})$$

дает верные результаты, если измерения производить по строго горизонтальным аэроснимкам, снятым при горизонтальном базисе фотографирования.

Поправка в абсциссу точки аэроснимка за влияние углов наклона α_x и ω , а также угла κ и разности высот базиса фотографирования δH равна

$$\Delta x = \left(\frac{x'^2}{f} + f \right) \frac{\alpha_x}{\rho} + \frac{x' y'}{f \rho} \omega + \frac{y' \kappa}{\rho} + \frac{x' \delta H}{H} + \frac{x' \Delta\rho}{Hb} \delta H, \quad (\text{IV.3.58})$$

где x' , y' — координаты точки на наклонном аэроснимке.

Применительно к исправлению абсцисс на правом аэроснимке ($x_{\Pi} = x_{\Pi} + b + \Delta\rho$) поправка в разности продольных параллаксов для плановой аэрофотосъемки равна

$$\begin{aligned} \delta\rho = & \frac{x_{\Pi}}{f} \left(\frac{2b}{\rho} \alpha_{x_{\Pi}} - \delta H \right) + \frac{x_{\Pi}^2}{f \rho} (\alpha_{x_{\Pi}} - \alpha_{x_{\Pi}}) + \\ & + \frac{x_{\Pi} y}{f \rho} (\omega_{\Pi} - \omega_{\Pi}) + \frac{y}{\rho} \left(\kappa_{\Pi} - \kappa_{\Pi} + \frac{b}{f} \omega_{\Pi} \right) + \frac{2x_{\Pi} \Delta\rho}{f \rho} \alpha_{x_{\Pi}} + \\ & + \frac{2b \Delta\rho}{f \rho} \alpha_{x_{\Pi}} + \frac{y \Delta\rho}{f \rho} \omega_{\Pi} - \frac{x_{\Pi} \Delta\rho}{f b} \delta H. \end{aligned} \quad (\text{IV.3.59})$$

При рельефе местности с небольшими высотами членами третьей строки формулы (VI.3.59), содержащими Δp , пренебрегают и пользуются для вычисления поправки δp , упрощенной формулой, состоящей из первых двух строк.

Поправку δp прибавляют к измеренному значению разности продольных параллаксов $\Delta p'$ и по формуле (IV.3.57) вычисляют превышение.

IV.3.5. Дифференцированный способ стереотопографической съемки

IV.3.5.1. Схема дифференцированного способа

В дифференцированном способе стереотопографической съемки составление планов и карт разделяется на ряд процессов, каждый из которых выполняется на отдельном, сравнительно простом приборе: определение элементов ориентирования — на стереокомпараторе, рисовка рельефа — на стереомере, составление по аэроснимкам плана — на оптическом проекторе.

Основным прибором при работе этим способом является топографический стереомер, на котором по высотным точкам производят ориентирование плановых аэроснимков и рисовку рельефа. Часть из высотных точек определяют в поле геодезическими методами, вторую часть получают путем фотограмметрического сгущения высот.

Схема работ при составлении топографических карт этим способом следующая:

- 1) лентосъемочные и фотолабораторные работы;
 - 2) создание геодезической основы;
 - 3) плановая и высотная привязки аэроснимков. Дешифрирование;
 - 4) определение элементов ориентирования аэроснимков.
- Развитие плано-высотных фототриангуляционных сетей;
- 5) стереоскопическая рисовка рельефа на топографических стереомерах;
 - 6) составление из отдельных аэроснимков с отдешифрированными контурами и горизонталями фотопланов или чертежных планов;
 - 7) вычерчивание и оформление оригинала карты.

IV.3.5.2. Стереометры

Устройство топографического стереомера. Особенностью стереомеров, разработанных проф. Ф. В. Дробышевым, является наличие в их конструкции коррекционных устройств, которые автоматически вводят поправки в измеряемые разности продольных параллаксов на плановых аэроснимках за влияние углов наклона снимков и базисов.

Схема топографического стереомера показана на рис. 112. На станине 8 установлены левая 12 и правая 10 кассеты, на которых укрепляются аэроснимки (отпечатки). При помощи кремальеры 11 эти кассеты перемещаются вдоль оси абсцисс прибора. Левая кассета имеет дополнительное (параллактическое) перемещение вдоль оси абсцисс, величина которого измеряется микрометренным винтом 1 с ценой деления 0,01 мм.

По направляющим 4, принятым за ось ординат, при помощи винта 7 перемещается наблюдательная система 6, представляющая собой линзово-зеркальный стереоскоп с увеличением около 2^х. Для устранения возникающего поперечного параллакса левая линза стереоскопа может перемещаться винтом 13 параллельно оси Y.

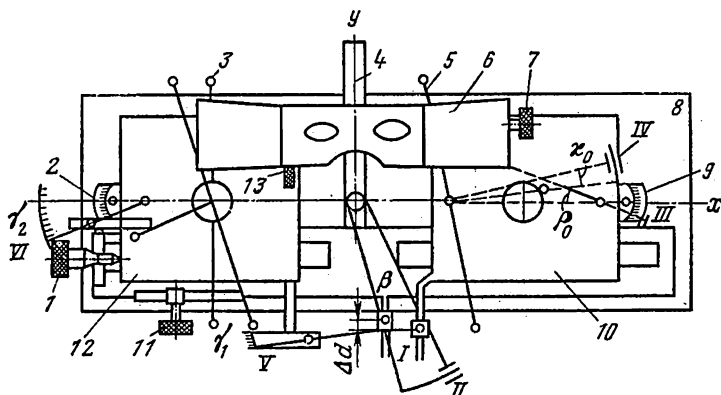


Рис. 112. Схема топографического стереометра

Над кассетами прибора натянуты нити 3 и 5, которые являются измерительными марками. Кассеты могут вращаться в своих плоскостях и закрепляются винтами 2 и 9. Повороты кассет отсчитываются по соответствующим шкалам с ценой деления $2'$. С правой кассетой связаны коррекционные устройства I, II, III и IV, которые автоматически вводят поправки в разность продольных параллаксов. С левой кассетой связаны дополнительные коррекционные устройства V и VI, предназначенные для внедрения поправок в районах со значительным рельефом (IV.3.59).

Коррекционные устройства. Первое и второе (или масштабно-конвергентное) коррекционные устройства работают совместно, и решают задачу автоматического введения поправки за влияние первых двух членов формулы (IV.3.59).

Третье и четвертое коррекционные устройства позволяют автоматически вводить поправки за влияние третьего и четвертого членов формулы (IV.3.59) путем дополнительного поворота правой измерительной нити.

Для обработки снимков местности со значительным рельефом топографический стереометр имеет два дополнительных коррекционных устройства (пятое и шестое), которые учитывают согласно уравнению (IV.3.59) члены, содержащие величину $\Delta\rho$.

Член уравнения (IV.3.59)

$$\delta_p'' = 2b\Delta\rho/f \cdot \alpha_{x_d}/\rho, \quad (\text{IV.3.60})$$

не зависящий от координат точек аэроснимка, коррекционными устройствами не учитывается. Его вычисляют и дополнительно вводят в отсчет по параллактическому винту.

Таким образом, суммарная поправка в разность продольных параллаксов, вызванная действием всех шести коррекционных устройств, выражается формулой

$$\delta_p = -\frac{x_{II}}{d_1} \Delta\alpha - \frac{x_{II}^2}{d_1} \cdot \frac{\beta}{\rho} - \frac{x_{II} y}{r} \cdot \frac{\rho_0}{\rho} - \\ - y \frac{x_0}{\rho} + \frac{x_{II} \Delta\rho}{d_1} \cdot \frac{\gamma_1}{\rho} + y \frac{\Delta\rho}{R} \frac{\gamma_2}{\rho}. \quad (\text{IV.3.61})$$

Чтобы на стереометре были измерены истинные разности продольных параллаксов, необходимо соблюдение равенства правых частей формул (IV.3.59) и (IV.3.61). На основании этого равенства можно найти величины установочных элементов для отдельных коррекционных устройств:

$$\left. \begin{aligned} \text{I. } \Delta d &= d_1 (\delta H - 2b\alpha_{x_{\Pi}}/\rho)/f; \\ \text{II. } \beta &= d_1 (\alpha_{x_{\Pi}} - \alpha_{x_{\text{Л}}})/f; \\ \text{III. } \rho_0 &= r (\omega_{\Pi} - \omega_{\text{Л}})/f; \\ \text{IV. } \kappa_0 &= \kappa_{\Pi} - \kappa_{\text{Л}} - b\omega_{\text{Л}}/f; \\ \text{V. } \gamma_1 &= d_1 (2\alpha_{x_{\text{Л}}}/\rho - \delta H/b)/f; \\ \text{VI. } \gamma_2 &= R\omega_{\text{Л}}/f. \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.3.62})$$

Для вычисления этих установочных величин по формулам (IV.3.62) необходимо знать элементы ориентирования аэроснимков.

IV.3.5.3. Обработка аэроснимков на топографическом стереометре

Ориентирование аэроснимков по установочным элементам. Ориентировать аэроснимки на стереометре — значит привести коррекционные устройства прибора в такое положение, при котором измеряемые разности продольных параллаксов будут равны их истинному значению, т. е. соответствовать горизонтальной аэрофотосъемке. Ориентирование аэроснимков на стереометре может быть выполнено двумя способами:

- а) по установочным элементам;
- б) по опорным высотным точкам.

Установочные элементы Δd , β , ρ_0 , κ_0 , γ_1 и γ_2 вычисляют по известным углам ориентирования аэроснимков [см. формулы (IV.3.62)] и устанавливают с учетом места нулей на шкалах соответствующих коррекционных устройств. Ориентировав аэроснимки по начальным направлениям, приступают к измерениям исправленных разностей продольных параллаксов и к рисовке рельефа.

Ориентирование аэроснимков на стереометре по опорным высотным точкам. При ориентировании аэроснимков по высотным точкам изменением коррекционных устройств добиваются равенства измеренных и вычисленных по известным превышениям разностей продольных параллаксов. Так как в уравнении поправок (IV.3.59) шесть неизвестных величин: δH , $\alpha_{x_{\text{Л}}}$, $\Delta\alpha_x$, e , $\Delta\kappa$ и $\omega_{\text{Л}}$, то для решения задачи необходимо знать

шесть превышений или отметки семи точек. Задача решится методом приближений.

Схемы расположения опорных высотных точек и действия коррекционных устройств показаны на рис. 113. Опорные точки должны совпадать с резкими контурами аэроснимка, по-

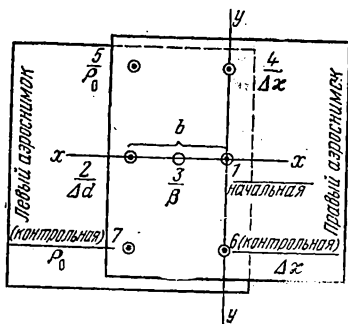


Рис. 113. Схема опорных высотных точек

этому возможны некоторые отступления от строгой схемы, но не более чем на 1 см.

В производственных условиях обычно определяют взаимный продольный угол наклона аэроснимков и устанавливают на шкале конвергентного устройства угол β с учетом его знака. Это дает возможность выполнить ориентирование по шести точкам.

Ориентирование аэроснимков равнинной местности производят установкой только четырех основных корректоров (на шкалах пятого и шестого корректоров γ_1 и γ_2 ставят их места нулей). В горных районах ориентирование выполняют в два приема: устанавливают четыре основных корректора, а затем — два дополнительных.

Зная геодезическое превышение h между опорными точками и определив высоту фотографирования H_1 над первой точкой и базис аэроснимков b , вычисляют по формуле

$$\Delta p = bh / (H_1 - h) \quad (\text{IV.3.63})$$

истинные разности продольных параллаксов для точек 2—6, записывая их в журнал. Аэроснимки закладывают в стереометр, ориентируют по начальным направлениям и приступают к ориентированию по высотным точкам в первом приближении.

Стереоскопически визируют на первую точку и берут отсчет по параллактическому винту. Прибавив к отсчету вычисленное значение Δp для точек 2, 4 и 5, получают отсчеты, которые «должны быть» при наблюдениях этих точек, и записывают их в журнал. Устанавливают на параллактическом винте вычисленный отсчет второй точки и переходят к наблюдениям ее. Перемещая движок Δd масштабного-конвергентного устройства, добиваются касания нити поверхности модели в этой точке. Аналогично установив на параллактическом винте вычисленное значение отсчета точки 4, а затем точки 5 и изменяя установку коррекционных устройств соответственно ω_0 и ρ_0 , добиваются наведения нити на указанные точки. Если отличие контрольных отсчетов на точках 2, 4 и 5 от вычисленных не превышает $\pm 0,10$ мм, то переходят к ориентированию во втором приближении, добиваясь, чтобы разности между измеренными и вычисленными отсчетами на всех точках, включая контрольные, не превосходили $\pm 0,03$ мм.

Рисовка рельефа на топографическом стереометре. Закончив ориентирование аэроснимков, для каждой горизонтали вычисляют установочный отсчет по параллактическому винту. Число горизонталей определяют по высоте самой низкой и самой высокой точек стереопары. По превышению над начальной точкой каждой пятой горизонтали определяют по формуле (IV.3.63) разность Δp , которую прибавляют к отсчету на начальную точку, получая установочные отсчеты для этих горизонталей. Установочные отсчеты для промежуточных горизонталей находят путем простого интерполирования.

Рисовку горизонталей обычно начинают на участках с ярко выраженным рельефом. Установив на параллактическом винте отсчет, соответствующий некоторой средней горизонтали участка, и стереоскопически наблюдая местность, находят точки, в которых измерительная нить касается модели местности. Передвигая вдоль оси абсцисс стереопару и вдоль оси ординат наблюдательную систему и непрерывно отмечая карандашом на правом аэроснимке точки касания нити модели местности, получают горизонталь. Проверив повторным наблюдением правильность рисовки заданной горизонтали, устанавливают на параллактическом винте новый отсчет и переходят к рисовке следующей горизонтали.

На участках с большой разностью высот и крутыми склонами рекомендуется сначала рисовать рельеф через несколько горизонталей, выявляя общую его закономерность, а затем проводить промежуточные горизонталы. На участках с пологими склонами и слабо выраженным рельефом рисовка горизонталей контролируется частым наведением нити на отдельные точки и вычислением их отметок.

Составление топографического плана. Заключительным этапом дифференцированного способа является переход от центральной проекции аэроснимка к ортогональной проекции плана.

В равнинной местности, где обычно составляют фотопланы, этот переход прост. Горизонталы и результаты дешифрирования с отдельных аэроснимков переносят на фотопланы по контурам на глаз или под стереоскопом.

В горных районах этот переход сложнее. Здесь или создают на щелевых трансформаторах ортофотопланы, или составляют при помощи оптических проекторов чертежные планы.

На планшет с нанесенными точками плановой опоры (опознаками, трансформационными точками) проектируют уменьшенный аэронегатив и, изменяя масштаб изображения, наклоняя и поворачивая камеру, добиваются совмещения изображения точек с их положением на планшете. Затем перерисовывают на планшет изображение контуров и горизонталей (по зонам). Высоту зоны и поправку за рельеф рассчитывают по тем же формулам, что и при трансформировании.

Для перехода из одной зоны в другую проектор перемещают по высоте на величину

$$\Delta Z = Zh/H_1, \quad (\text{IV.3.64})$$

где Z — высота проектора над планшетом; h — высота (ступень) зоны; H_1 — высота фотографирования над средней плоскостью начальной зоны.

Положение оптического проектора для последующих зон может быть также найдено по изменению масштаба изображения некоторого отрезка, длина которого в начальной зоне равна l . При переходе в следующую зону эта длина изменится на величину

$$\Delta l = lh/(fM), \quad (\text{IV.3.65})$$

где M — знаменатель масштаба плана.

IV.3.6. Универсальный способ стереотопографической съемки

Универсальный способ стереотопографической съемки основан на определении пространственного положения точек местности при помощи фотограмметрических засечек, осуществляемых обратным проектированием пары аэроснимков. В отличие от дифференцированного способа в универсальном применяются сложные приборы, позволяющие одному наблюдателю последовательно выполнять на приборе все процессы создания по аэроснимкам оригиналов планов и карт: взаимное и геодезическое ориентирование, фотограмметрическое сгущение опорных точек, рисовку рельефа и ситуации.

Универсальные приборы имеют проектирующие камеры, воссоздающие геометрическую модель местности. Эту модель стереоскопически наблюдают и измеряют с высокой точностью в пространственной системе координат, план местности строят в ортогональной проекции. Поэтому универсальные приборы с одинаковым успехом применяются как в равнинных, так и в горных районах.

Значительным достоинством этого способа является и то, что процесс построения и измерения модели местности достаточно механизирован и, как правило, не требует каких-либо сложных вычислений.

В универсальных приборах последних моделей применяются автоматизированные электронные устройства, которые упрощают и ускоряют процессы ориентирования и обработки аэроснимков и расширяют возможности стереофотограмметрии в решении научных и производственных задач (расчеты аналитических данных, выбор оптимальных вариантов трасс и др.).

Обработки аэроснимков с преобразованными связками. В приборах с преобразованными связками объективы проектирующих камер не идентичны аэрофотосъемочным ($f_n \neq f$) и на них можно обрабатывать аэроснимки, снятые АФА с различными фокусными расстояниями.

При восстановлении модели местности по преобразованным связкам плановые координаты на горизонтальных аэроснимках не изменяются, наблюдается только пропорциональное искажение высот точек модели. В результате этого вертикальный масштаб $1 : M_B$ модели отличен от горизонтального $1 : M_r$ и равен

$$1/M_B = K \cdot 1/M_r, \quad (IV.3.66)$$

где K — коэффициент преобразования связок, или аффинности, разный отношению f_n/f .

Для получения достоверных результатов при обработке аэроснимков с небольшими углами наклона на приборах с преобразованными связками необходимо:

а) вместо углов наклона аэроснимка α_X и ω наклонить проектирующие камеры прибора на новые углы, равные

$$\alpha'_X = K\alpha_X, \quad \omega' = K\omega; \quad (IV.3.67)$$

б) ввести децентрацию аэроснимков на величины

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= 0,5\alpha'_X f_n (1 - 1/K^2) = 0,5\alpha_X f (K^2 - 1); \\ \Delta y &= 0,5\omega' f_n (1 - 1/K^2) = 0,5\omega f (K^2 - 1); \end{aligned} \right\} \quad (IV.3.68)$$

в) при ориентировании и измерении модели иметь в виду, что согласно формуле (IV.3.66) ее вертикальный масштаб не равен горизонтальному.

Оригинальная особенность применяемых в СССР приборов с преобразованными связками (стереопроектор, стереограф) состоит в том, что в этих приборах результаты, измеренные в данной точке модели, трансформируются при помощи особых коррекционных устройств к горизонтальной съемке, т. е. в приборах осуществлена коррекция измеренных величин в текущей точке.

Стереопроектор СПР. Стереопроектор Г. В. Романовского — высокоточный универсальный прибор для крупномасштабных съемок, на котором могут обрабатываться плановые аэроснимки, полученные АФА с фокусным расстоянием от 55 до 210 мм. Схема прибора показана на рис. 114. Соотношение между масштабами фотографирования и плана может меняться в пределах 0,5—2.

В приборе осуществлена механическая засечка, которая выполняется при помощи точных проектирующих рычагов, вращающихся вокруг центров проектирования. Аэроснимки в кассетах всегда занимают горизонтальное положение и их измеряют при ортогональном расположении лучей зрения, что весьма удобно для наблюдений.

Пространственная засечка осуществляется по системе «треугольник плюс параллелограмм», основными точками которой являются $S, S', M' \text{ и } M$. Для установки фокусных расстояний проектирования f_n точки S и S' могут передвигаться относительно аэроснимков в пределах от 140 до 300 мм при помощи каретки фокусных расстояний K_f .

Наблюдательная система стереопроектора представляет собой бинокулярный микроскоп со сменными окулярами, дающими возможность получить увеличение 6 или 8 $\times$. В систему введены светящиеся марки, изображение которых совмещено с изображением аэроснимка.

Коррекционная система СПР основана на принципе совмещения по горизонтали неискаженных масштабов наклонного и горизонтального аэроснимков, снятых с одного центра проектирования. Обнаруженное при этом смещение идентичных точек наклонными возможно получить увеличение 6 или 8 $\times$. В систему введением соответствующих поправок по направлениям, проходящим через точку нулевых искажений.

Для планового аэроснимка величина этой поправки может быть вычислена по формуле (IV.3.20).

Автор прибора для поправки вывел зависимость

$$\delta_r = rr_0 \sin \gamma / f, \quad (\text{IV.3.69})$$

где r и r_0 — длина радиуса-вектора соответственно на наклонном и горизонтальном аэроснимках от точки нулевых искажений до наблюдаемой; γ — угол наклона радиуса-вектора.

При наблюдении текущей точки поправку вводят в результаты измерений путем соответствующего смещения объектива бинокулярного микроскопа.

Схема коррекционного механизма показана на рис. 115.

Если центры карданов O_1 и O_2 совмещены, то поправка в результаты измерений равна нулю. Это имеет место или при строго горизонтальном аэроснимке, или при визировании на точку нулевых искажений наклонного аэроснимка. В обоих случаях стержни L_1 и L_2 будут перпендикулярны к плоскости XU прибора, а коррекционная площадка E — параллельна ей. Разница будет только в том, что при горизонтальном аэроснимке центр полусферы пальца D будет совпадать с точкой вращения площадки E , а при наклонном снимке он будет находиться на некотором расстоянии Δl (по осям координат $\Delta l'_\alpha$ и $\Delta l'_\omega$), определяемом углами наклона аэроснимка α_x и ω . В последнем случае для правильной установки коррекционных стержней требуется введение децентрации аэроснимков с кассетами на величины

$$\Delta_x = f^2 \Delta l'_\alpha / l^2; \quad \Delta_y = f^2 \Delta l'_\omega / l^2$$

и децентрации стержней L_1 и L_2 на величины

$$\delta_x = f^2 \Delta l'_\alpha / 2l^2; \quad \delta_y = f^2 \Delta l'_\omega / 2l^2.$$

При наблюдении некоторой точки a наклонного аэроснимка каретка K_c передвигается, поворачивая на некоторый угол β стержень L_2 наклоняя на тот же угол площадку E . В результате палец D вместо с муфтой M поднимется на отрезок $\Delta = \Delta l \operatorname{tg} \beta = \Delta l r / l$. Муфта M увлекает за собой кардан O_1 , который, скользя по наклонившемуся на угол β_1 стержню L_1 , поднимается на ту же величину Δ .

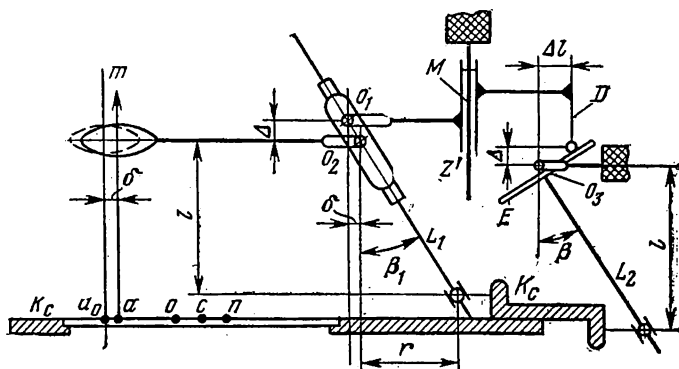


Рис. 115. Коррекционный механизм СПР

Одновременно стержень L_1 сместит кардан O_2 , а вместе с ним и объектив на величину δ . При этом

$$\delta = \Delta \operatorname{tg} \beta_1 = \Delta l r (r + \delta) / l^2, \quad (\text{IV.3.70})$$

где l — постоянная корректора.

При величине $\Delta l = l^2 \sin \gamma / f$ это соответствует формуле (IV.3.69). Ориентирование аэроснимков на стереопроекторе. На счетчике каретки b_x устанавливают базис проектирования

$$b_{\Pi} = M_a b / M_k, \quad (\text{IV.3.71})$$

где M_a , M_k — соответственно знаменатели масштабов аэроснимка и карты; b — базис аэроснимка.

Взаимное ориентирование снимков и установка децентраций на обоих приборах производится методом последовательных приближений. Как обычно, взаимное ориентирование состоит в устранении поперечных параллаксов на шести стандартных точках. При этом процесс может выполняться или при неподвижном базисе движения обеих камер (рис. 116, а), или при неподвижной камере одного аэроснимка — базисными движениями и изменением положения второй камеры (рис. 116, б).

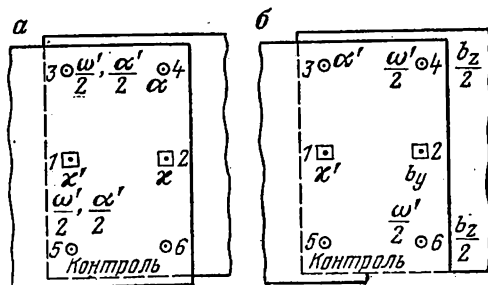


Рис. 116. Схема взаимного ориентирования:
а — движениями камер; б — базисными движениями

Закончив первый прием взаимного ориентирования, берут отсчеты по шкалам коррекционных систем и вычисляют децентрацию аэроснимков и коррекционных механизмов.

После введения децентраций выполняют второй прием взаимного ориентирования снимков до полного устранения поперечных параллаксов.

Внешнее ориентирование модели выполняется по опорным точкам, нанесенным на планшет в масштабе карты. Масштабирование модели состоит в сравнении отрезков, полученных на приборе, с отрезками на планшете и введении найденных поправок в базисные компоненты.

Горизонтирование модели на стереопроекторе выполняют по четырем опорным точкам в продольном и поперечном направлениях, используя при этом метод последовательных приближений. Предварительно определяют вертикальный масштаб преобразованной модели и фокусное расстояние проектирующих камер, а также подбирают соответствующие шкалы и шестерни для счетчика высот.

Несколькими приемами добиваются равенства геодезических и фотограмметрических высот на всех четырех опорных точках.

Для рисовки горизонтали устанавливают на счетчике высот соответствующую ей отметку и в дальнейшем ножной диск Z сохраняют неподвижным. Трассирование горизонтали (ведение марки по поверхности модели) производят только движениями ручных штурвалов X и Y . При вычерчивании контуров используют все три движения, т. е. штурвалы X и Y и диск Z .

Стереограф. Стереограф проф. Ф. В. Дробышева — портативный универсальный прибор с механической засечкой. В приборе применены особые коррекционные плоскости, непрерывно меняющие фокусное расстояние f_n проектирующих камер. Вследствие этого абсциссы и ординаты наблюдаемых точек приводятся к горизонтальной съемке и пространственная засечка осуществляется по исправленным результатам измерений.

Для строгого решения задачи трансформирования наклонных аэроснимков в стереографе должны выполняться следующие условия.

1. Центр вращения коррекционной плоскости должен быть совмещен с точкой нулевых искажений аэроснимка, отстоящей от вертикальной линии, которая проходит через новый центр проектирования, на величину, равную $f \operatorname{tg} \alpha/2$.

2. Коррекционная плоскость должна быть установлена на угол $\alpha_1 = K \cdot \alpha$, где $K = f_n/f$; f_n — фокусное расстояние проектирующей камеры.

3. Установленные в приборе аэроснимки должны быть наклонены на угол α , как в момент фотографирования, и смещены с отвесного направления на величины децентраций.

4. Аэроснимки должны наблюдаться отвесными визирными лучами.

Фокусное расстояние прибора 127—133 мм. На приборе могут обрабатываться плановые аэроснимки с $f_n = 55$ —210 мм. Соотношение масштаба аэроснимка и масштаба составляемой карты может быть от 0,5 до 3,0.

Основными узлами прибора являются снимкодержатели, базисное устройство, проектирующие рычаги, коррекционные механизмы, наблюдательная система, координатограф.

Схема прибора показана на рис. 117.

На прикрепленной к столу станине 1 находятся направляющие и каретки осей Y и X (2, 3). На каретке 3 лежат направляющая 4 и базисная каретка 5, а также направляющие 6 дифференциальных

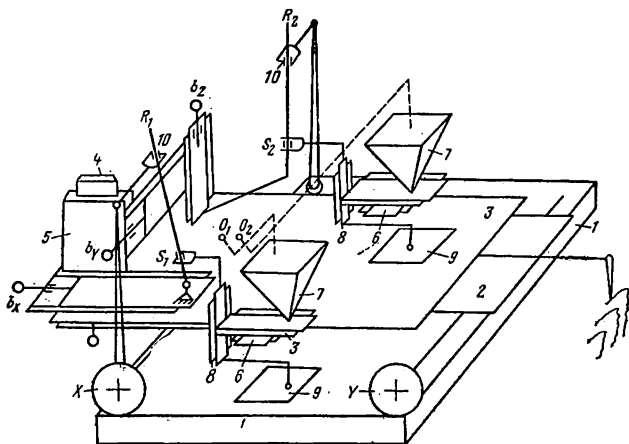


Рис. 117. Схема стереографа

кареток 7, с которыми соединены снимкодержатели и направляющие кареток 8 изменения фокусного расстояния. Эти каретки заканчиваются шаровыми опорами, которые касаются коррекционных плоскостей 9. Последние могут наклоняться на углы $K\alpha$ и $K\omega$. С каретками 8 связаны нижние карданы S_1 и S_2 , через которые (а также через верхние карданы 10) проходят рычаги R_1 и R_2 , определяющие направления проектирующих лучей. Точки S_1 и S_2 являются центрами проектирования.

При смещении кареток 2 и 3 вдоль осей Y и X шаровые опоры скользят по коррекционной плоскости 9, вызывая смещения кареток 8 вдоль вертикальных направляющих, т. е. изменение фокусного расстояния прибора. Вследствие этого нижние карданы S_1 и S_2 скользят вдоль проектирующих рычагов и смещают в горизонтальной плоскости дифференциальные каретки, несущие снимкодержатели.

На базисной каретке 5 имеются суппорты, которые позволяют устанавливать базис фотографирования путем смещения левой камеры на величину b_x и правой — b_y и b_z . На суппорте b_x расположены шаровые опоры рычагов R_1 и R_2 , определяющие положение точки модели.

Таким образом, при помощи коррекционных плоскостей происходит перемещение центров проектирования, что вызывает смещение аэроснимков, компенсирующее влияние углов наклона.

Каждый снимкодержатель имеет поворот κ в своей плоскости и движение для введения децентрации вдоль осей x и y .

Наблюдательная система представляет собою неподвижный бинокулярный микроскоп, обеспечивающий отвесное визирование на точки снимка. Увеличение системы 4 и 7^x .

Координатограф служит для получения графического изображения в масштабе составляемой карты. Переход от масштаба модели к масштабу карты происходит путем замены шестерен в редукторах.

Установив на приборе аэроснимки и определив масштаб модели и коэффициент преобразования связи, приступают к взаимному ориентированию снимков путем последовательного устранения поперечных параллаксов. При этом вводят децентрацию снимков по формулам

$$\Delta_x = f \operatorname{tg} \alpha = f l_{\alpha} / (90K);$$

$$\Delta_y = f \operatorname{tg} \omega = f l_{\omega} / (80K),$$

где l_{α} , l_{ω} — смещение толкателей коррекционной плоскости от начального положения; 90—80 — расстояния от центра вращения коррекционных плоскостей до толкателя в мм; K — коэффициент преобразования связи.

Внешнее ориентирование модели и съемка рельефа и ситуации принципиально не отличаются от этих процессов на СГР.

IV.3.7. Понятие о пространственной фототриангуляции

Способы пространственной фототриангуляции. В пространственной фототриангуляции по аэрофотоснимкам определяют плановое положение и высоты точек, по которым на стереоприборах производят ориентирование стереопар и составление топографических карт. Соединение отдельных моделей в общую систему фототриангуляции происходит через связующие точки, выбираемые в зонах перекрытия аэрофотоснимков. По включенным в сеть опорным пунктам (опознакам) выполняют внешнее ориентирование всей системы и затем определяют геодезические координаты включенных в сеть точек.

Различают маршрутную фототриангуляцию, развиваемую по аэрофотоснимкам одного маршрута, и блочную, создаваемую в пределах двух маршрутов и более и не требующей геодезической подготовки каждого маршрута. Фототриангуляция может быть построена аналоговым методом на универсальных стереоприборах и аналитическим методом с использованием высокоточных стереокомпараторов и электронных вычислительных машин.

Аналоговая фототриангуляция. Аналоговая фототриангуляция включает следующие процессы:

- 1) подготовительные работы;
- 2) внутреннее ориентирование снимков или установка снимков на приборе;
- 3) взаимное ориентирование снимков и построение отдельных моделей;
- 4) приведение моделей к единому масштабу, построение свободной фотограмметрической сети;
- 5) измерение координат точек моделей;
- 6) геодезическое (внешнее) ориентирование модели маршруты по опорным точкам;
- 7) уравнивание (увязка) сети;
- 8) получение геодезических координат точек сети.

Плановое положение точек сети строится графически на планшете; высоты точек берут со счетчика высот прибора. Соединение маршрутных сетей осуществляется по общим точкам поперечных перекрытий.

Для пространственного фототриангулирования на универсальных приборах предусмотрена возможность переключения хода лучей в наблюдательной системе: от левого фотоснимка в правый оку-

ляр и от правого — в левый (в стереопланиграфе) или перекладывания правого фотоснимка с кассетой на место левого и наоборот с сохранением элементов ориентирования (в СПР, СД), что позволяет при подориентировании рассматривать правый фотоснимок в предыдущей стереопаре, как левый в последующей.

При увязанной маршрутной фототриангуляции средние квадратические ошибки средней (слабой) точки могут быть подсчитаны по формулам, предложенным А. Н. Лобановым,

$$\left. \begin{aligned} m_{X_{n/2}} &= 0,27 M m_q \sqrt{n^3}; \\ m_{Y_{n/2}} &= 0,14 M m_q \sqrt{n^3}; \\ m_{h_{n/2}} &= 0,23 M f m_q \sqrt{n^3} / b, \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.3.72})$$

где M — знаменатель масштаба аэроснимков; m_q — средняя квадратическая ошибка определения поперечных параллаксов; f — фокусное расстояние камеры; b — базис на аэроснимке; n — число фотоснимков в маршруте.

Аналитическая фототриангуляция. В строгом способе аналитической блочной фототриангуляции, разработанном А. Н. Лобановым. Для повышения точности используются элементы внешнего ориентирования, зафиксированные в полете. Результаты измерений аэрофотоснимков, получаемые на стереокомпараторе, стремятся освободить от систематических ошибок. Построение и уравнивание сети производится одновременно при помощи электронных вычислительных машин, при этом учитываются веса всех измеренных элементов.

В этом способе предполагается, что значения элементов внешнего ориентирования фотоснимков и координат определяемых точек местности приближенно известны. Уравнивание блочной фототриангуляции сводится к составлению и решению по методу наименьших квадратов уравнений, содержащих в качестве неизвестных поправки к приближенным значениям элементов внешнего ориентирования фотоснимков и к результатам фотограмметрических, геодезических и бортовых измерений.

При фотограмметрических измерениях определяют координаты точек аэрофотоснимков. Как известно,

$$\left. \begin{aligned} x &= -f \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}; \\ y &= -f \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}, \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.3.73})$$

где x, y — координаты текущей точки фотоснимка (начало координат в главной точке); X, Y, Z — координаты соответственной точки местности; f — фокусное расстояние камеры; X_S, Y_S, Z_S — координаты центра проектирования S ; $a_1, a_2, \dots, c_3$ — направляющие косинусы, зависящие от угловых элементов ориентирования α, ω, κ .

Для приближенных значений неизвестных X, Y, Z можно написать

$$\left. \begin{aligned} a\delta X_S + b\delta Y_S + c\delta Z_S + a\delta\alpha + e\delta\omega + j\delta\kappa + \\ + g\delta X + h\delta Y + i\delta Z + (X_b - X) = v; \\ a'\delta X_S + b'\delta Y_S + c'\delta Z_S + a'\delta\alpha + e'\delta\omega + \\ + f'\delta\kappa + g'\delta X + h'\delta Y + i'\delta Z + (Y_b - Y) = v'; \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.3.74})$$

где $a, b, \dots, i$ — частные производные функции (IV.3.73) по соответствующим переменным; $\delta X_S, \delta Y_S, \dots, \delta Z_S$ — поправки к приближенным значениям неизвестных; x, y — измеренные координаты точки аэрофотоснимка; x_b, y_b — координаты точки аэрофотоснимка, вычисленные по формулам (IV.3.73) с использованием приближенных значений неизвестных.

В матричном виде система уравнений для всех фотограмметрических измерений будет

$$\bar{B}'\bar{\delta}' + \bar{l}' = \bar{v}'. \quad (\text{IV.3.75})$$

Для внешнего ориентирования блочной фототриангуляции используют координаты опорных пунктов, превышения и расстояния между точками местности.

Уравнения поправок для координат опорных пунктов (опознаков) имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \delta X + (X^0 - X'_1) = v_X; \quad \delta Y + (Y^0 - Y') = v_Y; \\ \delta Z + (Z^0 - Z') = v_Z, \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.3.76})$$

где X', Y', Z' — координаты опознаков, найденные из измерений; X^0, Y^0, Z^0 — приближенные координаты тех же пунктов; v_X, v_Y, v_Z — поправки к измеренным координатам; $\delta X, \delta Y, \delta Z$ — поправки к приближенным координатам.

В матричном виде для всех опорных пунктов имеем

$$\bar{\delta} + \bar{l} = \bar{v}. \quad (\text{IV.3.77})$$

Расстояние S_{ik} между точками i и k местности

$$S_{ik} = \sqrt{(X_k - X_i)^2 + (Y_k - Y_i)^2 + (Z_k - Z_i)^2}. \quad (\text{IV.3.78})$$

Обозначим S'_{ik} — измеренное расстояние, а S^0_{ik} — приближенное значение. Тогда $S'_{ik} + v_{S_{ik}} = S^0_{ik} + \delta S_{ik}$ и уравнение поправок для расстояний будет

$$\begin{aligned} a\delta X_i + b\delta Y_i + c\delta Z_i + a'\delta X_k + b'\delta Y_k + c'\delta Z_k + \\ + (S^0_{ik} - S'_{ik}) = v_{S_{ik}}, \end{aligned} \quad (\text{IV.3.79})$$

где δS_{ik} и $v_{S_{ik}}$ — поправки к S^0_{ik} и S'_{ik} ; $a, b, \dots, c'$ — частные производные функции (IV.3.78).

Система уравнений поправок для всех измеренных расстояний имеет вид

$$\bar{B}_S\bar{\delta} + \bar{l}_S = v_S. \quad (\text{IV.3.80})$$

Аналогично для измеренных превышений на местности

$$\bar{B}_h\bar{\delta} + \bar{l}_h = v_h. \quad (\text{IV.3.81})$$

Совместное уравнение поправок для геодезических измерений получим в виде

$$\bar{B}''\bar{\delta}'' + \bar{l}'' = \bar{v}'' \quad (\text{IV.3.82})$$

К бортовым измерениям относятся определение в поле элементов внешнего ориентирования фотоснимков (координат центра проектирования углов наклона и поворота аэрофотоснимка), превышения и длины базиса фотографирования, расстояний от центра проектирования до точек местности.

Уравнения поправок для элементов внешнего ориентирования имеют вид

$$\begin{aligned} \delta X_S + (X_S^0 - X'_S) &= v_{X_S}; \quad \delta Y_S + (Y_S^0 - Y'_S) = v_{Y_S}; \\ \delta Z_S + (Z_S^0 - Z'_S) &= v_{Z_S}; \quad \delta \alpha + (\alpha^0 - \alpha') = v_{\alpha}; \quad (\text{IV.3.83}) \\ \delta \omega + (\omega^0 - \omega') &= v_{\omega}; \quad \delta \kappa + (\kappa^0 - \kappa') = v_{\kappa}, \end{aligned}$$

где $X_S^0, Y_S^0, \dots, \kappa^0$ — приближенные значения элементов внешнего ориентирования; $X'_S, Y'_S, \dots, \kappa'$ — измеренные элементы внешнего ориентирования; $\delta X_S, \delta Y_S, \dots, \delta \kappa$ — поправки к приближенным значениям элементов внешнего ориентирования; $v_{X_S}, v_{Y_S}, \dots, v_{\kappa}$ — поправки к измеренным элементам внешнего ориентирования.

Для всех аэрофотоснимков блока уравнения поправок (IV.3.83) представляются в виде

$$\bar{\delta} + \bar{l} = \bar{v}. \quad (\text{IV.3.84})$$

Уравнения поправок для измеренных базисов фотографирования B и превышений ΔH центров проектирования, а также расстояний D от центра проектирования до точек местности будут

$$\bar{B}_B \bar{\delta} + \bar{l}_B = \bar{v}_B; \quad \bar{B}_{\Delta H} \bar{\delta} + \bar{l}_{\Delta H} = \bar{v}_{\Delta H}; \quad \bar{B}_D \bar{\delta} + \bar{l}_D = \bar{v}_D. \quad (\text{IV.3.85})$$

Все уравнения поправок этой группы измерений в обобщенном виде можно записать так:

$$\bar{B}''' \bar{\delta}''' + \bar{l}''' = \bar{v}'''. \quad (\text{IV.3.86})$$

Следовательно, аналитическая блочная фототриангуляция заключается в составлении и решении трех групп уравнений (IV.3.75), (IV.3.82) и (IV.3.85) соответственно для фотограмметрических, геодезических и бортовых измерений.

В общем виде уравнения поправок будут

$$\bar{B} \bar{\delta} + \bar{l} = \bar{v}. \quad (\text{IV.3.87})$$

Нормальные уравнения

$$\bar{B}^T \bar{P} \bar{B} \bar{\delta} + \bar{B}^T \bar{P} \bar{l} = 0, \quad (\text{IV.3.88})$$

где P — весовая матрица измеренных величин; B^T — транспонированная матрица от B .

Следует иметь в виду, что каждое изображение точки позволяет составить два уравнения поправок фотограмметрических измерений и каждая опорная точка — три уравнения поправок геодезических измерений.

Программа блочной фототриангуляции включает следующие основные части:

- 1) обработку результатов фотограмметрических измерений;
- 2) определение геодезических координат опорных пунктов (опознаков);
- 3) составление уравнений поправок для фотограмметрических, геодезических и бортовых измерений;
- 4) составление нормальных уравнений;
- 5) решение нормальных уравнений;
- 6) вычисление координат точек сети в геодезической системе.

Для больших блоков число уравнений исчисляется многими сотнями и тысячами и для их решения необходимая ЭВМ большой мощности. Поэтому иногда большие блоки делят на перекрывающиеся подблоки, каждый из которых решается отдельно. Затем их объединяют в одну систему по основным точкам (так называемым квазиснимкам).

IV.3.8. Наземная стереофотограмметрическая съемка

Принцип метода. В наземной стереофотограмметрической, или фототеодолитной, съемке определение пространственных координат объектов и составление топографического плана ведут по фотоснимкам (стереопарам), полученным специальным прибором — фототеодолитом с некоторого базиса. Базисы выбирают с таким расчетом, чтобы при фотографировании с них получить изображение участка местности без «мертвых пространств», где ближние предметы закрывают собой задний план.

Фотографирование с концов базиса производится при оптических осях камер, нормальных к базису и равномерно отклоненных влево и вправо на угол φ (30°). Следовательно, на каждой станции с одного базиса получают три стереоскопические пары снимков (рис. 118), снятые при строго горизонтальных и взаимно параллельных оптических осях. Пара $A-B$ принадлежит к нормальному случаю съемки, пара $AL-BL$ равномерно отклонена влево, пара $AR-BR$ — вправо.

Так как при фототеодолитной съемке снимок занимает вертикальное положение, то на нем изображаются оси ox и oz , вместо ox и oy при аэрофотосъемке.

Геодезические работы при этом виде съемки состоят в определении трех координат одного из концов базиса, передаче дирекционного угла на базис и измерении его длины и наклона. Дополнительно определяют плановые геодезические координаты трех контрольных точек на стереопару. Определив в камеральных условиях фотограмметрические координаты контрольных точек и сравнив их с геодезическими, можно судить о точности съемки и при необходимости ввести поправки в фотограмметрические данные.

В наземной стереофотограмметрической съемке элементы внешнего ориентирования фотоснимков известны с высокой точностью. Это в значительной степени упрощает и облегчает обработку снимков, так как отпадает такой трудоемкий процесс, как взаимное и геодезическое ориентирование модели.

Наземная стереосъемка с успехом принимается для создания крупномасштабных планов горных районов, различного рода изысканий и обследований (дорожных, гидротехнических, геологических, архитектурных), наблюдений за устойчивостью инженерных сооружений, траекторией движения тел и в других областях науки и тех-

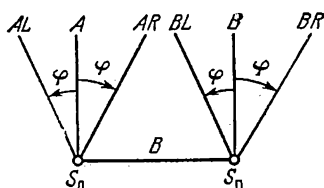


Рис. 118. Виды наземной фототеодолитной съемки

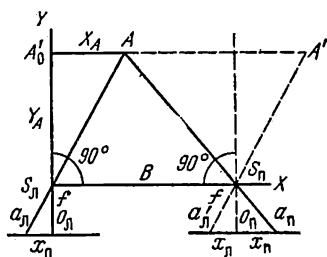


Рис. 119. Система координат наземной фототопографической съемки

ники. Этот метод применяют в комбинации с аэрофотосъемкой для плано-высотной привязки аэроснимков в горных районах.

Формулы наземной стереофотограмметрической съемки. Примем за начало координат местности точку S_L , за ось X — направление базиса B , за ось Y — направление оптической оси, за ось Z — перпендикуляр к плоскости XY в точке S_L (рис. 119). Тогда для этого нормального случая съемки между координатами местности X, Y, Z и координатами ее изображения x_L, z_L на левом снимке и x_P, z_P — на правом получаем следующие зависимости:

$$\left. \begin{aligned} \text{отстояние } Y &= Bf/p; \\ \text{абсцисса } X &= Yx_L/f = Bx_L/p; \\ \text{высота } Z &= Yz_L/f = Bz_L/p, \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.3.89})$$

где $p = x_L - x_P$ — продольный, или горизонтальный, параллакс точки; f — фокусное расстояние камеры фототеодолита.

Если базис B имеет наклон, то берут его горизонтальное проложение.

Для случая съемки с равномерно отклоненными оптическими осями от нормали к базису на угол φ эти формулы будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} Y &= \frac{Bf}{p} \left(\cos \varphi + \frac{x_P}{f} \sin \varphi \right); \\ X &= \frac{Bx_L}{p} \left(\cos \varphi + \frac{x_P}{f} \sin \varphi \right); \\ Z &= \frac{Bz_L}{p} \left(\cos \varphi + \frac{x_P}{f} \sin \varphi \right). \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.3.90})$$

При этом углу φ придают знак плюс, если оптические оси отклонены влево, и знак минус, если вправо.

В зависимости от точности измерения длины базиса m_B/B и ошибок в координатах точек снимка m_x, m_p, m_z могут быть найдены

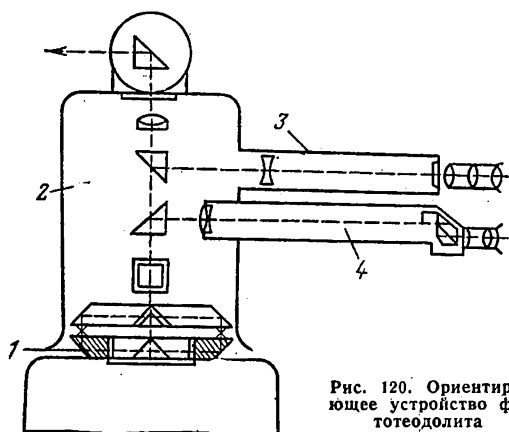


Рис. 120. Ориентирующее устройство фототеодолита

ошибки определения координат точек местности по формулам

$$\left. \begin{aligned} m_X^2 &= \left(\frac{x_{\text{л}} m_B}{fB} \right)^2 Y^2 + \left(\frac{x_{\text{л}} m_P}{Bf^2} \right)^2 \frac{Y^4}{\sin^2 \varphi} + \left(\frac{m_x}{f} \right)^2 Y^2; \\ m_Y^2 &= \left(\frac{m_B}{B} \right)^2 Y^2 + \left(\frac{m_P}{Bf} \right)^2 \frac{Y^4}{\sin^2 \varphi}; \\ m_Z^2 &= \left(\frac{z_{\text{л}} m_B}{fB} \right)^2 Y^2 + \left(\frac{z_{\text{л}} m_P}{f^2 B} \right)^2 \frac{Y^4}{\sin^2 \varphi} + \left(\frac{m_z}{f} \right)^2 Y^2. \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.3.91})$$

Фототеодолит Photoe 19—1318 (ГДР). Прибор предназначен для крупномасштабных съемок и приспособлен для работы в горных условиях. Объектив камеры ($f=19$ см, относительное отверстие 1:25) укреплен на суппорте и может перемещаться вверх на 30 мм и вниз на 40 мм относительно среднего положения. В плоскости прикладной рамки имеются две метки главной горизонтали, соответствующие среднему положению объектива. Для определения главной горизонтали при любом положении объектива с ним связан оптический указатель горизонта, который изображается в виде черного штриха.

Формат снимков 13×18 см. Горизонтальный угол зрения около 50° , вертикальный — 38° . На корпусе камеры расположены два цилиндрических уровня с ценой деления $20-30''$.

Для установки оптической оси камеры перпендикулярно или на заданный угол к линии базиса служит ориентирующее устройство, находящееся на корпусе камеры. Это устройство состоит из стеклянного лимба 1 (рис. 120), неподвижно скрепленного с корпусом и вращающегося вокруг вертикальной оси кожуха 2 со зрительной трубой 3 и трубой 4 отсчетного микроскопа. Поворотом всей камеры зрительную трубу 3 наводят на визирную марку, установленную на втором конце базиса. В поле зрения отсчетного микроскопа видны противоположные штрихи диаметром лимба. Если совместить штрихи 80 и 270° , то оптическая ось камеры будет пер-

пендикулярна к оси зрительной трубы, т. е. к линии базиса. Для отклонения оптической оси от нормали к базису на 30° необходимо совместить штрихи $120-300^\circ$ или $60-240^\circ$.

Для определения углов наклона базиса ориентирующее устройство имеет, кроме горизонтального лимба, еще и вертикальный лимб с точностью отсчета по лимбам $\pm 1'$.

В комплект фототеодолита входит оптический теодолит Theo-020 с точностью отсчета по горизонтальному и вертикальному кругам $6''$. Длина базиса определяется по инварной двухметровой рейке путем измерения теодолитом параллактического угла.

Полевые работы. При составлении проекта съемки стремятся иметь по возможности меньшее число базисов, но при этом местность должна сниматься с минимальным объемом «мертвых пространств». Базисы следует располагать параллельно общему направлению снимаемого участка с учетом возможности их геодезической привязки.

Величину базиса фотографирования подсчитывают по формуле

$$B = Y^2 m_p / (m_Y f), \quad (\text{IV.3.92})$$

где Y — максимальное отстояние при съемке; m_p — ошибка определения горизонтального параллакса; m_Y — ошибка определения отстояния; f — фокусное расстояние камеры.

Исходя из точности определения отстояния $1/2000$ и $m_p = 0,005$ мм, при $f = 200$ мм получим минимальную величину базиса $B = Y/20$, что соответствует углу засечки 3° . Максимальная величина базиса $B = Y/4$ и определяется возможностями стереоскопических наблюдений (угол засечки 16°). Между концами базиса должна быть взаимная видимость.

На каждую снимаемую пару намечают три контрольные точки, при этом одна точка должна быть расположена в ближнем плане, две другие — на дальнем плане. Контрольные точки могут располагаться в зоне перекрытий смежных пар и быть общими. В качестве контрольных точек используют выделяющиеся местные предметы или специально выставленные вехи, марки и т. п. Выгодно использовать здесь пункты триангуляции и закрепленные точки фототеодолитных станций.

Привязку станции к пунктам геодезической основы производят обратными или прямыми засечками, методом микротриангуляции или светодальномерной полигонометрии. Кроме координат одной из точек, определяют дирекционный угол базиса и превышение правой точки над левой. Контрольные точки засекаются с базиса или пунктов опорной сети.

Фотографирование местности на станции производят при нормальном и отклоненном влево и вправо положениях оптической оси камеры, ориентированной по базису, и с приведенными на нуль-пункт уровнями.

Камеральная обработка. При измерении на стереокомпараторе фотоснимков наземной стереофотограмметрической съемки осями прибора будут X и Z . Снимки ориентируют по меткам главной вертикали и определяют места нулей шкал x_0, z_0, p_0 . Затем приступают к измерениям координат точек. Штурвалами X и Y (Z) совмещают марку левого микроскопа с выбранной точкой снимка. Параллактическими винтами P и Q перемещают правый снимок и при стереоскопическом наблюдении совмещают пространственную марку с точкой модели. Снимают отсчеты x', z', p' .

Вычислив координаты точек снимка

$$x = x' - x_0; \quad z = z' - z_0; \quad p = p' - p_0,$$

по формулам (IV.3.89) или (IV.3.90) определяют фотограмметрические координаты точек местности, отнесенные к левой точке базиса. По известным геодезическим координатам этой точки и дирекционному углу базиса перевычисляют фотограмметрические координаты в геодезические.

Для составления плана местности по фототеодолитным снимкам применяют универсальные приборы: стереопланиграф, автограф, стереометрограф или особые приборы: стереоавтограф, технокарт, в которых пространственная фотограмметрическая засечка решается при помощи плоских механизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лобанов А. Н. Фотограмметрия. М., Недра, 1984.
2. Кислов В. В. Фотограмметрия. М., Недра, 1979.
3. Лобанов А. Н. Фототопография. М., Недра, 1983.
4. Лобанов А. Н. Аэрофототопография. М., Недра, 1978.

IV.4. КОСМИЧЕСКАЯ ФОТОСЪЕМКА

Н. П. Лаврова

IV.4.1. Задачи космической съемки

Развитие науки и техники позволило создать серию космических летательных аппаратов (КЛА), которые доставляют на Землю ценные материалы для исследований и практического применения в разных отраслях народного хозяйства. Программа космических исследований, осуществляемая с пилотируемых кораблей, орбитальных и межпланетных станций, позволяет изучать планету, окружающий мир, природные ресурсы.

Космическая съемка (КС) — процесс получения с космического летательного аппарата статического изображения местности на светочувствительном материале с помощью оптических приборов в заданных временных и пространственных параметрах. По спектральному диапазону КС подразделяют на ахроматическую (черно-белую) и цветную (с натуральной и условной цветопередачей объектов местности).

Космической телевизионной съемкой называется процесс получения изображений поверхности Земли, Луны, планет Солнечной системы с летательных аппаратов с помощью оптических, электронных и радиотехнических средств. Методы космической телевизионной съемки можно подразделить по спектральному диапазону, по назначению материалов съемки, количеству информационных каналов, по приемнику световой энергии, способу передачи информации и т. д.

При полете КЛА по околоземным орбитам получают материалы, позволяющие изучать наиболее общие закономерности окружающего его мира, решать вопросы охраны окружающей среды от загрязнения, изучать и правильно использовать природные ресурсы, исследовать труднодоступные и удаленные районы, изучать Мировой океан и многие другие вопросы.

Особенно широко применяют за последние годы материалы космических съемок для изучения природных ресурсов Земли. Высокая оперативность и эффективность метода космической съемки опреде-

лила области применения, куда можно отнести исследование планет Солнечной системы, создание картографических материалов на основе высокоточных геодезических и фотограмметрических измерений, изучение и рациональное использование природных ресурсов Земли, исследование Мирового океана, охрану окружающей среды.

По космическим снимкам можно проследить геологические структуры на больших площадях и выявить крупнорегиональные и планетарные связи между различными объектами и явлениями.

Космические методы в океанологии позволяют изучать распространение и типы морских льдов, характеристики ледовой обстановки. Снимки из космоса можно также применять для изучения рельефа морского дна.

Гидролого-гляциологические исследования по космическим снимкам позволяют определить мощность горных водосборов, границы снежных покровов, запасы воды в снежном покрове.

По космическим снимкам можно определить загрязнение морей, океанов, составить гидрологические карты с границами затопляемых пойм, характеристиками стока.

При изучении почвенных покровов также можно применить космические снимки. По ним выполняют почвенное картографирование, изучают распространение засоленных и переувлажненных почв.

Космические снимки позволяют изучать растительный покров, продуктивность биомассы, оценивать качество посевов, намечать комплекс лесотаксационных работ, определять породу и возраст леса, выявлять поражения растений, определять территориальную структуру ландшафта.

Значительный эффект достигнут при использовании космических снимков для решения сельскохозяйственных задач. По снимкам возможно определить состояние почв и культур, наметить более правильное направление землепользования, план агротехнических мероприятий, составить карты сельскохозяйственных угодий и культур, определить производственную направленность хозяйств.

Все космические летательные аппараты можно подразделить на искусственные спутники Земли без экипажа, космические пилотируемые корабли с экипажем и межпланетные автоматические станции и спутники. По назначению выделяют научно-исследовательские аппараты для изучения верхних слоев атмосферы, физических явлений в околоземном и межпланетном пространстве, природных ресурсов Земли и других планет, аппараты прикладного назначения.

Космические летательные аппараты, предназначенные для полетов по геоцентрической орбите, получили название искусственных спутников Земли (ИСЗ). Для осуществления обширной программы космических исследований, решения ряда прикладных и научных задач созданы разные типы искусственных спутников Земли: исследовательские, геодезические, связные, метеорологические, навигационные и т. д.

Следует также выделить искусственные спутники Земли, управляемые космонавтами; они получили название космических летательных аппаратов (КЛА), космических пилотируемых кораблей или орбитальных пилотируемых станций (ОПС). Для движения космического летательного аппарата по геоцентрической орбите ему должна быть сообщена скорость, равная или немного больше первой космической скорости. Период обращения определяется высотой полета и может составлять от полутора часов до нескольких суток.

Запуск космических летательных аппаратов производится с космодрома с помощью многоступенчатой ракеты-носителя. Определе-

ние координат КЛА и уточнение параметров орбиты производится вдоль трассы его полета измерительными пунктами. Для выполнения космической съемки в заданной точке орбиты производится ориентация КЛА с помощью систем ориентации и системы управления.

На борту ОПС устанавливается комплекс фотографической аппаратуры, работающей в разных диапазонах спектра, телескопические системы, приборы для спектрографирования земной поверхности и др. Телевизионную и инфракрасную съемки производят как с пилотируемых, так и с беспилотных космических аппаратов.

В современной метеорологии и широкое применение нашли наблюдения, получаемые с искусственных спутников Земли. Спутники серии «Метеор» используют малокадровые телевизионные камеры для съемки облачности земной поверхности, ледяного и снежного покровов; инфракрасную радиометрическую аппаратуру для съемки облаков и подстилающей поверхности как на освещенной, так и неосвещенной сторонах Земли; актинометрическую систему для регистрации отраженной солнечной радиации; спектрометрическую аппаратуру для определения вертикального профиля температуры в атмосфере.

Методы космической съемки нашли применение при изучении планет Солнечной системы и позволили получить серию уникальных материалов для определения фигуры и размеров планет, составления тематических карт, изучения других параметров.

Автоматические межпланетные станции представляют собой летательные аппараты, оснащенные сложной радиотехнической и научной аппаратурой, системой ориентации и управления, программно-временными устройствами, системой регулирования теплового режима, источниками питания, они предназначены для проведения фотографической панорамной съемки поверхности планеты, исследования характеристик атмосферы, ее теплового режима, характера динамики атмосферы. Для изучения планетарных перемещений облачных структур проводится съемка в ультрафиолетовых лучах с искусственных спутников. Регистрация потоков радиации из верхней и нижней полусфер в разных зонах спектра обеспечивает изучение отражательных свойств поверхности Венеры и определение энергетического баланса на разных уровнях в атмосфере. Определение прозрачности атмосферы проводится по измерениям поглощения радиации в отдельных полосах углекислого газа, водяного пара и в ближней инфракрасной области спектра.

Космическая съемка планеты Марс осуществлена с автоматических межпланетных станций, которые созданы для исследования космического пространства и планет Солнечной системы.

В состав космической съемочной аппаратуры, установленной в межпланетной станции, входят телевизионная камера для фотографирования планеты Марс, спектрорефлексомер, спектрограф. На борту также установлены приборы для обнаружения магнитного поля Марса и измерения магнитных полей в космическом пространстве, газоразрядные и сцинтилляционные счетчики для изучения радиационных полюсов Марса, радиотелескоп для изучения радиоизлучения в космосе, регистрации потоков протонов и электронов, регистрации микрометеоритов.

Особенно ценные и высококачественные материалы космической фотосъемки Луны получены при полетах автоматических станций типа «Зонд». Съемка произведена на черно-белую и цветную пленку, и впервые получены изображения планеты Земля и обратной стороны Луны, диска Луны. Эти материалы послужили основой соз-

дания тематических карт видимой и невидимой стороны Луны, каталога координат лунных объектов, яркостных карт Земли.

IV.4.2. Подспутниковые эксперименты

При проведении космических съемок в целях исследования природных ресурсов Земли одновременно с полетом КЛА выполняют фотосъемку с самолетов над полигонами. Эти работы получили название подспутниковых экспериментов. Для проведения летных экспериментов применяют самолеты, оснащенные аппаратурой для проведения исследований в широком диапазоне электромагнитных волн. Обычно исследования производят над небольшими регионами в разных ландшафтах земной поверхности и над акваториями Мирового океана.

Одним из наиболее важных и трудноучитываемых факторов, влияющих на достоверность определения физических свойств земных объектов по материалам космической съемки, является атмосфера. Известно, что пропускание электромагнитных волн атмосферой носит селективный характер. Коэффициент пропускания изменяется в значительных пределах и зависит от сезона в момент проведения исследования, метеорологических факторов, загрязнения атмосферы, содержания влаги и т. д. Приземные слои атмосферы (10—15 км) в основном определяют изменение функции передачи модуляции и степень искажения результатов фотографической съемки земных объектов. По данным проведенных измерений с самолетов и сопоставления их с синхронными наземными измерениями определяют влияние атмосферы на качество аэросъемочных материалов и переносят эти закономерности с некоторой степенью приближенности на результаты космических съемок.

Исследования с самолетов позволяют также произвести испытание технических средств, предназначенных для космической съемки, и определить оптимальный вариант аппаратного обеспечения. По материалам аэросъемки определяют спектральные коэффициенты яркости объектов земной поверхности, их статистическое распределение и свойства. Тестовые съемки проводят для специалистов разных областей народного хозяйства, геологов, картографов, океанологов, специалистов лесного и сельского хозяйства. Проведение совместных исследований с самолетов и КЛА позволяет классифицировать земные объекты, разработать методику идентификации.

К аэросъемочному самолету предъявляют специальные требования: хороший обзор местности для экипажа; продольная и поперечная устойчивость самолета; хорошая маневренность; обеспеченность современным пилотажно-навигационным оборудованием; высокая эффективность полета и т. д. Для выполнения экспериментов по исследованию природных ресурсов Земли наиболее часто применяют аэросъемочный самолет Ан-30. Помимо штатного съемочного оборудования на самолете устанавливают все виды научной аппаратуры, необходимой для получения информации об объектах земной поверхности и условиях проведения экспериментов. Самолет Ан-30 предназначен для выполнения аэросъемочных работ в средних и мелких масштабах для картографических целей и исследования природных ресурсов Земли.

IV.4.3. Геометрические параметры космической фотосъемки

Космическая фотосъемка земной поверхности, планет Солнечной системы с использованием оптико-электронных средств и фотоматериалов производится в разных масштабах и при разных положи-

ях оптической оси фотокамеры. Масштаб плановой космической съемки определяется высотой полета H КЛА и величиной фокусного расстояния космической съемочной камеры

$$1/m = f'/H. \quad (\text{IV.4.1})$$

Положение оптической оси определяет метод фотографирования. Плановое фотографирование выполняют при положении оптической оси, направленной на центр Земли.

Космическая съемка, при которой оптическая ось фотосъемочной камеры составляет с вертикалью некоторый угол $\gamma > 10^\circ$, называется перспективной. При перспективной космической съемке заданный угол γ создается или отклонением оптической оси от вертикали, или установкой космической камеры под заданным углом к плоскости иллюминатора. Масштаб изображения при перспективной космической съемке — величина переменная, для каждой точки определяемая зависимостью

$$1/m_i = dl/dL, \quad (\text{IV.4.2})$$

где dl — изображение отрезка на снимке; dL — длина отрезка на местности.

С орбиты КЛА выполняют одномаршрутное или многомаршрутное фотографирование. Перекрытием называют части двух соседних космических снимков с изображением одного и того же участка местности, продольное перекрытие космических снимков P_x — в направлении полета КЛА, поперечное P_y — в направлении, перпендикулярном к направлению полета КЛА. Промежутки времени между моментами начала выдержек двух последовательных кадров при маршрутной космической съемке, необходимый для получения заданной величины продольного перекрытия, называется интервалом фотографирования τ . Отношение величины перекрытия к линейному размеру космического снимка в том же направлении определяется коэффициентом перекрытия K_x и K_y .

Высоту съемки, площадь снимаемой поверхности, продольное и поперечное перекрытия определяют с учетом фотограмметрических требований к материалам космической съемки. Аналитические представления этих параметров значительно усложняются по сравнению с методом аэросъемки. Общая формула для определения продольного и поперечного перекрытия снимков для случая космической съемки с круговой орбитой имеет следующий вид:

$$P\% = \left(\frac{2\theta - \varepsilon_i}{2\theta} 100\% \right) = \left\{ 1 - \frac{\varepsilon_i}{2 \left[\arcsin \left(\frac{H+R}{R} \cdot \sin \omega \right) - \omega \right]} \right\}. \quad (\text{IV.4.3})$$

где 2ω — угол поля зрения камеры; ε_i — планетоцентрический угол между двумя центрами проектирования; R — радиус Земли, 2θ — угол планетоцентрический.

Определение продольного перекрытия снимков требует учета вращения Земли

$$P_x = \left\{ 1 - \frac{\varepsilon_x}{2 \left[\arcsin \left(\frac{H+R}{R} \cdot \sin \omega \right) - \omega \right]} \right\} \cdot 100\%. \quad (\text{IV.4.4})$$

Формулы ((IV.4.3) и (IV.4.4) справедливы при рассмотрении гипотетического полета относительно невращающейся Земли, В действи-

тельности, вследствие вращения Земли необходимо рассматривать движение КЛА не в абсолютной неподвижной системе координат, а относительно поверхности Земли, так как именно этой скоростью определяется величина интервала фотографирования при заданном продольном перекрытии космических снимков,

$$V^K = 2\pi \frac{R+H}{T_{KA}},$$

где V^K — модуль вектора скорости; T_{KA} — период обращения КЛА.

КЛА на новой высоте пройдет по новому маршруту, отстоящему по долготе от предыдущего маршрута на величину λ_τ . В связи с этим поперечное перекрытие между маршрутами космической съемки обусловлено, главным образом, вращением Земли.

$$\lambda_\tau = 2\pi\omega_3 \sqrt{(R+H)^3/\mu},$$

где ω_3 — угловая скорость вращения Земли; μ — гравитационный параметр Земли.

IV.4.4. Фотосъемочная аппаратура

Классификация космических съемочных камер (КСК) определяется их назначением, методом проведения съемки, геометрическими параметрами. Качественные показатели КСК определяют измерительные и дешифровочные свойства космического негатива; конструктивные и эксплуатационные данные КСК определяют ее массу, габариты, энергопотребление, возможности размещения на борту КЛА.

Космические камеры по назначению материалов съемки можно подразделить на четыре основные группы: топографические, дешифровочные, звездные и многозональные космические съемочные камеры. К каждому из четырех видов КСК предъявляются специальные требования, характерные только для данного вида, и общие, характерные для всех типов камер. К специальным требованиям относят точность передачи геометрии объектов съемки и качество передачи контраста объекта.

Топографические космические съемочные камеры (ТКСК) предназначены для получения плановых фотоснимков, пригодных для создания топографических карт земной и лунной поверхности стереофотограмметрическим методом. Измерительные свойства космических негативов должны позволять определять координаты точек со средней квадратической ошибкой не более ± 10 мкм в масштабе изображения. Ошибки от невыравнивания пленки в плоскость должны быть не более 0,01 мм. При этом в камере должно быть обеспечено впечатывание по краю негатива или по полю оптических меток для определения величины деформации, положения центра негатива и направления съемки. Фотозатвор ТКСК не должен вносить геометрических искажений при построении изображения объекта.

Дешифровочные космические съемочные камеры (ДКСК) предназначены для получения снимков, пригодных для составления тематических карт, фотопланов и фотосхем, и проведения комплексов работ по распознаванию объектов съемки. Как правило, дешифровочные камеры имеют фокусное расстояние более 300 мм и большие размеры кадра. В дешифровочных камерах несколько снижены требования к величине дисторсии и точности выравнивания пленки в

плоскость. ДКСК позволяют получать плановые и перспективные снимки.

Звездные космические съёмочные камеры (ЗКСК) обеспечивают получение снимков с изображением звездного неба, по которым определяют координаты КЛА в заданной системе координат и точную ориентацию носителя в период работы фотографической камеры. Негативы, полученные при съёмке звездной камерой, должны обеспечивать возможность измерения координат звезд со средней квадратической ошибкой 5 мкм. Размеры кадра, фокусное расстояние ЗКСК выбирают исходя из условия получения необходимого количества изображения звезд на одном кадре, обеспечивающего точность решения задач.

Многозональные космические съёмочные камеры (МКСК) предназначены для одновременной съёмки объектов земной поверхности в разных зонах спектра. Космическая съёмка может быть выполнена камерой с несколькими объективами на одну и ту же пленку, с применением узких зональных фильтров или несколькими камерами на разные типы черно-белых пленок с применением узких зональных фильтров для каждой пленки. В наземных условиях производят синтезирование трех или четырех частичных изображений и получают с помощью специальных проекторов совмещенное изображение, которое в зависимости от типа позитивного материала может быть черно-белым или цветным.

Для космических съёмок применяют камеры с большим диапазоном по фокусному расстоянию ($f' = 50 \div 3000$ мм). Все проектируемые камеры должны иметь высокую информационную способность. При съёмках с больших высот критерий разрешающей способности является, наряду с геометрическим, основным при создании и выборе ТКСК и доминирующим при использовании ДКСК.

Метод космической съёмки определяет комплекс технических средств, размещенных на космическом летательном аппарате и предназначенных для получения фотографических изображений земной поверхности, планет Солнечной системы, поверхности Луны. Сочетание оптической системы, создающей изображение, с определенным фотографическим материалом, регистрирующим изображение, обеспечивает получение снимков для решения различных задач картографирования, дешифрирования, исследования природных ресурсов, изучения акватории Мирового океана.

Космическая съёмочная система состоит из космической съёмочной камеры, блока автоматического формирования команд управления КСК, электронной системы регистрации вспомогательной информации, установки для крепления КСК к носителю съёмочной аппаратуры. В комплект съёмочной системы может входить устройство для фотохимической обработки фотоматериала на борту носителя. Процесс космической съёмки осуществляется с помощью нескольких систем, обеспечивающих получение высококачественных изображений объектов, удаленных от Земли или других планет на сотни и тысячи километров; измерение геометрических параметров фотографирования; управление съёмочной системой; регистрацию временных и других параметров.

Таким образом, космические съёмочные камеры являются составной частью сложной технической бортовой системы, обеспечивающей ориентацию и стабилизацию КЛА, управление съёмочным процессом, определение геометрических параметров съёмки.

Космическая съёмочная камера предназначена для получения изображения объектов съёмки на поверхности светочувствительного материала, объективной части камеры, в которой устанавливается

один или несколько объективов, камерной части, предназначенной для функционального соединения кассетной и объективной частей, и кассетной части, в которой размещаются устройства и механизмы для транспортирования и выравнивания аэрофотопленок.

Кассета предназначена для размещения и предохранения от засветки светочувствительного материала, его перемотки на величину кадра и выравнивания пленки в плоскость в момент фотографирования.

Объектив КСК — корригированная оптическая система, состоящая из нескольких линз и оправ. Объектив предназначен для построения оптического изображения объектов поверхности в фокальной плоскости и определяется следующими основными характеристиками: фокусное расстояние объектива f' ; угловое поле оптической системы 2ω ; относительное отверстие $2a/f'$; и геометрическая светосила объектива $(2a/f')^2$; светораспределение по полю изображения E_i ; коэффициент светопропускания K_a .

Качество объектива определяется разрешающей способностью R , коэффициентом добротности, ортоскопичностью и коэффициентом передачи модуляции T .

Объективы КСК состоят из нескольких оптических компонентов — положительных, отрицательных и асферических линз.

Одной из важных характеристик КСК является угловое поле оптической системы. Угловое поле определяется входным и выходным люками системы и диафрагмами. Реальные оптические системы дают удовлетворительное изображение только при известном ограничении ширины действующих пучков лучей. Так как при съемке трехмерные объекты изображаются на плоскости, необходимо ограничить ширину пучков, строящих изображения, так как чем уже пучки, тем отчетливее изображение пространственных предметов на плоскости. Для ограничения пучка лучей применяют ограничивающие диафрагмы, положение и величина которых определяют четкость изображения и светосилу объектива.

По углу поля зрения объективы съёмочных камер делят на узкоугольные, с нормальным полем зрения, широкоугольные.

Все реальные фотографические объективы имеют значительные аберрации и светорассеяние, которые сильно понижают разрешающую способность объектива. Для определения фотографической разрешающей способности объектива применяют те слои, с которыми объектив должен работать на практике. Фотографическая разрешающая способность объектива зависит не только от фотослоя, но и от контраста K и формы миры:

$$K = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}, \quad (IV.4.5)$$

где $E_{\max}$, $E_{\min}$ — освещенность в серединах темной и светлой полос миры.

Зная разрешающую способность фотослоя $1/R_{\text{сл}}$ и объектива $1/R_{\text{об}}$ (визуальную), можно подсчитать ожидаемую $1/R$ фотографическую разрешающую способность фотографической системы по приближенной формуле:

$$\frac{1}{R_{\text{фс}}} \approx \frac{1}{R_{\text{сл}}} + \frac{1}{R_{\text{об}}}. \quad (IV.4.6)$$

Фотографическая разрешающая способность объектива определяется при помощи коллиматора, в фокусе объектива которого помещается штриховая мира. При исследовании оптической системы

часто применяют радиальную штриховую миру. Разрешающая способность R , определенная в этой мири, будет получена по формуле

$$R = 2n/\pi d_n; \quad R = N/\pi d, \quad (IV.4.7)$$

где n — число белых или черных штрихов миры ($2n=N$ — число пар штрихов); d_n — диаметр нерезкости кружка изображения миры, где штрихи слились.

Фотозатворы относятся к наиболее сложным и ответственным узлам космической фотосъемочной системы. Фотозатвором КСК называют устройство, при помощи которого световые лучи от объекта съемки пропускаются на светочувствительный слой. Время, в течение которого осуществляется экспонирование светочувствительного материала, т. е. время открытия затвора, называется выдержкой. В остальное время затвор должен быть закрыт и полностью исключать возможность засветки светочувствительного материала. К фотозатворам предъявляют требования, определяемые задачами космической съемки, диапазонами яркостных характеристик, качественными показателями, надежностью системы и т. д. Учитывая, что во время одного витка производится космическая съемка при разных уровнях освещенности объектов и с большим изменением коэффициента яркости (например водные поверхности и заснеженные горы), необходимо, чтобы фотозатвор имел большой интервал выдержек, т. е. обеспечивал возможность проведения съемки с большими и малыми выдержками. Фотозатвор не должен вносить геометрических искажений при построении изображения объекта, т. е. должен сохранять ортоскопичность изображения. Это требование особенно тщательно надо учитывать при создании фотозатворов для топографических космических съемочных камер, материалы съемки которых применяют для высокоточных измерений. К затвору предъявляют также требование, чтобы коэффициент полезного действия был высоким, т. е. потери световой энергии при прохождении через экспонирующее устройство должны быть минимальными. Экспонирование светочувствительного материала должно осуществляться одновременно по всему кадру и равномерно.

Фотозатворы должны быть надежными в работе, просты в эксплуатации и обеспечивать возможность автоматического регулирования экспозиции. Классификация фотозатворов производится по принципу действия, по конструктивным признакам, по характеру движения механизма экспонирования (шторки, лепестки, заслонки и т. д.), по месту расположения фотозатвора в общей съемочной системе.

По принципу дозирования света на эмульсионный слой фотозатворы делают следующим образом: в центральных затворах экспонирование происходит от центра к краям кадра, в щелевых фотозатворах экспонирование производится при перемещении щели перед светочувствительным материалом, а в жалюзийных затворах экспонирование осуществляется открытием створок жалюзи.

По конструктивным признакам фотозатворы подразделяют на дисковые, шторные, жалюзи, обтюраторы, световые, электронно-оптические и т. д.

Основные характеристики затвора определяют его эксплуатационные возможности. Одной из важных характеристик фотозатвора является оптический коэффициент полезного действия (ОКПД). Он определяется отношением количества световой энергии, прошедшей за время выдержки через фотозатвор, ко всему количеству света, упавшему на него за то же время.

Экспозицией называется количество освещения, подействовавшее

го на данную точку светочувствительного материала. Величина экспозиции H определяется произведением освещенности изображения E на время экспонирования t :

$$H = E \cdot t. \quad (\text{IV.4.8})$$

Выдержкой называется точно определенный промежуток времени, в течение которого фотозатвор пропускает лучи от объекта съемки на светочувствительный слой.

Временем экспонирования кадра называется точно определенный промежуток времени, в течение которого поочередно экспонируются все точки кадра. Время экспонирования кадра больше времени выдержки (например у шторных затворов).

Эффективной выдержкой t_0 называется произведение оптического коэффициента полезного действия на выдержку:

$$t_0 = \eta \cdot t. \quad (\text{IV.4.9})$$

Кассета КСК служит для размещения светочувствительного материала — пленки, ее транспорта после очередной экспозиции на величину кадра или непрерывного транспорта в щелевых камерах. В кассете имеется механизм, предназначенный для выравнивания пленки в плоскость перед ее экспонированием. Двигателем, приводящим механизмы кассеты в движение, служит электродвигатель постоянного тока, получающий энергию в 28 В и расположенный на корпусе камеры, внутри кассеты или вне ее. Кассеты различаются по конструктивным признакам, транспортирующим устройствам, способам выравнивания пленки в плоскость. Конструктивные параметры кассеты определяют скорость перемотки пленки, ее выравнивание, что влияет на величину цикла работы всей съемочной камеры. Запас пленки, размещаемой в кассете, также определяется устройством транспортирующего механизма, мощностью электродвигателя, параметрами съемочного процесса. В КСК применяют, в основном, механический метод выравнивания пленки.

Многозональную космическую съемку выполняют в КЛА в целях получения черно-белых снимков в узких зонах спектра для дешифрования объектов местности.

Многозональную космическую съемку можно подразделить по диапазону спектральных каналов, количеству информационных каналов. Наиболее часто используют 6 каналов для съемки в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах.

Выделение определенной зоны спектра производят с помощью светофильтров, которые устанавливают на объективах съемочных камер. Приемником потока лучистой энергии служат пленки, имеющие спектральную чувствительность в заданной области спектра. Съемка производится камерами с $f' \approx 100\text{—}150$ мм на черно-белые пленки с одной для всех кадров выдержкой. Для устранения сдвига изображения применяют компенсацию сдвига изображения.

Многозональная камера состоит из нескольких съемочных камер, кассет, блока управления.

Космическая фотосъемка объектов производится одновременно в нескольких узких зонах спектра фотосъемочными камерами. Изменение спектрального состава света производится с помощью светофильтров. Построение изображения осуществляется на приемнике лучистой энергии — фотопленке, которая должна быть оптимальна по своим спектральным характеристикам для данной зоны. Фотопленки — черно-белые, имеющие разные сенситометрические характеристики, в связи с чем выдержки для разных каналов с учетом кратности светофильтра для данной пленки будут различны. Управ-

ление комплектом фотосъемочных камер осуществляется с помощью блока формирования команд (БФК).

Включение космических съемочных камер может производиться оператором или автоматически по команде с Земли. Выполнение космической фотосъемки КЛА производится в автоматическом режиме, для чего в комплект фотосъемочной аппаратуры входит система управления.

Система управления КСК, установленная на борту КЛА, в общем случае должна решать следующие задачи:

- создание временного масштаба в системе единого времени;
- изменение интервала фотографирования в зависимости от положения на орбите;
- регистрация моментов съемки с точностью не ниже 10^{-1} с;
- измерение и регистрация времени асинхронности срабатывания затворов фотокамер при использовании многокамерных систем;
- выполнение действий фотосъемочной аппаратуры в заданной последовательности;
- управление многокамерными системами;
- корректирование программ, заложенных с Земли.

Основными особенностями, определяющими требования к системе управления фотосъемочной аппаратурой, являются: различные методы навигации; большая протяженность маршрутов; переменная скорость относительно планеты; большая скорость движения КЛА; значительные высоты съемки; различные варианты ориентации оптических осей фотосъемочных камер.

Перед выполнением космической съемки все камеры калибруются по геометрическим и светотехническим параметрам.

Под калибровкой космических съемочных систем понимают определение элементов внутреннего ориентирования и определение поправок в координаты точек космических снимков, характеризующих отличие проекции реального снимка от идеальной центральной проекции. В результате калибровки определяют такие величины, как элементы внутреннего ориентирования фотографической камеры, величины дисторсии ее объектива, а иногда и величины деформации фотоматериала, влияние атмосферной рефракции и др.

Существует несколько способов калибровки фотографических камер. Они разделяются на визуальные и фотографические. Фотографические способы можно, в свою очередь, подразделить на лабораторные и полевые.

Большинство способов предполагает измерение только радиальной составляющей дисторсии, и лишь некоторые из них позволяют определять тангенциальную составляющую, да и то с недостаточной точностью.

Сущность визуального способа состоит в измерении в пространстве предметов углов, соответствующих калиброванным радиальным отрезкам выравнивающего стекла, являющегося прикладной рамкой фотосъемочной камеры.

По известным отрезкам r_i и соответствующим измеренным углам α_i вычисляются элементы внутреннего ориентирования f' , x_0 , y_0 , а также величины дисторсии δ :

$$f' = \Sigma r_i / \Sigma \operatorname{tg} \alpha_i; \quad \delta_i = r_i - f' \operatorname{tg} \alpha_i; \quad x_0 = \frac{\Sigma \delta_2 - \Sigma \delta_1}{2 \Sigma \operatorname{tg}^2 \alpha_i};$$

$$y_0 = \frac{\Sigma \delta_2 - \Sigma \delta_1}{2 \Sigma \operatorname{tg}^2 \alpha y_i}. \quad (\text{IV. 4. 10})$$

Для измерения центральных углов в пространстве предметов в визуальном способе используется оптическая скамья, неотъемлемой частью которой является наличие угломерного устройства, позволяющего с высокой точностью выполнять измерения. Обычно точность измерения углов составляет 1—2", а точность определения параметров находится в пределах 5 мкм.

Однако визуальные способы имеют существенный недостаток — этот способ не соответствует процессу получения снимка в реальных условиях. В связи со стремлением производить измерения в условиях, приближающихся к условиям эксплуатации фотокамеры, возник фотографический способ калибровки.

Сущность фотографического способа состоит в фотографировании естественных или искусственных объектов и точек, расположенных по определенной системе. Лабораторные фотографические способы предполагают фотографирование марок коллиматоров, оптические оси которых расположены под известными углами и пересекаются в одной точке. Марки фотографируются испытуемым объектом на фотоплёнке, помещенной в плоскости прикладной рамки. По измеренным радиальным отрезкам по изображениям марок коллиматоров и соответствующими им известным углам вычисляются элементы внутреннего ориентирования и дисторсия фотографической камеры. При этом тангенциальная дисторсия определяется как отклонение изображения марок от линии нулевого искажения для данного радиального направления. Для практической реализации лабораторного фотографического способа созданы специальные приборы, получившие название фотографической скамьи.

Калибровку аэрокосмической аппаратуры выполняют также по снимкам звездного неба. Элементы внутреннего ориентирования камеры и график дисторсии по полю снимка можно определить на основании зависимости между координатами изображений звезд на снимке и их расчетными значениями, полученными по астрономическим данным. Эта зависимость может быть представлена уравнением

$$\begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ -f' \end{pmatrix} = KA \begin{pmatrix} l \\ m \\ n \end{pmatrix}, \quad (\text{IV.4.11})$$

где x, y — расчетные значения координат изображений звезд; A — матрица ориентации космической камеры (система $Sxyz$) в геоцентрической системе координат $OXYZ$; K — коэффициент пропорциональности; l, m, n — направление на звезды в геоцентрической системе координат (направляющие косинуса).

Исключив из (IV.4.11) коэффициент K , легко получить уравнение коллинеарности следующего вида: $x, y = (f', l, m, n)$

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= -f' \frac{a_{11}l + a_{12}m + a_{13}n}{a_{31}l + a_{32}m + a_{33}n} = -f' \frac{L}{N}; \\ \bar{y} &= -f' \frac{a_{21}l + a_{22}m + a_{23}n}{a_{31}l + a_{32}m + a_{33}n} = -f' \frac{M}{N}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.4.12})$$

Вычислим координаты главной точки x, y и величины дисторсии $\Delta x', \Delta y'$:

$$\left. \begin{aligned} x' &= x - x_0; \quad y' = y - y_0; \\ \Delta x' &= \frac{\Delta r}{r} x'; \quad \Delta y' = \frac{\Delta r}{r} y'. \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.4.13})$$

Составим систему условных уравнений с учетом (IV.4.12) и (IV.4.13) и при условии, что все другие систематические ошибки исключены:

$$\left. \begin{aligned} (x' - x_0) \left(1 + \frac{\Delta r}{r} \right) + f' \frac{L}{N} &= 0; \\ (y' - y_0) \left(1 + \frac{\Delta r}{r} \right) + f' \frac{M}{L} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.4.14})$$

Каждая изобразившаяся звезда дает возможность составить два уравнения. В обработку обычно берут значительное количество изображений звезд (50—100), равномерно расположенных по полю кадра, и полученную систему уравнений решают по способу наименьших квадратов методом приближений. В результате получают значение элементов внутреннего ориентирования фотографической камеры (f' , x_0 , y_0) и величину дисторсии.

За последние годы находит широкое применение способ калибровки съемочных камер по снимкам полигона. Для реализации данного способа необходимо создать специальный полигон с достаточным количеством замаркированных опорных точек, координаты которых известны с высокой точностью. Затем этот полигон фотографируют съемочной камерой, установленной на носителе, находящемся в режиме съемочного полета. Этот способ позволяет получать параметры съемочных камер в условиях, близких к условиям реальной съемки. Важным является тот фактор, что способ позволяет определить суммарное влияние различных систематических ошибок на построение изображения.

В основу способа взято известное уравнение зависимости координат точек снимка и объекта

$$\left. \begin{aligned} (x - x_0) + \Delta x &= \\ = f' \frac{a_{11}(x - x_3) + a_{12}(y - y_3) + a_{13}(z - z_3)}{a_{31}(x - x_3) + a_{32}(y - y_3) + a_{33}(z - z_3)}; \\ (y - y_0) + \Delta y &= \\ = f' \frac{a_{21}(x - x_3) + a_{22}(y - y_3) + a_{23}(z - z_3)}{a_{31}(x - x_3) + a_{32}(y - y_3) + a_{33}(z - z_3)}, \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.4.15})$$

где x , y — координаты изображения точек объекта; x_0 , y_0 — координаты главной точки; Δx , Δy — элементы матрицы ориентации, являющиеся функциями угловых элементов внешнего ориентирования.

Линеаризация уравнений (IV.4.15) приводит к уравнениям поправок следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} A\delta f' + B\delta x_0 + C\delta y_0 + D\delta K_1 + F\delta K_2 + Q\delta\delta + L\delta A + \\ + K\delta\alpha + l &= v; \\ A_1\delta f' + B_1\delta x_0 + C_1\delta y_0 + D_1\delta K_1 + F_1\delta K_2 + Q_1\delta\delta + \\ + L_1\delta A_1 + K_1\delta\alpha + l &= v_1. \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.4.16})$$

Таким образом, одна точка полигона, изобразившаяся на снимке, дает два уравнения с одиннадцатью неизвестными, два из которых принадлежат только данной точке. Поэтому решение уравнений необходимо отнести к отдельным зонам снимка и решить мето-

дом последовательных приближений. В результате решения уравнений находят искомые параметры снимка.

Следует отметить, что этот способ калибровки предъявляет высокие требования к испытательному полигону как с точки зрения размещения его точек в плановом и высотном отношении, так и к их закреплению, маркировке и определению геодезических координат.

Важными факторами, определяющими геометрическую точность космического снимка, являются деформации иллюминатора и явление внутренней рефракции.

В условиях космического полета под воздействием механических напряжений, радиального перепада температур на внутренней и внешней поверхностях иллюминатора возникает деформация поверхностей последнего. Суммарное отклонение проектирующего луча δ_i из-за указанных факторов определяется по формуле

$$\delta_i = d (\operatorname{tg} i - \operatorname{tg} r) \rho \left[\frac{\partial t \Delta t}{\partial R} + \frac{K \Delta P D^2}{d^2 E} + \frac{d \left(\frac{\partial t}{\partial R} \right) \alpha_t}{\operatorname{tg} r} \right], \quad (\text{IV. 4. 17})$$

где d — толщина иллюминатора; α_t — коэффициент линейного расширения стекла, из которого сделан иллюминатор; Δt — перепад температур по толщине иллюминатора; ΔP — перепад давления; D — световой диаметр иллюминатора; E — модуль Юнга; K — коэффициент, зависящий от геометрии и модуля иллюминатора; $\partial t / \partial R$ — радиальный температурный градиент.

При съемках из космоса через иллюминаторы, изготовленные из кварцевого стекла и представляющие собой двухстекольные или трехстекольные конструкции, отклонения проектирующих лучей для углов падения Y ($Y=0, \dots, 60^\circ$), не превосходят нескольких секунд и практически не влияют на точность построения изображений.

Из-за различных термобарических состояний газовых сред по обеим сторонам иллюминатора возникает явление внутренней рефракции. Величину угла (δ_0), на который отклонится луч, находят, используя известный оптический инвариант

$$n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin \eta, \quad (\text{IV. 4. 18})$$

где n_1, n_2 — показатели преломления соответствующих сред; i — угол падения луча; η — угол его преломления.

При плоской границе двух газовых сред влияние отклонения проектирующего луча на положение точек снимка определяется формулами, которые для горизонтального снимка имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \delta_x &= \frac{\delta_0 (f'^2 + x^2 + y^2) x}{\rho f'^2}; \\ \delta_y &= \frac{\delta_0 (f'^2 + x^2 + y^2) y}{\rho f'^2}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV. 4. 19})$$

Для условий космического полета величины угловых отклонений световых лучей достигают нескольких десятков секунд ($50''$), а соответствующие им геометрические искажения координат точек горизонтального снимка — нескольких десятков микрометров (для короткофокусных и длиннофокусных съемочных камер искажения на краю снимка могут составлять соответственно 20 и 35 мкм).

IV.4.5. Фотографические материалы для аэрокосмических съемок

По спектральной светочувствительности пленки можно разделить на категории, определяющие зону сенсibilизации.

Максимумы сенсibilизации черно-белых пленок и снижение спектральной светочувствительности в определенных зонах спектра определяют их применение для съемки объектов, имеющих спектральные коэффициенты яркости, соответствующие максимумам сенсibilизации. Выделяют несенсibilизированные пленки (до 500 нм), ортохроматические (580 нм), изоортохроматические (600 нм), изохроматические (640 нм), панхроматические (680 нм), изопанхроматические (700 нм) и инфрахроматические (900 нм).

Цветные фотопленки можно разделить на две группы: пленки, позволяющие воспроизвести объекты ландшафта в цветах, близких натуральным; пленки, на которых объекты ландшафта передаются в условных цветах, т. е. цветах, не соответствующих цвету фотографируемого ландшафта. Первую группу составляют цветные фотопленки негативные и обратимые. Вторую группу составляют спектрально-зональные фотопленки.

Цветные фотопленки имеют три светочувствительных эмульсионных слоя, обладающих различной эффективной спектральной чувствительностью. Спектральная эффективная чувствительность цветной фотопленки лежит в диапазоне от 450 до 680 нм, т. е. соответствует видимой зоне спектра.

При съемке растительных объектов, почвенных покровов, для выявления заболевания лесов и посевов широко применяют спектрально-зональные пленки. Спектрально-зональные фотопленки могут иметь два или три эмульсионных светочувствительных слоя. Широко применяют для аэрокосмических съемок спектрально-зональную пленку СН-6М, которая по спектральной чувствительности охватывает диапазон от 520 до 800 нм. Верхний, инфрахроматический слой имеет чувствительность в области 720—800 нм, нижний, панхроматический 520—700 нм. На негативе все объекты, отражающие инфракрасные лучи, воспроизводятся зеленым частичным изображением; отражающие красные лучи — пурпурным частичным изображением. Объекты, отражающие лучи обеих зон, будут воспроизводиться зеленым и пурпурным частичными изображениями, в результате чего получается зеленовато-серое изображение. Пленка СН-6М рекомендована при аэрокосмической съемке объектов с существенным различием спектральных коэффициентов яркости в инфракрасной и видимой зонах спектра. Цветовой баланс спектрально-зональных пленок рассчитан на применение светофильтров ОС-14. Известны также опытные пленки, имеющие максимум сенсibilизации в инфракрасной и зеленой зонах спектра.

IV.4.6. Измерительные свойства космических снимков

Измерительные свойства космического снимка в значительной степени зависят от геометрической точности построения фотографического изображения.

В реальных условиях космической съемки происходит искажение внутренней и внешней связей проектирующих лучей из-за различных явлений: деформации пленки и ее невыравнивания в плоскость в момент экспозиции, дисторсии объектива, внутренней фотограмметрической рефракции, деформации иллюминатора, атмосферной рефракции.

Метрическая нестабильность пленки обусловлена многими факторами, суммарное влияние которых вызывает искажение геометрических характеристик объекта и координатных меток, расположенных в фокальной плоскости аппарата. Деформация негативов трудно поддается учету и существенно влияет на точность стереофотограмметрической обработки и не позволяет при измерениях полностью использовать высокую точность стереофотограмметрических приборов.

Для измерения негативов с точностью 1 мкм необходимо, чтобы усадка пленки после обработки не превышала 0,001 %. На самом же деле она составляет от 0,1 до 0,4 % и более.

Размеры фотоматериалов после обработки меняются в пространственной системе координат по трем осям. Для фотограмметрических целей наиболее важное значение имеет учет плоскостной деформации.

Различают следующие виды плоскостной деформации:

- равномерная (продольная и поперечная деформация одинаковы и не препятствуют фотограмметрическим работам, так как легко учитываются);

- остаточная (разность между продольной и поперечной деформациями);

- неравномерная (в пределах одного снимка деформация непостоянна даже в отдельном направлении). Так как в космических съемочных камерах применяют механический метод выравнивания, то метрическую нестабильность снимка можно с высокой степенью точности определить по нанесенной на стекле сетке крестов.

Основная задача космической съемки — получение негативов с высокими измерительными и информационными свойствами — может быть решена при условии максимального учета факторов, влияющих на экспозицию. При отступлениях от оптимальных значений экспозиций происходит ухудшение качества негативов, что ведет к потере мелких и малоконтрастных деталей изображения и снижению резольвометрических характеристик негативов.

Помимо экспонетрической широты пленки L_R величина допустимого отклонения в экспозиции определяется условиями фотохимической обработки и специальными требованиями, предъявляемыми к качеству космических снимков. Учитывая, что фотографическая широта цветных пленок значительно меньше черно-белых, надо особенно точно определить выдержку при съемке на цветные материалы.

Экспонетрические методы при выполнении космической съемки можно разделить на три основные категории:

- расчетный метод;
- полуавтоматический метод;
- автоматический метод.

В случае неавтоматического регулирования экспозиции для ускорения расчетов могут быть составлены экспонетрические номограммы, в основу которых положена зависимость

$$t_{\text{эф}} = \frac{4qK_{\Phi}n_0^2}{S \cdot E \cdot \bar{r} \cdot K_w \tau_a \cdot K_c}, \quad (\text{IV. 4. 20})$$

где q — кратность светофильтра; K_{Φ} — коэффициент, зависящий от выбора единиц светочувствительности; n_0 — знаменатель относительного отверстия; S — общая светочувствительность фотопленки; E — освещенность земной поверхности (ЛК); τ_a — коэффициент пропускания атмосферы при угловом поле объектива 2ω ; K_w — коэффициент изменения освещенности по полю кадра,

Спектральная освещенность зависит от спектрального коэффициента пропускания атмосферы $\tau_{a\lambda}$:

$$E_{\lambda} = E_{a\lambda} \cdot \tau_{a\lambda}, \quad (\text{IV.4.21})$$

где $E_{a\lambda}$ — спектральная освещенность у границы земной атмосферы. Спектральный состав отраженного излучения изменяется в широких пределах и достигает наибольшей величины при переходе от видимой зоны к инфракрасной. Спектральный коэффициент яркости r зависит от состояния поверхности объектов, угла падения лучей, угла визирования и азимута наблюдений.

Значительное влияние на интенсивность и спектральный состав потока излучения в направлении объектива оказывает воздушная дымка. С учетом спектральной яркости дымки $L_{D\lambda}$ и спектрального коэффициента пропускания атмосферы τ_{max} (слоя атмосферы между объективом и земной поверхностью) спектральную яркость потока L можно записать

$$\bar{L}_{\lambda} = E_{a\lambda} \cdot \tau_{a\lambda} \cdot \frac{r\lambda}{\pi} \cdot \tau_{\text{нал}} + L_{D\lambda}. \quad (\text{IV.4.22})$$

Полный фотоактивный поток определяют по формуле

$$A = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_{\lambda} \cdot S_{\lambda} \cdot d\lambda, \quad (\text{IV.4.23})$$

где S_{λ} — спектральная чувствительность пленки; λ_1, λ_2 — границы спектральной зоны фотографирования; J_{λ} — монохроматическая облученность.

Наиболее достоверный способ учета спектральных характеристик информационного канала заключается в применении фотоприемного устройства со спектральной чувствительностью, подобной спектральной чувствительности пленки. Это необходимо, например, для космической фотосъемки в ультрафиолетовых, инфракрасных лучах, при съемке на спектральнозональные материалы. Степень подобия спектральных характеристик фотоприемника и пленки должна быть тем выше, чем больше градиенты зависимых от длины волны величин в зоне фотографирования.

IV.4.7. Основы фотохимической обработки материалов космической съемки

Информационная емкость космических снимков во многом зависит от двух процессов — экспонирования и проявления материалов съемки. Методика фотохимической обработки космических негативов должна предусматривать получение оптимальных характеристик, определяющих качество фотографического изображения. С достаточной точностью процессы проявления могут характеризовать количественные методы оценки фотографического качества. К количественным методам оценки качества фотографического изображения можно отнести сенситорезольвометрические показатели; способ оценки по пограничным кривым; передачи модуляции (ФПМ) съемочной системы; информационный критерий по энтропии; корреляционный метод. Оценка качества по указанным критериям позволяет выбрать наиболее рациональную схему технологического негативного процесса.

Процесс фотохимической обработки космических негативов должен обеспечивать:

максимальную информационную емкость фотографического изображения;

заданные сенситорезольвометрические показатели;
стабильность сенситометрических показателей для однородных ландшафтных зон;
проработку деталей в свете и тенях;
равномерность проявления по всему негативу;
длительную сохранность космических съёмочных материалов;
наименьшую деформацию;
целесообразную оперативность обработки.

Для фотохимической обработки аэрокосмических материалов съёмки применяют различные рецептуры проявителей, обеспечивающие оптимальные результаты. Можно классифицировать проявители по материалам, для которых они предназначены: для проявления негативной пленки — негативные, для позитивной — позитивные, проявители для фотобумаг и т. д. Классифицируют проявители по скорости проявления: медленно работающие, нормальные, быстрые. Можно также выделить специфические особенности проявляющих растворов: мелкозернистые, выравнивающие, двухрастворные, двухрастворные тропические, дубящие и т. д. Разрабатываются новые проявляющие вещества, исследуется влияние различных компонентов и добавок на процесс проявления.

При фотохимической обработке космических негативов рекомендован двухрастворный метод проявления. Он позволяет в начальный период проявления мелкозернистым проявителем получить оптимальную величину разрешающей способности, обеспечить проработку слабо экспонированных объектов и несколько затормозить процесс проявления ярко освещенных объектов. Медленно работающий проявитель позволяет оценить правильность экспонирования данного кадра и определить длительность процесса проявления в каждой ванне с помощью прибора ЭОП. Проявление во втором, более энергичном проявителе обеспечивает увеличение коэффициента контрастности γ и светочувствительности S_D , при этом не происходит большого нарастания оптических плотностей. Двухрастворное проявление увеличивает R и улучшает условия дешифрирования черно-белых космических негативов.

Пленки, полученные при выполнении космических экспериментов, проявляют через некоторое время после экспонирования. При продолжительном хранении экспонированного слоя может происходить регрессия скрытого изображения — существенное его ослабление. Особенно сильно уменьшаются малые плотности. Чтобы ослабить это влияние, необходимо применить более энергичное проявление. Правильность выбранной методики фотохимической обработки материалов космической съёмки Луны и Земли подтверждена высокими изобразительными свойствами снимков.

Фиксирование фотопленок, полученных при космической съёмке, выполняют после процесса проявления и промывки. К растворам для фиксирования предъявляются требования, обеспечивающие полное растворение галлоидного серебра, оставшегося в эмульсионном слое после проявления, быстроту протекающей реакции, сохранение полученных значений оптической плотности.

Зависимости, которые характеризуют проявление черно-белых негативов, не могут быть перенесены на процесс обработки материалов цветной съёмки. Учитывая, что для обеспечения цветового баланса между отдельными слоями цветной пленки коэффициент контрастности может изменяться на незначительную величину, необходимо строго выдерживать заданный температурный режим и время проявления.

При анализе существующих режимов фотохимической обработ-

ки материалов космической фотосъемки необходимо выполнить основное условие — максимально разделить по цвету сверхмелкие изображения объектов земной или лунной поверхности.

На качество цветного негатива влияют многие факторы: точность выдерживания температурного и временного режимов проявления, истощение и загрязнение растворов, тип проявительного прибора, действия различных компонентов растворов и т. д.

Основной фотохимической обработки цветного материала служит то, что серебро изображения, полученное фотографическим путем, заменяют на окрашенные вещества, плотности которых пропорциональны плотности металлического серебра.

Цветное проявление представляет собой процесс химического проявления скрытого фотографического изображения, когда образование изображения из восстановленного серебра проходит с совместным образованием окрашенных продуктов — красителей. После удаления металлического серебра из фотографического слоя остается изображение из окрашенных продуктов.

Процесс образования изображения, начиная с объекта и кончая приемником — фотопленкой, может быть рассмотрен при помощи пространственных передаточных функций, на которые разлагается изображение с помощью двумерного преобразования Фурье. Пространственные передаточные функции позволяют рассматривать влияние каждого звена системы как нормированную функцию передачи информации $T(N_x N_y)$ независимо от основной системы передачи изображений, оценить весь процесс в целом ($N_x N_y$ — пространственная частота).

Выходной сигнал системы — преобразованная звеньями информация об объекте — может быть представлен передаточной функцией всего тракта между земной поверхностью и полученным фотографическим изображением.

Схема прохождения пространственных частот:

- 1) земная или лунная поверхность с пространственным спектром $Q_{об}(N_x, N_y)$;
- 2) атмосфера с передаточной функцией $T_{атм}(N_x, N_y)$;
- 3) иллюминатор космического летательного аппарата $C_n(N_x, N_y)$;
- 4) оптические детали космической съемочной камеры (объектив, выравнивающее стекло, светофильтр) $T_{об}(N_x, N_y)$;
- 5) светорассеяние камеры $C_k(N_x, N_y)$;
- 6) оптическая диффузия пленки $T_{д.пл}(N_x, N_y)$;
- 7) химическая диффузия пленки $T_{х.пл}(N_x, N_y)$, фотохимическая обработка.

Энергетический спектр пространственных частот может быть представлен зависимостью

$$Q_{\Phi}(N_x) = [T_{атм}(N_x) T_{об}(N_x) T_{д.пл}(N_x) \times \\ \times T_{х.пл}(N_x)]^2 C_4^2(N_x) Q_{об}(N_x), \quad (IV.4.24)$$

где $Q_{\Phi}(N_x)$ — спектральное яркостное распределение фотографического изображения объектов (преобразованный энергетический спектр).

Формула (IV.4.24) определяет энергетические соотношения при анализе информативности космических съемочных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаврова Н. П., Стеценко А. Ф. Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемочное оборудование. М., Недра, 1981.
2. Лаврова Н. П. Космическая фотосъемка. М., Недра, 1983.

РАЗДЕЛ V

ПРИКЛАДНАЯ ГЕОДЕЗИЯ

V.1. ИЗЫСКАНИЯ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В. В. Калугин

V.1.1. Классификация инженерных сооружений

Инженерные сооружения различаются по назначению и конструктивным особенностям, их можно также классифицировать по форме и размерам и по точности выполнения геометрических параметров.

По назначению сооружения делят на промышленные, жилищно-гражданские, дорожно-транспортные, гидротехнические, сельскохозяйственные.

По форме и размерам различают площадные, линейные и точечные сооружения.

По точности реализации в ходе строительства геометрических параметров, установленных проектными документами, различают сооружения технической точности (ошибки возведения 10 мм и больше), повышенной точности, характеризуемые ошибками 2—10 мм, и прецизионные, в которых установка во взаимное положение отдельных конструктивных элементов выполняется с ошибкой 0,2—1 мм, а иногда и точнее.

Назначение, форма, размер сооружения во многом определяют объем, точность и организацию геодезических работ при строительстве и эксплуатации этого сооружения.

В строительстве инженерных сооружений различают три этапа в зависимости от вида производственной деятельности: инженерные изыскания, проектирование и возведение сооружений. В ходе выполнения этих этапов необходимо обеспечить выполнение следующих требований:

- экономическую целесообразность;
- функциональную (технологическую) целесообразность;
- техническую возможность, прочность, устойчивость и долговечность;
- архитектурно-эстетические требования;
- охрану окружающей среды.

Выполнение указанных требований обеспечивает высокоэффективную эксплуатацию сооружений.

V.1.2. Назначение и виды инженерных изысканий

Основной задачей инженерных изысканий является комплексное изучение природных условий района (участка) строительства и получение необходимых материалов для разработки экономически целесообразных и технически обоснованных решений при проектировании и строительстве объектов, а также данных для составления

прогноза изменений окружающей природной среды под воздействием строительства и эксплуатации предприятий, зданий и сооружений.

Инженерные изыскания характеризуются:

- целенаправленностью, т. е. выполнением только тех видов работ, которые необходимы для изучения природных условий района;
- комплексностью, что определяется многообразием природных факторов, непосредственно влияющих на выбор проектных решений;
- стадийностью, т. е. обеспечением последовательности выполнения изысканий в зависимости от очередности решаемых проектных задач, к которым относятся:

1) определение технической возможности и экономической целесообразности строительства;

2) выбор оптимального варианта расположения строительного объекта;

3) компоновка зданий и сооружений на выбранном варианте;

4) составление расчетных схем и расчет устойчивости зданий и сооружений.

Последовательное решение проектных задач предопределяет необходимость проведения инженерных изысканий по этапам в соответствии с технико-экономическим обоснованием и стадиями разработки проекта (проект и рабочая документация — при двухстадийном проектировании, рабочий проект — при одностадийном) и устанавливает принципы планирования и организации изысканий.

По своему содержанию изыскания делятся на экономические и технические.

Экономические изыскания. Основой экономических изысканий являются перспективные научно разработанные планы развития народного хозяйства СССР. При выполнении этого вида изысканий определяется экономическая целесообразность размещения сооружения в данном районе на основе изучения производственных сил района, сырьевых и энергетических ресурсов, транспортных связей.

Различают проблемные и титульные экономические изыскания.

Проблемные экономические изыскания рассматривают ряд вариантов решения какой-либо общей народнохозяйственной задачи, как правило, связанных со строительством крупных и сложных инженерных комплексов, приводящей к экономическому перерождению районов. Проводятся без привязки сооружений к конкретному месту на предпроектном этапе при разработке схем развития и размещения отраслей народного хозяйства и промышленности.

Титульные экономические изыскания ведутся при проектировании определенного объекта с учетом конкретного места его размещения. Титульные изыскания при двухстадийном проектировании ведутся, как правило, на стадии разработки проекта со сводным сметным расчетом стоимости и основываются на методе внутриобъектного сравнения вариантов, при котором несколько технически равноценных схем размещения и строительства сооружения сравниваются по экономическим показателям.

При проведении экономических изысканий учитываются прямые и дополнительные затраты, связанные со строительством, а также экономическая эффективность капитальных вложений. Последняя обычно определяется по срокам окупаемости сооружения, нормативная величина которых устанавливается.

Технические изыскания. Целью технических изысканий является изучение технической возможности строительства в данном районе и определение его основных показателей. Эти изыскания включают в себя инженерно-геодезические, инженерно-геологические и инженер-

но-гидрометеорологические изыскания, которые могут быть дополнены геоморфологическими, почвенно-грунтовыми, климатологическими и другими видами исследований.

Технические изыскания ведутся специализированными организациями системы Госстроев союзных республик или выполняются ведомственными проектно-изыскательскими организациями, обслуживающими различные виды строительства.

Для выполнения изысканий на объекте должны быть в установленном порядке получены от заказчика техническое задание и оформленные разрешения на проведение изысканий, составлена программа изысканий и соответствующая сметно-договорная документация.

Техническое задание, в котором даны указания о целевом назначении и намечаемых видах изысканий, наименование объекта, данные о местоположении района строительства, назначении и видах зданий и сооружений, предполагаемых видах воздействия нагрузок и допускаемых величинах деформаций, сведения о стадии проектирования, конструктивные характеристики и требования к точности обеспечения параметров проектируемых сооружений, выдается, как правило, на проведение комплекса инженерных изысканий.

Проведение изысканий проектно-изыскательской организацией ведется в три этапа: подготовительный, полевой и камеральный.

В подготовительный период проводится сбор, анализ и обобщение материалов о природных условиях района изысканий, работы по составлению программы, графика и сметы изысканий и организации полевых изыскательских подразделений. Состав, объемы, методы и последовательность выполнения изысканий обосновываются в программе на основе требований инструкций по инженерным изысканиям для соответствующих видов строительства.

Сбор материалов следует осуществлять через архитектурно-планировочные управления при исполнительных комитетах Советов народных депутатов, в изыскательских и проектных организациях, а также:

по топографо-геодезическим, аэрофотосъемочным и картографическим работам — в центральном картгеофонде и территориальных инспекциях Госгеонадзора ГУГК при Совете Министров СССР;

по инженерно-геологическим работам — во Всесоюзном и территориальных геологических фондах Министерства геологии СССР;

по инженерно-гидрометеорологическим работам — в органах Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды.

При подготовке и проведении изыскательских работ с целью обеспечения охраны природы, соблюдения земельного и водного законодательства СССР следует предусматривать и осуществлять меры предупредительного характера, исключающие возможность необоснованных потрав посевов, вырубку леса, загрязнение поверхностных и подземных вод. Методы изысканий должны быть избраны с учетом минимального вмешательства в естественный ход природных процессов. При завершении изысканий проводятся ликвидационные работы, в первую очередь закрытие горных выработок и скважин и восстановительные мероприятия.

Порядок, методика и точность выполнения технических изысканий в целом или по отдельным их видам устанавливаются нормативными документами.

V.1.3. Состав инженерно-геодезических изысканий

Инженерно-геодезические изыскания обеспечивают изучение топографических условий района строительства и получение топографо-геодезических материалов и данных, необходимых для проектирования объектов и выполнения других видов изысканий. Объектом изысканий являются ситуация и рельеф.

В зависимости от назначения и вида сооружений, площади изучаемого участка и стадии проектирования в состав инженерно-геодезических изысканий входит:

- сбор и анализ имеющихся материалов топографо-геодезической изученности;

- построение (развитие) государственной геодезической сети 3-го и 4-го классов, геодезической сети сгущения 1-го и 2-го разрядов и нивелирной сети II—IV классов;

- создание планово-высотной съемочной геодезической сети;

- топографическая съемка и обновление топографических планов;

- съемка подземных инженерных коммуникаций;

- геодезическое трассирование линейных сооружений;

- инженерно-геодезическое обеспечение геологических, гидрометеорологических и других видов изысканий, включая специальные геодезические наблюдения;

- картографические работы.

Основанием для производства инженерно-геодезических изысканий служит техническое задание заказчика, в котором дополнительно к пунктам, указанным в V.1.2, указывают:

- данные о системе координат и высот;

- данные о границах участков съемки с учетом проектируемых коммуникаций;

- масштаб съемки и высоту сечения рельефа;

- особые требования к точности и детальности проведения инженерно-геодезических изысканий.

В зависимости от результатов анализа собранных материалов топографо-геодезической изученности решается вопрос о необходимости полевого обследования района изысканий, результаты которого должны быть отражены в программе изысканий как обоснования к намеченному объему работ.

Программа на инженерно-геодезические изыскания, кроме общих характеристик района, его изученности, сведений о сооружении, должна содержать:

- карту-схему с границами участков съемки и разграфкой листов плана;

- сведения о системах координат и высот;

- обоснование видов и классов (разрядов) геодезических и нивелирных сетей, их проекты и расчет точности;

- обоснование масштабов съемок и высот сечения рельефа, если они не соответствуют установленным в техническом задании;

- чертежи геодезических центров;

- сведения о привязке горных выработок, гидрологических и геофизических точек и др.

В практике инженерно-геодезических изысканий программа составляется на объекты площадей более 100 га (или при стоимости работ более 20 тыс. руб.).

Решение основных проектных задач обеспечивается созданием топографо-геодезических материалов, перечень которых дан в табл. 42.

ТАБЛИЦА 42

№ п/п	Проектные задачи	Материалы инженерно-геодезических изысканий
1	Сравнение и оценка вариантов размещения площадки (трассы) в районе строительства. Выбор перспективных вариантов	Топографические и аэросъемочные материалы М 1:100 000—1:5000 Материалы полевого обследования. Ситуационные планы М 1:25 000—1:5000, обзорные планы (карты-схемы М 1:100 000—1:25 000)
2	Составление схем генпланов по вариантам и их сравнение	Топографические планы М 1:50 000—1:2000
3	Компоновка зданий и сооружений (разработка генпланов)	Топографические планы М 1:5000—1:1000
4	Составление проектов отдельных зданий и сооружений (проектов трассы на сложных участках)	Топографические планы М 1:1000—1:500. Специальные топопланы
5	Уточнение и детализация сложных сооружений	Топографические планы М 1:500 и 1:200. Специальные топопланы

На участках, где общее изменение ситуации и рельефа составляет более 35 % по сравнению с изображением на ранее выполненном плане, съемка производится заново. Обновление планов следует выполнять, широко используя материалы съемки текущих изменений (корректиры) и аэрофотосъемку.

На этапе рабочей документации могут выполняться съемки незначительных участков со специальной нагрузкой, так называемые изыскательские планы, которые служат топографической основой лишь в период проектирования.

Плановая опорная геодезическая сеть для съемок создается в виде триангуляции, трилатерации и полигонометрии 4 класса и выше, а для съемки небольших площадей — развитием геодезических сетей 1-го и 2-го разрядов. Площади менее 1 км² обеспечиваются продолжением теодолитных ходов или созданием сети микротриангуляции, а в высотном отношении — ходами технического нивелирования.

Съемка существующих подземных коммуникаций производится в случаях отсутствия или утраты, недостаточной полноты и точности планов (исполнительных чертежей) и включает в себя:

- сбор и анализ имеющихся материалов;
- восстановление существующей опорной геодезической сети или создание новой;
- рекогносцировку и обследование подземных коммуникаций;
- планово-высотную съемку имеющихся выходов на поверхность;
- съемку и обследование подземных коммуникаций с применением индукционных приборов;
- вскрытие в необходимых случаях подземных коммуникаций и съемку их в траншеях и шурфах.

Съемку существующих подземных коммуникаций проводят одновременно с топографической съемкой участка местности. Предельные ошибки в определении положения выходов, углов поворота и других точек подземных коммуникаций и сооружений не должны быть более 0,4 мм на плане. Планы, в зависимости от их назначения, степени насыщенности коммуникациями и подробности их характеристик, составляются в масштабах 1:5000—1:200, причем планы масштабов 1:5000 и 1:2000 являются документами учетно-справочного характера. Планы в масштабе 1:200 составляют в исключительных случаях, когда территория съемки имеет густую сеть подземных коммуникаций. Для определения глубины заложения подземных сетей и уклонов выполняют нивелирование коммуникаций.

Кроме плана трассы с указанными параметрами высотного положения элементов и устройств, строят профили по данным линейных измерений и нивелирования. Горизонтальный масштаб профиля принимают равным масштабу топоплана, а вертикальный в 5 или 10 раз крупнее.

Трассировочные работы, проводимые при изысканиях линейных сооружений, включают:

- камеральное трассирование на основе материалов топографо-геодезической изученности;
- полевое обследование направлений трасс;
- трассировочные работы на местности;
- топографическую съемку полос местности вдоль трасс;
- закрепление на местности углов поворота и створных точек трасс.

В целях геодезического обоснования инженерно-геологических, инженерно-гидрометеорологических и других видов изысканий выполняется перенесение в натуру и планово-высотная привязка горных выработок (скважин, шурфов и др.) и различных точек полевых измерений и наблюдений (геофизических, гидрологических, гидрогеологических и др.). На участках развития физико-геологических процессов и явлений (карсты, оползни, сели), а также в районах ведения горных выработок выполняются специальные геодезические наблюдения и съемки.

V.1.4. Инженерно-геологические изыскания и использование их результатов

Инженерно-геологические изыскания обеспечивают изучение инженерно-геологических условий района (участка) строительства, включая геоморфологическое и геологическое строение, состояние и физико-механические свойства грунтов, гидрогеологические условия, неблагоприятные физико-геологические процессы и явления, а также составление прогноза изменения этих условий при строительстве и эксплуатации сооружений. Конечной целью геологических изысканий является определение несущей способности оснований инженерных сооружений.

Инженерно-геологические изыскания проводятся строго по этапам, обеспечивая реализацию принципа «от общего к частному», когда от этапа к этапу сокращается площадь исследований, но увеличивается их детальность и обеспечивается последовательное решение проектных задач.

При выполнении изысканий проводят районирование территории по характеру рельефа, по геологическому строению и по гидрогеологическим условиям. По совокупности инженерно-геологических условий районы строительства делят на простые — с благоприятными ус-

ловиями, средние и сложные, где требуется проведение ряда мероприятий по борьбе с неблагоприятными природными условиями.

В состав инженерно-геологических изысканий входят:

- сбор, анализ и обобщение данных о геологических условиях района строительства, включая материалы прошлых лет;
- инженерно-геологическая рекогносцировка;
- инженерно-геологическая съемка;
- инженерно-геологическая разведка.

Все этапы, за исключением первого, по характеру производства работ выполняются в три периода: подготовительный, полевой и камеральный.

Инженерно-геологическая рекогносцировка проводится на начальных этапах и выполняется с целью общей оценки и сравнения инженерно-геологических условий по намеченным вариантам. При рекогносцировке проводятся маршрутные наблюдения, при необходимости выполняется незначительный объем полевых работ — проходка отдельных горных выработок и геофизические работы. Большинство задач инженерно-геологической рекогносцировки может быть решено с помощью аэрофотоматериалов. Широкие возможности открывает использование специальных аэрофотоматериалов, в частности многозональных и спектральных снимков, отличающихся относительно более высокими дешифровочными свойствами.

Инженерно-геологическая съемка является основным комплексным видом геологических изысканий и проводится для оценки инженерно-геологических условий территории, предназначенной для строительства, и обеспечивает решение задач компоновки объектов, выбор типов и расчет оснований фундаментов сооружений. В ходе ее проведения выполняются проходка горных выработок, полевые и лабораторные исследования состава и свойств грунтов, геофизические работы. На этом этапе изучают четыре основных фактора: грунты, подземные воды, рельеф и физико-геологические процессы.

В ходе инженерно-геологической съемки составляют инженерно-геологические карты, которые могут быть классифицированы по основным признакам — масштабу и назначению.

Карты масштабов 1:1 000 000 и мельче — *инженерно-геологические регионального изучения территории СССР* — предназначены для изучения общих закономерностей геологического строения значительных по площади территорий.

Карты масштаба 1:500 000—1:50 000 — *государственные инженерно-геологические* — используются для размещения значительных по площади сооружений.

Карты *инженерно-геологические крупномасштабные* составляют в масштабах 1:10 000 и крупнее в ходе инженерно-геологической съемки или разведки и используют для выбора места и размещения объектов, составления генпланов и детальной планировки городов.

По содержанию инженерно-геологические карты разделяют на аналитические, где показывают один или несколько инженерно-геологических элементов, например, литологию, тектонику, гидрогеологию района, и синтетические с совокупной оценкой инженерно-геологических условий.

При проведении инженерно-геологической съемки выполняется значительный объем геодезических работ, связанных с разбивкой маршрутов исследований и координированием точек наблюдений. Так, на 1 км² геологической карты масштаба 1:5000 устанавливается до 100 точек наблюдений и горных выработок, положение которых должно быть определено. На этом же этапе организуются наблюдения за деформациями масс горных пород и сооружений на

Этап изысканий	Решаемые задачи проектирования	Методы изучения	Масштабы инженерно-геологических карт
Сбор и обобщение материалов	Хозяйственная необходимость и экономическая целесообразность	Материалы прошлых лет	1:1 000 000— 1:500 000
Инженерно-геологическая рекогносцировка	Технико-экономическое сравнение вариантов	Маршрутные наблюдения, проходка отдельных горных выработок. Аэрофотосъемка	1:100 000— 1:50 000
Крупномасштабная инженерно-геологическая съемка	Компоновка зданий и сооружений. Предварительные расчеты оснований	Материалы аэрофотосъемки, маршрутные наблюдения проходки горных выработок, полевые и лабораторные исследования	1:10 000— 1:5000
Инженерно-геологическая разведка	Окончательные расчеты оснований зданий и сооружений	Проходка горных выработок, полевые и лабораторные исследования в зоне взаимодействия зданий с геологической средой	1:5000— 1:2000
Инженерно-геологические исследования	Уточнение проектов зданий и типов избранных фундаментов в процессе возведения сооружений	Документация строительных работ. Результаты наблюдений за деформациями	1:2000— 1:500

склонах и в местах, подверженных влиянию физико-геологических процессов.

Инженерно-геологическая разведка представляет собой комплекс работ, проводимых в пределах сферы предполагаемого взаимодействия сооружения с окружающей средой, с целью получения исходных количественных данных для расчета оснований и фундаментов сооружения и количественного прогноза изменения геологических условий в процессе строительства и эксплуатации. Проводится путем проходки горных выработок, полевых и лабораторных исследований.

Основные параметры различных этапов инженерно-геологических изысканий приведены в табл. 43.

Целью изучения *физико-геологических процессов* является определение масштабов их проявления, степени влияния и выбор способов борьбы с неблагоприятным воздействием этих процессов на проектируемые сооружения. При проведении инженерно-геологических изысканий изучают:

- просадочные явления в районах распространения лессовых пород, которые относятся к категории макропористых грунтов и прочность которых находится в большой зависимости от их влажности;
- характер проявления механической и химической суффозий (вымывания) и динамики развития карстовых явлений;
- оползневые явления, характер предполагаемого воздействия строительства на их проявления;
- сезонно-периодическое воздействие промерзания грунта на инженерные сооружения.

Основным методом физического определения развития этих процессов является изучение деформаций подверженных их влиянию районов и участков путем проведения инженерно-геодезических работ.

Основными видами полевых работ, выполняемых при инженерно-геологических изысканиях, являются продолжение маршрутов, проходка горных выработок и геофизические методы разведки.

Проходка горных выработок должна обеспечивать:

- непрерывность описания вскрываемых выработок грунтов;
- возможность отбора образцов грунтов ненарушенной структуры с любой глубины в пределах мощности изучаемого разреза;
- возможность проведения в выработке гидрогеологических и полевых исследовательских работ.

Различают открытые (расчистки, закопушки, шурфы, шахты, штольни) и подземные (квершлаг, штреки) горные выработки. Горноразведочные работы предварительно проектируют на топографической основе, а затем от пунктов опорной сети переносят в натуру. При проходке выполняются маркшейдерские работы.

Скважины при инженерно-геологических изысканиях обычно проходят диаметром от 89 до 168 мм (для специальных работ их диаметр может быть увеличен), используя, в зависимости от грунтов, колонковый, ударно-канатный или вибрационный метод бурения.

При *опытных полевых исследованиях* определяют физико-механические свойства грунтов и их гидрогеологические параметры. Основное внимание уделяют выяснению деформационных и прочностных свойств в условиях естественного залегания, применяя следующие методы: статических нагрузок на штампы, прессиометрии (обжатия стенок буровых скважин), вращательного среза, среза цилиндров в выработках, раздавливания, выпирания.

В методе штампов на основании наблюдений за осадкой S в зависимости от величины нагрузки P , прилагаемой к штампу, модуль деформации определяют по формуле

$$F = (1 - \mu^2) \cdot \frac{P}{S \cdot d}, \quad (V.1.1)$$

где μ — коэффициент поперечного расширения, принимаемый равным в пределах 0,3—0,5; d — площадь штампа.

Контроль перемещения элементов испытательного оборудования может осуществляться с использованием геодезических приборов и методов. В песчаных грунтах широко используют методы статического и динамического зондирования, связанные с заглублением в грунт зонда.

Гидрогеологические наблюдения проводят с целью изучения распространения подземных вод, условий их залегания, гидравлических особенностей, условий питания, запасов и режима. Определяют глубину залегания воды, характер водоносного горизонта, динамические характеристики (скорость), химический состав, коэффициент фильтрации.

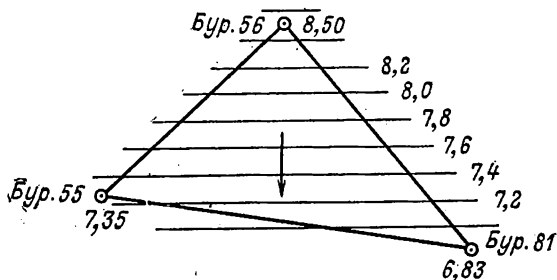


Рис. 121. Определение направления грунтового потока

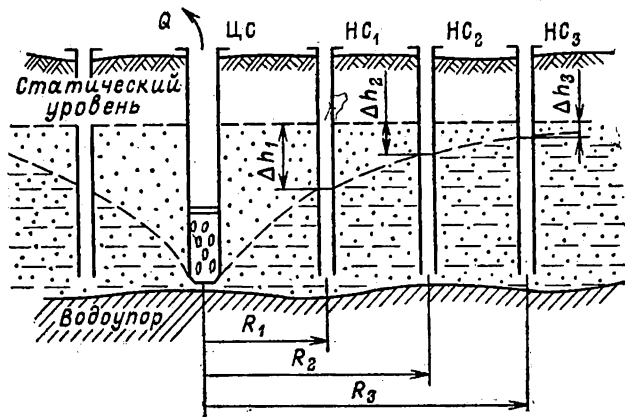


Рис. 122. Определение коэффициента фильтрации способом откачек

Уклон подземных потоков определяют по отметкам зеркала подземных вод, а по линиям, нормальным к гидроизогипсам, устанавливают направление потока (рис. 121). На инженерно-геологических картах равные уровни показывают гидроизогипсами, равные напоры (в районах распространения артезианских вод) — гидроизопьезами. Скорости подземных потоков измеряют химическим, электролитическим или колориметрическим методами по интервалу времени, затрачиваемому грунтовыми водами на прохождение известного расстояния между двумя исследовательскими скважинами.

Коэффициент фильтрации определяют по эмпирическим формулам, лабораторным способом или на основе полевых испытаний, используя метод откачек или нагнетания. В методе откачек вокруг центральной скважины ЦС (рис. 122) располагают на расстоянии R_i наблюдательные скважины (НС) и, проводя откачку воды, определяют ее установившийся расход Q_i и понижение уровня Δh_i в наблюдательных скважинах. Тогда коэффициент фильтрации можно вычислить по формуле

$$k = \frac{0,73Q \cdot \lg \frac{R_2}{R_1}}{(\Delta h_1 - \Delta h_2) \cdot (2H - \Delta h_1 - \Delta h_2)}, \quad (V.1.2)$$

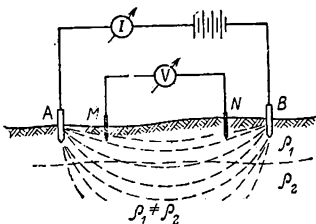


Рис. 123. Схема применения метода электроразведки

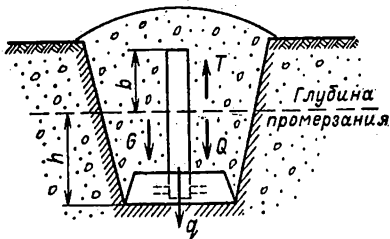


Рис. 124. Схема расчета устойчивости геодезического знака

где H — мощность водоносного горизонта.

Для приближенной оценки водопроницаемости сыпучих пород с известным диаметром D господствующих в грунте частиц может быть использована формула

$$k = 1000 \cdot D_{\text{мм}}^2 \text{ м/сут.}$$

По результатам полевых исследований составляют инженерно-геологические колонки, представляющие вертикальный разрез в исследуемой точке, а на основе нескольких колонок, выполненных по точкам створа, — инженерно-геологический разрез.

Геофизические методы разведки основаны на определении пород путем изучения процессов, обусловленных строением земной коры и некоторых физических свойств пород: электропроводности (электроразведка), скорости распространения упругих волн (сейсморазведка), характера магнитного поля (магниторазведка) и аномалий силы тяжести (гравиразведка). Эти методы используются для изучения и уточнения положения границ слоев различных пород и уровней подземных вод, выполняются обычно только в комплексе с другими видами исследований. Геофизические методы обеспечивают исследование пород между точками их изучения другими способами.

В электроразведке основными методами являются вертикальное электроразведывание (ВЭЗ) и электропрофилеирование (ЭП), при которых на исследуемом участке через электроды A и B (рис. 123) создают искусственное электромагнитное поле и определяют разность потенциала ΔU в точках M и N .

При вертикальном электроразведывании измерения ведут при различных разностях питающих электродов, что дает возможность определить сопротивление пород ρ_i на разных глубинах. Электропрофилеирование проводится по установленным створам и маршрутам с заданной постоянной базой между электродами. Удельное электрическое сопротивление грунтов в значительной степени зависит от их влажности и колеблется в широких пределах: в скальных — 6000—1000 Ом·м, а сыпучих — 10 000—200 Ом·м.

Сейсмическая разведка позволяет провести определение глубин горизонтов пород, степени их монолитности, а также уровней грунтовых вод. Выполняется методом отраженных и преломленных волн. Наблюдение на местности ведут вдоль профилей (прямых и ломаных линий), в точках которых устанавливают сейсмоприемники. В зависимости от расположения наблюдательных точек и пункта взрыва различают продольные, непродольные и дуговые профили.

Магнитная разведка основана на выявлении и изучении аномалий геомагнитного поля, обусловленных неодинаковыми магнитными свойствами горных пород. Успешно применяется для картирования геологических объектов магматического происхождения, локальных структур с большой плотностью. Проводится методами площадной и маршрутной (профильной) магнитных съемок путем измерения составляющих магнитного поля магнитометрами. При проведении поисково-разведочных работ на больших территориях производят аэромагнитную съемку. Измеренные значения величин отклонений магнитного поля наносят в виде изоаномал на карту.

Гравиметрическая разведка основана на измерении силы тяжести на поверхности Земли гравиметрами и ведется с целью выявления геологических структур с пониженной плотностью, месторождений газа и нефти. По результатам определения отклонений от нормального значения силы тяжести составляют карту изоаномал, сечение которых устанавливают в зависимости от масштаба гравиметрической съемки от 10^{-3} до 10^{-1} мм/с² (от 0,1 до 10 мгал).

При определении влажности и плотности пород, их минералогического состава, уровня подземных вод находят применение методы ядерной физики, основанные на зависимости интенсивности проникающего излучения радиоактивных веществ от характеристик горных пород.

Учет геологических условий района, степени проявления физико-геологических процессов приобретает особую важность при выборе местоположения, конструкции и метода закладки геодезических знаков, к устойчивости которых предъявляются повышенные требования. Из всего многообразия процессов, воздействующих на знак, учету, в первую очередь, подлежат экзогенные процессы, обусловленные воздействием таких факторов, как температура и влажность. Наибольшее влияние на положение центров оказывает морозное пучение, сила которого для знака с периметром верхней части l_i и ее высотой над границей промерзания b (рис. 124) определяется по формуле

$$T = b \cdot l_i \cdot f,$$

где f — удельная сила пучения, равная $5 \div 10$ т/м².

Учитывая действующие на знак силы: q — вес звена, G — вес лежащего над якорем грунта и силу трения, величина которой определяется по формуле

$$F = f_T^H \cdot l_i \cdot h,$$

где h — высота знака от якоря до границы промерзания; f_T^H — нормативное сопротивление грунта, для глин, например, равное 0,2 кг/см², параметры геодезического знака, обеспечивающие его устойчивость, могут быть определены на основании выражения

$$0,9 (q + G + F) \geq T. \quad (V.1.3)$$

V.1.5. Методы инженерно-гидрометеорологических изысканий

В ходе проведения инженерно-гидрометеорологических изысканий обеспечивается изучение гидрологических и метеорологических условий района строительства, а также проводится оценка возможных изменений этих условий под воздействием строительства и эксплуатации сооружений. Из комплекса работ, входящих в гидроме-

теорологические изыскания, наиболее тесно связаны с геодезией гидрометрические работы, при которых проводят измерения параметров водотоков, и гидрометрические работы, изучающие положение, размеры и режимы водных объектов.

Гидрометрические работы включают в себя наблюдения за колебаниями уровней воды, проведение промерных работ и русловых съемок, измерение скоростей течения, определение наносов и расходов воды.

Полевым работам предшествуют сбор, анализ и обобщение данных о гидрологии района и рекогносцировка.

Определение уровней выполняется на гидрологических станциях и водомерных постах путем фиксации отметки поверхности воды относительно нуля графика данного водомерного поста. Наблюдения в период устойчивых уровней выполняют обычно дважды в сутки — в 8 и 20 часов. За нуль графика водомерного поста принимают условную плоскость, расположенную на 0,5 м ниже возможного наинизшего уровня воды в данном месте водотока. Отметка нуля графика устанавливается высотной привязкой к нивелирному реперу, который закрепляется в районе водомерного поста выше уровня высоких вод.

По конструкции водомерных устройств для определения уровней посты могут быть различных типов.

На реечных постах уровни отсчитываются по рейке, закрепленной в вертикальном или наклонном положении на свае, имеющей отметку нуля графика. Используется на реках с небольшим перепадом уровней.

На свайных постах уровень определяется по одной из группы свай, закрепленных на перпендикулярном к течению створе с превышением между смежными сваями 0,5—1 м (рис. 125). Высотное положение свай перекрывает весь возможный диапазон колебаний уровней. Наблюдения уровней ведутся с помощью рейки относительно ближайшей затопленной сваи. Свайные посты устраивают на реках и водоемах с большой амплитудой колебания уровней. Высоты свай определяют нивелированием.

На автоматических водомерных постах запись уровней производится непрерывно. В устройстве этих постов используются поплавковые передачи и дистанционные водомерные приборы,

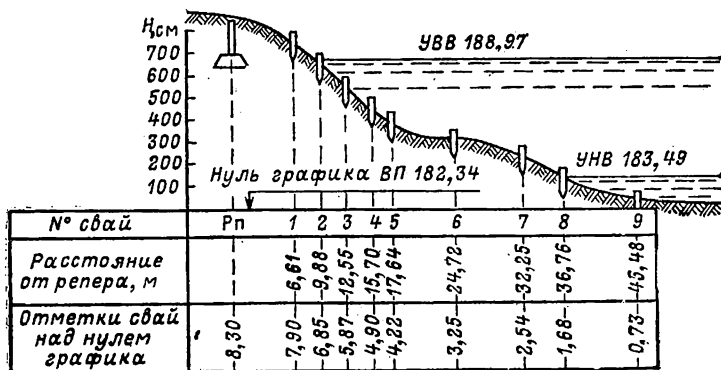


Рис. 125. Схема свайного водомерного поста



Рис. 126. Кривые продолжительности и повторяемости уровней

преобразующие вертикальные перемещения уровней в электрические импульсы. Самописцы уровней (лимниграфы) в зависимости от величины колебаний обеспечивают запись результатов наблюдений в различных масштабах (1:1—1:20). Находят применение при наблюдениях регистраторы предельных уровней. Для постов с фиксацией уровней рейками точность измерения равна 1—0,5 см.

На основании ежедневных наблюдений уровней строятся графики колебаний уровней и кривые повторяемости и обеспеченности (рис. 126), имеющие большое значение для характеристики режима реки и проектных работ. Кривая продолжительности (обеспеченности) уровней указывает длительность существования уровня не ниже определенного значения. Кривая повторяемости (частоты) определяет отрезок времени, в течение которого уровень имел определенное значение.

Для целей оптимального использования рек составляется продольный профиль, представляющий собой вертикальный разрез русла по линии наибольших глубин русла или по середине реки. Продольные профили рек могут быть сокращенными и подробными

ТАБЛИЦА 44

Характеристика профиля	Горизонтальный масштаб	Вертикальный масштаб
Подробные профили	1:25 000 1:50 000—1:100 000 1:200 000	1:50—1:100 1:100—1:200 1:200—1:300
Сокращенные профили:		
а) для больших равнинных рек	1:100 000 1:300 000 1:500 000	1:200 1:500 1:1000
б) для малых равнинных и горных рек	1:50 000—1:100 000	1:200

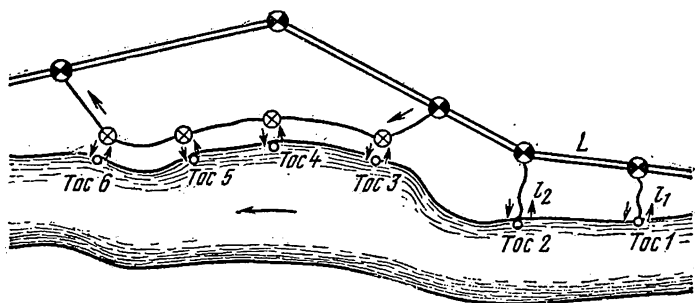


Рис. 127. Схема нивелирования уровней при составлении продольного профиля

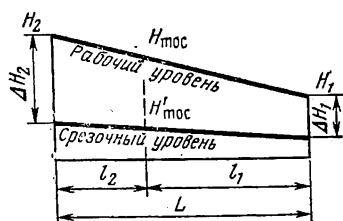


Рис. 128. Схема приведения уровней на точках однодневной связи

в зависимости от целей их использования. Горизонтальные и вертикальные масштабы продольных профилей приведены в табл. 44. Выбор вертикального масштаба зависит от минимального значения превышения, которое может быть изображено на чертеже.

В комплекс работ по составлению продольного профиля входит измерение глубин на профилях живых сечений, наблюдения на водомерных постах и нивелирование рабочих уровней реки на протяжении всего участка. Кроме

отметок уровня и дна реки на продольном профиле отмечают отметки берегов, горизонта высшего и низшего уровней, километраж по средней линии.

Для обеспечения нивелирования реку разделяют на участки длиной 30—50 км, на границах которых, а также в характерных местах перелома профиля устанавливают временные водомерные посты. В период нивелирования уровней воды наблюдения на водомерных постах ведутся с периодичностью 1—2 часа.

На равнинных реках в среднем через 2—3 км устанавливаются фиксирующие уровень воды точки однодневной связи (ТОС), высотное положение которых определяется от реперов магистрального нивелирного хода (рис. 127) проложением рабочих ходов.

Установку кольев ТОС и их нивелирование по возможности производят в один и тот же день. При значительном удалении магистрального хода от русла реки прокладывается дополнительный нивелирный ход, опирающийся на реперы магистрального хода, и устанавливаются временные реперы. Рабочие нивелирные ходы прокладывают как висящие.

Для удобства пользования материалами наблюдений отметки рабочих уровней на разных участках приводят к одному моменту времени путем простого интерполирования с учетом величин изменения уровней ΔH_i на водомерных постах за период между датой нивелирования и датой приведения (рис. 128), вычисляя так называемый «срезочный» уровень на точке однодневной связи $H_{\text{тос}}$ по формулам

$$\left. \begin{aligned} H'_{\text{ТОС}} &= H_{\text{ТОС}} - \Delta H_1 - \frac{\Delta H_2 - \Delta H_1}{L} \cdot l_1; \\ H'_{\text{ТОС}} &= H_{\text{ТОС}} - \Delta H_2 + \frac{\Delta H_2 - \Delta H_1}{L} \cdot l_2, \end{aligned} \right\} \quad (\text{V.1.4})$$

где $H_1, H_2, H_{\text{ТОС}}$ — высоты уровней водомерных постов и ТОС; l_1, l_2 — расстояния по реке от ТОС до водомерных постов.

При разности величин изменения уровней на смежных постах более 10 см высоту ТОС вычисляют из следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} H'_{\text{ТОС}} &= H_{\text{ТОС}} - \Delta H_2 + \frac{H_2 - H_{\text{ТОС}}}{H_2 - H_1} \cdot (\Delta H_2 - \Delta H_1); \\ H'_{\text{ТОС}} &= H_{\text{ТОС}} - \Delta H_1 - \frac{H_{\text{ТОС}} - H_1}{H_2 - H_1} \cdot (\Delta H_2 - \Delta H_1). \end{aligned} \right\} \quad (\text{V.1.5})$$

В высоты точек, по которым строится продольный профиль реки, при необходимости должны быть введены поправки за поперечный уклон водной поверхности, вызванный кривизной русла на данном участке и вращением Земли. Влияние вращения Земли зависит от скорости течения V , широты места φ , ширины реки B и приводит к превышению уровня правого уреза над левым на величину

$$\Delta h_B = (2V \cdot \omega \cdot \sin \varphi \cdot B) / g, \quad (\text{V.1.6})$$

где ω — угловая скорость вращения Земли ($7,29 \cdot 10^{-5}$ 1/с); g — ускорение силы тяжести.

Влияние центробежной силы на поворотах реки определяется по формуле

$$\Delta h_{\text{ц}} = \frac{V^2}{g \cdot R} \cdot B, \quad (\text{V.1.7})$$

где R — средний радиус закругления русла.

Суммарная величина этих поправок может достигать 50 мм.

Примеры глубин выполняются при производстве русловых съемок или определении расходов, для чего на исследуемом участке перпендикулярно к течению реки разбиваются и закрепляются створ-

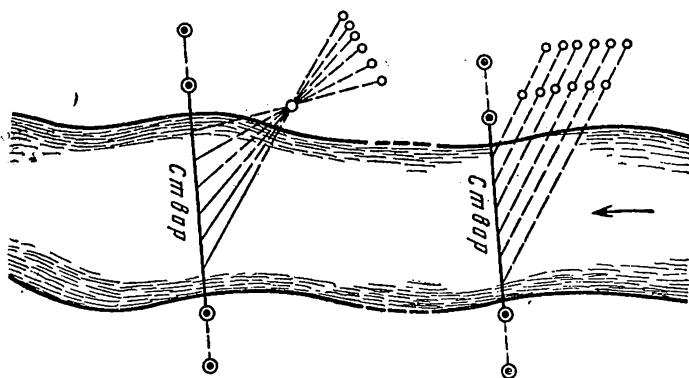


Рис. 129. Схема определения планового положения промерных вертикалей по створным точкам

ТАБЛИЦА 45

Показатель	Марка эхолота			
	ПЭЛ-2	ПЭЛ-3	ИРЭЛ	Кубань
Пределы измерения глубин, м	0,2—40	0,4—200	0,5—20	0,2—20
Масштаб записи на батиграмме	1:100	1:200, 1:1000	1:100	1:100
Число измерений в 1 мин	200	200	200	300
Масса комплекта, кг	102	95	54	20

ными знаками поперечники или гидрометрические створы, вдоль которых ведутся гидрометрические работы. При промерных работах фиксируется на какой-то момент времени урезным колом, с привязкой к реперу, уровень воды, к которому в дальнейшем приводят измеренные значения глубин. Определение планового положения промерных вертикалей производится на несудоходных реках шириной до 100 м по размеченному тросу или по системе створных знаков (рис. 129), а в остальных случаях — геодезическими методами.

Глубины до 5 м измеряют с помощью специальной рейки-наметки, свыше 5 м — ручным лотом или, при скоростях течения реки более 1 м/с, механическим лотом (рыбалотом), обеспечивающим точность измерений около 1 %. Для повышения точности измеренных лотом значений глубин вводят поправку за снос, вычисляемую по показаниям переносного угломера.

При значительных объемах промерных работ используют эхолоты, работа которых основана на принципе ультразвуковой локации. Глубина определяется по регистрации времени t прохождения звукового сигнала от вибратора излучателя до дна водоема и обратно к вибратору-приемнику по формуле

$$h = \sqrt{\left(\frac{Vt}{2}\right)^2 - b^2} + k, \quad (V.1.8)$$

где V — скорость звука в водной среде ($V \approx 1500$ м/с); b — половина расстояния между излучателем и приемником; k — поправка, учитывающая положение излучателей на корпусе судна относительно уровня воды.

Моменты прохождения промерных вертикалей, начала и конца промеров фиксируются на ленте записывающего устройства оперативными отметками.

Технические характеристики основных типов эхолотов, используемых при гидрологических изысканиях, приведены в табл. 45.

Указанные типы эхолотов обеспечивают точность измерения глубин в пределах 2 %. Малогабаритные эхолоты могут быть использованы в зимний период непосредственно со льда при условии введения поправок за счет несовпадения скоростей звука в воде и во льду.

Расстояние между промерными вертикалями зависит от ширины реки и принимается в соответствии с данными, приведенными ниже.

Ширина реки, м	менее 20	20—40	40—100	100—300	300—800	Свыше 800 м
Расстояние между промерными вертикалями, м	1—2	2—3	4—8	10—20	30—40	50

Для приближенного определения глубины на беспроточном участке в месте, где гидрометрические работы в полном объеме не проводятся, достаточно определить ширину реки B , среднюю скорость $V_{\text{ср}}$ и, зная характеристики живого сечения на каком-то гидрометрическом створе, расположенном выше или ниже по течению, можно вычислить среднюю глубину $h_{\text{ср}}$ по формуле

$$h_{\text{ср}} = \frac{h' \cdot B' \cdot V'_{\text{ср}}}{B \cdot V_{\text{ср}}}, \quad (\text{V.1.9})$$

где h' , B' , $V'_{\text{ср}}$ — значения параметров реки, полученные на гидрометрическом створе путем измерений.

Русловые съемки проводятся при изысканиях гидротехнических сооружений и переходов через реки, а также для целей изучения изменений руслового режима и деформаций берегов. В ходе русловых съемок, используя мензульный, тахеометрический методы или аэросъемку, выполняют крупномасштабные съемки береговой полосы до границы, превышающей горизонт высоких вод на 1 м. К точности и детальности съемок береговой ситуации предъявляются пониженные, по сравнению с топографическими планами аналогичных масштабов, требования.

Для обеспечения русловых съемок создается съемочное обоснование в виде нивелирных и теодолитных ходов, с точек которых производится съемка берегов и русловой части. На реках небольшой ширины ходы обоснования прокладываются на одном берегу, при ширине более 150 м — по двум берегам с обязательной взаимной увязкой. Для съемок протяженных участков прокладываются полигонометрические ходы или развиваются триангуляционные сети 1 и 2 разрядов.

В зависимости от стадии проектирования, ширины, особенностей реки съемки выполняют в масштабах от 1 : 10 000 до 1 : 1000. Съемку русла выполняют методами поперечников, косых и продольных галсов.

При методе поперечников комплекс работ аналогичен составу промерных работ на гидрометрическом створе. Для обеспечения необходимой полноты рельефа дна расстояние между поперечниками устанавливается, в зависимости от ширины реки, характера дна и масштаба съемки, равным 20, 25 и 50 м.

На реках с большими скоростями течения используют методы косых (рис. 130, а) и продольных галсов (рис. 130, б), при которых положение промерных вертикалей определяют с точек ходов обоснования прямыми угловыми засечками.

Скорости течения измеряют для изучения режима скоростей и расходов воды. В живом сечении скорости измеряют в зависимости от глубины, ширины реки, характеристик рельефа дна.

Определение приближенного значения скорости течения без полевых измерений производят по формуле Шези

$$V = c \cdot \sqrt{R \cdot i}, \quad (\text{V.1.10})$$

где R — гидравлический радиус; i — уклон водной поверхности. Значение скоростного коэффициента c вычисляют из выражения

$$c = \frac{1}{n} \cdot R^y, \quad (\text{V.1.11})$$

где n — коэффициент шероховатости; y — показатель степени, принимаемый равным $\approx 1,5 \sqrt{n}$ при $R < 1$ м, $y \approx 1,3 \sqrt{n}$ при $R > 1$ м.

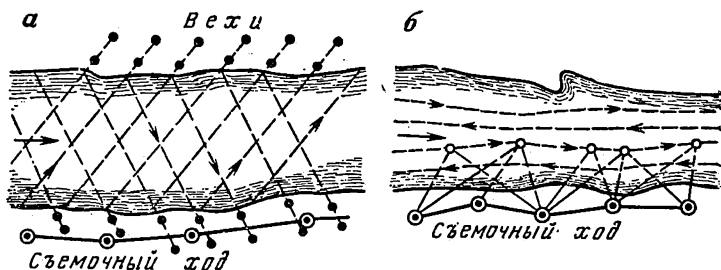


Рис. 130. Схема определения планового положения точек при русловых съемках

Значения гидравлического радиуса в формулах (V.1.10) и (V.1.11) вычисляются по известной площади живого сечения W и величине смоченного периметра P :

$$R = W/P.$$

Основным и наиболее точным методом является измерение скоростей гидрометрическими вертушками. В практике гидрометрических измерений применяются вертушки типа ГР-21М и ГР-55, имеющие сходные технические характеристики: пределы измерения скоростей 0,04—5 м/с, ошибка измерения скоростей 2—6 % (в зависимости от характера потока), глубины измерений на штанге до 3 м, на тросе до 20 м.

До начала работ путем тарирования в лабораторных условиях устанавливается зависимость скорости V потока от скорости вращения лопастного винта n , выражаемая уравнением вида

$$V = V_0 + a \cdot n, \quad (V.1.12)$$

или для начальной криволинейной части тарировочного графика

$$V = b \cdot n + \sqrt{c \cdot n^2 + V_0^2}, \quad (V.1.13)$$

где V_0 — нижний предел измерения скорости, характеризующий чувствительность вертушки; a , b , c — коэффициенты, определяемые при тарировании.

Измерения гидрометрической вертушкой ведут путем подсчета числа оборотов винта N за выбранный отрезок времени Δt , откуда

$$n = N/\Delta t.$$

Установлено, что для определения средней скорости на вертикали достаточно ограничиться определением скоростей в пяти точках на следующих глубинах: у поверхности, на глубине 0,2 H ; 0,6 H ; 0,8 H и у дна. В этом случае среднюю скорость вычисляют как средневесовую по формуле

$$V_{cp} = 0,1 \cdot (V_{пов} + 3V_{0,2H} + 3V_{0,6H} + 2V_{0,8H} + V_{дно}). \quad (V.1.14)$$

При сокращенных программах измерений, летом используют двухточечный (на глубинах 0,2; 0,8 H) или одноточечный (0,6 H) способы;

зимой — трехточечный (0,2; 0,6; 0,8 Н). Вычисления средних скоростей выполняют по формулам

$$V_{\text{ср}} = \frac{V_{0,2H} + V_{0,8H}}{2}; \quad V_{\text{ср}} = \frac{V_{0,2H} + 2V_{0,6H} + V_{0,8H}}{4}. \quad (\text{V.1.15})$$

Для уменьшения влияния пульсаций продолжительность наблюдений устанавливается равной 2—5 мин.

Кроме точечного способа применяют интеграционное измерение средних скоростей, сущность которого заключается в перемещении вертушки по вертикали или по горизонтали в плоскости живого сечения.

Число скоростных вертикалей устанавливается в зависимости от ширины реки:

Ширина реки, м		2—5	5—20	20—100	100—300
Число вертикалей	, ...	3	5	7	9

Продолжение

Ширина реки, м		300—600	600—1000	Более 1000
Число вертикалей		11	13	15—20

Метод поверхностных поплавков используется на участках, где вертушки не могут быть применены. Скорость определяется по времени прохождения поплавков через три разбитых на участке створа (верхний, главный и нижний), расстояние между которыми известно. Длина участка поплавокных измерений принимается по данным, приведенным ниже:

Ширина русла, м		До 200	До 500	Свыше 500
Длина участка измерений, км		0,5—1	1—2	2—3

Среднюю скорость течения по измеренной поверхностной вычисляют по формуле

$$V_{\text{ср}} = 0,85 \cdot V_{\text{пов}}. \quad (\text{V.1.16})$$

Для определения местоположения поплавков на створе их положение определяют теодолитом угловой засечкой или с высокого берега способом вертикального угла, а также при помощи мензулы. Наблюдения ведут при ветре скоростью не более 5 м/с. Точность метода составляет 10—15 % от величины скорости.

Расход водотока Q , характеризуемый объемом воды, протекающей через живое сечение за единицу времени, определяют по формуле

$$Q = W \cdot V_{\text{ср}}. \quad (\text{V.1.17})$$

Расходы определяют аналитическим, графоаналитическим или графомеханическим методами.

В аналитическом методе по измеренным значениям средних скоростей V_i и глубин водотока h_i , зная расстояние между промерными вертикалями b_i , определяют расход по формуле

$$Q = \frac{h_1 \cdot V_1}{4} \cdot b_1 + \frac{h_1 + h_2}{2} \cdot \frac{V_1 + V_2}{2} \cdot b_2 + \dots + \frac{h_n \cdot V_n}{4} \cdot b_{n+1}. \quad (\text{V.1.18})$$

Слагаемые формулы (V.1.18) характеризуют величину частичного расхода, т.е. расхода через площадь, ограниченную смежными вертикалями.

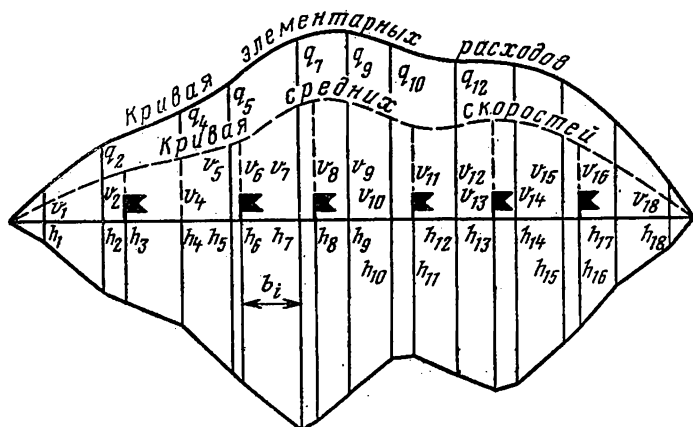


Рис. 131. Профиль живого сечения и его характеристики

При графоаналитическом методе по данным промерных работ строят профиль живого сечения и по результатам измерения скоростей — кривую средних скоростей (рис. 131). Определив по графику скорости на всех промерных вертикалях, вычисляют значения элементарных расходов q , как произведения глубины на скорость

$$q_i = h_i \cdot v_i. \quad (V.1.19)$$

Общий расход вычисляют по формуле

$$Q = k_1 \cdot q_1 \cdot b_1 + \sum_{i=1}^n \frac{q_i + q_{i+1}}{2} \cdot b_i + k_2 \cdot q_n \cdot b_{n+1}, \quad (V.1.20)$$

где значения коэффициентов k_i принимаются в зависимости от характера берега в пределах 0,5—0,9.

Графомеханический метод определения расходов заключается в построении по вычисленным значениям q , графика элементарных расходов и определении его площади планиметром.

В ходе гидрометеорологических изысканий по топографическим картам, масштабы которых выбирают в зависимости от размера реки и рельефа водосбора, определяют основные гидрографические характеристики: площадь водосбора F (км²), длину главного водотока L (км), средний уклон водосбора $I_{ср}$ и среднюю высоту $H_{ср}$ водосбора по формулам

$$I_{ср} = h \left(\frac{L_0 + L_1}{2} + \frac{L_1 + L_2}{2} + \dots + \frac{L_{n-1} + L_n}{2} \right) / F; \quad (V.1.21)$$

$$H_{ср} = (H_1 F_1 + H_2 F_2 + \dots + H_n F_n) / F,$$

где L_i — длины горизонталей; h — расчетное сечение рельефа; F_i — площади между горизонталями.

V.1.6. Использование аэрометодов при гидрометеорологических изысканиях

Глубины при гидрологических изысканиях на крупных реках, водохранилищах и озерах могут быть определены по материалам аэрофотосъемки.

Фотометрический метод основан на аналитической зависимости между оптической плотностью негатива, связанной с фотографической яркостью водоема, и его глубиной. Для установления этой зависимости необходимо иметь не менее 3 известных опорных глубин с соответствующими им значениями фотографической яркости в этих точках. Задача упрощается, когда на снимках имеются линия уреза, где глубина равна нулю, или точки с относительно большими значениями глубин. Возможно также использование результатов аэрофотосъемки, выполненной синхронно в двух разных зонах спектра (например, в красном и зеленом), что позволяет определять глубины водоемов без непосредственного измерения опорных глубин.

По видимым на аэроснимках контурам дна глубины могут быть определены стереофотограмметрическим методом, при котором необходим учет преломления проектирующих лучей на границе раздела двух сред вода — воздух. Превышение рассматриваемой точки дна над урезом воды (глубина) определяется по формуле

$$h = \frac{H \cdot \Delta p}{N(b + \Delta p)}, \quad (V.1.22)$$

где F — величина, зависящая от значений отстояния изображения определяемой точки от центра снимка, показателя преломления воды относительно воздуха и фокусного расстояния АФА; H , b — параметры фотогафрирования.

Как и в фотометрическом способе, здесь каждая пара снимков должна быть обеспечена как минимум четырьмя высотными опознаками, в качестве которых могут быть использованы контурные точки дна с известными глубинами, а также точки уреза воды.

Возможно использование для определения глубин стереопары, полученной одновременно от двух синхронно работающих АФА, установленных на разных носителях (ведущем и ведомом), расстояние между которыми известно, что исключает необходимость наличия опорных высотных точек. Относительная ошибка определения глубин по аэроснимкам в значительной степени зависит от прозрачности воды и не превышает 10 %, при этом измерения проводят в пределах: фотометрическим способом — до 3—8 м, стереофотограмметрическим — до 5—20 м.

Определение скоростей. На крупных реках и при значительной скорости течения находят применение фотограмметрический метод, при котором выполняется маршрутная аэрофотосъемка исследуемого участка так, чтобы на снимках были изображены оба берега, и, выполнив геодезическую привязку снимков, составляя фотоплан в масштабах 1 : 10 000 или 1 : 5000. С пускового створа выполняют пуск поплавков, обычно в виде круглых щитов диаметром 1,5—2 м, которые фотографируют в повторном залете с интервалом 1—3 мин с обязательной фиксацией времени.

Переноса положение поплавков со снимков на фотоплан, определяют расстояние, пройденное каждым поплавком между двумя моментами фотографирования, и вычисляют поверхностную скорость

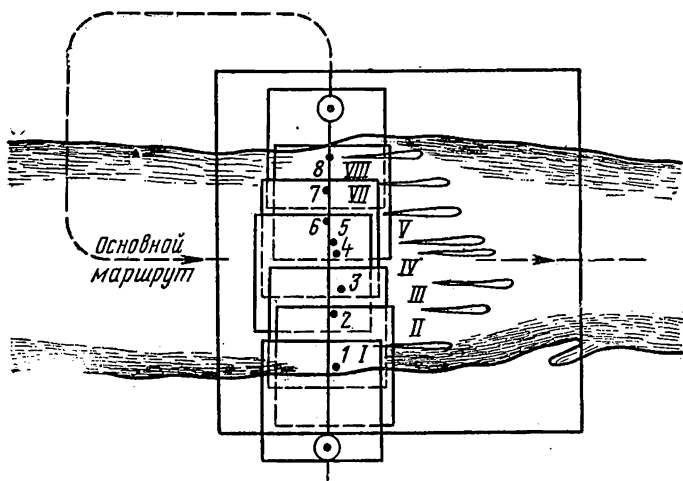


Рис. 132. Определение расхода воды аэрометодом

каждого поплавка и среднюю скорость всей реки на участке. Относительная ошибка метода составляет около 10 %. Направление течения определяется по траектории движения поплавков на фотоплане.

При использовании стереофотограмметрического метода маршрутная съемка участка реки с плавущими поплавками выполняется с продольным перекрытием в 60 %. Измерив на каждой стереопаре величину смещения поплавка l_i , которая аналогична смещению точек снимка под влиянием рельефа и может быть принята за разность продольных параллаксов «псевдоэффекта» за интервал времени Δt , вычисляют значение поверхностной скорости по формуле

$$V_i = \frac{l_i}{\Delta t \cdot f_k} \cdot H \quad (V.1.23)$$

с ошибкой, не превышающей 3—5 %.

Определение расходов. Для оперативного определения расходов успешно могут применяться аэрометоды с использованием донных индикаторов, наполненных легко различимой на поверхности воды жидкостью. Съемка производится в два этапа. Первоначально, пролетая по намеченному гидрометрическому створу, сбрасывают в воду сосуды-индикаторы, количество которых устанавливается в соответствии с числом скоростных вертикалей. Фотографирование на этом, называемом вспомогательным, маршруте производится с периодичностью 2—3 с, обеспечивающей фиксацию на аэроснимках моментов падения индикаторов в воду (точки 1, 2, 3 на рис. 132). В дальнейшем для фиксации мест выхода на поверхность жидкости из индикаторов (точки I, II, III и т. д.) выполняют основной залет по маршруту вдоль реки и производят съемку участка гидрометрического створа с 60-процентным перекрытием снимков в масштабе, обеспечивающем получение на снимках обоих берегов. На снимках

основного маршрута по контурным точкам на берегах выбирают условный створ, измеряют расстояния от него до мест выхода индикаторной жидкости. Восстанавливают выбранный створ на снимках вспомогательного маршрута и определяют расстояния от него до точек падения индикаторов в воду. Вычислив общее расстояние от места падения до выхода индикаторной жидкости L_i , вычисляют элементарный расход на вертикали по формуле

$$q = L_i \cdot V_0, \quad (V.1.24)$$

где скорость всплывания жидкости V_0 устанавливается опытным путем.

По значениям элементарных расходов графоаналитическим или графомеханическим методом по известным расстояниям между сосуда-индикаторами определяют общий расход с точностью 4—5 %. При скоростях течения более 0,5 м, используя приближенные значения глубин, рекомендуется вводить поправки за снос судов по течению.

V.1.7. Геодезические работы при проведении инженерных изысканий

Топографическое обеспечение инженерно-геологических изысканий связано с определением положения объектов изысканий и пунктов производства работ.

Перенос в натуру проекта горных выработок и буровых скважин в зависимости от масштаба инженерно-геологической съемки осуществляется глазомерно (при масштабе 1:25 000 и меньше по контурам) или инструментально проложением теодолитных ходов, засечками, построением геологических сеток. Средняя квадратическая ошибка переноса устанавливается равной 1—2 м относительно пунктов геодезической основы.

При составлении инженерно-геологических карт горные выработки наносятся на карты:

- при М 1:25 000 и меньше по контурам или промерам, а по высоте — интерполированием отметок точек по горизонталям;
- при М 1:10 000 и крупнее по вычисленным координатам с ошибкой относительно пунктов обоснования 0,2 мм в масштабе плана.

Точность высотной привязки выработок характеризуется величинами 0,3—1 м и зависит от их назначения. При гидрогеологических исследованиях, проводимых с целью определения уровней, режима и уклонов подземных вод, высоты выработок и скважин определяются со средней квадратической ошибкой 10—20 мм, что требует применения геометрического или тригонометрического нивелирования.

При геофизической разведке основной задачей геодезических работ является разбивка точек стояния приборов и определение их координат и высот. Выбор метода создания геодезического обоснования и производства разбивочных работ зависит, как правило, от масштаба инженерно-геологических съемок.

При электроразведке точность геодезических работ определяется точностью определения величины сопротивления и при разбивке мест установки электродов характеризуется относительной ошибкой 1/100. Так как положение профилей и магистралей, по которым проводится электроразведка, впоследствии переносится на отчетную карту, то их ошибка по отношению к пунктам обоснования не должна превышать 10—15 м, а взаимное положение конечных точек профиля должно определяться с ошибкой не более 2 мм в мас-

штабе плана. Высоты точек профиля достаточно определять с ошибкой порядка 2 % от максимальной глубины исследования.

При сейсморазведке осуществляют разбивку точек наблюдений с точностью не ниже 1:300 от заданного расстояния, а привязку к пунктам геодезического обоснования с ошибкой не более 2 мм в масштабе плана. Точность определения высот пунктов взрыва и мест установки сейсмографов зависит от скорости распространения сейсмических волн и устанавливается в пределах 0,3—1,5 м. Таким образом, координаты пунктов могут быть определены по топокарте, а высоты — методом барометрического нивелирования.

Магнитные съемки проводят, как правило, при заблаговременно созданном геодезическом обосновании. На местности разбивают профили или сетку квадратов и по их точкам прокладывают теодолитные ходы. Относительная ошибка расстояния между точками профиля не должна превышать 1:100, а средняя квадратическая ошибка привязки конечных пунктов магистралей — 10 м. Маршрутная магнитная съемка выполняется, в основном, вдоль дорог, просек, по берегам рек, что позволяет выполнить визуальную привязку пунктов к ориентирам, имеющимся на местности и на карте.

В сложных условиях для магнитных съемок масштабов 1:50 000—1:10 000 допускается вешение съемочных профилей по магнитному азимуту. Высотное положение пунктов, как правило, не определяется.

При аэромагнитных съемках точность привязки местоположения самолета должна обеспечить нанесение маршрута полета на топооснову с ошибкой не более 1 мм в масштабе отчетной карты.

Геодезическое обоснование гравиметрических съемок состоит в разбивке на местности пунктов наблюдений, определении их координат и высот и обеспечении учета влияния рельефа местности. Точность геодезических работ зависит от масштаба съемки и сечения изоаномал отчетной карты и устанавливается в соответствии с требованиями табл. 46.

При определении высот зоны пункта наблюдения для вычисления поправок за рельеф местности производят нивелирование по расходящимся лучам на расстояние 100—500 м. При высоте сечения 10^{-2} и $0,5 \cdot 10^{-2}$ мм/с возможно применение барометрического нивелирования с применением микробарометров по характерным точкам рельефа.

Наиболее точными геодезическими работами, проводимыми при инженерно-геологических изысканиях, являются наблюдения за смещениями и осадками районов развития физико-геологических процессов.

Наблюдения за просадочными явлениями производят одновременно на нескольких участках, различающихся по геологи-

ТАБЛИЦА 46

Масштаб съемки	Сечение изоаномал, мм/с ²	Средняя квадратическая ошибка определения относительно исходных пунктов	
		координат, м	высот, м
1:200 000—1:100 000	$2 \cdot 10^{-2}$	80	2,5
1:100 000—1:50 000	$1 \cdot 10^{-2}$	40	1,0
1:50 000—1:25 000	$0,5 \cdot 10^{-2}$	20	0,5
1:10 000—1:5 000	$0,25 \cdot 10^{-2}$	5	0,25
1:2000—1:1000	$1 \cdot 10^{-3}$	2	0,15

ческим и гидрогеологическим условиям. Состав геодезических работ связан с периодическим нивелированием системы реперов, расположенных на взаимно перпендикулярных створах. Наблюдения ведутся в течение длительного времени с обязательной фиксацией гидрогеологических параметров и продолжаются в период возведения и эксплуатации сооружений.

Развитие карстовых процессов оценивается также путем периодического нивелирования системы реперов, закрепленных по створам или контуру подверженного суффозии участка. Карстовые формы рельефа (естественные колодцы, шахты, замкнутые овраги и др.) хорошо дешифрируются на аэроснимках и позволяют определить зоны, охваченные этим процессом.

Наблюдения на оползневых участках ведутся для определения мер защиты сооружений и прогнозирования развития этого процесса и включают определение плановых и высотных смещений как тела самого оползня, так и возводимых на нем сооружений. Значения средних квадратических ошибок определения смещения относительно опорных пунктов устанавливаются следующие:

- для оползневых массивов 50 мм в плане, 10 мм по высоте;
- для сооружений на оползне 10 мм в плане, 2 мм по высоте.

Методы наблюдений за оползнями изложены в разделе V.2.7.3.

При геоморфологических изысканиях по топографическим материалам или результатам специальных съемок определяют геоморфологические показатели района строительства, в том числе:

— среднюю высоту топографической поверхности, для чего участок площадью P разбивают на n площадок с площадями P_i и отметками центра тяжести каждой площади H_i . Значение средней высоты вычисляют по формуле

$$H_{\text{ср}} = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^n H_i \cdot P_i; \quad (\text{V.1.25})$$

— средний уклон местности по измеренным длинам горизонталей l_i и высоте сечения рельефа h_0 — по формуле

$$i_{\text{ср}} = \frac{h_0}{P} \sum_{i=1}^n l_i; \quad (\text{V.1.26})$$

— площадь топографической поверхности, которая при известных углах наклона элементарных поверхностей v_i и площадях их горизонтальных проекций S_i определится как

$$P_T = \sum_{i=1}^n S_i \cdot \sec v_i. \quad (\text{V.1.27})$$

При гидрометеорологических изысканиях, определении гидрометрических характеристик живого сечения и русловых съемок основной объем геодезических работ связан с определением планового положения промерных и скоростных вертикалей и поплавков.

Наиболее распространенным является метод прямых засечек, который выполняется с пунктов геодезического обоснования или, при работах на гидрометрическом створе, с базиса b_i , разбитого на берегу перпендикулярно к створу (рис. 133). Для контроля

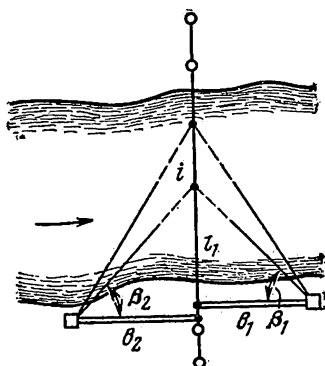


Рис. 133. Схема засечки промерной вертикали

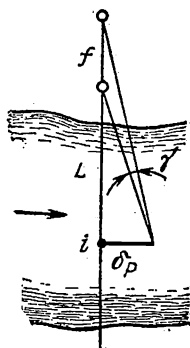


Рис. 134. Схема определения чувствительности створа

рекомендуется измерить второй базис и засечку точек измерений производить одновременно двумя теодолитами. Точность производства полевых работ (средние квадратические ошибки измерения базиса m_b и измерения угла m_β) устанавливается на основании формул

$$\left. \begin{aligned} m_b &= \frac{m_P}{\sqrt{2} \cdot \operatorname{tg} \beta_i} ; \\ m_\beta &= \frac{m_P \cdot \cos^2 \beta_i \cdot \rho}{\sqrt{2} \cdot b_i} , \end{aligned} \right\} \quad (\text{V. 1. 28})$$

где m_P — средняя квадратическая ошибка определения планового положения промерной вертикали, равная 0,5—1 м; обычно принимается равной $m_{b_i} = \frac{1}{1000} - \frac{1}{2000}$; $m_{\beta_i} = 1' - 3'$.

Положение промерных вертикалей при использовании метода засечек может быть определено графически с помощью мензулы. Этот способ обеспечивает оперативное определение взаимного положения отдельных вертикалей, контроль частоты их выполнения. Его существенным недостатком является низкая точность при значительных скоростях движения промерного судна.

При допустимых ошибках определения положения промерных точек до 10 м может быть использован метод обратной засечки с промерного судна путем измерения секстантом угла между направлениями на створные знаки и пункт обоснования на берегу.

На небольших реках, где на дно можно установить дальнометрическую рейку, используют оптические дальнометры. При работах на гидрометрических створах и производстве русловых съемок существенное влияние на качество съемки рельефа оказывают ошибки в положении промерных точек из-за их отклонения от створных линий, зафиксированных вехами. При проектировании гидрометрических работ расстояние между створными знаками (рис. 134) устанавливает-

ся исходя из допустимой ошибки планового положения промерной точки δ_P и определяется по формуле

$$f = \frac{L^2 \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\delta_P - L \cdot \operatorname{tg} \gamma}, \quad (\text{V.1.29})$$

где γ — угловая величина чувствительности створа, принимаемая равной удвоенной величине разрешающей способности глаза ($\gamma = 2^\circ$); L — расстояние от промерной точки до створного знака. Величина ошибки δ_P принимается не превышающей 1 мм в масштабе съемки.

При больших объемах промерных работ, когда измерения глубин ведутся эхолотами, для определения плановых координат применяют радиодальномерную систему радиолог, состоящую из задающей радиостанции, установленной на судне, и двух отражающих, закрепленных на берегу. Речной радиолог снабжен автоматическим прокладчиком, обеспечивающим графическое построение курса судна в масштабах 1:2000, 1:5000 и 1:10 000. Геодезическое обеспечение метода связано с привязкой точек установки отражающих радиостанций к пунктам геодезического обоснования и проложением радиодальномерных магистралей между ними. Пункты радиомагистрали устанавливают вдоль берегов на расстоянии друг от друга, равном 10—20-кратным интервалам между галсами. Промерные работы всегда начинают и завершают на пунктах радиомагистрали, координаты которых определены.

Эффективным является использование при речных съемках радиомензулы, принцип действия которой основан на использовании полярного способа определения координат. Полярный угол устанавливается вращением кипрегеля вокруг фиксированной точки, а расстояние, измеренное радиодальномером, автоматически откладывается на его линейке. Средняя квадратическая ошибка метода не превышает 3—5 м. При составлении продольного профиля, для высотного обеспечения участка, вне зоны затопления паводковыми водами прокладывают по одному берегу, а для рек шириной более 500 м — по обоим берегам нивелирный ход, закрепляемый через 5—7 км постоянными и через 2—3 км временными реперами. Для рек длиной 200—300 км прокладывают ходы III класса, для крупных рек — II класса. Рабочие ходы для определения урезов длиной l_i (см. рис. 127) прокладывают как висячие в прямом и обратном направлениях. Средняя квадратическая ошибка m_h определения величины падения уровня между ТОС устанавливается в зависимости от величины падения водной поверхности на участке между двумя определяемыми урезами и может быть подсчитана по формуле

$$m_h = \sqrt{\eta_1^2 L + \eta_2^2 (l_1 + l_2) + 2m_\phi^2}, \quad (\text{V.1.30})$$

где η_1 , η_2 — средние квадратические ошибки определения превышений на 1 км соответственно в магистральном и рабочих ходах; m_ϕ — средняя квадратическая ошибка фиксации воды, принимаемая равной 5 мм.

Требуемая точность определения величины падения устанавливается на основании гидрологических расчетов и обычно принимается равной

$$m_{h_p} = 0,072 h. \quad (\text{V.1.31})$$

Вычисленная по формуле (V.1.30) ошибка не должна превышать требуемой, т. е. $m_h \leq m_{h.p.}$. Значения η_i принимают в 2,5 раза меньше предельного: для II класса — 2 мм, для III — 4 мм, для IV — 8 мм и для технического нивелирования — 20 мм. На практике точность рабочих ходов, как правило, устанавливается на класс ниже точности магистрального.

V.1.8. Стадии проектирования и состав проектных документов

Строительство инженерных сооружений ведется на основании проектов, представляющих собой комплекс документов, разработанных на основе материалов инженерных изысканий. В ходе проектирования обосновывается техническая и экономическая целесообразность строительства, обеспечивается выбор местоположения и методов возведения сооружений.

Проектирование предприятий, зданий и сооружений осуществляется на основе утвержденных в установленном порядке схем развития и размещения отраслей народного хозяйства и отраслей промышленности и схем развития и размещения производительных сил по экономическим районам и союзным республикам, разработанным на период не менее чем на 15 лет. Через каждые 5 лет в эти схемы вносятся необходимые уточнения и составляются схемы на новое пятилетие. При разработке схем основной задачей является выявление наиболее рационального использования всех ресурсов данной территории.

Проектирование объектов жилищно-гражданского назначения ведется на основе схем развития и проектов районной планировки.

Проектные работы должны обеспечить реализацию в строящихся объектах достижений науки и техники, высокую эффективность капитальных вложений и рациональное использование природных ресурсов и земель. Различают индивидуальные, повторно применяемые и типовые проекты.

Индивидуальные проекты составляют только для сооружений со сложным конструктивным решением или новой технологией производства. Для их разработки производят допроектные технико-экономические обоснования.

Важнейшим направлением в проектировании является типизация проектных решений на базе унификации объектно-планировочных, конструктивных и технологических решений. Строительство по типовым проектам обеспечивает максимальную экономическую эффективность проектных и строительных работ и ведется для производственных сооружений со стабильной технологией, жилых и общественных зданий. Использование типового проекта в конкретных условиях обеспечивается привязкой проекта, т. е. внесением в чертежи ряда изменений, вызванных новыми геологическими и гидрометеорологическими факторами.

Проектирование проводится*:

в одну стадию — рабочий проект со сводным сметным расчетом стоимости — для предприятий, зданий и сооружений, строительство которых будет осуществляться по типовым и повторно применяемым проектам, а также для технически несложных объектов;

* Инструкция о составе, порядке разработки, согласования и утверждения проектно-сметной документации на строительство предприятий, зданий и сооружений. СН 202—81. М., Стройиздат, 1982.

в две стадии — проект со сводным сметным расчетом стоимости и рабочая документация со сметами — для других объектов строительства, в том числе крупных и сложных.

Стадийность разработки проектно-сметной документации устанавливается заказчиком в задании на проектирование.

Проект состоит из вводного раздела, выполняемого в форме общей пояснительной записки, и трех основных частей: технологической, строительной и экономической. Ситуационные планы размещения сооружений с указанием существующих и проектируемых коммуникаций и сетей, а также схема генерального плана с выделением очередности строительства объектов приводится в пояснительной записке.

Технологическая часть содержит обоснование решений по технологии производства, принципиальные решения по научной организации труда. Основными чертежами, используемыми в этой части, являются принципиальные схемы технологии, схемы грузопотоков и сетей.

Строительная часть содержит основные архитектурно-строительные решения, выполненные в виде планов, разрезов, фасадов, схем трасс линейных сооружений, планов и профилей внутриплощадных сетей.

На стадии проекта разрабатывается и раздел организации строительства, состав, объем и содержание которого устанавливаются существующими нормативами. В качестве основных в этот раздел включаются проекты организации строительства (ПОС) и проекты производства работ (ППР). На основании утвержденного проекта производится составление рабочей документации.

В состав рабочей документации входят рабочие чертежи, ведомости объемов строительных и монтажных работ, спецификации на оборудование и потребные материалы. По содержанию рабочие чертежи разделяются, в зависимости от вида работ, для выполнения которых они предназначены, на чертежи строительно-монтажных работ, чертежи установки технологического оборудования и чертежи сетей снабжения и систем управления.

Рабочий проект на строительство технически несложных объектов и сооружений, возводимых по типовым или повторно применяемым проектам, в своей пояснительной записке кроме общих и технологических сведений, показателей и характеристик содержит ситуационные планы размещения по отдельным зонам, генеральные планы, в том числе инженерных коммуникаций и решения рельефа территории строительства. В разделе организации строительства разрабатывается ПОС и ППР.

Проекты производства работ разрабатывают с учетом организационно-технических решений, заложенных в проектах организации строительства. В ППР определяют технологию, сроки и порядок выполнения строительно-монтажных работ, уточняют строительный генеральный план. На все основные виды строительно-монтажных работ составляют технологические схемы на простые работы и технологические карты на сложные.

В ПОС несложных объектов должны быть отражены указания по составу, точности, методам и порядку построения геодезической разбивочной основы, а ППР включает схемы размещения знаков для выполнения геодезических построений, и геодезического контроля положения конструкций, а также указания по точности геодезических измерений и перечень необходимых для этого средств. Для всех остальных сооружений в составе ППР разрабатывается

специальная часть или составляется отдельный проект производства геодезических работ (ППГР).

Рабочие чертежи являются проектными документами, широко используемыми как при геодезической подготовке территории строительства, так и при геодезическом обеспечении возведения зданий и сооружений. В состав рабочих чертежей входят архитектурно-строительные чертежи (фасады, планы, разрезы), схемы фундаментов, несущих конструкций и технического оборудования, чертежи отдельных конструктивных элементов.

На планах зданий (сооружений), выполняемых по разрезу горизонтальной плоскостью, проходящей на уровне $1/3$ изображаемого этажа (или 1 м над ним), наносят и указывают координационные оси, расстояния между ними, отметки участков, уклоны пола, толщину стен, перегородок и т.п. и их привязку. На разрезах указывают оси и расстояния между ними, отметки уровня земли, чистого пола этажей, конструктивных элементов, размеры и привязку (по высоте) стен, проемов, отверстий. Цифрами обычно обозначают координатные оси по стороне сооружения с большим количеством осей. Условные обозначения на рабочих чертежах устанавливаются согласно ГОСТ «Условные изображения элементов зданий, сооружений и конструкций».

Разработка проектов осуществляется в соответствии с действующими нормативными документами по строительству, среди которых основными являются главы строительных норм и правил (СНиП) и разрабатываемые в качестве дополнения к ним «Строительные нормы» (СН), которые содержат конкретизированные показатели и требования в соответствии с назначением проектируемых объектов.

В.1.9. Составление генеральных планов объектов

Важной частью проекта предприятия или сооружения является генеральный план, который представляет собой схему взаимного расположения подземных, наземных и надземных сооружений на выбранном участке строительства. В генеральном плане решаются вопросы организации всей территории в единый функциональный комплекс, обеспечивающий оптимальные условия эксплуатации объекта. Генплан также должен обеспечить увязку расположения сооружений и коммуникаций с рельефом местности и планировочными решениями на площадке.

Основой технических решений, принятых в генеральном плане, являются технология основного производства (для промышленных объектов) или функционально-транспортные связи (для жилищно-гражданских сооружений). Генеральные планы составляются на крупномасштабных топографических планах в принятых условных обозначениях.

Различают проектный, строительный и исполнительный генеральный план. Проектный генплан разрабатывается со степенью детализации, зависящей от стадии проектирования. На плане сооружения и здания наносят по габаритным осям, а инженерные сети — по продольным осям. Проектный генплан составляется для инженерных комплексов и предприятий в масштабах $1:1000$ и $1:500$, а для отдельных зданий $1:500$ — $1:100$. При проектировании создается несколько вариантов решения строительной площадки и затем выполняется их технико-экономическая оценка.

Генеральные планы проектируют графоаналитическим, аналитическим, машинным и модельными методами. При графоаналитическом методе расстояние между отдельными элементами и соо-

ружениями определяются графически с топографического плана, для чего на плане строится сетка квадратов со сторонами от 50 до 400 м, оси которой, как правило, параллельны главным осям проектируемых сооружений. В соответствии с принятой системой строительных координат разрабатываются и рассчитываются на основании генплана разбивочные чертежи для производства геодезических работ.

При аналитическом методе проектирования генпланов расстояния устанавливаются исходя из соответствующих норм проектирования.

Так как при формировании схемы генерального плана требуется учесть большое число факторов, широкое применение находит использование ЭВМ, обеспечивающих составление оптимальных вариантов размещения путем решения задач с некоторой целевой функцией, составленной по функциональным и планировочным требованиям. При решении задач генерального планирования городов и населенных пунктов целесообразно использование для определения оптимального взаимного размещения жилой и производственной зоны методов линейного программирования, основанных на оптимизации транспортных перевозок.

Рабочие чертежи проектного генплана включают, как правило, план зданий и сооружений, план организации рельефа, план земельных масс, сводный план коммуникаций и план благоустройства.

Строительный генплан разрабатывается на основе проектного генплана и служит для решения вопросов размещения временных сооружений, организации работы механизмов. Здесь же указывается очередность производства работ и строительства объектов в основной и подготовительный периоды. Стройгенплан входит в состав проекта организации строительства и детализируется при составлении проекта производства работ. Он является одним из основных документов при разработке проекта производства геодезических работ.

Проект вертикальной планировки состоит из плана организации рельефа (микропланировка) и плана земельных масс (картограмма земельных работ). Определяющим документом проекта является схема вертикальной планировки, составляемая на топографическом плане 1:5000 или 1:2000 (для транспортных сооружений — 1:10 000), на которой проектные решения даются по осям проездов в виде проектных отметок точек пересечения осей и перегибов продольного профиля. На основании схемы проектирование вертикальной планировки осуществляется методом профилей, методом проектных горизонталей или их комбинацией.

Метод профилей используется при проектировании линейных сооружений и заключается в разработке по схеме вертикальной планировки продольных профилей и через 20, 40 или 100 м — поперечных профилей. Для продольных профилей вертикальный масштаб применяют в 10 раз больший, чем горизонтальный, а для поперечных — в 2 раза.

Метод проектных горизонталей заключается в решении проектного рельефа отдельными оформляющими плоскостями, изображенными горизонталями. Сечение проектного рельефа горизонталями зависит от стадии проектирования, рельефа местности и обычно для проектов, составляемых в масштабе 1:2000, принимается равным 0,5—1 м, 1:1000—0,2—0,5 м и 1:500—0,1—0,2 м. Достоинством метода проектных горизонталей является совмещение горизонтального и вертикального решений территории строительства.

Положение проектных горизонталей на плане определяется по

проектным высотам характерных точек перегиба проектного рельефа.

Для составления картограммы и подсчета объемов земляных работ по проектному варианту на генплан с вертикальной планировкой наносят сетку квадратов со сторонами в 10, 25 40 или 50 м и по величинам рабочих отметок, равных разности проектных и фактических высот, вычисляют рабочие отметки углов квадрата. По полученным рабочим отметкам и известным площадям квадратов вычисляют объемы земляных работ.

V.1.10. Разработка проектов производства геодезических работ

Проект производства геодезических работ (ППГР) как проектный документ разрабатывается, как правило, генеральной подрядной организацией, а для сложных и уникальных объектов может быть выполнен специализированными проектными организациями. В ППГР устанавливаются очередность геодезических работ и методы их производства, порядок использования материалов и приборов, потребность в кадрах и мероприятия по контролю качества геодезических работ.

Для составления ППГР используются:

- данные инженерно-геодезических изысканий, выполненных на участке строительства;
- проектные и строительные генеральные планы объекта;
- рабочие чертежи в виде фасадов, планов, разрезов, а также профили сооружений и коммуникаций по их осям;
- чертежи фундаментов, стен, перекрытий и предполагаемого к установке технологического оборудования;
- технические решения по организации строительства, в том числе сетевые графики на строительство объектов и сооружений.

ППГР разрабатывается на основе технического задания и включает в себя пояснительную записку и комплект графических документов. В пояснительной записке указываются:

- исходные данные и основные положения проекта;
- обоснования точности геодезических работ;
- методика и точность построения опорных планово-высотных геодезических сетей;
- методика геодезических работ при возведении подземной и наземной части сооружения;
- методика геодезических работ при монтаже конструкций и технологического оборудования;
- геодезические измерения при контроле за положением сооружения и оборудования в период эксплуатации;
- виды научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

В качестве приложения к ППГР оформляются:

- **схемы** плановых и **высотных** сетей, чертежи геодезических знаков и центров;
- **схемы** зон видимости с учетом их возможных изменений;
- **схемы** производства разбивочных и контрольных измерительных работ;
- заявочные ведомости на приборы, оборудование и материалы.

При разработке ППГР точность геодезических работ при строительстве устанавливается в зависимости от этажности или **высоты**

ТАБЛИЦА 47

№ п/п	Характеристика объектов строительства	Величины средних квадратических ошибок при построении разбивочной сети строительной площадки		
		Угловые измерения, с	линейные измерения	определение превышений на 1 км хода, мм
1	Предприятия и группы зданий (сооружений) на участках более 1 км ² . Отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки 100 тыс. м ²	3	1:25 000	4
2	Предприятия и группы зданий (сооружений) на участках площадью менее 1 км ² . Отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки от 10 до 100 тыс. м ²	5	1:10 000	6
3	Отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки менее 10 тыс. м ² . Дороги, инженерные сети в пределах застраиваемых территорий	10	1:5000	10
4	Дороги, инженерные сети вне застраиваемых территорий. Земляные сооружения, в том числе вертикальная планировка	30	1:2000	15

зданий и сооружений, их конструктивных решений на основании нормативных требований*:

— для работ по созданию разбивочной сети строительной площадки, выполняемой в виде строительной сетки, красных линий или сетей микротриангуляции и трилатерации, по табл. 47;

— для разбивочных работ при возведении сооружений по табл. 48.

При строительстве по проектам, содержащим особые требования к точности обеспечения геометрических параметров, выполняются специальные расчеты.

V.1.11. Обеспечение точности геометрических параметров в строительстве

Важнейшим правилом, определяющим геометрические построения и обеспечивающим типизацию и стандартизацию при проектировании и возведении зданий и сооружений, является обеспечение модульной координации размеров в строительстве (МКРС). Модульная координация предполагает установление всех размеров и габ-

* СНиП 3.0103—84 «Геодезические работы в строительстве». М., 1984.

Класс точности	Характеристика зданий, сооружений и конструкций	Величины средних квадратических ошибок результатов измерений при разбивочных работах			
		Линейные измерения	Угловые измерения, с	Определение превышения на станции, мм	Передача отметок с исходного на монтажный горизонт, мм
1-р	Металлические конструкции с фрезерованными поверхностями. Сборные железобетонные конструкции, монтируемые методом самофиксации в узлах, сооружения высотой более 100 до 120 м с пролетами более 24 до 36 м	$\frac{1}{15\,000}$	5	1	5
2-р	Здания выше 16 до 25 этажей, сооружения более 60 до 100 м или с пролетами более 18 до 24 м	$\frac{1}{10\,000}$	10	2	4
3-р	Здания выше 5 до 16 этажей, сооружения высотой более 16 до 60 м или с пролетами более 6 до 18 м	$\frac{1}{5000}$	20	2,5	3
4-р	Здания до 5 этажей, сооружения высотой до 15 м и с пролетами до 6 м	$\frac{1}{3000}$	30	3	3
5-р	Деревянные конструкции, инженерные сети, дороги, подземные пути	$\frac{1}{2000}$	30	5	10
6-р*	Земляные и временные сооружения	$\frac{1}{1000}$	45	10	20

* Элементы благоустройства и проект вертикальной планировки в натуру по классу 6-р переносятся с точностью линейных измерений 1/500.

ритов кратным величине основного модуля M , за который принимается величина в 100 мм. МКРС предусматривает предпочтительное применение прямоугольной модульной пространственной координационной системы, а в отдельных случаях косоугольных, центральных и других систем.

При назначении координационных размеров объемно-планировочных и конструктивных элементов, определяемых величинами шагов, пролетов, высот этажей зданий и сооружений, наряду с основными применяются следующие производные модули:

укрупненные модули (мультимодули) 60М, 30М, 15М, 12М, 6М, 3М, соответственно равные 6000, 3000, 1500, 1200, 600 и 300 мм;
дробные модули (субмодули) 1/2М, 1/5М, 1/10М, 1/20М, 1/50М, 1/100М, соответственно равные 50, 20, 10, 5, 2 и 1 мм.

Для обеспечения совместимости модульных сеток разных размеров укрупненные модули назначаются из условия, что относительно большие модули всегда кратны наименьшему, используемому в конструкции данного сооружения. Предпочтительным является использование для жилищно-гражданских сооружений группы модулей 3М—6М—12М—60М, а для промышленных — 15М, 30М, 60М.

Определение положения конструктивных элементов, технологического оборудования определяется путем их привязки к координационным осям. Привязка определяется расстоянием от координационной оси до координационной плоскости элемента или геометрической оси его сечения. Вынесенные геодезическими методами и закрепленные в натуре координационные (разбивочные) оси составляют геометрическую основу возводимого сооружения.

Реализация запроектированных геометрических параметров обеспечивается выполнением комплекса геодезических и строительно-монтажных работ, точность которых устанавливается специальными расчетами. Общий принцип расчета по теории размерных цепей состоит в определении суммарных характеристик точности замыкающих звеньев размерных цепей конструкций, в качестве которых могут быть использованы: проектные габариты сооружений или положение их координационных элементов относительно опорных осей, зазоры между элементами, величины площадок опирания, несоосность функционально связанных элементов, превышения между смежными поверхностями, неперпендикулярность конструкций и др.

Функциональность сооружения считается обеспеченной, если в результате принятых при расчете точности решений соблюдается условие

$$\Delta_{\Phi} \geq \Delta_{\Sigma} \quad (V.1.32)$$

где Δ_{Φ} — допуск функционального размера, устанавливаемый нормативными документами; Δ_{Σ} — допуск замыкающего звена, определяемый суммированием допусков составляющих звеньев размерной цепи.

Точность замыкающего звена через величины допустимых отклонений δ_i , устанавливаемых строительными нормами и правилами, выражается формулой

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}, \quad (V.1.33)$$

где составляющими правой части, наряду с технологическими, являются и ошибки геодезических измерений.

Кроме вероятностного метода расчета по формуле (V.1.33), в отдельных случаях при технико-экономической обоснованности может быть использован метод максимума — минимума, реализующий формулу

$$\delta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \delta_i.$$

Решение задачи по определению необходимой точности обеспечения геометрических параметров в строительстве может быть выполнено одним из двух способов:

— прямым, когда по известным значениям ошибок составляющих звеньев определяют допустимое отклонение замыкающего звена или величину функционального допуска;

— обратным, когда по установленному функциональному допуску определяется точность строительно-монтажных и геодезических работ.

Предрасчет точности геодезических работ обычно выполняется путем решения обратной задачи из условия малого влияния геодезических измерений на конечную точность функциональных параметров, определяемого для типовых сооружений формулой

$$\delta_{г.р} = 0,2\delta_{\Sigma}, \quad (V.1.34)$$

где $\delta_{г.р}$ — допустимая ошибка геодезических измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Видуев В. Г., Полищук Ю. В., Инженерные изыскания. Киев, Вища школа, 1979.
2. Генеральный план и транспорт промышленных предприятий/Под ред. И. И. Костина. М., Стройиздат, 1981.
3. Инженерные изыскания в строительстве. Справочник строителя/Под ред. С. П. Абрамова. М., Стройиздат, 1982.
4. Левчук Г. П., Новак В. Е., Лебедев Н. Н. Прикладная геодезия. М., Недра, 1983.
5. Руководство по инженерным изысканиям в строительстве/Т. А. Ларина, С. П. Абрамов, О. В. Слинко и др. М., Стройиздат, 1982.
6. Справочное руководство по инженерно-геодезическим работам/Под ред. В. Д. Большакова и Г. П. Левчука. М., Недра, 1980.

V.2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

А. В. Зацаринный

V.2.1. Общие сведения

Под автоматизацией геодезических работ понимается процесс, при котором функции измерения частично или полностью передаются приборам и автоматическим устройствам.

Для автоматизации геодезических измерений применяют полуавтоматические и автоматические системы и приборы—оптико-электронные, в том числе лазерные, электромеханические, гидронивелиры с автоматическим съемом информации и др.

Все многообразие автоматических измерительных систем разделяют на замкнутые системы (с обратной связью) и незамкнутые (с разомкнутой главной цепью).

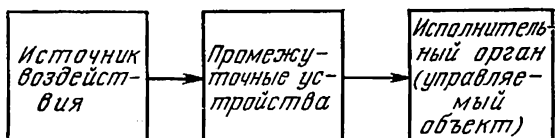


Рис. 135. Схема незамкнутой системы

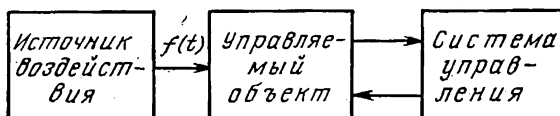


Рис. 136. Схема замкнутой системы

Замкнутые автоматические системы выполняются в виде систем автоматического регулирования, следящих систем, вычислительных систем, компенсационных систем измерения и др.

Наиболее перспективными в силу их высокой точности и широких функциональных возможностей являются следящие системы, предназначенные для измерения величин, изменяющихся по произвольному закону. Следящая система автоматически регистрирует изменение контролируемого параметра (например, величины деформации сооружения), меняющегося по любому произвольному закону, заранее неизвестному, как правило, без механической связи между задающим и исполнительными элементами.

На рис. 135, 136 в общем виде изображены схемы незамкнутой и замкнутой систем.

Независимо от структуры построения автоматической измерительной системы каждая из них содержит главный элемент — измерительный преобразователь (датчик), воспринимающий и преобразующий контролируемую (измеряемую) величину в электрический сигнал, удобный для дистанционной передачи и дальнейшей обработки.

Датчики, применяемые для автоматизации геодезических измерений, различают по назначению, принципу действия, конструкции и т. д.

Датчик может иметь простую или сложную структурную схему, но основным его элементом является чувствительный элемент, первым воспринимающий измеряемую величину и преобразующий ее к виду, удобному для дальнейшей обработки.

Основные характеристики датчиков:

— статическая характеристика — зависимость выходной величины $x_{\text{вых}}(t)$ от входной $x_{\text{вх}}(t)$ при установившемся режиме

$$x_{\text{вых}}(t) = F[x_{\text{вх}}(t)];$$

— крутизна статической характеристики

$$K = \frac{dx_{\text{вых}}(t)}{dx_{\text{вх}}(t)};$$

— порог чувствительности — минимальное изменение входной величины, которое может быть воспринято последующими элементами

ми измерительной схемы и вызвать изменения полезного выходного сигнала;

— мощность на входе и выходе.

Для автоматизации геодезических измерений широкое применение нашли фотоэлектрические, индуктивные, емкостные, потенциометрические и другие типы датчиков.

При производстве геодезических работ информацию об объекте измерения можно в ряде случаев получать контактным способом (датчик непосредственно связан с объектом измерения, например, струной, штангой и т. п.) или бесконтактным (при помощи оптического луча).

Точность и надежность работы автоматической геодезической измерительной системы во многом определяется построением структурной схемы ее электронной части, выбором элементов, в том числе и регистрирующего устройства.

В зависимости от назначения автоматической системы и решаемой задачи автоматические регистраторы могут выполняться в двух вариантах: в виде различных аналоговых или дискретных приборов, в том числе цифропечатающих и систем записи информации на магнитной ленте, или в виде систем отображения информации [1].

К приборам первой группы относятся самопишущие вольтметры, амперметры, цифропечатающие устройства и др.

Отображение информации в современных автоматических измерительных системах может осуществляться с помощью различных индикаторных устройств, дисплеев, табло, планшетов и других, содержащих различного рода счетные устройства — цифровые индикаторы, позволяющие получать количественные показатели.

V.2.2. Принципы построения датчиков для автоматизации измерений

V.2.2.1. Фотоэлектрические датчики

Использование фотоэлектрических датчиков при производстве геодезических работ предполагает наличие специального устройства, создающего оптическим лучом референтную световую линию или плоскость, относительно которой при помощи датчика выполняют измерения (например, нивелирование, определение деформаций и др.).

Принцип действия фотоэлектрических датчиков основан на преобразовании лучистой энергии в электрический сигнал в соответствии с характером выполняемых измерений.

Фотоэлектрический датчик, как правило, содержит чувствительный элемент, состоящий из координатора и приемника лучистой энергии (ПЛЭ), назначение которых состоит в первичном преобразовании информации об измеряемой величине в электрический сигнал.

Для автоматизации измерений в геодезии широкое применение нашли амплитудные, амплитудно-фазовые, время-импульсные, число-импульсные, поляризационные и другие типы фотоэлектрических датчиков.

Фотоэлектрические датчики для измерения линейных перемещений. Датчики амплитудного и амплитудно-фазового типа. Принцип действия простейшего датчика амплитудного типа [1] поясняется рис. 137. Такой датчик состоит из светоделительной призмы 1, двух конденсаторов 2 и двух приемников 3 лучистой энергии. При смещении ребра делительной призмы с оптической оси светового луча происходит перераспределение световой энергии в обоих плечах дат-

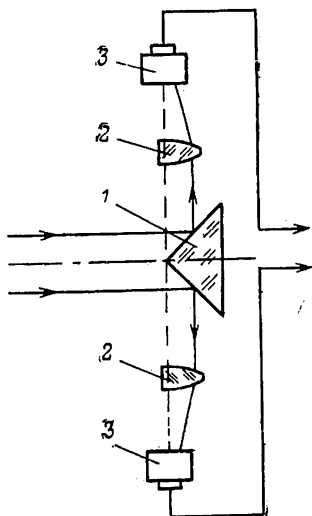
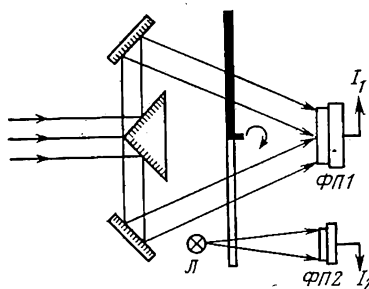


Рис. 137. Схема амплитудного фотозлектрического датчика

Рис. 138. Схема датчика с модуляцией светового потока



чика и разность фототоков $I_1 - I_2$, получаемая в дифференциальной электронной схеме, определяет величину измеряемого перемещения.

С целью повышения помехозащищенности опико-электронной части датчика от влияния фоновых засветок и обеспечения достаточно простыми средствами необходимого усиления электрических сигналов, снимаемых с приемников лучистой энергии, в схему такого датчика вводят модулирующее устройство. На рис. 138 показана схема фотозлектрического датчика с одним информативным ФП1 и вторым опорным ФП2 приемниками лучистой энергии.

Модулятор в таком датчике осуществляет поочередное (со сдвигом по фазе на 180°) прерывание световых потоков в каждом плече датчика, и разностный сигнал $I_1 - I_2$ в виде переменного тока сравнивается по фазе с сигналом опорного канала, создаваемого источником подсветки и вторым приемником лучистой энергии.

Высокую точность измерения линейных перемещений относительно оптической оси светового луча можно достичь амплитудно-фазовыми датчиками, если модуляцию излучения осуществлять непосредственно у излучателя (на передающем устройстве), а в электронную часть датчика (рис. 139) ввести устройство выделения сигналов (УВС) в виде суммы и разности токов от приемников лучистой энергии.

Сравнение в амплитудно-фазовом детекторе (АФД) разностного и суммарного сигналов, фазы которых совпадают или противоположны в зависимости от направления смещения ребра делительной призмы с оптической оси луча, дает возможность выделить информацию о величине и направлении смещения.

Диапазон измеряемых линейных перемещений датчиками рассматриваемого типа ограничен диаметром светового луча и размерами светоделильной призмы, а точность во многом зависит от равномерности распределения энергии по сечению светового луча и может достигать величины порядка $0,01 - 0,05$ мм.

Датчик время-импульсного типа. Принцип действия время-импульсных датчиков линейных перемещений основан на измерении

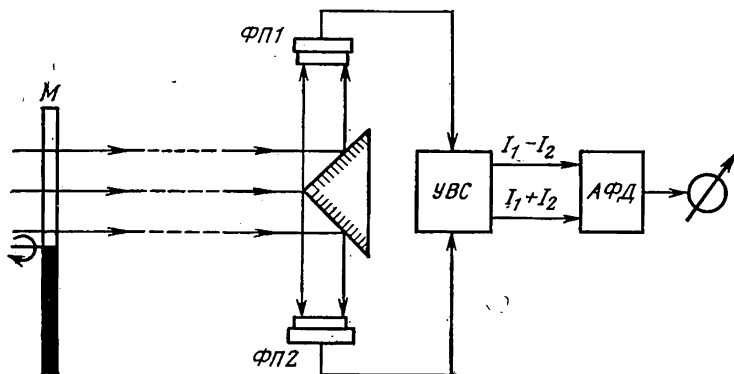


Рис. 139. Схема амплитудно-фазового датчика

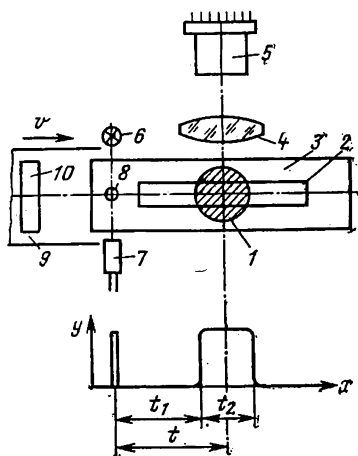


Рис. 140. Схема время-импульсного датчика

длительности серии импульсов, характеризующих перемещение объекта измерения [3].

Время-импульсный датчик, в котором используют сканирующую щель для измерения линейных смещений, показан на рис. 140.

Датчик содержит экран 3 с горизонтальной прямоугольной щелью 2, за которым равномерно со скоростью v перемещается непрозрачная шторка 9, содержащая прямоугольную щель 10.

Лампочка подсветки 6, отверстие 8 и фотодиод 7 предназначены для формирования опорного импульса начала отсчета. Конденсор 4 и фотоприемник 5 (ФЭУ) служат для приема излучения 1 от источника света, формирующего в пространстве референтную линию.

При равномерном движении щели 10, например слева направо, вначале формируется импульс от фотодиода 7, а затем видеосигнал от ФЭУ. Время t соответствует интервалу от момента формирования переднего импульса от фотодиода 7 до середины видеосигнала от ФЭУ. Время t_1 — интервал между передними фронтами импульсов от фотодиода и ФЭУ, t_2 — длительность видеосигнала.

Если через x обозначить координату центра светового пятна на экране, то $t=x/v$. С учетом длительности t_2 импульса видеосигнала и временного интервала t_1 время t можно представить как

$$t = t_1 + \frac{t_2}{2}.$$

Как видно из последнего уравнения, задача определения координаты $x=vt$ светового пятна сводится к нахождению суммы времени t_1 и $t_2/2$. Точность определения координаты x в таком время-импульсном датчике в первую очередь определяется точностью измерения времени t и постоянством скорости перемещения шторки. Высокой точности измерения времени t можно достичь, применяя число-импульсные пересчетные схемы, управляемые фронтами импульсов время-импульсного датчика.

В отличие от амплитудных и фазово-амплитудных датчиков, время-импульсные датчики линейных смещений обладают при сравнительно высокой точности ($\approx 0,05$ мм) более широким диапазоном измеряемых перемещений ($\approx$ до ± 100 мм).

Число-импульсные датчики. Принцип действия число-импульсных датчиков основан на подсчете разности числа импульсов, вырабатываемых оптико-электронной частью датчика в соответствии с характером выполняемых измерений.

Упрощенная схема число-импульсного датчика показана на рис. 141. Он состоит из цилиндрической линзы 1, координатора 2 с двумя щелями в виде спиралей Архимеда, разнесенных по положению на 180° , двух зеркал 3, 4, конденсоров 5, 6, приемников 7, 8 лучистой энергии, электропривода диска координатора, электронного блока 9 и регистратора 10.

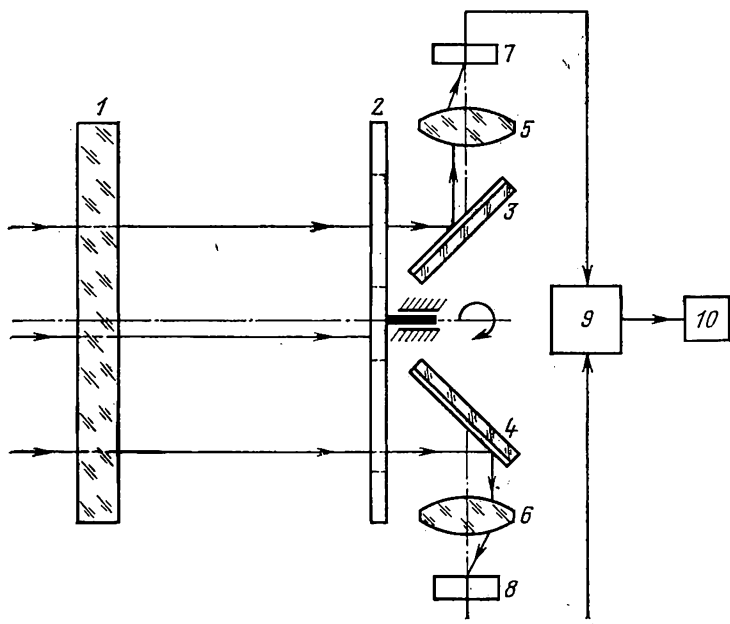


Рис. 141. Схема число-импульсного датчика

Координатор 2 расположен в фокальной плоскости линзы 1. Цилиндрическая линза фокусирует световой луч, задающий референтную линию, в световой штрих и при вращении диска координатора его щели сканируют одновременно две половины этого светового штриха. Конденсоры 5 и 6 собирают на чувствительные площадки приемников 7 и 8 световые пучки, проходящие сквозь щели координатора при его вращении, и на выходе приемников излучения возникают импульсы, длительность которых пропорциональна времени сканирования каждой щелью координатора своего полштриха.

Для точного определения длительности этих импульсов осуществляют модуляцию светового луча по амплитуде непосредственно на выходе источника излучения, создающего референтную линию, с частотой, большей на 2—3 порядка, чем частота вращения координатора.

В этом случае сигналы, снимаемые с приемников лучистой энергии, будут представлять собой пачки импульсов. Если световой штрих, создаваемый цилиндрической линзой на диске координатора, располагается симметрично относительно оси координатора (отсутствует смещение базовой точки датчика относительно оптического луча), то разность $N_1 - N_2$ числа импульсов в пачках окажется равной нулю. При смещении светового штриха относительно оси вращения диска координатора число импульсов в пачках, снимаемых с приемников 5, 6, окажется различным и их разность $N_1 - N_2$ будет пропорциональна величине этого смещения, а знак разности определит направление смещения.

Подсчет разности числа импульсов в датчиках такого типа выполняет специальное электронное устройство.

Такие число-импульсные датчики обеспечивают в диапазоне линейных перемещений ± 30 мм точность измерения около 0,01 мм при частоте модуляции светового луча 1000 Гц.

Фотоэлектрические датчики для измерения угловых смещений. Для дистанционного измерения угловых смещений (в частном случае наклонов) конструктивных элементов объектов при монтаже технологического оборудования могут использоваться угломерные фотоэлектрические датчики.

Такие датчики по принципу выделения информации подразделяют на амплитудно-фазовые, фазовые, частотные и др. Ниже рассмотрены некоторые принципы их построения.

Измерение угловых смещений объектов относительно референтного направления, создаваемого оптическим лучом, можно осуществлять двумя способами — по схеме прямого измерения, когда излучатель и фотоэлектрический угломерный датчик располагаются на расстоянии друг от друга, причем датчик закрепляется на объекте измерения, а излучатель на жестком реперном основании, и по автоколлимационной схеме, когда излучатель и датчик совмещены в одном приборе, а информация о поведении объекта измерения, содержащаяся в оптическом луче, направляется в прибор от пассивного отражателя, закрепляемого на объекте измерения.

Фотоэлектрические датчики для измерения угловых смещений объектов могут выполняться в виде простых позиционно-чувствительных устройств, дающих информацию о появлении угловых смещений или в виде следящих угломерных систем, не только сигнализирующих об угловых смещениях, но и измеряющих их величину и направление.

Основным элементом любой фотоэлектрической угломерной системы является позиционно-чувствительный датчик, который создает на выходе сигнал, соответствующий рассогласованию между опти-

ческой осью устройства и направлением на объект измерения.

Для сбора лучистой энергии от излучателя и направления ее на светочувствительный элемент позиционно-чувствительного датчика в угломерных устройствах в большинстве случаев применяют объективы. В датчиках могут применяться линзовые, зеркальные, зеркально-линзовые объективы.

От величины фокусного расстояния объектива и диаметра входного зрачка зависят угол поля зрения системы и начальный сигнал рассогласования на позиционно-чувствительном датчике.

При работе с точечным излучателем или с излучателем, создающим пучок лучей, близкий к параллельному (например с лазером), при появлении на входе системы углового рассогласования α линейное перемещение центра изображения излучателя в фокальной плоскости объектива определяется величиной $f'\alpha$ (для малых углов α). Таким образом, объектив, являясь первичным преобразователем входной информации, позволяет при угловых измерениях перейти от непосредственного измерения угла к измерению линейных смещений центра создаваемого им изображения на позиционно-чувствительном датчике.

Комбинация элементов — объектив плюс позиционно-чувствительный датчик — дает возможность вести измерение угловых смещений объекта, на котором расположен излучатель, с высокой точностью, однако в ограниченном угловом диапазоне. Расширение диапазона измерений часто приводит к нелинейности статической характеристики датчика. Поэтому схема угломерных устройств с компенсацией взаимного положения нуля-органа позиционно-чувствительного датчика и изображения излучателя является наиболее распространенной.

Компенсация может осуществляться непосредственным перемещением нуля-органа позиционно-чувствительного датчика или коррекцией положения изображения излучателя в фокальной плоскости объектива за счет использования оптико-механических, электрооптических и других видов компенсаторов.

Измерение величины углового рассогласования на входе угломерного датчика осуществляется специальным отсчетным приспособлением, кинематически или электрически связанным с компенсатором.

Позиционно-чувствительный датчик в целом при такой схеме измерения выполняет роль нуля-индикатора.

На рис. 142 представлена функциональная схема амплитудной углоизмерительной следящей системы (УСС).

Она включает в себя объектив 1, оптико-механический компенсатор 2, светоразделительную призму 3, отражающие пентапризмы 4, модулятор (механический obturator) 5, две ромбические призмы 6, приемник лучистой энергии 7, источник подсветки 8, конденсор 9, приемник лучистой энергии 10, электронные усилители 11, 12, исполнительный электродвигатель 13, редуктор 14, регистратор 15.

При появлении на входе УСС углового рассогласования между референтным направлением, задаваемым оптическим лучом, и оптической осью УСС происходит смещение кружка рассеяния в фокальной плоскости объектива 1 с разделительной грани блока 3. Величина этого углового рассогласования преобразуется в разность световых потоков $\Phi_1 - \Phi_2$, направляемых пентапризмами 4 в сравнивающее устройство, obturator 5 которого поочередно модулирует их и осуществляет на фотоприемнике сравнение по амплитуде.

В случае равенства световых потоков в обоих плечах сравнивающего устройства фотоприемник 7 оказывается засвеченным

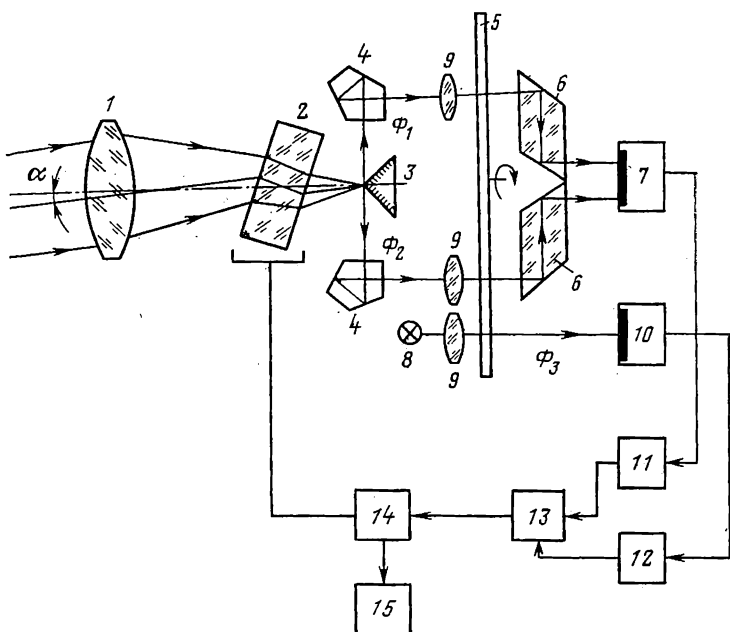


Рис. 142. Схема угломерной следящей системы с внутренней модуляцией светового потока

постоянным по величине световым потоком, равным $(\Phi_1 + \Phi_2)/2$, и электрический сигнал на входе его не содержит переменной составляющей. При наличии на входе системы углового рассогласования (того или иного знака) в электрическом сигнале, снимаемом с фотоприемника 7, появляется переменная составляющая (одной или другой фазы), амплитуда которой определяется величиной углового рассогласования. Для определения направления углового рассогласования используется опорный сигнал, задаваемый источником подсветки 8, конденсором 9, obturatorом 5 и фотоприемником 10.

Взаимное расположение световых потоков Φ_1 и Φ_2 и светового потока Φ_3 , используемого для получения опорного сигнала, относительно obturatorа обеспечивает сдвиг фазы опорного сигнала с фотоприемника 10 на $\pi/2$ по отношению к фазам сигнала с фотоприемника 7. Управляющий сигнал с фотоприемника 7 и опорный сигнал с фотоприемника 10 усиливаются электронными усилителями 11 и 12 и подаются на двухфазный асинхронный исполнительный электродвигатель 13, выходной вал которого через редуктор 14 кинематически связан с оптико-механическим компенсатором 2. Обмотки исполнительного электродвигателя включены таким образом, чтобы при вращении его вала поворот оптических компенсаторов приводил к уравниванию световых потоков Φ_1 и Φ_2 .

На рис. 143 приведена схема амплитудной УСС, в которой достигнута высокая точность измерения угловых смещений при отно-

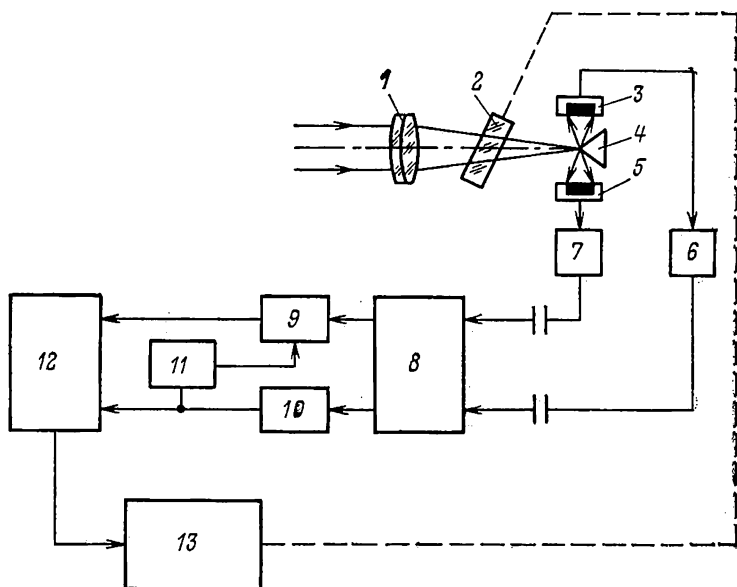


Рис. 143. Схема угломерной следящей системы с электронным устройством выделения суммы и разности сигналов

сительно несложной конструктивной схеме. В такой фотоэлектрической следящей системе отсутствуют элементы, формирующие канал опорного сигнала; она обладает высокой помехозащищенностью.

Необходимым условием работоспособности системы является модуляция потока излучения, причем модуляция с заданной частотой может осуществляться как внутри угломерной системы в промежутке между объективом и амплитудным анализатором, так и вне системы — у источника излучения.

Блок-схема такой следящей системы содержит объектив 1, оптико-механический компенсатор 2, светоделительную призму 4, два фотоприемника 3, 5, предусилители 6, 7, электронное устройство 8 выделения мгновенной суммы и разности сигналов, усилители 9, 10 разности и суммы сигналов, исполнительный электродвигатель 12, схему 11 (выпрямитель) для регулировки коэффициента усиления усилителей. Электронное устройство 8 выделения мгновенной суммы и разности сигналов выполнено таким образом, что фаза и величина разностного сигнала изменяются в зависимости от величины углового рассогласования на входе следящей системы.

На два входа устройства 8 подаются сигналы от фотоприемников 3, 5, а с выходов его сумма и разность сигналов соответствующей фазы подаются на усилители разности и суммы сигналов соответственно, причем выходы их подключены к обмоткам управления и через фазосдвигающую емкость к обмотке возбуждения двухфазного асинхронного электродвигателя. Электродвигатель 12 через кинематическую цепь 13 осуществляет поворот оптико-механического

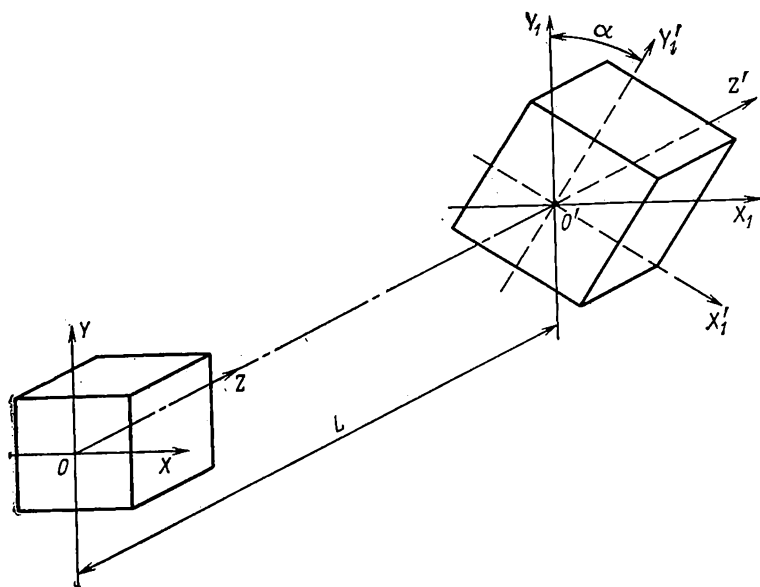


Рис. 144. Схема измерения угла скручивания

компенсатора 2 пропорционально величине и направлению углового рассогласования.

С целью устранения влияния изменения мощности источника излучения на точность работы угломерной следящей системы выход усилителя 10 суммы сигналов через выпрямитель 11 соединен с регулирующими элементами усилителя 9, которые изменяют коэффициент усиления обратно пропорционально величине суммы сигналов.

Такие угломерные следящие системы обеспечивают измерение смещений с точностью 1—2" в диапазоне до ± 10 —15'.

Датчики для измерения углов скручивания. В практике геодезических измерений часто возникает необходимость измерения взаимного разворота (угла скручивания) объектов в плоскостях, перпендикулярных к линии, соединяющей эти плоскости (рис. 144).

Такие измерения целесообразно выполнять оптическими методами. Наиболее эффективно эта задача может быть решена с использованием линейно-поляризованного света, так как плоскость поляризации линейно-поляризованного света может быть принята за референтную плоскость, а рефракция и турбулентность атмосферы практически не влияют на ее ориентацию в пространстве.

При прохождении света через систему поляризатор — анализатор интенсивность I излучения меняется в соответствии с законом Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha,$$

где I_0 — интенсивность излучения, прошедшего поляризатор; α — угол между направлениями ориентации плоскостей пропускания анализатора и поляризатора.

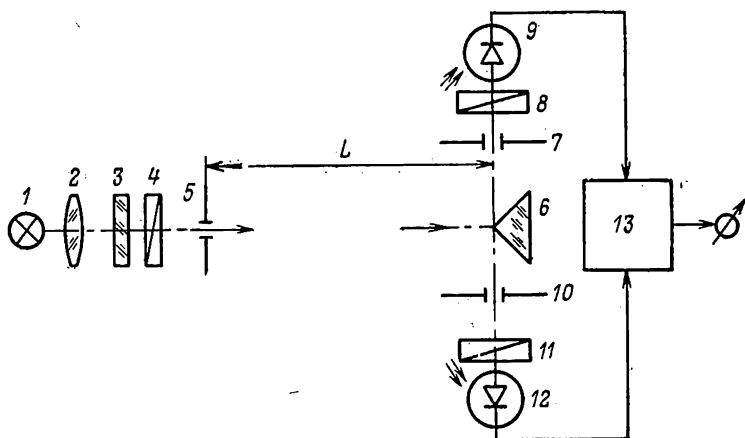


Рис. 145. Схема поляризационного угломерного датчика

Схема простого поляризационного датчика для измерения углов скручивания показана на рис. 145.

Осветитель, создающий поляризованную референтную плоскость, содержит источник излучения 1, конденсор 2, светофильтр 3, поляризатор 4 и диафрагму 5.

Сам датчик состоит из светоделительной призмы 6, диафрагм 7, 10, анализаторов 8, 11, приемников лучистой энергии 9, 12. Электронный блок 13 обработки электрических сигналов сравнивает по амплитуде фототоки I_1 — I_2 и по величине их разности выдает информацию об измеряемом угле α . Средняя квадратическая ошибка измерения изменения угла α такими датчиками составляет 4—5".

Существенного повышения точности (до 2—3") и расширения диапазона измерения углов скручивания можно достичь, применяя датчики, работающие на принципе модуляции излучения по плоскости поляризации.

Колебания положения плоскостей поляризации с циклической частотой около нулевого положения с помощью специального модулятора (электрохимического, магнитооптического, электрооптического и др.) при «скрещенном положении» поляризаторов обеспечивают надежное выделение минимального фототока от приемника лучистой энергии с удвоенной частотой при переходе плоскости поляризации через нулевое положение.

В таких датчиках интенсивность I поляризованного света после анализатора изменяется по закону

$$I = I_0 (\alpha \pm \alpha_0 \sin \omega t)^2,$$

где I_0 — интенсивность линейно-поляризованного света; α — угол поворота анализатора; α_0 — амплитуда колебаний плоскости поляризации модулятором; ω — частота колебаний; t — время.

На практике целесообразно применение таких поляризационных датчиков, работающих в автоколлимационном режиме, когда на измеряемом объекте закрепляют специальный пассивный отражатель, а измерительный прибор устанавливают на жестком реперном основании; схема такого датчика показана на рис. 146.

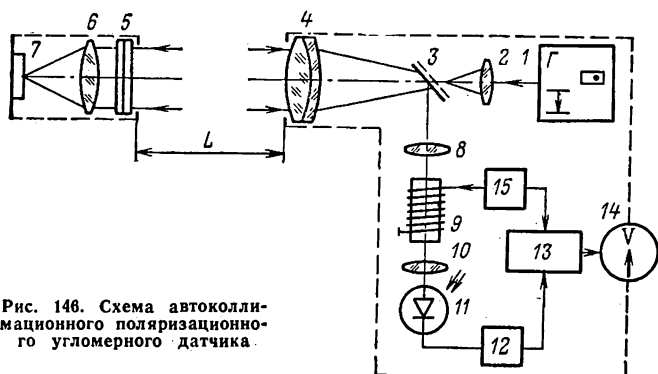


Рис. 146. Схема автоколлимационного поляризационного угломерного датчика.

Пучок линейно-поляризованного света от источника 1 света, например газового лазера, коллимируется телескопической системой, состоящей из окуляра 2 и объектива 4, и направляется ею на отражатель. Он включает в себя фазовую $\lambda/4$ пластинку 5 и зеркально-линзовый отражатель, состоящий из объектива 6 и зеркала 7, установленного в его фокальной плоскости. Отраженный пучок линейно-поляризованного света принимается объективом 4 и полупрозрачной пластиной 3 и линзой 8 направляется на модулятор 9 (электрохимический или электромагнитный совместно с анализатором) и по выходе из него собирается линзой 10 на чувствительной площадке приемника 11 лучистой энергии. Избирательный усилитель 12, настроенный на частоту генератора 15, питающего модулятор, подает усиленный фототок на фазовый детектор 13, куда также поступает опорное напряжение от генератора 15. При отсутствии угла скручивания между отражателем и измерителем электрический сигнал на индикаторе 14 равен нулю. При появлении скручивания на индикатор поступает ток, величина которого пропорциональна углу скручивания, а направление протекания (знак) определяется направлением поворота.

Средняя квадратическая ошибка измерения угла скручивания такими датчиками составляет $2 \div 3''$ в диапазоне $\pm 30^\circ$.

V.2.2.2. Индуктивные датчики

Индуктивные датчики применяют для автоматизации геодезических измерений при вертикальном проектировании точек, створных наблюдениях, центрировании. Принцип действия таких датчиков основан на изменении индуктивного сопротивления элементов его схемы при изменении их взаимного положения.

Индуктивный датчик содержит одну или несколько катушек индуктивности, располагаемых на магнитопроводящем каркасе, и подвижный якорь. Вместо якоря может быть использована струна из ферромагнитного материала.

Для практического применения более удобными являются двухфазные индуктивные датчики, у которых величина выходного сигнала определяет величину смещения его подвижных элементов относительно каркаса магнитопровода, а фаза сигнала — направление смещения. Такие датчики содержат две катушки индуктивности,

включенные по дифференциальной (разностной) схеме. При среднем положении якоря индуктивное сопротивление обоих плеч датчика одинаково и разность токов, протекающих через катушки индуктивности, равна нулю, т. е. выходной сигнал отсутствует.

На рис. 147 представлена в упрощенном виде конструкция однокоординатного индуктивного датчика. Индуктивный датчик 1 помещен в специальный стакан, содержащий калиброванный вкладыш 3. При сборке и юстировке датчика продольная ось соленоидов 2 (катушек индуктивности) совмещается с осью вкладыша. При измерениях вкладыш датчика вставляют в калиброванную втулку 4, ось которой совпадает с осью центримуемого объекта, и по показаниям электронной части схемы датчика выставляют ось калиброванной втулки 4 в проектное положение, заданное нитью отвеса из ферромагнитной струны, выполняющей роль якоря.

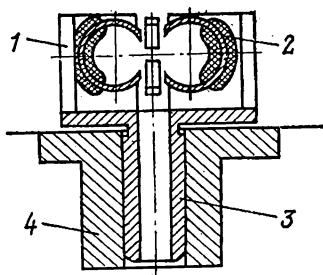


Рис. 147. Индуктивный датчик

Для измерения углов наклона объектов могут применяться жидкостные дифференциальные индуктивные датчики. В таких датчиках сердечник выполнен в виде ампулы уровня, заполненной жидкостью с высокой магнитной проницаемостью и содержащей воздушный пузырек. Соленоидные катушки надеты на стеклянную ампулу, включены в мостовую электрическую схему и питаются переменным током от генератора.

При наклоне ампулы уровня за счет перемещения воздушного пузырька датчика происходит изменение индуктивности катушек, которое фиксируется регистрирующим устройством. При наклоне ампулы цилиндрического уровня на 2° пузырек воздуха смещается на 2–3 мм, что позволяет регистрировать угол наклона с точностью 0,5".

Индуктивные датчики имеют прочную конструкцию, высокую надежность и высокий коэффициент усиления, достигающий нескольких сотен вольт на 1 мм.

Точность измерения линейных и угловых смещений индуктивными датчиками очень высокая — до нескольких мкм в диапазоне около 1 мм и до сотых долей угловых секунд в диапазоне до десятков секунд.

К недостаткам индуктивных датчиков следует отнести трудность регулировки для получения нулевых значений напряжения на выходе дифференциального датчика, возможность работы только на переменном токе.

В.2.2.3. Емкостные датчики

Принцип действия емкостных датчиков основан на учете изменения электрических параметров схемы датчика при изменении емкости конденсатора переменной емкости за счет механического перемещения пластин конденсатора или изменения диэлектрической проницаемости среды конденсатора.

Изменение емкости можно получить изменением расстояния между электродами или чаще — изменением площади взаимного перекрытия электродов, а также изменяя диэлектрическую проницаемость среды между пластинами конденсатора.

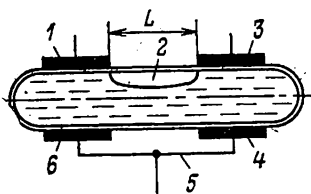


Рис. 148. Схема емкостного датчика

Точность емкостных датчиков зависит от влияния температуры на геометрические размеры и диэлектрическую проницаемость (в датчиках с жидким и твердым диэлектриком). Применение дифференциальных регистрирующих схем сводит эти погрешности к минимуму.

Питание измерительных схем дифференциальных емкостных датчиков осуществляется обычно переменным током повышенной частоты — от нескольких килогерц до десятков мегагерц.

Дифференциальный конденсатор обычно выполняется в виде жидкостной ампулы уровня, помещенной между обкладками-электродами (рис. 148).

При наклоне ампулы уровня за счет смещения воздушного пузырька происходит изменение диэлектрической проницаемости среды такого конденсатора в каждом из его плеч. Это вызывает, в свою очередь, изменение реактивного сопротивления плеч мостовой электрической схемы и, как следствие, ее разбаланс. Величина этого разбаланса регистрируется измерительным прибором, входящим в комплект датчика.

При дифференциальной схеме включения такого датчика противофазные высокочастотные напряжения от генератора подводят к пластинам 1 и 3, а электроды 4 и 6 соединяют проводником 5 и с него снимают напряжения рассогласования.

Чувствительность такого уровня очень высока и составляет 0,05° на одно деление шкалы регистрирующего прибора.

При наклоне ампулы уровня 2 изменяется диэлектрическая постоянная конденсатора за счет перемещения пузырька воздуха, что, в свою очередь, изменяет емкость плеч дифференциального конденсатора. При включении такого преобразователя по мостовой схеме питания его от высокочастотного генератора амплитуда напряжения рассогласования пропорциональна углу наклона, а фаза — направлению наклона.

В амплитудно-фазовом детекторе электронной схемы уровня осуществляется преобразование сигнала, и на выходе детектора получают напряжение постоянного тока. Полярность тока определяет направление наклона ампулы, а величина тока — величину угла наклона.

Одной из наиболее удачных конструкций с мостовой схемой включения преобразователя является уровень УЭ-2.

Он имеет следующие технические характеристики:

Предел измерения, угл. с	25	10	5
Цена деления, угл. с	0,5	0,2	0,1

В приборе УЭ-2 применен дифференциальный емкостный преобразователь, включенный в мостовую схему, образованную самим дифференциальным преобразователем и двумя катушками индуктивности.

Резонансная собственная частота мостовой схемы у прибора выбрана значительно выше частоты питающего синусоидального генератора. Такое решение избавляет от необходимости точной частотной настройки контура и дает возможность ослабить требования к стабильности частоты генератора.

Емкостные датчики с успехом могут применяться для дистанционного определения углов наклона объектов, в автоматических микроnivelерах, использоваться в качестве экзаменаторов уровней.

В.2.2.4. Датчики для автоматизации гидронивелирования

Измерение положения уровня жидкости в автоматических гидронивелирах можно осуществлять электроконтактным, фотоэлектрическим, частотным, магнитным, радиоактивным и другими способами. Наибольшее распространение получили два способа — электроконтактный и фотоэлектрический [2].

На рис. 149 приведена принципиальная схема гидростатического датчика электроконтактного гидронивелира с дистанционной системой счета информации.

Устройство содержит сосуд 3, внутри которого помещается шуп 4 с закрепленной на нем посредством изолятора 2 иглой 1 электрического указателя. Эксцентриковый кулачок 5, укрепленный на осях электродвигателя 6, приводит в движение шуп 4.

Осветитель 11 и фотоприемник 10 с неподвижной 9 и подвижной 8 растровыми пластинами образуют фотоэлектрический датчик, дающий информацию о величине пути перемещения шупа. Фотоэлектрический датчик при перемещении шупа вырабатывает определенное число импульсов, подсчитываемое счетчиком 13. Питание системы осуществляется от блока питания 12, а концевой выключатель 7 служит для отключения цепи питания электродвигателя 6 по окончании цикла измерения. Запуск системы в работу производится нажатием кнопки на пульте управления.

При нажатии на пульт управления кнопки за счет работы двигателя шуп 4 начинает опускаться вниз. При этом с фотоприемника 10 на вход счетчика 13 поступают импульсы. В момент касания иглой 1 поверхности жидкости из-за разности потенциалов между рабочей жидкостью и иглой формируется электрический импульс, осуществляющий записание счетчика.

Величина l перемещения шупа от нулевого (крайнего верхнего) положения до момента снятия импульса с иглы 1 определится как $l = n\delta$, где n — число импульсов, зафиксированных на счетчике; δ — цена одного импульса.

Средняя квадратическая ошибка в определении высотного положения поверхности жидкости электроконтактными устройствами составляет около 10 мкм.

Известны гидростатические нивелиры, в которых фиксация момента касания шупа с поверхностью жидкости дистанционно и автоматически определяется при помощи света. При этом подвижный шуп может быть выполнен в виде цилиндрического световода, заточенного на конце под углом полного внутреннего отражения света, с осветителем, установленным над световодом, и фотоприемником, расположенным под уровнем рабочей жидкости.

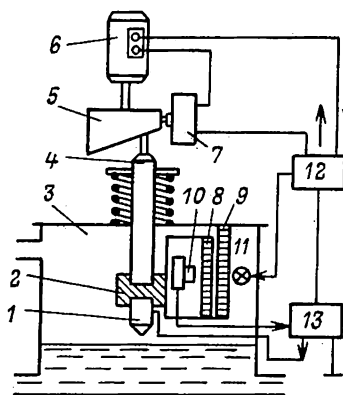


Рис. 149. Схема электроконтактного датчика гидронивелира

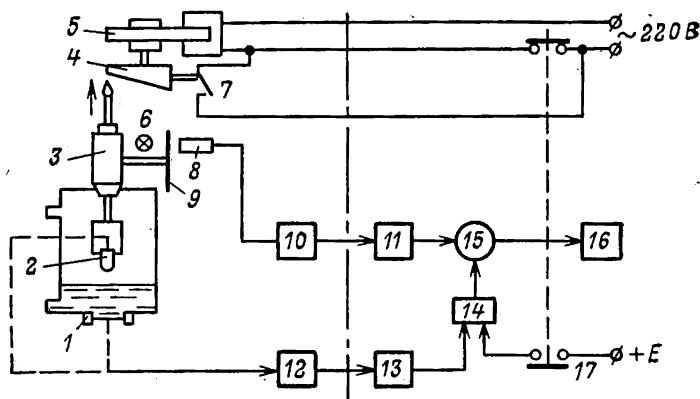


Рис. 150. Схема датчика гидронивелира с фотоэлектрической регистрацией

На рис. 150 изображена упрощенная функциональная схема, поясняющая принцип действия датчика и измерительной системы при измерении высотного положения уровневой поверхности жидкости световодом.

При нажатии кнопки 17 на пульте управления осуществляется запуск системы. Нижней парой контактов осуществляется переброс триггера 14 в такое состояние, при котором клапан 15 открывается. Одновременно через верхнюю пару контактов подается питание на электродвигатель 5. При вращении вала электродвигателя кулачок 4, содержащий боковой выступ, замыкает контакт 7, самоблокируя цепь питания электродвигателя, и перемещает вниз шток индикатора 3 часового типа. Этот шток индикатора, в свою очередь, сообщает вращательное движение кодирующему диску 9 со щелями. Осветитель 6 и фотодиод 8 при вращении диска вырабатывают электрические импульсы, число которых пропорционально величине перемещения штока.

Счетные импульсы, усиленные усилителем 10 и сформированные формирователем 11, через клапан 15 направляются в счетчик импульсов 16, где и фиксируются.

На конце штока 3 установлен световод 2 с вмонтированной внутри него лампочкой. Световод заточен в нижней части на конце под углом полного внутреннего отражения. В момент касания световодом поверхности жидкости условия полного внутреннего отражения нарушаются и засвечивается фотодиод 1, расположенный надне стакана гидростатического датчика. Фотодиод 1 выдает импульс, который после усиления усилителем 12 и формирования формирователем 13 поступает на второй вход триггера 14.

Этот импульс переводит триггер в исходное состояние и тем самым запирает счетчик. На счетчике импульсов оказывается зафиксированным число импульсов, соответствующее величине хода световода от крайнего верхнего положения до уровня жидкости в сосуде.

Кулачок 4, совершив полный оборот, приводит все системы датчика в исходное для работы состояние.

В качестве рабочей жидкости, заполняющей датчики гидронивелиров, может быть использована дистиллированная вода с добавкой 0,1 % формалина или спирта, или жидкость, проводящая электрический ток.

V.2.3. Способы создания референтных линий и плоскостей оптическим излучением

Для автоматизации геодезических измерений с применением оптико-электронных приборов (полуавтоматических и автоматических нивелиров, створных приборов, измерителей деформаций сооружений и др.) в качестве референтных линий и плоскостей, относительно которых выполняют измерения, используют сформированное соответствующим образом в пространстве оптическое излучение.

V.2.3.1. Способы создания световых референтных линий

Под способом задания оптическим излучением референтного направления или плоскости следует понимать совокупность методов и устройств, обеспечивающих строгое проектное направление распространения светового луча. В качестве источников света применяют тепловые излучатели, светодиоды, лазеры. Преимущественное применение в последние годы получили лазерные источники света в силу особых свойств их излучения — узкой диаграммы направленности, монохроматичности, когерентности, высокой спектральной яркости и возможности получения поляризованного излучения. Наиболее просто референтная линия задается скользящим параллельным пучком лучей лазера (рис. 151), когда в качестве коллимирующего устройства используют оптическую телескопическую систему.

Лазерный пучок лучей не является ни гомоцентрическим, ни пучком параллельных лучей. В общем случае энергия излучения лазера с резонатором, образованным двумя сферическими или одним плоским и одним сферическим зеркалами, распространяется в пространстве по касательной к кривым, образующим каустику, и структура пучка определяется в основном геометрией резонатора, т. е. кривизной зеркал и расстоянием между ними.

Однако для большинства инженерных расчетов излучение лазера можно принять распространяющимся с некоторым постоянным углом расходимости и характеризовать его мощностью излучения, диаметром светового пучка на выходе, угловой расходимостью и функцией распределения энергии лазера внутри телесного угла.

При этом можно принять, что по выходе из телескопической системы пучки лазерных лучей будут иметь расходимость, в Γ^* меньшую, чем на выходе из лазера, а диаметр пучка лучей соответственно возрастает в такое же число крат, т. е. $\beta = \alpha/\Gamma^*$, $D = d \cdot \Gamma^*$.

Недостатком такого способа задания референтной линии является невысокая помехозащищенность приемного фотоэлектрического

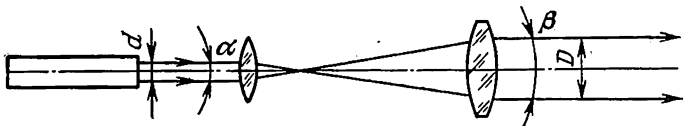


Рис. 151. Схема коллимирования лазерного луча

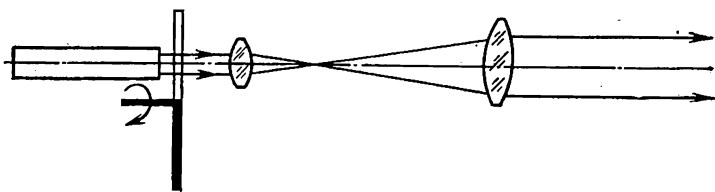


Рис. 152. Задание опорной линии сколлимированным и модулированным лучом

устройства от влияния фоновых засветок, что снижает точность измерения.

Оснащение лазерного передающего устройства модулятором света (оптико-механическим или электрооптическим) (рис. 152) позволяет исключить указанный недостаток и в некоторых случаях не только упростить конструкцию измерительного прибора (фотоэлектрического датчика), но и добиться существенного повышения точности измерений.

При выполнении геодезических измерений с применением фотоэлектрических датчиков иногда оказывается целесообразным работать с фокусированным лазерным лучом. Фокусировка луча оптической системой на конечное расстояние позволяет уменьшить габариты приемного устройства и повысить концентрацию энергии на анализаторе датчика [1].

При выполнении ряда геодезических измерений, например створных, находит применение способ задания референтной линии с использованием лазера и зонных пластин [3].

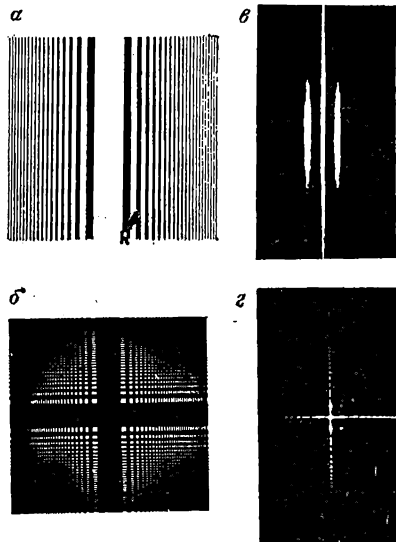


Рис. 153. Формирование изображения зонными пластинами

Зонная пластина (рис. 153, а, б) представляет собою экран, содержащий прозрачные и непрозрачные зоны. При освещении зонной пластины от лазерного источника света на расстоянии q формируется яркое световое пятно (рис. 153, в, г), строго симметричное относительно прямой, соединяющей точечный источник света и ось симметрии пластины.

При перемещении δ_i зонной пластины в направлении, перпендикулярном к референтной прямой, изображение источника света (лазерного луча) смещается в ту же сторону на величину a_i :

$$a_i = \frac{p_i + q_i}{p_i} \delta_i$$

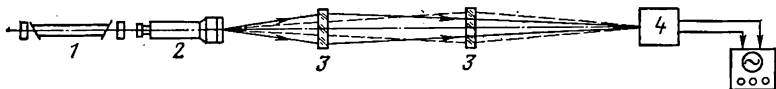


Рис. 154. Схема производства створных измерений с применением зонных пластин

где r_i , q_i — соответственно расстояния от лазера до зонной пластины и от зонной пластины до регистрирующего устройства.

Наклон зонной пластины вдоль створа при условии сохранения перпендикулярности рабочей плоскости зонной пластины к направлению створа, а также ее развороты в пределах до $\pm 25^\circ$ вокруг вертикальной оси практически не влияют на положение оси симметрии изображения.

Такая некритичность к положению зонной пластины в створе значительно упрощает предварительную юстировку пластины, повышает производительность при измерениях.

Расчет геодезических зонных марок проводится по специальным формулам, определяющим положение краев прозрачных и непрозрачных зон.

При измерениях линейных смещений целесообразно применять одномерные зонные пластины, формирующие изображение источника света в конце створа в виде вертикальной узкой световой полосы.

Схема измерений с использованием зонных пластин показана на рис. 154.

В исходных и определяемых точках створа последовательно между излучателем 1, коллиматором 2 и фоторегистратором 4 устанавливают марки 3 с зонными пластинами, с помощью которых лазерный пучок света формируется в предметную плоскость фотоприемника.

При створных измерениях фиксируют положение оси симметрии зонных пластин относительно опорной линии, определяемой источником света и базовой точкой регистрирующего устройства.

В качестве регистраторов используют регистраторы осциллографического типа либо дискретного типа — с пересчетным устройством и цифровой индикацией.

Наряду с лазерными источниками излучения в практике геодезических измерений находят также применение и тепловые. Формирование в пространстве узконаправленного светового потока от тепловых излучателей сопряжено с определенными трудностями, обусловленными значительной расходимостью излучения от источника и, как следствие этого, необходимостью применения сложных оптических систем. Однако высокая надежность тепловых излучателей, достаточно высокая мощность излучения, небольшие габариты, дешевизна и невысокие питающие напряжения в ряде случаев позволяют отдать им предпочтение перед лазерными источниками.

При использовании тепловых излучателей для создания оптическим лучом опорной линии в принципе пригодны вышеописанные способы, однако наибольшее распространение получили два способа задания референтного направления — модулированным узконаправленным лучом и оптическим лучом, содержащим так называемую равносигнальную зону.

В первом случае у передающего устройства помещается модулятор (механический или электрооптический), осуществляющий модуляцию светового потока. Во втором случае в прожекторе уста-

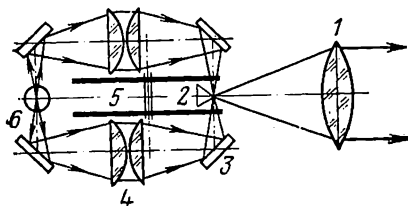


Рис. 155. Схема создания равносигнальной зоны оптического луча

навливают модулятор светового потока, создающий равносигнальную зону для фотоэлектрического приемного устройства, настроенного на соответствующие частоты модуляции.

Начиная с некоторого расстояния от прожектора (порядка 100 фокусных расстояний от объектива), в пространстве создается четкая равносигнальная зона.

Для получения в пространстве резкого и стабильного положения равносигнальной зоны в фокальной плоскости объектива 1 (рис. 155) располагают ребро неподвижной разделительной призмы 2, а модулятор 5, состоящий из дисков с разным числом вырезов, выносят за фокальную плоскость и располагают на пути световых потоков, создаваемых нитью осветителя 6 при помощи зеркал 3 и конденсоров 4.

При смещении входного зрачка приемного устройства относительно равносигнальной зоны оптического луча изменяется соотношение принимаемого объективом количества энергии, промодулированного разными частотами. В селекторных устройствах, расположенных после фотоэлектрических усилителей, в этом случае выделяется разностный сигнал той или другой частоты, который может характеризовать величину смещения контролируемой точки от референтной линии.

Возможно использовать в качестве источников излучения в полуавтоматических и автоматических геодезических приборах арсенид-галлиевые светодиоды. Малые габариты излучателей, надежность, незначительная потребляемая мощность и удобство модуляции питающим током указывают на перспективность их применения в осветительных устройствах для целей автоматизации измерений.

V.2.3.2. Способы создания световых референтных плоскостей лазерным излучением

Способы формирования опорной плоскости могут быть различными и определяются как характером, так и точностью выполняемых измерений.

Формирование опорной геодезической плоскости можно осуществить с применением цилиндрической оптики (рис. 156). Такой способ прост, надежен. Однако он требует хорошего расчетного согласования параметров лазерного луча, цилиндрической линзы и телескопической оптической коллимирующей системы и в своей основе связан со значительными потерями излучения в пространстве за счет расширения луча в одной плоскости.

Применение в качестве развертывающего устройства вращающейся пентапризмы позволяет осуществлять развертку луча практически с любой требуемой скоростью (рис. 157).

Для повышения пространственной стабильности опорной плоскости при производстве высокоточных измерений целесообразно обе-

спечить в лазерных приборах вращение телескопической коллимирующей оптической системы совместно с развертывающим устройством (пентапризмой) (рис. 158). Такой способ развертки луча в плоскость позволяет, используя оптические свойства телескопической системы, в Γ^x (Γ^x — угловое увеличение телескопической системы) повысить пространственную стабильность опорной плоскости за счет уменьшения в Γ^x влияния биения подшипников осевой пары развертывающего устройства.

Перспективной для использования в лазерных приборах, предназначенных для высокоточного нивелирования, следует считать также возможность создания двойной развертки лазерного луча, при которой один луч создает видимую геодезическую плоскость, а второй является информативным, измерительным.

Для реализации этой возможности необходимо один из лучей после коллимации развертывать со скоростью около 25 об/с, а второй более медленно (до 1—2 об/с). Такое построение схемы лазерного прибора (рис. 159) дает возможность работать с прибором как визуально, так и с высокой точностью выполнять измерения автоматическим фотоэлектрическим датчиком.

Одним из возможных вариантов развертки луча в плоскость является способ с применением вращающейся прямоугольной приз-

Рис. 156. Развертка луча в плоскость цилиндрической линзой

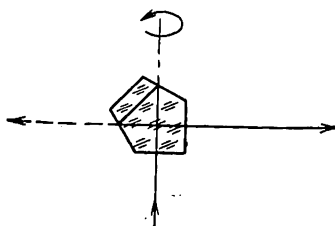
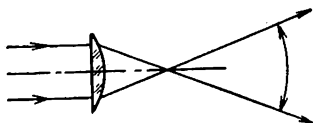


Рис. 157. Развертка луча в плоскость пентапризмой

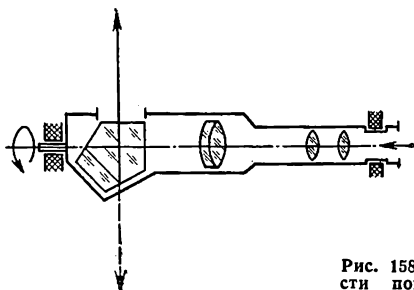


Рис. 158. Схема создания опорной плоскости повышенной пространственной стабильности

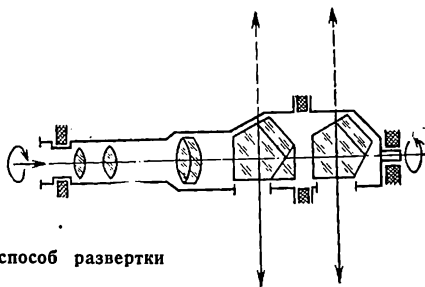


Рис. 159. Двухлучевой способ развертки луча

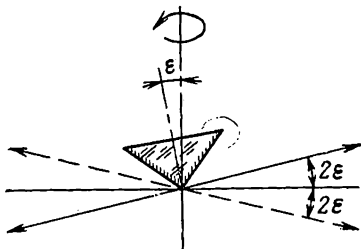


Рис. 160. Схема создания опорной плоскости прямоугольной вращающейся призмой

мы (рис. 160). Излучение лазера направляется на светоделительную грань прямоугольной призмы с зеркальными поверхностями.

Призмой луч света разделяется на два луча, расходящихся в противоположных направлениях. Призма вращается относительно оси, совпадающей с осевой линией пучка лучей лазера, однако сама призма наклонена к оси светового пучка на небольшой угол ϵ . Поэтому отраженные лучи также соответственно наклонены к горизонту на углы $+2\epsilon$ и -2ϵ .

При вращении призмы световые лучи описывают в пространстве две поверхности, плоскость симметрии которых является опорной геодезической плоскостью.

В любой точке, лежащей на указанной плоскости на некотором расстоянии от прибора, будут наблюдаться последовательные вспышки света одинаковой интенсивности, причем частота этих вспышек в два раза выше числа оборотов призмы.

Если глаз наблюдателя точно располагается на референтной плоскости, то уже при скорости вращения призмы 10 об/с вследствие инерции зрительного восприятия свет в этой точке будет казаться непрерывным. В точках, лежащих выше или ниже названной плоскости, свет при визуальном наблюдении кажется мерцающим.

Отыскание в пространстве референтной плоскости может осуществляться автоматически фотоэлектрическим датчиком, регистрирующим минимум световой энергии между двумя максимумами.

V.2.4. Методы и приборы автоматизации геодезических измерений

Замена обычных геодезических приборов лазерными во многих случаях позволяет повысить точность и производительность геодезических работ, снизить затраты на подготовительные работы, сокра-

тить рабочий персонал, частично или полностью автоматизировать измерения.

В настоящее время лазеры используют для разбивочных и планировочных работ, передачи высотных отметок при проведении крупных строительных работ, планировке местности, при укладке трубопроводов, для установки и выверки технологического оборудования, геометрического и тригонометрического нивелирования, вертикального проектирования точек при строительстве высотных зданий и сооружений башенного типа и др.

Лазерные визиры. Лазерные визиры предназначены для задания оптическим лучом определенного направления в пространстве.

В конструкцию лазерного визира, как правило, входят газовый лазер, телескопическая коллимирующая трубка, подставка с подъемными и отсчетными механизмами. Она может содержать установочные уровни, устройства стабилизации направления светового луча, устройства для изменения направления распространения светового луча (оптические насадки) и пр.

В СССР в настоящее время выпускаются серийно лазерные визиры ЛВ-5, ЛВ-78, УНЛ-3.

Лазерный визир ЛВ-5 (в модифицированном исполнении ЛВ-5М) выполнен на базе лазера ОКГ-13 мощностью 1 мВт. Коллимирующая труба с увеличением $30\times$ жестко соединена с корпусом, внутри которого на юстировочных приспособлениях устанавливается лазер. Подставка имеет механизмы наведения прибора в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Диапазон работы механизмов $\pm 5^\circ$, цена деления отсчетной шкалы механизма $15''$. В вертикальной плоскости труба прибора может поворачиваться на углы $\pm 15^\circ$, в горизонтальной — на 360° без отсчитывания величины угла поворота. Питание прибора осуществляется от сети переменного тока 220 В, 50 Гц и 127 В, 50 Гц. К лазерному визиру ЛВ-5М имеется дополнительный блок, позволяющий подключать прибор к аккумулятору напряжением 12 В. Для визуального наведения на цель на корпусе прибора имеется визирное приспособление.

Лазерный визир ЛВ-78 — более совершенная конструкция. Он имеет наводящие и измерительные механизмы такие же как в ЛВ-5, однако для измерения угла его поворота в горизонтальной плоскости имеется лимб с ценой деления $5'$. В приборе применен лазер ЛГ-78 мощностью излучения 2 мВт с холодным катодом. В нижней части корпуса излучателя установлен аккумуляторный блок питания.

Лазерный визир УНЛ-3 — лазерный указатель направления, предназначен для контроля за движением проходческого щита при строительстве тоннелей различного назначения. Исходя из этого прибор выполнен в пыле-влагонепроницаемом корпусе, во взрывобезопасном исполнении. Прибор не имеет подставки, наводящих и измерительных механизмов, но содержит специальную оснастку для крепления на стены тоннеля. К оснастке корпус прибора крепится с помощью резьбовых шпилек. В качестве источника излучения в УНЛ-3 использован газовый лазер ЛГ-78. Между резонатором лазера и оптической коллимирующей системой с увеличением $16\times$ расположена пара юстировочных оптических клиньев для соосности лазерного пучка лучей и коллимирующей оптики.

Для расширения функциональных возможностей лазерных визиров выпускается серийно комплект насадок и приспособлений — ПНЛ, состоящий из различных подставок и кронштейнов, марок для визуального отсчета, устройств для поворота лазерного луча в вертикальное направление и др.

Лазерные приборы многоцелевого назначения. При строитель-

стве различных объектов, монтаже и эксплуатации технологического оборудования часто возникает необходимость проведения целого ряда геодезических измерений и контролировать закладку фундаментов и соосность изделий, осуществлять вертикальное проектирование точек, створные измерения и вести контроль прямолинейности с одновременным определением плоскостности строительно-монтажных конструкций и технологического оборудования и др. Для этих целей с успехом могут быть применены многоцелевые лазерные приборы.

В МИИГАиК совместно с ГСПИ создан образец лазерного прибора ЛАГ (лазерный горизонт), предназначенного для решения названных задач. ЛАГ представляет собой прибор, содержащий лазерный излучатель, оптическую систему, оптико-механический блок

развертки луча в плоскость и нивелирную рейку с фотоэлектрическим датчиком.

Излучение от лазера 1 (ОКГ-13 или ЛГ-78) направляется в оптическую систему (рис. 161), состоящую из двух спаренных коллимирующих телескопических труб 3, 4, расположенных под углом 90° , и светоделительного устройства 2.

Оптико-механический блок развертки 5 луча в плоскость содержит устройство электропривода и пентапризмы 6, склеенных между собой и развернутых одна относительно другой на 180° . Пентапризмы имеют полупрозрачные верхние отражающие грани, на которые нанесены оптические клинья, дополняющие пентапризмы в меридиональном сечении до плоскопараллельных пластин.

Вертикальная и горизонтальная оптические телескопические системы (зрительные трубы) имеют общую сетку нитей и окуляр.

Такая компоновка прибора позволяет при включенном лазере оптической системой задавать референтные линии в плоскости горизонта и по вертикали, а также блоком пентапризм осуществлять развертку луча в плоскость. Наблюдая в окуляр 7, можно глазом распланировать след лазерной плоскости и референтных световых линий.

Лазер и оптико-механическая система прибора ЛАГ закреплены в корпусе 8, приведение лазерной плоскости в горизонтальное положение осуществляется по двум цилиндрическим контактным уров-

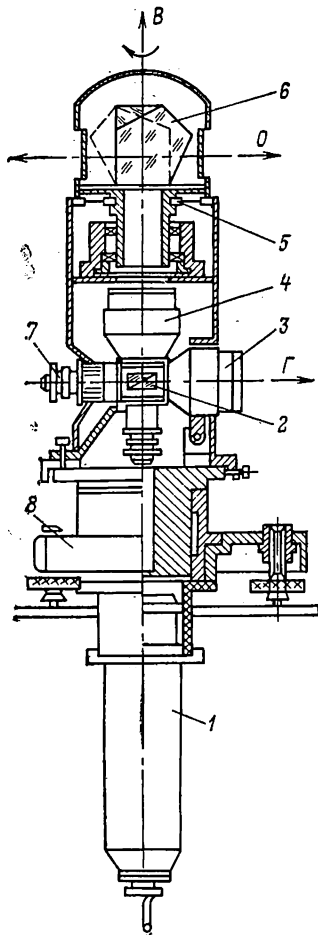


Рис. 161. Схема лазерного прибора ЛАГ

ням, расположенным под углом 90° друг к другу и собранных в один блок с общим окуляром.

Экспериментальные исследования прибора ЛАГ с применением фотоэлектрической регистрации показали, что на дистанциях 4—60 м среднее квадратическое отклонение превышений, полученных из геометрического нивелирования и ЛАГ, составляет около 3,0 мм.

Лазерный геодезический прибор для строительства ПИЛ-1 выполнен в виде компактной конструкции, содержащей газовый лазер, оптическую коллимирующую систему, устройство развертки луча в плоскость, ряд вспомогательных механических устройств, обеспечивающих надежное крепление прибора к координатному столику и устойчивому штативу.

Механизмы координатного столика и штатива обеспечивают горизонтирование прибора и установку светового луча на заданной проектной высоте.

Прибор ПИЛ-1 оснащен отдельным фотоприемным устройством, состоящим из фотоэлектрического датчика и измерительной рейки. Во время производства измерений фотоприемное устройство перемещают вдоль рейки до появления показаний на стрелочном приборе, после чего берут отсчет по шкале рейки. Такая методика выполнения работ повышает точность и объективность измерений, увеличивает производительность в $1,5 \div 2$ раза.

Основные технические характеристики прибора ПИЛ-1

Максимальное отклонение пучка лазерного излучения от вертикали и горизонтали, угл. с	не более $\pm 20'$
Дальность действия при метеорологической дальности видимости 1000 м	не менее 150
Погрешность измерения расстояния от пучка лазерного излучения до контролируемой поверхности, мм не более	± 3
Угол сканирования пучка лазерного излучения, угл. градус, не менее	180
Средний ресурс, ч	5000
Условия работы:	
интервал температур, $^\circ\text{C}$	От -10 до $+40$
относительная влажность воздуха при температуре 25°C , %	До 98
Габариты, мм:	
передатчика	$563 \times 174 \times 187$
фотоприемника	$218 \times 127 \times 129$
измерительной рейки	25×2000
штатива	$247 \times 247 \times 873$
блока питания	$345 \times 132 \times 151$
Масса, кг:	
передатчика	5,3
фотоприемника	2,0
измерительной рейки	1,6
штатива	6,6
блока питания	4,9

При вертикальной планировке с заданной точностью на объектах водохозяйственного, сельскохозяйственного и дорожного строительства возникает необходимость в процессе проведения земляных работ, проведения высотного геодезического контроля и исполнительного нивелирования на значительных по размерам площадях. Для этих целей используют лазерные приборы СКП-1 и САУЛ.

В основу метода автоматического контроля высотных отметок обрабатываемой поверхности при планировании площадей положен принцип определения специальным фотоэлектрическим датчиком высотного положения рабочего органа землеройной машины относительно референтной плоскости, создаваемой лазерным излучением.

Прибор СКП-1 состоит из двух блоков — излучателя, неподвижно устанавливаемого над точкой с известной высотной отметкой и создающего световую референтную плоскость, и фотоприемного устройства с индикатором. Фотоприемное устройство регистрирует положение рабочего органа планировочной машины относительно референтной плоскости и формирует электрические сигналы, управляющие подъемом и опусканием рабочего органа. Контроль ведется по сигнальным лампочкам индикатора, устанавливаемого в кабине машины.

Излучатель, устанавливаемый на опоре, создает в пространстве вращающимся скользящим лазерным лучом со скоростью 1 об/с световую плоскость, относительно которой фотоприемное устройство, устанавливаемое на вертикальной штанге, жестко связанной с рабочим органом, определяет его положение и выдает команды в контур управления.

В качестве источника света в СКП-1 использован лазер ОКГ-13. Развертка луча в плоскость осуществляется вращающейся пентапризмой. В оптическом канале развертывающего устройства использован оптический клин, устанавливаемый после пентапризмы, с помощью которого устраняются погрешности в геометрии создаваемой плоскости из-за неточностей изготовления пентапризмы.

Для стабилизации в пространстве создаваемого световым лучом плоскости в конструкции СКП-1 использована карданная подвеска на шарикоподшипниках. Для успокоения свободных колебаний подвески в конструкции применен масляный демпфер, выполненный в виде ребристого цилиндра, помещенного в масляный кожух. Предварительная установка излучателя осуществляется по круглому уровню, закрепленному на его корпусе.

Фотоприемное устройство выполнено в виде набора световодных дисков — линз с приемниками лучистой энергии (фотодиодами), что обеспечивает при измерениях круговой обзор. Электронная часть фотоприемного устройства конструктивно расположена в его корпусе.

Индикатор положения рабочего органа представляет собой пульт, на котором расположено семь ламп накаливания и переключатель рода работ грубо — точно.

Режим работы грубо применяют при предварительной планировке площадей, при этом в работе участвуют лишь средняя, верхняя и нижняя лампы индикатора в отличие от режима точно, когда в работе участвуют все лампы. По сигналам загорающихся ламп водитель планировочной машины судит о положении фотоприемного устройства, а значит и рабочего органа машины, относительно референтной плоскости.

Фотоприемное устройство обеспечивает регистрацию положения рабочего органа машины с ошибкой не более ± 3 см.

Техническая характеристика СКП

Длина волны излучения, мкм	0,6328
Мощность излучения, мВт	200
Угол развертки оптической плоскости, угл. градус	360
Диапазон действия, м	5÷500

Ошибка:	
определения высотного положения контролируемого объекта, мм	± 30
задания опорной плоскости, угл. с	± 8
Нестабильность положения оптической плоскости во времени, с/сут	8
Размер поперечного пучка по вертикали, мм	25—80
Диапазон регистрации излучения по высоте, мм	200
Виброустойчивость приемного устройства в диапазоне 10—70 Гц	4
Допустимая влажность окружающего воздуха при $t=30^\circ\text{C}$, %	96
Интервал рабочих температур, $^\circ\text{C}$	$-10 \div +40$
Масса, кг:	
измерителя (вместе со штативом и блоком питания)	30
фотоприемного устройства	3
индикатора	4,1
Габариты, мм:	
излучателя	700×800
фотоприемного устройства	142×424
индикатора	65×70×285
штанги	1750

Выпускаемая серийно лазерная система аналогичного назначения САУЛ-1 имеет подобные технические характеристики и отличается от СКП-1 некоторыми конструктивными усовершенствованиями.

Применение на практике лазерных приборов СКП-1 и САУЛ-1 обеспечивает повышение производительности труда на 30—35 %, дает возможность работать с одним излучателем одновременно несколькими планировочным машинам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зацаринный А. В. Автоматизация высокоточных инженерно-геодезических измерений. М., Недра, 1976.
2. Васютинский И. Ю. Гидронивелирование. М., Недра, 1983.
3. Ямбаев Х. К. Высокоточные створные измерения. М., Недра, 1978.

В.3. АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ МЕСТНОСТИ

В. И. Шиллингер

В.3.1. Общие сведения

Автоматическое определение координат местности производится при помощи приборов, устанавливаемых на транспортном средстве и выдающих информацию в виде цифровых показаний и графической записи о высотах и плановых координатах точек местности, расположенных на пути следования. Оно может обеспечить точность выполнения топографо-геодезических работ по плановому и высотному обоснованию геолого-геофизических съемок, привязке аэрофотоснимков, различного рода трассировочных и инженерных работ: изыскания трасс водо-нефте-газопроводов, линий электропередач и др.

Приборы для автоматического определения координат по измеряемой величине разделяются на:

— высотомеры-автоматы, предназначенные для автоматического нивелирования местности;

— топопривязчики, обеспечивающие непрерывное определение местонахождения движущейся платформы;

— трехкоординатные автоматы (трехкоординатные топопривязчики).

При построении геодезических автоматов наибольшее применение находит метод счисления пути, основанный на автоматическом вычислении координат X , Y , H точек местности путем непрерывного суммирования элементарных приращений координат, соответствующих малым перемещениям ΔS_i прибора на местности, и, следовательно,

$$\left. \begin{aligned} H &\approx H_0 + \sum_1^n \Delta h_i = H_0 + \sum_1^n \Delta S_i \sin \nu_i; \\ X &\approx X_0 + \sum_1^n \Delta X_i = X_0 + \sum_1^n \Delta S_i \cos \nu_i \cos \alpha_i; \\ Y &\approx Y_0 + \sum_1^n \Delta Y_i = Y_0 + \sum_1^n \Delta S_i \cos \nu_i \sin \alpha_i, \end{aligned} \right\} \quad (\text{V.3.1})$$

где ν_i — текущие значения углов продольного наклона местности на пути движения; α_i — текущие значения дирекционных углов направления пути; H_0 , X_0 , Y_0 — начальные значения высоты и координат; n — число участков ΔS_i на пути, пройденном от начальной точки.

Результаты измерений тем точнее, чем короче участки ΔS_i при $\Delta S_i \rightarrow 0$:

$$\left. \begin{aligned} H &= H_0 + \int_0^S \sin \nu dS; \\ X &= X_0 + \int_0^S \cos \nu \cos \alpha dS; \\ Y &= Y_0 + \int_0^S \cos \nu \sin \alpha dS. \end{aligned} \right\} \quad (\text{V.3.2})$$

Координаты можно определить, вводя скорость движения прибора $v = dS/dt$, тогда

$$\left. \begin{aligned} H &= H_0 + \int_0^t v \sin \nu dt; \\ X &= X_0 + \int_0^t v \cos \nu \cos \alpha dt; \\ Y &= Y_0 + \int_0^t v \cos \nu \sin \alpha dt. \end{aligned} \right\} \quad (\text{V.3.3})$$

Приборная реализация формул достигается посредством измерения текущих значений проходимого пути S или скорости v с помощью колесного датчика пути, доплеровской системы или другими способами. Непрерывное измерение угла наклона местности γ определяется продольным наклоном движущейся платформы относительно направления вертикали места, которая задается при помощи физического маятника, гировертикали и др. Дирекционный угол задается магнитным компасом, гироскуроуказателем и др.

Автоматическое вычисление координат в соответствии с формулами (V.3.1), (V.3.2) или (V.3.3) осуществляется с помощью вычислительных устройств.

К геодезическим автоматам, основанным на методе счисления пути, относятся высотомеры-автоматы МИИГАиК типа ВА-1М, ВА-56, АВА, высотомер-автомат Джонсона (США), отечественные топопривязчики типа ТМ, ТМГ, Т-11 и др., которые устанавливаются на автомашинах или прицепе к тягачу.

V.3.2. Высотомеры-автоматы

Высотомер-автомат представляет собой прибор, установленный на транспортном средстве и автоматически выдающий информацию о продольном профиле пути его следования по местности. Автоматическое нивелирование, выполняемое при помощи высотомеров-автоматов, по качеству результатов приближается к точности технического нивелирования (6—10 см на 1 км хода).

Высотомер-автомат вырабатывает превышение H_{AB} точек A и B местности в соответствии с выражениями

$$H_{AB} \approx \sum_1^n \Delta h_i = \sum_1^n \Delta S_i \sin \gamma_i$$

или

$$H_{AB} = \int_{S_A}^{S_B} \sin \gamma dS.$$

Измерение текущих значений S производится колесным датчиком пути, угол наклона местности γ определяется продольным наклоном основания транспортного средства относительно вертикали, которая задается маятником.

Высотомеры-автоматы ВА-1М и ВА-56 (МИИГАиК). В приборах применен свободный от механических связей с механизмами маятник, обладающий малым статическим моментом (около 4 гсм) и компенсированный от влияния тангенциальных ускорений движения. Это позволяет устанавливать приборы на автомобиль и производить нивелирование при скорости движения до 30 км/ч.

Для создания компенсационного момента служит схема, представленная на рис. 162. На оси маятника 1 укреплен рамка 2, находящаяся в поле постоянного магнита. Якорь тахогенератора 3 приводится во вращение датчиком пути. Электродвижущая сила тахогенератора E_t пропорциональна скорости движения, а ток в цепи компенсации — ускорению автомобиля $\ddot{W}$. Действующий на рамку момент равен по величине и противоположен по направлению моменту, создаваемому тангенциальными ускорениями. Таким образом, исключается возможность отклонения маятника от вертикали при движении автомобиля с переменной скоростью.



Для получения $\sin \psi$ по углу, измеренному маятниковой системой, и ввода значения $\sin \psi$ в интегратор применяется фазо-импульсный метод преобразования угла в электрические импульсы.

Принципиальная электро-
механическая схема приборов
ВА-1М и ВА-56 дана на рис.
163. Барабан 4 глобоидальной
формы имеет на поверхности

контактный гребень 3, с которым замыкается тонкая контактная
 проволочка, укрепленная на конце маятника 1. Вторая контактная
 пара 5, 6 фиксирует нулевое положение системы. При вращении
 барабана 4 от электродвигателя 2 происходит поочередное
 замыкание контактных пар. Положение контактного гребня на
 барабане определяется временными интервалами τ между ну-
 левым импульсом и импульсом, возникающим при замыкании
 контакта маятника. Значение τ зависит от величины и знака угла



наклона прибора и, следовательно, определяется углом наклона местности. Форма контактного гребня выполняется так, чтобы $K \sin \nu = \tau/T$, где K — постоянный коэффициент, T — время одного оборота барабана. В качестве интегратора применена реверсивная электромагнитная муфта 6. Маломощные импульсы напряжения посылаются от контактной системы в электронное реле 7, осуществляющее переход от фазо-импульсного преобразования к широтно-импульсному и усиление мощности. Импульсы от реле производят очередное включение электромагнитов 10, 12 муфты, вращающихся от датчика пути 13 в противоположных направлениях. Суммарный поворот якоря 11 за время T , которому соответствует малый участок пути, ΔS_i , будет пропорционален $\Delta S_i \tau/T = K \Delta S_i \sin \nu_i$, т. е. превышению Δh_i . Ось якоря связана со счетчиком 8, учитывающим величину накопленного превышения на пройденном пути, равную $H_{AB} = K_h \sum_1^n \Delta S_i \sin \nu_i$, где K_h — масштабный коэффициент. Измеренные расстояния фиксируются счетчиком 9.

Прибор ВА-1М снабжен устройством для записи непрерывного профиля местности на фотоленте, которая перемещается пропорционально пути. При уходе линии записи за пределы бумаги линия появляется с противоположного края, что позволяет вести непрерывную запись профиля в крупном масштабе на узкой бумажной ленте. В приборе имеется устройство для фиксации на фотоленте характерных пунктов местности при помощи цифровых отметок.

Прибор ВА-56 установлен на автомобиле ГАЗ-69. В этом приборе предусмотрено дополнительное устройство, исключающее влияние рессорной подвески рамы автомобиля на точность измерения угла профиля местности. Принцип действия устройства основан на автоматическом вводе поправки в угловое положение маятника при всяком отклонении рамы автомобиля, возникающем вследствие упругости рессор.

Основные блоки прибора: датчик угла, пульт управления, тахогенератор компенсации и другие размещены в кабине автомобиля.

Датчиком пути приборов служат передние колеса автомобиля. При выполнении рейса автоматического нивелирования запрещается включать передний мост как ведущий, чтобы исключить влияние на точность измерений пробуксовок колес.

Скорость движения автомашины во время рабочего рейса не должна превышать 25—30 км/ч на хороших участках дороги.

Производительность полевых работ с приборами достигает 40—50 км двойного хода за семичасовой рабочий день. Камеральная обработка результатов измерений одного дня занимает около двух часов.

Основные технические данные приборов приведены в табл. 49.

Высотомер-автомат АВА (МИИГАиК). Прибор АВА смонтирован на специальной трехколесной тележке, перемещаемой по местности тягачом или вручную. Маятниковая система и схема компенсации подобны имеющимся в приборах ВА-1М и ВА-56.

В приборе применена число-импульсная схема интегрирования, выполненная на транзисторах, что обеспечивает малое потребление энергии, снижает массу и габариты прибора и повышает стабильность счетно-решающей части. Число-импульсное интегрирование в приборе АВА основано на заполнении временных интервалов между сигналами, поступающими от контактной системы, и импульсами, количество которых генерируется пропорционально пути, пройденному прибором.

ТАБЛИЦА 49

Техническая характеристика	Прибор		
	ВА-1М	ВА-56	АВА
Предельная скорость движения, км/ч	30	30	5* и 15
Предельный угол наклона местности, градус	15	15	15
Способ регистрации превышений	Визуальный отсчет и графическая запись	Визуальный отсчет	Визуальный отсчет и графическая запись
Цена делений счетчика, см:			
превышений	10	10	2* и 5
расстояний	100	100	10* и 30
Масштаб записи:			
вертикальный	1:200	—	1:100*
горизонтальный	1:4000	—	и 1:250 1:2000 и 1:5000
Средняя квадратическая ошибка определения высоты точки при двойном ходе длиной 10 км, проложенном между исходными реперами**, см	25	20	20
Потребляемая мощность, Вт	50	50	12

* При прокатке тележки вручную.

** По материалам полевых испытаний.

В течение каждого цикла измерений в счетные устройства поступает число импульсов, пропорциональное $\sin \nu_i$. В схеме имеется два счетных канала. При положительном ν_i импульсы поступают в первый канал, а при отрицательном ν_i — во второй.

Алгебраическое суммирование импульсов обоих каналов производится дифференциальным электромеханическим счетчиком. Таким образом, фиксируемое счетчиком число импульсов пропорционально

превышению, равному $\sum_{i=1}^n \Delta S_i \sin \nu_i$. Структурная схема прибора АВА представлена на рис. 164.

Прибор позволяет вести непрерывную запись профиля в двух масштабах на фотоленте шириной 50 мм. Для визуальных отсчетов имеются счетчики пути и превышений.

Рама тележки имеет форму равнобедренного треугольника, в вершинах которого установлены три колеса. Два колеса, находящиеся у основания треугольника, при движении тележки катятся по одному следу. Это обеспечивается тем, что переднее и заднее колеса соединены с поворотной тягой, производящей поворот колес на равные углы в противоположных направлениях. Датчиком пути служит неповоротное колесо тележки.

Пульт управления может устанавливаться в трех положениях:

- а) в кабине тягача — при работе с тягачом;
- б) на тележке — при прокатке тележки вручную;

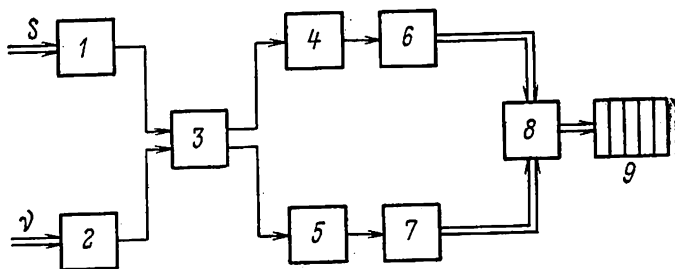


Рис. 164. Структурная схема прибора АВА:

1 — генератор импульсов; 2 — контактная система; 3 — схема распределения импульсов; 4, 5 — пересчетные схемы; 6, 7 — электромеханические счетчики импульсов; 8 — дифференциал; 9 — счетчик превышений

в) под общим кожухом тележки — в нерабочем положении.

Основные технические данные прибора приведены в табл. 49.

Высотомер-автомат Джонсона (США). Прибор установлен на автомобиле специальной конструкции и имеет маятниковый указатель вертикали, помещенный в жидкость для измерения углов наклона γ , и электронное вычислительное устройство для интегрирования, выполненное на транзисторах.

Датчиком пути служит пятое колесо, смонтированное между передними и задними колесами. В шинах колес автоматически поддерживается постоянное давление воздуха независимо от температуры окружающей среды, скорости движения и других факторов. Задние колеса автомобиля точно следуют по колес передних, что достигается одновременным поворотом всех четырех колес. Маятниковая система установлена между передним и задним мостами автомобиля на телескопической раме, благодаря чему исключается влияние подвески автомобиля на точность измерения угла наклона местности. В приборе производится цифровая печать результатов измерений при нажатии оператором специальной кнопки. Для устранения динамических воздействий на маятник отсчеты производятся на точках при остановке автомобиля.

В кабине автомобиля имеется система кондиционирования воздуха, что способствует повышению надежности работы прибора.

Пределы работы по углу продольного наклона $\pm 15^\circ$. Средняя производительность 80 км одиночных ходов в день. Точность измерений высот при одиночных ходах на хороших дорогах характеризуется средней квадратической ошибкой 0,3—0,6 м.

В.3.3. Топопривязчики

Топопривязчиком называется специальный автомобиль, на котором смонтирована навигационная аппаратура, обеспечивающая непрерывное автоматическое определение местонахождения автомобиля. Принцип работы топопривязчиков основан на непрерывном интегральном решении прямой геодезической задачи в плоских прямоугольных координатах с помощью вычислительного устройства по величине проходимого автомашиной пути и дирекционным углам бесконечно малых отрезков маршрута.

Текущие координаты движущейся машины вырабатываются на цифровых счетчиках вычислительным устройством, называемым кур-

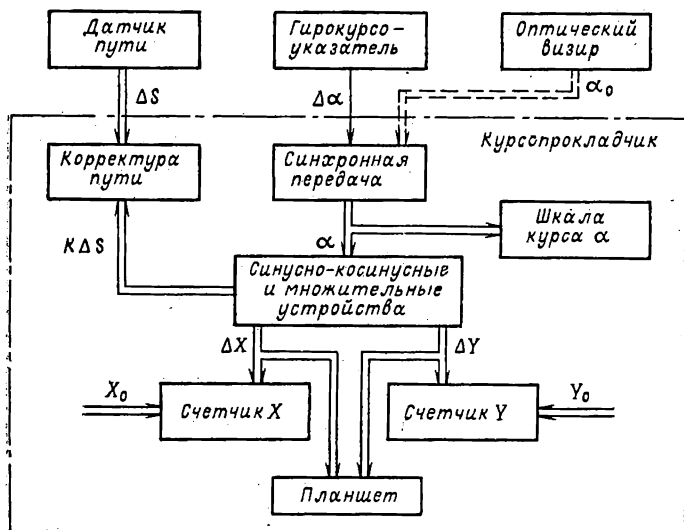


Рис. 165. Функциональная схема топопривязчика

сопрокладчиком, в соответствии с формулами

$$X = X_0 + \int_0^S \cos \alpha dS; \quad Y = Y_0 + \int_0^S \sin \alpha dS.$$

Одновременно маршрут движения автоматически вычерчивается на топографической карте или плане, установленных на специальном планшете.

Длина пути определяется датчиком пути, передающим информацию о расстоянии, проходимом передними колесами автомобиля (при этом передний мост не используется как ведущий). Некоторые топопривязчики, кроме датчика пути от передних колес имеют дополнительный датчик от пятого колеса, расположенного под кузовом автомобиля. Этот датчик применяется в случае необходимости включения переднего моста как ведущего. В некоторых топопривязчиках имеется электронный датчик пути, представляющий собой радиотехническое устройство, основанное на использовании эффекта Доплера, обеспечивающее определение пройденного расстояния без кинематической связи с ходовой частью автомашины.

Для измерения текущих значений дирекционных углов используется гирополюс (гирокурсоуказатель), обладающий способностью сохранять направление, заданное в горизонтальной плоскости, и который предварительно ориентируется на начальном пункте маршрута.

Текущие значения пути и дирекционного угла передаются в курсопрокладчик в виде электрических величин.

Функциональная схема топопривязчика показана на рис. 165.

Кроме датчика пути, гирокурсоуказателя и курсопрокладчика в комплект приборов топопривязчика входят визир ориентирования, источники питания, гирокомпас, буссоль, дальномер и др.

Визирное устройство служит для определения дирекционных углов продольной оси автомашины перед началом и по окончании ее движения по заданному маршруту.

Вычисление дирекционных углов продольной оси выполняется по формуле

$$\alpha_{\text{оси}} = \alpha_{\text{ор}} - \beta_{\text{виз}},$$

где $\alpha_{\text{ор}}$ — известный заранее дирекционный угол направления с начальной точки маршрута на видимый через визирное устройство местный предмет или геодезический пункт с известными координатами; $\beta_{\text{виз}}$ — отсчет по лимбу визира.

Входящий в комплект топопривязчика гирокомпас является вспомогательным выносным прибором, позволяющим определять истинные азимуты.

Точность определения координат точек местности с помощью топопривязчиков зависит в основном от качества работы курсовых гироскопов и датчиков пути, от длины рабочих маршрутов, наличия на маршрутах затяжных подъемов и спусков (так как в топопривязчиках измеряется наклонный путь, а не горизонтальный), от характера микрорельефа и свойств грунта, от точности юстировки визирного устройства и других причин.

Наиболее существенные систематические ошибки вызываются временным уходом (дрейфом) главной оси гирополукомпаса и малоточным определением корректурных коэффициентов пути.

Точность отечественных топопривязчиков характеризуется средней квадратической погрешностью 0,4—0,7 % пройденного пути. При движении топопривязчика по пересеченной местности со скользким или сыпучим грунтом ошибки могут возрастать в 1,5—2 раза.

Оценку точности топопривязчиков производят по результатам прокладки маршрутов между двумя точками на местности, расположенными на расстоянии 3—4 км одна от другой. Координаты точек X , Y и дирекционные углы направления продольной оси топопривязчика $\alpha_{\text{оси}}$ должны быть известны с достаточной точностью.

На основе определенных топопривязчиком значений координат X_T , Y_T и дирекционного угла $\alpha_{\text{оси}T}$ для каждого рейса вычисляются ошибки в определении координат и дирекционного угла по формулам

$$\delta_X = X_T - X; \quad \delta_Y = Y_T - Y;$$

$$\delta_\alpha = \alpha_{\text{оси}T} - \alpha_{\text{оси}}$$

и находят относительные (к пути) средние квадратические ошибки определения координат

$$m_X = \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{\delta_X}{S}\right)^2}{n}} 100 \%; \quad m_Y = \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{\delta_Y}{S}\right)^2}{n}} 100 \%,$$

где S — путь в м, пройденный машиной за один рейс; n — число рейсов.

Средняя арифметическая ошибка хода гироскопа за 15 мин движения (в делениях угломера)

$$m_\alpha = 15 \frac{\sum \delta_\alpha}{\sum t},$$

где t — время движения в одном рейсе в мин. Согласно требованиям к точности величины ошибок δ_x и δ_y не должны превышать 0,5 % от пройденного пути. Величина δ_α должна быть не более 0,5 деления угломера за 15 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полевой В. А. Работа с трехкоординатным топопривязчиком. М., Недра, 1978.
2. Ивандиков Я. М., Шиллингер В. И. Трехкоординатные топопривязчики. — В сб. Исследования по геодезии, аэрофотосъемке и картографии, вып. 4 (3), М., МИИГАиК, 1978, с. 49—57.

РАЗДЕЛ VI

ЭКОНОМИКА, ПЛАНИРОВАНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

К. В. Бажанов

VI.1. ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКОГО СТИМУЛИРОВАНИЯ ТОПОГРАФО-ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ГУГК

Производство топографо-геодезических работ является составной частью социалистического общественного производства.

Основной задачей деятельности ГУГК является наиболее полное удовлетворение растущих общенародных потребностей в геодезических данных, топографических съемках и картографических материалах. Исходя из этого, экономическая работа в отрасли нацелена на ускорение, интенсификации экономики топографо-геодезического производства, совершенствование системы планирования и стимулирования, развитие и укрепление хозяйственного расчета, усиление воздействия всего хозяйственного механизма на повышение эффективности производства и качества работы.

Как известно, центральным звеном, сердцевинной управления производством является планирование. Система планирования построена на сочетании перспективных и текущих планов экономического и социального развития отрасли в целом и отдельных предприятий и организаций.

Руководством по планированию топографо-геодезических работ установлен следующий порядок разработки планов.

Основой для разработки перспективных планов являются комплексные программы научно-технического прогресса топографо-геодезического производства, в которых делается научно-технический и социально-экономический прогноз на длительную перспективу (20 лет). Комплексные программы пересматриваются каждые пять лет.

На их основе и по данным технико-экономических докладов (ТЭДов) предприятий ГУГК разрабатывает проект основных направлений экономического и социального развития отрасли на 10 лет (по пятилеткам) и представляет в Госплан СССР. По получении контрольных цифр по основным показателям на предстоящую пятилетку ГУГК разрабатывает и доводит контрольные цифры до предприятий.

Руководствуясь контрольными цифрами и своими ТЭДами, предприятия и организации разрабатывают проекты пятилетних планов с распределением заданий по годам, представляют их в ГУГК, который разрабатывает проект пятилетнего плана отрасли и представляет его в Госплан. С учетом представленных отраслями проектов разрабатывается государственный план экономического и социального развития страны на пятилетку. Пятилетние планы яв-

ляются главной формой планирования экономического и социального развития и основой организации хозяйственной деятельности. Они разрабатываются на основе научно обоснованных технико-экономических норм и нормативов и включают задания и экономические нормативы для текущего годового планирования.

На основе этих заданий и экономических нормативов составляются текущие годовые планы. Их составление начинается снизу. Трудовые коллективы предприятий и организаций на основе использования внутрихозяйственных резервов, развертывания социального соревнования разрабатывают встречные планы, превышающие задания пятилетних планов на планируемый год. Встречные планы после увязки с материальными ресурсами включают в годовые планы.

Таким образом, встречное планирование становится эффективной формой реального участия всех трудовых коллективов в составлении и реализации государственных планов. В связи с этим в современных условиях интенсификации экономики возникают изменения в подходе к формированию планов. Исходной основой для них становится анализ использования производственных мощностей и всех видов ресурсов, постоянное совершенствование нормативной базы планов, последовательное снижение норм расхода ресурсов на единицу продукции. Управление планированием с помощью норм и нормативов позволяет обеспечить полную сбалансированность планов, нацелить их на достижение высоких конечных результатов и обеспечить тем самым наиболее полное удовлетворение общегосударственных потребностей.

Важной неотъемлемой частью хозяйственного механизма является хозяйственный расчет. Хозрасчет экономически заинтересовывает каждый производственный коллектив в эффективной работе. Это обеспечивается сочетанием государственных интересов с материальной заинтересованностью всего коллектива и каждого работника в высоких конечных результатах труда. Конкретные формы этого сочетания находит в системе стимулирования производительного, качественного труда.

Система стимулирования основана на важнейшем принципе самоокупаемости и рентабельности производства и осуществляется в следующем общем порядке.

Как уже говорилось выше, в пятилетних планах каждому предприятию устанавливается ряд основных показателей. В их число входят объем работ в сметной стоимости и размер планируемой прибыли. Коллектив предприятия разрабатывает меры, направленные на максимальное удешевление работ, тщательно учитывает все резервы, имеет право и экономически заинтересованно запланировать прибыль в большем, чем это установлено, размере. Полученная прибыль как разность сметной стоимости и фактической себестоимости работ является источником для образования фондов экономического стимулирования: фонда материального поощрения, фонда социально-культурных мероприятий и жилищного строительства и фонда развития производства. Чем большую прибыль будет планировать и получать предприятие, тем большие суммы будут поступать в фонд экономического стимулирования.

Фонд материального поощрения используется на премирование работников за выполнение показателей, установленных положением о премировании, на одновременное поощрение за выполнение особо важных производственных заданий, на премии коллективам и отдельным работникам — победителям в социальном соревновании и на одновременную помощь работающим. Из этого же фонда ежегодно

выплачивается вознаграждение работникам за общие результаты годовой деятельности предприятия. Размер вознаграждения зависит от производственного стажа работника и его вклада в результаты годовой деятельности предприятия.

Фонд социально-культурных мероприятий и жилищного строительства используется на строительство и капитальный ремонт жилых домов, столовых, буфетов, дошкольных учреждений, клубов, пионерских лагерей, санаториев, пансионатов, баз отдыха, спортивных и других сооружений культурно-бытового назначения, на приобретение для них оборудования, инвентаря, медикаментов, на оплату туристских путевок, путевок в дома отдыха и санатории, на культурно-просветительные и физкультурные мероприятия, на улучшение питания детей в яслях, детских садах и пионерских лагерях, на удешевление питания в столовых и буфетах предприятий.

Фонд развития производства используется на капитальное строительство для расширения производственных и бытовых помещений, на замену и обновление основных производственных фондов, на приобретение транспорта, на капитальные вложения по внедрению новой техники и технологии, на механизацию и автоматизацию производства и на другие мероприятия, обеспечивающие повышение эффективности производства.

Средства фондов расходуются по сметам, утвержденным руководством предприятием и согласованным с комитетом профсоюза, при активном участии всего производственного коллектива.

В соответствии с общими принципами стимулирования в предприятии разрабатываются положения о внутрихозяйственном расчете для всех производственных подразделений.

VI.2. СТОИМОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА ТОПОГРАФО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТ. СТРУКТУРА ЗАТРАТ

Как известно, стоимость производства работ является важнейшей экономической категорией.

В топографо-геодезическом производстве используют несколько стоимостных оценок:

- **сметная стоимость** — стоимость запланированного или выполненного объема работ, определяемая по сметам к техническим проектам на основании расценок (цен) или прямым расчетом;

- **плановая себестоимость** — стоимость запланированного или выполненного объема работ, определяемая в планах на текущий год на основании плановых калькуляций, выражающая ожидаемые (или ожидавшиеся) по разработанному плану затраты на производство;

- **себестоимость** — фактическая стоимость работ, которая подсчитывается в результате бухгалтерского учета фактических затрат на производство и выражает собственные уже произведенные затраты.

Разность между сметной стоимостью и плановой себестоимостью называют плановой прибылью, а разность между плановой себестоимостью и себестоимостью — сверхплановой прибылью. Таким образом, разность между сметной стоимостью и себестоимостью будет определять прибыль предприятия. Рассчитанная в бухгалтерских балансах с учетом доходов от непроизводственной деятельности, она носит название балансовой прибыли.

Осуществление режима экономии требует последовательного и неуклонного снижения себестоимости работ, т.е. экономного рас-

ходования всех видов ресурсов. Поэтому в системе плановых показателей ныне повышается значение показателя себестоимости. Добиться ее неуклонного снижения возможно лишь на основе тщательного анализа затрат, составляющих себестоимость по отдельным слагающим. Поэтому принято классифицировать все слагающие по отдельным признакам.

Структура себестоимости топографо-геодезических работ (по элементам затрат, в % к итогу) следующая: сырье и основные материалы — 3,5 %, вспомогательные и прочие материалы — 0,4 %, топливо и энергетические материалы — 1,5 %, малоценные и быстроизнашивающиеся предметы и спецодежда (износ) — 2,8 %, заработная плата основная и дополнительная — 49,2 %, начисления на заработную плату — 2,4 %, полевое довольствие — 5,4 %, амортизация — 5,2 %, транспорт — 27,8 %, прочие расходы — 1,8 %. Таким образом, в структуре себестоимости топографо-геодезических работ около половины занимают затраты на заработную плату, и их производство характеризуется как трудоемкое производство.

Предприятия ГУГК выполняют госбюджетные, финансируемые за счет средств государственного бюджета, работы и договорные, финансируемые за счет средств заказчиков. Объем работ в сметной стоимости или сметная стоимость госбюджетных работ в планах предприятий может быть превышена лишь в соответствующем порядке с разрешения ГУГК.

Топографо-геодезические работы выполняются двумя способами — хозяйственным и подрядным. На производство работ хозяйственным способом требуются собственные трудовые, материальные и финансовые ресурсы. При подрядном способе (например, аэрофотосъемочные работы, выполняемые по договорам авиаотрядами ГВФ) требуются лишь финансовые ресурсы.

Наконец, стоимость производства топографо-геодезических работ складывается из затрат на собственно производство работ и затрат на так называемые организационно-ликвидационные работы (орглики). Затраты на производство работ связаны с выполнением отдельных процессов непосредственно на объекте. Затраты на орглики связаны с подготовкой работ на объекте и их ликвидацией, т. е. на перевозке работников, собственных транспортных средств, приборов, инструментов, оборудования, материалов и в необходимых случаях горючего, продовольствия и фуража.

Существенная особенность затрат на организационно-ликвидационные работы состоит в том, что они трудно поддаются нормированию, а следовательно, снижается уровень их планирования, а углубленный экономический анализ проводится далеко не всегда. Между тем затраты на орглики могут достигать 70—80 % от затрат на собственно производство работ. Наведение порядка в планировании и использовании средств на организационно-ликвидационные работы является непременным условием экономного ведения хозяйства.

В свою очередь затраты на собственно производство работ и затраты на организационно-ликвидационные работы состоят из основных и накладных расходов. Основные расходы могут быть рассчитаны на единицу продукции по каждому процессу и состоят из отдельных статей.

Установлен следующий состав статей основных расходов:

В статью 1 — «Основная заработная плата производственного персонала» — входит основная заработная плата производственных инженерно-технических работников и рабочих; надбавки за районный коэффициент в размере от 15 до 100 %; надбавки за высоко-

горность в размерах 10 % при производстве работ на высотах от 1500 до 1700 м, 15 % — на высотах от 1701 до 2000 м, 30 % — от 2001 до 3000 м и 40 % — свыше 3000 м; надбавки при производстве работ в районах Крайнего Севера и приравненных к ним районах согласно действующим условиям оплаты труда в этих районах и премии, рассчитанные в соответствии с действующими положениями.

В статью 2 — «Дополнительная заработная плата производственного персонала» — включаются предусмотренные действующим законодательством о труде выплаты производственному персоналу за нерабочее время (очередные и учебные отпуска, выходные пособия, оплата за время, затраченное на выполнение государственных обязанностей, и т. п.); затраты на дополнительную заработную плату рассчитывают в следующих размерах от основной производственной заработной платы: для ИТР на полевых работах — 8,7 %, для ИТР на камеральных работах — 6,4 %, для рабочих — 4,2 %. При производстве работ на объектах, расположенных в районах Крайнего Севера и местностях, приравненных к ним, размер дополнительной заработной платы установлен соответственно 13,3; 10,0 и 8,5 %.

В статью 3 — «Начисления на заработную плату производственного персонала» — включаются отчисления на социальное страхование от основной и дополнительной заработной платы производственного персонала в размере 4,8 %.

В статью 4 — «Полевое довольствие производственного персонала» — включаются затраты по выплате полевого довольствия производственному персоналу в размере 40—50 % от заработной платы в зависимости от района производства работ.

В статью 5 — «Материалы» — входят все затраты на материалы, используемые непосредственно при производстве работ (цемент, гвозди, лесоматериалы, трубы, черные и цветные металлы, химикаты, фотобумага, фотопленка, журналы, бланки, чертежно-канцелярские материалы и др.), рассчитанные по действующим нормам расхода материалов и установленным ценам.

В статью 6 — «Транспорт производственный» — включаются затраты на содержание применяемого при производстве работ собственного транспорта, а также стоимость аренды наемного транспорта.

В статью 7 — «Амортизация производственных инструментов, приборов и оборудования» — входят амортизационные отчисления в установленных размерах от стоимости основных фондов, используемых непосредственно на топографо-геодезических работах.

В статью 8 — «Износ малоценных инструментов и предметов снаряжения» — включаются расходы по износу малоценных инструментов и предметов снаряжения, не числящихся в основных фондах. Сумма расходов определяется на основании перечня инструментов и предметов снаряжения, установленного для каждой бригады, и норм износа.

В статью 9 — «Прочие основные расходы» — входят оплата квартирных, суточных, подъемных и стоимости проезда при командировках и перемещениях производственного персонала, возмещение ущерба колхозам, совхозам и другим организациям и частным лицам, причиненного в связи с производством топографо-геодезических работ.

Накладные расходы не могут быть рассчитаны на единицу продукции. При составлении смет на производство топографо-геодезических работ их начисляют на суммы основных расходов в установленных для каждого предприятия размерах. В планах предприятий

их определяют непосредственным расчетом с учетом предстоящих фактических затрат и их уровня в прошлые годы.

Накладные расходы также состоят из отдельных статей. Без детальной расшивки к ним относятся затраты на содержание управленческого и административно-хозяйственного персонала предприятий, экспедиций и цехов; на содержание и ремонт зданий и транспортных средств; расходы по охране труда и технике безопасности, по повышению квалификации персонала, руководству практикой студентов, организованному набору рабочих, рационализации и изобретательству, содержанию охраны, почтово-канцелярские и другие расходы.

Существенную часть в накладных расходах составляют административно-управленческие расходы. Поэтому сокращение и установление оптимальных размеров административно-управленческого аппарата, ликвидация излишних звеньев и рациональное использование кадров в звеньях производственной сферы является непременным условием экономного хозяйствования.

VI.3. КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ (РАБОТ). СТАНДАРТИЗАЦИЯ

Качество продукции является одним из важнейших показателей конечной эффективности производства. Под качеством понимается совокупность свойств продукции, обуславливающих пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.

Продукция топографо-геодезического производства весьма разнообразна и характеризуется целым рядом показателей качества. Так, в целом качество топографо-геодезических работ принято характеризовать техническими данными схем построения сетей, надежностью и сохранностью на длительный срок геодезических центров и наружных знаков, точностью измерений, строгостью математической обработки результатов, безошибочностью каталогов, достоверностью и полнотой содержания планов и карт, качеством их художественного оформления и полиграфического исполнения.

Систематическое повышение качества продукции является обязательным требованием развития экономики. Поэтому на современном этапе интенсификации экономики особую важность приобретает проблема управления качеством продукции (работ). Управление качеством продукции — это установление, обеспечение и поддержание необходимого уровня качества продукции при ее разработке, производстве и эксплуатации при потреблении, осуществляемые путем систематического контроля качества и целенаправленного воздействия на условия и факторы, влияющие на качество продукции.

Организационно-технической основой государственного управления качеством являются система народнохозяйственного планирования и государственная система стандартизации.

В соответствии с постановлением о совершенствовании хозяйственного механизма отраслям и предприятиям утверждаются показатели роста производства продукции высшей категории качества или другие показатели качества, установленные для отрасли на пятилетку.

Совершенствуется система стандартизации. Стандартом называют нормативный документ, излагающий определенные правила и требования и обязательный для применения и выполнения в данной области производства. Разнообразием стандартов являются инст-

рукции, указания, технические условия, наставления, методики, которые несут несколько меньшую юридическую и правовую нагрузку. В зависимости от сферы действия стандарты подразделяются на государственные (ГОСТ), отраслевые (ОСТ), республиканские (РСТ) и стандарты предприятий (СТП). К началу 1981 года обновлен весь основной действующий фонд государственных стандартов и сокращен (до 4,2 года) средний срок их действия.

Рождение геодезической стандартизации относится к началу 70-х годов. Система стандартизации интенсивно развивается.

В топографо-геодезическом производстве решение задач управления качеством ведется по следующим основным направлениям:

- осуществление государственного геодезического надзора за качеством топографо-геодезических и картографических работ, выполняемых в стране всеми организациями независимо от их ведомственной принадлежности;

- создание комплексной системы управления качеством работ на предприятиях, фабриках и в производственных институтах системы ГУГК;

- развитие и совершенствование методов и форм социалистического соревнования за бездефектное выполнение и сдачу работ с первого предъявления и с личным штампом.

В системе ГУГК разработана и введена в действие с 1 февраля 1977 года. Комплексная система управления качеством геодезических и картографических работ (КС УГКР). Эта система внедряется на всех предприятиях и охватывает технические, экономические, социальные и организационные мероприятия исходя из действующих «Основных принципов Единой системы государственного управления качеством продукции». Основой этой системы служат создаваемые в предприятиях стандарты (СТП), а также руководящие технические материалы (РТМ) и руководящие материалы (РМ). Эти документы служат постоянным руководством и образцом для исполнителей работ при изготовлении и оформлении промежуточной и окончательной технической документации.

Решающая роль в улучшении качества продукции принадлежит предприятиям, активисты их коллективов. Трудовые коллективы, включившись в соревнование «Работать эффективно и качественно», сосредоточивают свои усилия на ускорении роста производительности труда, повышении качества продукции (работ). В этой связи особые задачи возникают в направлениях улучшения технологической дисциплины, повышении культуры производства, подготовки, расстановки и воспитания кадров производства.

За выпуск недоброкачественной продукции, не отвечающей требованиям стандартов, правил, инструкций, предусмотрена ответственность.

Дисциплинарная ответственность применяется в том случае, если нет оснований для привлечения работника к административной или уголовной ответственности, и выражается в форме наложения дисциплинарного взыскания вплоть до перевода на нижеоплачиваемую работу на срок до трех месяцев, или смещения на низшую должность на тот же срок, или увольнения.

К ограниченной материальной ответственности работник может быть привлечен за порчу или уничтожение материалов, полуфабрикатов, изделий, в том числе при их изготовлении; за порчу или уничтожение по небрежности инструментов, измерительных приборов, спецодежды, выданных в пользование предприятием, и выражается эта ответственность в виде возмещения причиненного ущерба,

но не свыше определенного предела (треть, две трети месячного заработка).

Имущественная ответственность возникает за поставку продукции более низкого качества, чем это требуют стандарты и технические условия, и выступает в форме штрафов (штрафные санкции).

VI.4. ТРУДОВЫЕ РЕСУРСЫ ПРЕДПРИЯТИИ

Труд является главной производительной силой производства.

Трудовые ресурсы предприятий определяются численностью его работников. Все работники объединяются в две группы: промышленно-производственный и непромышленный персонал.

К промышленно-производственному персоналу относятся работники, занятые непосредственно в сфере топографо-геодезического производства. Персонал непромышленных хозяйств не связан с основной деятельностью, но входит в штат предприятия. Это работники жилищно-коммунального хозяйства, медицинских учреждений, детских садов, клубов и т. п.

Инженерно-технические работники различаются по их квалификации: старший инженер, инженер, старший топограф, старший техник, топограф, техник, младший техник. Рабочие и исполняемые ими работы в соответствии с тарифной системой разделяются на шесть тарифных разрядов. Особую группу образуют лица административно-управленческого персонала (АУП).

Труд работников, как правило, нормируется. Нормы труда (нормы времени и выработки) устанавливаются с учетом полного и рационального использования оборудования, условий производства работ и передового производственного опыта. Под технической нормой времени понимают рассчитанное для определенных технических условий максимально допустимое рабочее время на выполнение заданного объема работ. Ее выражают в сменах или часах на единицу работ. Норма выработки — это количество продукции, которое должно быть изготовлено в единицу времени (час, смену, месяц).

На большинство процессов полевых и камеральных работ устанавливаются единые нормы времени и выработки, обязательные для всех организаций, ведущих топографо-геодезические работы. Таковыми в настоящее время являются «Единые нормы выработки и времени на топографо-геодезические работы», части I и II. М., Недра, 1982 (ЕНВ-82).

В топографо-геодезическом производстве применяются сдельная, повременная формы оплаты труда и новая, бригадная форма организации и стимулирования труда, которая должна стать основной.

Сдельная форма основана на оплате труда в прямой зависимости от его результатов, выраженных в произведенной продукции и выполненных операциях. За каждую единицу продукции устанавливается определенный размер оплаты — сдельная расценка, которая устанавливается делением тарифной ставки на соответствующую норму выработки.

В зависимости от конкретных условий применяют следующие системы оплаты труда:

— прямая индивидуальная, при которой оплата труда за единицу продукции производится по сдельной расценке независимо от перевыполнения норм выработки;

— сдельно-премиальная, при которой прямая сдельная оплата труда сочетается с премированием за выполнение установленных показателей;

— бригадная (коллективная) сдельная, при которой нормы и расценки устанавливаются на бригадную работу, заработная плата начисляется в целом по результатам работы бригады и затем распределяется между отдельными работниками;

— сдельно-прогрессивная, которая применяется в отдельных случаях для стимулирования увеличения объема продукции, ликвидации «узких мест»; по этой системе при перевыполнении норм выплаты оплаты производится по повышенным расценкам.

Бригадная форма организации и стимулирования труда наиболее полно отвечает современным требованиям научно-технического прогресса, возросшему образовательному, культурному и профессионально-техническому уровню работников. Хозрасчетным бригадам устанавливаются плановые задания по фонду заработной платы, использованию ресурсов, определяются формы и размеры поощрения за их экономию, взаимные обязательства (договор) бригады и администрации. Коллективы (советы) бригад имеют право в пределах нормативов и средств определять размеры премий и заработка, выплачиваемых за результаты труда всего коллектива бригады, с учетом реального вклада каждого в общие результаты работы путем определения каждому коэффициента трудового участия (КТУ); представлять членов бригады к установлению надбавок и доплат за профессиональное мастерство и совмещение профессий, рекомендовать администрации и профсоюзной организации изменения в установленном порядке разряд работника, определять победителей социалистического соревнования внутри бригады и размеры их поощрения.

Работа по бригадному подряду способствует более быстрому росту эффективности производства и качества работы, создает лучшие условия для укрепления трудовой дисциплины, роста молодых работников, созданию устойчивых трудовых коллективов, становится эффективной формой действительного участия трудовых коллективов в управлении производством, воспитания подлинно хозяйского отношения к делу.

Повременная оплата применяется на тех процессах, где техническое нормирование не представляется возможным или целесообразным в связи с частым изменением содержания и последовательности работ. При повременной форме заработной платы труд работника оплачивается в зависимости от отработанного времени. Различают две системы повременной оплаты труда:

— простая повременная, при которой труд работника оплачивается за определенное время работы, исходя из месячного оклада;

— повременно-премиальная, при которой к сумме оплаты за проработанное время дополнительно выплачивается премия за установленные количественные и качественные показатели в работе.

Вся сумма денежных средств предприятия, выделенная государством для оплаты труда работников, составляет фонд заработной платы. Общий плановый фонд заработной платы для каждого предприятия устанавливает ГУГК. Отношение общего фонда заработной платы к среднечисленной численности называют средней заработной платой. При планировании роста средней заработной платы соблюдается непреложный принцип — опережение темпов роста производительности труда по сравнению с темпами роста средней заработной платы.

VI.5. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ТРУДА. РЕЗЕРВЫ ЕЕ РОСТА

Производительность труда — главный фактор экономического роста. Неуклонный рост производительности труда является основой развития всего общественного производства. На каждом участке производства должны хорошо знать показатели производительности труда, факторы его экономии, обеспечивать рост производительности труда на своем участке.

Основным показателем для планирования и учета производительности труда служит выработка в расчете на каждого работающего в единицу рабочего времени. Для исчисления этого показателя объем изготовленной продукции делят на численность работников.

В зависимости от метода выражения объема произведенной продукции различают несколько методов исчисления производительности труда:

— натуральный, при котором объем продукции выражается в натуральных показателях. Его разновидностью является условно-натуральный метод, при котором объем продукции (и выработка) выражаются в квадратных километрах съемки, приведенной к масштабу 1 : 10 000;

— стоимостной, при котором объем продукции выражается в денежной форме, в сметной стоимости. Этот метод универсален, но не совершенен, потому что сметная стоимость работ далеко не пропорциональна затратам рабочего времени, объему вложенного труда;

— трудовой, при котором объем продукции выражается количеством нормированного времени (нормо-дней, нормо-часов). Этот метод применяется в производстве, более надежен, чем стоимостной, но имеет свои недостатки и не универсален.

Для усиления действия принципа распределения по труду, усиления контроля за мерой труда и мерой потребления необходимо оценивать вклад в общее дело каждой отрасли, каждого трудового коллектива более точно. Поэтому постановлением о совершенствовании хозяйственного механизма предусмотрен переход на новый метод для определения объема продукции, исчисления уровня производительности труда и планирования заработной платы по нормативной чистой продукции (НЧП).

Введение этого показателя позволяет более точно отразить затраты труда работников данного предприятия без учета затрат труда других коллективов, воплощенных в покупных изделиях и других материальных ресурсах. Переход на показатель НЧП будет осуществляться по мере готовности к переходу на этот показатель отдельных отраслей. Ведутся исследования о применении этого показателя и в топографо-геодезическом производстве*.

В планировании и учете производительности труда используется также показатель трудоемкости. Он характеризует количество рабочего времени, затрачиваемого на производство единицы продукции. Чем меньше трудоемкость продукции, тем больше ее выработка на каждого работающего.

Плановые задания и отчетные показатели по росту производительности труда обычно исчисляются в процентах к соответствующему базисному периоду. В новых условиях хозяйствования оценка выполнения пятилетнего плана производится нарастающим итогом

* Геодезия и картография, 1980, № 6, с. 5—8.

с начала пятилетки, а годового — с начала года. Основные расчеты в этих случаях производятся в следующем порядке.

Рост производительности труда за ряд лет определяется перемножением соответствующих индексов. Если, например, в первый год пятилетки производительность труда выросла на 4 %, во второй — на 6 % и в третий — на 5 %, то рост производительности труда за три года составит

$$1,04 \cdot 1,06 \cdot 1,05 \cdot 100 = 105,7 \%$$

Для определения среднего процента роста производительности труда за ряд лет (или месяцев) пользуются формулой

$$\left(1 + \frac{P}{100}\right)^t = K, \quad (\text{VI.5.1})$$

где P — среднегодовой (среднемесячный) рост производительности труда, %; t — число лет (месяцев); K — общий коэффициент роста выработки за данный ряд лет (месяцев). Так, если предприятие, например, должно повысить производительность труда за пятилетие на 20 %, то по формуле

$$\left(1 + \frac{P}{100}\right)^5 = 1,20$$

получим, что $P = 3,7 \%$.

Доля увеличения объема продукции за счет повышения производительности труда определяется по следующей формуле:

$$П = 100 - \frac{П_{\text{числ}}}{П_{\text{прод}}} \cdot 100, \quad (\text{VI.5.2})$$

где $П$ — процент прироста продукции за счет повышения производительности труда; $П_{\text{числ}}$ — процент увеличения численности работников; $П_{\text{прод}}$ — процент увеличения объема продукции.

Так, если объем производства увеличивается на 30 %, а численность на 6 %, то процент прироста продукции за счет повышения производительности труда составит

$$100 - \frac{6}{30} \cdot 100 = 80 \%$$

При оценке уровня производительности труда на рабочих местах нередко судят по проценту выполнения норм выработки. Говорится, например, что бригада выполняет нормы выработки на 110 %. Если нормы выработки технически обоснованы и выполнялись, например, в прошлом году на 100 %, то можно говорить о росте производительности труда на 10 %. А если и раньше бригада выполняла нормы на 110 %, то никакого роста производительности труда не произошло *.

Повышение производительности труда требует систематического выявления и всемерного использования имеющихся резервов. Выявление резервов ведется в следующих направлениях:

— снижение трудоемкости продукции путем улучшения ее конструктивных характеристик, роста технической вооруженности и квалификации труда, совершенствования технологии производства, внедрения передовых методов труда и опыта новаторов;

* [5], с. 106.

— улучшение использования рабочего времени путем ликвидации прогулов, опозданий и других нарушений трудовой дисциплины, устранения потерь рабочего времени из-за плохой организации труда и производства, устранения непроизводительных затрат труда (потери от брака, отклонения от технологического процесса и т. п.);

— использование кадров в трудовых коллективах — сокращение текучести кадров, создание стабильных трудовых коллективов, бригадная организация и оплата труда, совершенствование структуры работающих (сокращение аппарата управления, оптимальное соотношение отдельных категорий работающих и т. д.).

Рассматривая производительность труда как главный фактор экономического роста, нельзя сводить повышение производительности труда только к экономии живого труда. По своей экономической сущности повышение производительности труда означает экономии совокупных затрат на единицу готового продукта — и живого и прошлого труда, овеществленного в средствах и предметах труда. В современных условиях в росте общественной производительности труда существенно возросло значение экономии прошлого, овеществленного труда и всемерная экономия материальных ресурсов производства выступает как существенное направление интенсификации экономики.

VI.6. МАТЕРИАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ ПРЕДПРИЯТИЙ. ПУТИ ИХ ЭКОНОМИИ

Материальные ресурсы предприятий составляют материально-вещественные элементы производства. Их называют производственными фондами и разделяют на основные фонды и оборотные фонды.

Основные фонды переносят свою стоимость на себестоимость продукции по частям, обслуживают многие производственные циклы и в процессе производства не изменяют свою натуральную форму.

Основные фонды разделяют на производственные — средства труда, непосредственно участвующие в процессе производства, и непроизводственные — здания, сооружения культурно-бытового назначения и жилые дома и т. п. В практике бухгалтерского учета к основным фондам относят предметы средств труда дороже 100 руб. со сроком службы более одного года, а весь остальной, так называемый малоценный и быстроизнашивающийся инвентарь относят к оборотным фондам.

В структуре основных фондов предприятий 50—65 % их стоимости составляют машины и оборудование и транспортные средства. Эти группы являются активной частью основных фондов, определяющей производственную мощность предприятий и их подразделений.

Под производственной мощностью предприятий понимают его максимальную способность к выпуску определенного объема продукции определенной номенклатуры. Имеющиеся в распоряжении предприятия основные фонды характеризуют фондовооруженность труда, которая исчисляется числом основных производственных фондов, приходящихся на одного работающего.

Основные фонды выделяются каждому предприятию при его организации в так называемом «Уставном фонде», а затем пополняются за счет централизованных и собственных средств на капитальные вложения. Предприятия имеют право для этой цели использовать долгосрочный банковский кредит.

Предприятия несут ответственность за используемые основные фонды и вносят ежегодно в государственный бюджет плату за фон-

ды из прибыли в размере до 6 % от среднегодовой стоимости основных фондов. Плата не взимается с той части основных фондов, которые используются в научных целях или предназначены для работы в особых районах, а также за вновь вводимые в действие производственные помещения, установки и уникальные приборы и инструменты.

Основные фонды учитывают в натуральном (количественном) и стоимостном выражениях. В практике бухгалтерского учета используют несколько видов стоимостных оценок. Главной из них является оценка по первоначальной (балансовой) стоимости, которая выражает всю сумму денежных затрат на создание основных фондов (стоимость строительства зданий, сооружений до ввода в эксплуатацию или затраты на приобретение оборудования и наладочно-пусковые работы). Первоначальная стоимость может быть изменена лишь в результате общегосударственной переоценки основных фондов.

Постепенный физический и моральный износ основных фондов называют амортизацией. В экономическом смысле амортизация — это денежное выражение той части стоимости основных фондов, которая в процессе производства переносится на вновь создаваемую продукцию и предназначена для их возобновления на новой технической основе. Перенос стоимости потребленных в процессе производства основных фондов на себестоимость продукции осуществляется при помощи амортизационных отчислений, которые и включаются в себестоимость продукции.

Сумма амортизационных отчислений, предназначенных на капитальный ремонт и модернизацию, остается в распоряжении предприятия. Из суммы амортизационных отчислений, предназначенных для полного восстановления основных фондов, до 50 % остаются в распоряжении предприятия и направляются в фонд развития производства, а остальная часть в соответствии с действующими положениями используется как источник финансирования централизованных капитальных вложений.

Рациональное использование производственных основных фондов, повышение эффективности их использования является одним из основных направлений интенсификации производства. Эффективность использования основных фондов оценивают рядом показателей.

Важнейшим обобщающим показателем является фондоотдача.

Фондоотдача определяется объемом выпуска продукции на рубль среднегодовой стоимости фондов. Для исчисления фондоотдачи нужно объем работ в сметной стоимости разделить на стоимость основных фондов. Показатель, обратный фондоотдаче, называют фондоемкостью.

Оценка фондоотдачи по сметной стоимости имеет недостатки, поэтому предусмотрен* переход на ее исчисление по нормативной чистой продукции. В этом случае появляется возможность сравнения этого показателя для разных предприятий по абсолютной величине, а не только по динамике его роста.

При анализе загрузки оборудования используются следующие основные показатели.

Коэффициент интенсивной загрузки оборудования $K_{и}$ рассчитывается по формуле

$$K_{и} = M_{ф}/M_{пр}, \quad (VI.6.1)$$

где $M_{пр}$ — мощность проектная; $M_{ф}$ — мощность фактическая.

* [5], с. 116.

Например, на универсальном приборе по нормативам следует зарисовать в месяц 100 км² съемки масштаба 1 : 10 000, а фактически зарисовывается 80 км², поэтому

$$K_{\text{н}} = 80/100 = 0,80.$$

Коэффициент экстенсивной загрузки оборудования $K_{\text{э}}$ рассчитывается по формуле

$$K_{\text{э}} = B_{\text{ф}}/B_{\text{пл}}, \quad (\text{VI.6.2})$$

где $B_{\text{пл}}$ — плановый фонд времени; $B_{\text{ф}}$ — фактически отработанное время.

Например, плановый фонд времени работы универсального прибора за месяц составляет 180 часов, а фактически отработано 150. Поэтому

$$K_{\text{э}} = 150/180 = 0,83.$$

Интегральный (полный) коэффициент загрузки оборудования $K_{\text{инт}}$ вычисляется по формуле

$$K_{\text{инт}} = K_{\text{н}} \cdot K_{\text{э}}. \quad (\text{VI.6.3})$$

Для данного примера его величина будет

$$K_{\text{инт}} = 0,80 \cdot 0,83 = 0,66.$$

Коэффициент сменности $K_{\text{см}}$ вычисляется по формуле

$$K_{\text{см}} = B/A, \quad (\text{VI.6.4})$$

где B — количество (сумма) отработанных приборо-смен за сутки; A — общее количество приборов.

Например, в цехе установлено 30 приборов, а работало в первую смену 28, а во вторую — 20. Коэффициент сменности при двухсменном режиме работы составит

$$K_{\text{см}} = (28 + 20)/30 = 1,6.$$

В практике применяется расчет показателя фондоотдачи по выработке в натуральных показателях на единицу оборудования—выработка на один универсальный прибор квадратных километров съемки или на один светодальноммер — сторон полигонометрии.

Повышение эффективности использования основных фондов требует систематического выявления и всемерного использования имеющихся резервов. Выявление резервов ведется в следующих направлениях:

- увеличение времени работы машин, механизмов, оборудования путем ввода в действие неустановленного оборудования, повышения коэффициента сменности, ликвидации внутрисменных простоев, сокращения времени нахождения в ремонте;

- оптимальная загрузка техники, производственных площадей, путем ускорения сроков достижения проектной производительности техники, ликвидации узких мест и обеспечения соответствия мощности отдельных участков, скоростных методов работы, внедрения научной организации труда и производства, рационального использования производственных площадей;

- техническое совершенствование производственных основных фондов путем реконструкции на базе новой техники, развития рационализаторского движения, использования прогрессивных технологических процессов, модернизации оборудования.

К оборотным фондам относят те материально-вещественные элементы производства, которые целиком потребляются в одном про-

изводственном цикле, полностью переносят свою стоимость на себестоимость продукции и в процессе производства изменяют свою натуральную форму. Кроме оборотных фондов предприятия имеют фонды обращения — средства в виде готовой продукции, не переданной потребителю, и денежные средства, находящиеся в кассе, на счетах в банке, в пути, в расчетах. Совокупность денежных средств, авансированных в оборотные производственные фонды и фонды обращения, образуют оборотные средства предприятий. Оборотные средства в зависимости от источников формирования подразделяются на собственные (закрепленные в уставном фонде) и заемные (полученные в виде краткосрочного банковского кредита), а по особенностям планирования и принципам организации — на нормируемые и ненормируемые. К нормируемым оборотным средствам относят оборотные фонды и готовую продукцию, а к ненормируемым — средства в расчетах и денежные средства предприятия.

Оборотные средства в процессе производства совершают кругооборот: имеющиеся у предприятия оборотные средства затрачиваются на приобретение оборотных фондов, последние в процессе производства превращаются в готовую продукцию и после ее реализации вновь поступают в распоряжение предприятия в виде оборотных средств. Этот процесс называют оборачиваемостью оборотных средств. Для оценки оборачиваемости используют показатели: число оборотов (коэффициент оборачиваемости) и время одного оборота (оборотная периодичность в днях). Для расчета числа оборотов объем работ в сметной стоимости делят на среднюю сумму оборотных средств. Для определения времени оборота нужно число дней в отчетном периоде (за год — 360, квартал — 90) разделить на число оборотов.

Ускорение оборачиваемости оборотных средств — непереносимое условие экономного хозяйствования. Особое значение в современных условиях интенсификации производства приобретает уменьшение материалоемкости, энергоемкости продукции — прямая экономия всех видов ресурсов производства.

Основные направления экономии ресурсов следующие:

- снижение материалоемкости продукции путем разработки более экономичных проектов на объекты работ, конструкций центров и знаков, широкого применения ресурсосберегающей техники, внедрения малоотходной и безотходной технологии, использования прогрессивных видов конструкционных материалов;

- сокращение потерь в производственном процессе путем устранения потерь при заготовке, переработке, транспортировке и хранении, усиления сохранности материальных ресурсов (борьба с безхозяйственностью, расточительством, хищениями), ликвидации брака;

- увеличение выхода конечной продукции путем внедрения научно обоснованных норм расхода материалов, топлива, энергии, применения прогрессивных форм материально-технического обеспечения производства, улучшения качества, потребительского эффекта продукции;

- полное использование вторичных ресурсов и отходов путем утилизации и использования всех отходов сырья и материалов, многократного использования тары, вспомогательных материалов, сбора и использования бытовых отходов.

Обобщающим показателем эффективности использования выделенных в распоряжение предприятия производственных фондов является рентабельность, которую вычисляют как отношение прибыли к стоимости основных фондов и нормируемых оборотных средств.

VI.7. ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ НОВОЙ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Одно из решающих направлений интенсификации производства—научно-технический прогресс. Его ускорение становится более настоятельным, чем когда-либо ранее. Достижение высоких конечных результатов, рост которых опережает затраты, может быть обеспечено прежде всего на основе широкого внедрения прогрессивной ресурсосберегающей техники и технологии.

Методы расчета эффективности и конкретные показатели весьма разнообразны. Наиболее полно они освещены в книге [3].

При определении экономической эффективности нового мероприятия необходимо рассчитывать время, в течение которого дополнительные затраты, требуемые на осуществление этого мероприятия, будут возвращены за счет снижения себестоимости работ после внедрения. Этот период времени называют сроком окупаемости T . Его рассчитывают по формуле

$$T = \frac{K_H - K_C}{C_C - C_H}, \quad (\text{VI.7.1})$$

где K_H — капитальные вложения на создание новой техники; K_C — стоимость старой техники; C_H — себестоимость годового объема продукции (работ) с помощью новой техники; C_C — себестоимость такого же объема продукции (работ) с использованием старой техники.

Рассчитанный срок окупаемости T сравнивают с нормативным T_H . Если рассчитанный срок меньше нормативного, то мероприятие экономически целесообразно.

Величину, обратную нормативному сроку окупаемости, называют коэффициентом сравнительной экономической эффективности E_H . Для топографо-геодезического производства принимают $E_H = 0,15$; $T_H = 7$.

Согласно типовой методике показателем сравнительной экономической эффективности капитальных вложений является минимум приведенных затрат Z_i :

$$Z_i = C_i + E_H K_i = \min, \quad (\text{VI.7.2})$$

где K_i — капитальные вложения по каждому варианту; C_i — себестоимость по этому же варианту; E_H — нормативный коэффициент сравнительной эффективности. Разность годовых приведенных затрат по старому (базовому) варианту Z_C и новому Z_H выразит размер годового экономического эффекта $\mathcal{E}_r$:

$$\mathcal{E}_r = Z_C - Z_H, \quad (\text{VI.7.3})$$

а с учетом (VI.7.2)

$$\mathcal{E}_r = (C_C + E_H K_C) - (C_H + E_H K_H) \quad (\text{VI.7.4})$$

или

$$\mathcal{E}_r = (C_C - C_H) - E_H (K_H - K_C). \quad (\text{VI.7.5})$$

Пусть, например, требуется определить годовой экономический эффект от внедрения редуктора для буровой установки, позволяющего ввинчивать трубчатые центры. Для введения мероприятия потребовались дополнительные капитальные вложения в объеме 505 руб. ($K_H - K_C = 505$). Себестоимость годового объема работ после внедрения составила 5607 руб. ($C_H = 5607$), а до внедрения составляла 19 162 руб. ($C_C = 19\,162$). По формуле (VI.7.5)

$$\mathcal{E}_r = (19\,162 - 5607) - 0,15 \cdot 505 = 13,5 \text{ тыс. руб.}$$

VI.8. ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА В ПРЕДПРИЯТИЯХ ГУГК

В топографо-геодезическом производстве принят проектно-сметный метод планирования. Его сущность состоит в том, что на каждый объект работ разрабатывается технический проект. Проектирование осуществляется в два этапа. Вначале составляется собственнотехнический проект, в котором определяют наиболее экономичный вариант технического и технологического решения, объемы работ подсчитывают по укрупненным процессам, а их стоимость — по расценкам на топографо-геодезические работы. Затем разрабатывают технологический (рабочий) проект, в котором определяют детально технологию работ, объемы работ подсчитывают по всем процессам и производят расчет (калькуляцию) себестоимости работ с учетом максимально возможной экономии всех видов ресурсов. Материалы технического проектирования используют для планирования.

Годовой план экономического и социального развития предприятия принято называть техпромфинпланом. После утверждения начальником предприятия он приобретает силу закона для всего коллектива и каждого работника.

Техпромфинплан — весьма объемный документ. Он включает более 30 плановых форм (специальных таблиц) и приложений к ним.

План экспедиции, цеха состоит также из ряда взаимосвязанных плановых форм. Основными из них являются следующие. План топографо-геодезических работ по объектам (ф. 2-ЭЦ), в котором приводятся объемы работ и нормы выработки на всех объектах по всем процессам, плановые расходы всех видов ресурсов на планируемые объемы работ по всем статьям основных расходов, накладные расходы, сметная стоимость и плановая себестоимость работ.

В плане себестоимости работ (ф. 5-ЭЦ) приводится расчет плановой себестоимости на год и по кварталам по основным и накладным расходам.

В плане по труду и фонду заработной платы (ф. 8-ЭЦ) указываются численность работников по категориям, фонд заработной платы, выработка на одного работающего и средняя заработная плата.

В плане по фонду материального поощрения приводится размер планируемой прибыли, распределение фонда материального поощрения, а в квартальном плане объемы работ распределяются по месяцам.

Производственный план цеха имеет те же основные разделы, что и план экспедиции. Цеховые накладные расходы на содержание управленческого персонала утверждают по определенным для цеха штатам, а расходы на содержание производственных помещений, отопление, освещение, электроэнергию и другие нужды выделяют из общих накладных расходов предприятия.

Полевой партии, входящей в состав экспедиции, выдается плановое задание, которое является частью производственного плана экспедиции. Начальнику партии устанавливают лимит накладных расходов, в пределах которого он производит затраты на аренду помещений, их содержание и другие хозяйственные нужды. Планы работ отдельно действующих партий более подробны.

Начальники партий и бригады камеральных цехов выдают исполнителям наряды на производство работ по установленной форме, в которых указываются перечень видов и объемы работ, нормы выработки, сроки выполнения работ, составы бригад, тарифы и оклады работников, количество времени на организационно-ликвидационные работы.

ционные работы, лимиты расхода материалов и другие данные. Работа подрядных бригад планируется и организуется по одному на длительный срок наряды.

Кроме собственно плановых документов экспедициям, цехам, партиям, бригадам и исполнителям выдаются технические предписания, в которых излагаются особенности технического и организационного выполнения работ, меры по охране труда, включая меры по технике безопасности, порядок материально-технического обеспечения работ, связи, контроля и приемки работ и другие сведения, необходимые для успешного выполнения установленных плановых заданий.

В планово-экономической работе в настоящее время все большее применение находят экономико-математические методы, методы оптимального планирования и электронно-вычислительная техника, способствующие повышению ее уровня (см. гл. VI.10).

VI.9. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Организация производства представляет собой совокупность методов, обеспечивающих наиболее целесообразное соединение и использование во времени и пространстве средств труда, предметов труда и самого труда с целью наилучшего выполнения установленных плановых заданий.

Организационная работа на предприятии ведется по всем направлениям, основными из которых являются организация управления, общая организация производства, организация труда, организация материально-технического снабжения, организация контроля и приемки работ.

В основе управления промышленным предприятием лежат линейный и функциональный принципы. Поэтому организационная структура управления предприятием, примерная схема которой приведена на рис. 166, строится по линейно-функциональной системе. Линейные руководители — начальник предприятия, начальники экспедиций, цехов, партий и руководители бригад осуществляют непосредственное руководство по принципу единоначалия, наделены необходимыми правами и несут ответственность за деятельность подчиненных им подразделений. Функциональные отделы ведут подготовительную работу, разрабатывают рекомендации, на основании которых линейный аппарат принимает управленческие решения, и несут ответственность за качество выполняемой ими работы.

С развитием производства совершенствуется и организационная структура управления, актуальной задачей в современных условиях является сокращение и упрощение управленческого аппарата.

Общая организация производства направлена на обеспечение пропорциональности, непрерывности и равномерности работы. Пропорциональность достигается обеспечением соответствия мощностей полевого и камерального производства. Непрерывность и равномерность производства — важные условия сокращения длительности производственного цикла, которое достигается путем сокращения перерывов в технологическом процессе по данному виду работ, предотвращения простоев, устранения непроизводительных потерь времени, особенно в течение полевого сезона. Равномерность работы обеспечивается путем создания так называемых заделов. Под образованием задела понимают планируемое на данный момент увеличение объема работ по предыдущему процессу по сравнению с последующим. Объемы заделов планируют на минимально необходимом уровне.

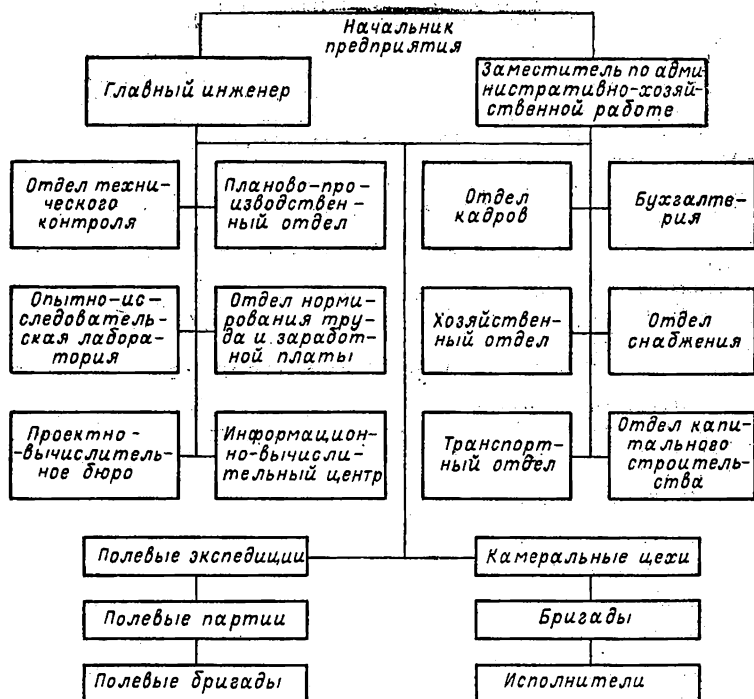


Рис. 166. Примерная организационная структура предприятия

Равномерная работа всех подразделений предприятия обеспечивает ритмичный выпуск конечной продукции — оригиналов карт и планов. Ритмичность выпуска продукции самым существенным образом зависит от ритмичности работы полевых подразделений, от плановости, тщательности разработки и действенности организационных мероприятий в период подготовки экспедиций к полевым работам.

Организация труда имеет целью планомерное и наиболее рациональное использование рабочего времени работников для обеспечения высокой производительности при одновременном улучшении условий труда. В настоящее время организационная работа в этой области базируется на развитии и внедрении методов научной организации труда и производства и проводится по следующим основным направлениям:

- углубление разделения и улучшение кооперирования труда путем создания комплексных экспедиций, партий и бригад, укрупнения партий и бригад и совмещения профессий;
- развитие прогрессивной бригадной формы организации труда с его оплатой по единому наряду;
- улучшение организации обслуживания рабочих мест путем обеспечения бригад типовыми комплектами современного полевого оборудования, снаряжения, спецодежды и спецобуви, путем разработки новых образцов лагерного инвентаря, приспособлений к инструментам и рациональных вычислительных форм и таблиц;

— совершенствование трудовых процессов путем изучения и распространения методов работы передовиков производства, разработки и внедрения типовых проектов организации труда, новых приемов труда, применения серийно выпускаемых средств механизации труда;

— повышение квалификации кадров путем проведения качественного инструктажа, технической учебы, производственно-технических конференций по обмену опытом;

— совершенствование нормирования путем внедрения технически обоснованных норм выработки и составов бригад, дифференцированных норм в зависимости от конкретных условий работ;

— создание наиболее благоприятных в санитарно-гигиеническом, психофизиологическом, эстетическом отношениях условий труда, безопасности работ путем разработки оптимальных режимов труда и отдыха, тщательного подбора составов бригад, обучения их методам безопасного ведения работ и оказания первой помощи, путем повышения культуры и эстетики труда, введения рационального освещения, снижения уровня шума, улучшения общих санитарно-гигиенических условий в производственных помещениях.

Научная организация труда и производства — проблема комплексная. Основными критериями оценки уровня научной организации труда и производства следует считать производительность труда, качество работ, состояние санитарно-гигиенических и психофизиологических условий, уровень культуры и эстетики труда. Важной частью организационной работы, направленной на повышение уровня научной организации труда и производства, является широкое развертывание социалистического соревнования, своевременность и гласность подведения его итогов.

Материально-техническое снабжение экспедиций организуется через центральный склад предприятия, базы и оптовые магазины территориальных управлений снабжения и через розничную торговлю. Полевые бригады снабжаются через склад экспедиции, а при работе в труднодоступных районах — склад партии. Все товарно-материальные ценности отпускаются со складов по предварительным заявкам на основании специальных документов — накладных. Руководители полевых бригад несут материальную ответственность за сохранность полученных ими товарно-материальных ценностей в установленном порядке.

Организация контроля качества и приемки работ, являясь функциональной подсистемой комплексной системы управления качеством, направлена на повышение качества работ, предупреждение брака, определение готовности продукции для ее выпуска или последующей обработки и оценки качества исполненных работ.

На полевых работах непосредственный контроль качества работ исполнителя и приемку работ производит начальник партии. Он обязан проверять работу каждого исполнителя не реже 1—2 раз в месяц в зависимости от условий производства работ. Начальник экспедиции, главный инженер, инспектор отдела технического контроля (ОТК) и редактор производят контроль работы каждого исполнителя не менее одного раза в течение полевого сезона. Качество работы исполнителей проверяют также инспектирующие лица предприятий и ГУГК. Контрольные проверки полевых работ производят путем просмотра материалов, инструментальной проверки в поле и наблюдения за работой исполнителя. В результате контроля составляется двусторонний акт, в котором указывают данные результатов проверки, замечания и указания по дальнейшему производству работ. Приемка исполненной полевой продукции от исполнителя производится начальником партии, от начальника партии — начальни-

ком экспедиции или главным инженером, от руководства экспедиции—инспектором ОТК. На камеральных работах непосредственный контроль качества и приемку работ от исполнителя осуществляет бригадир. Регулярно контролируют качество работ исполнителя и принимают продукцию от бригадира Начальник цеха или сменный инженер и инспектор ОТК.

VI.10. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Управление в современном широком смысле этого слова определяют как целенаправленные воздействия на коллективы работников для координации их деятельности в процессе производства. К функциям управления относят планирование, организацию, координирование (оперативное управление), контроль и учет. Основными методами управления являются экономические, организационно-распорядительные и социально-психологические.

Экономические методы представляют собой систему экономических мер, определяющих хозяйственную деятельность предприятия. Они основаны на использовании совпадения интересов всего общества, отдельного коллектива и каждого работника и создают условия, при которых выгодно работать хорошо.

Организационно-распорядительные методы являются дополнением к экономическим. Путем организационно-распорядительных воздействий формируется оптимальная производственная структура, определяются формы связей между подразделениями, порядок разделения и кооперирования труда, четко разграничиваются права и обязанности звеньев управления. Распорядительные воздействия в форме приказов и распоряжений развивают и конкретизируют организационные формы управления.

Социально-психологические методы управления направлены на создание социальных условий и психологической атмосферы, способствующих повышению эффективности труда. К ним относятся мероприятия, намеряемые в планах социального развития коллективов: повышение квалификации, улучшение условий труда, улучшение бытового обслуживания и отдыха и другие воспитательные меры, направленные на развитие экономического мышления, трудовой активности, инициативы и предприимчивости, а также меры, направленные на создание благоприятной психологической атмосферы в трудовых коллективах, взаимоотношений работников, улучшение стиля руководства. Социально-психологическим методам управления придается в последнее время особое значение.

В управлении производством все шире используются идеи и методы наиболее общей науки об управлении — кибернетики.

Производственную деятельность можно рассматривать как функционирование сложной динамической системы, состоящей из двух подсистем — объекта управления и управляющего органа (рис. 167). Сущность управления заключается в целенаправленном воздействии управляющего органа на объект управления управленческими решениями — командами управления, которые разрабатываются в своей исходной основе путем анализа внешней информации — директивных указаний вышестоящего органа управления и сбора и анализа информации о состоянии объекта управления — внутренней информации. Но объект управления подвержен возмущающим воздействиям, которые мешают выполнить команды управления (метеорологические условия, болезнь работников, перебои в снабжении и т. п.). Необходимо немедленно разработать, принять и пе-

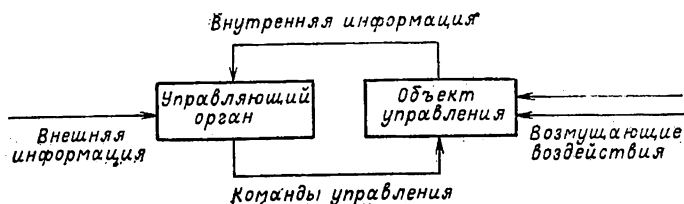


Рис. 167. Принцип управления

редать на управляемый объект новые команды, нейтрализующие последствия возмущающих воздействий. Но для этого надо знать реальное состояние объекта управления, а управляющий орган судит о состоянии объекта по той информации, которая от него поступает, т. е. имеет дело не с реальным объектом, а его информационной моделью. Следовательно, объем и качество внутренней информации, своевременность и полнота ее поступления в управляющий орган предопределяют качество управленческих решений. Качество управленческих решений определяется и тем, насколько тщателен анализ внутренней информации, насколько обоснован выбор того или иного управленческого решения, является ли оно оптимальным. Решающая роль в выработке решений принадлежит человеческому мышлению с его неповторимыми свойствами предвидения и выбора, его интуиции. Поэтому информацию считают объектом и продуктом управленческого труда, а управление в целом — и наукой, и искусством, и в этом нет противоречия.

Существенно повысить качество работы с информацией позволяют ЭВМ, а качество управленческих решений — экономико-математические методы (ЭММ).

ЭВМ являются мощным самостоятельным техническим средством управления. Они позволяют быстро и надежно перерабатывать большие потоки информации, автоматизировать процесс обычных планово-экономических расчетов и решать принципиально новые задачи. Предприятия оснащены современными типами ЭВМ, и необходимо расширять сферу их применения в планово-экономических расчетах.

Экономико-математические методы являются разделом научной дисциплины «Исследование операций», которую определяют как прикладное направление кибернетики. Основная задача исследования операций — предварительное количественное обоснование управленческих решений. Само принятие решения не является предметом исследования операций, а принадлежит человеку. Поэтому ЭММ не могут заменить управленческую деятельность людей, а помогают ее осуществлять на научном уровне.

Основу ЭММ в топографо-геодезическом производстве составляет математическое программирование и сетевое планирование и управление (СПУ). Разрабатывают пути применения других научных направлений — теории массового обслуживания, теории игр, теории расписаний и др. Обзор этих направлений приведен в монографии [1].

Задача математического программирования в общем виде состоит в отыскании таких значений m искомым переменных x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, m$), которые удовлетворяли бы n наложенных на их величины ограничений:

$$f_j(x_i) \geq 0; \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (\text{VI.10.1})$$

и обращали бы в минимум или максимум функцию этих переменных

$$F(x_i) \rightarrow \min(\max); \quad (\text{VI.10.2})$$

Функцию (VI.10.2) называют целевой функцией, т.е. математическим выражением критерия оптимальности задачи. Функции (VI.10.1) называют условиями ограничений. В общем функции (VI.10.1) и (VI.10.2) составляют математическую модель задачи, т.е. упрощенную формализацию экономического смысла задачи. Если функции (VI.10.1) и (VI.10.2) линейны, то модель представляет задачу линейного программирования, если функции либо (VI.10.2), либо (VI.10.1) нелинейны, возникает задача нелинейного программирования. Если же искомые переменные рассматривают изменяющимися во времени, применяют методы динамического программирования. Условия ограничений в одной модели могут выражаться как равенствами, так и неравенствами. Функция цели в модели должна быть единственной (либо максимум, либо минимум).

Наибольшее распространение в практике находят задачи и методы линейного программирования. Разработаны модели разработки планов, оптимальных комплексов работ, распределения транспортных средств, развозки материалов, проектирования геодезических сетей, выбора оптимальных трасс и проектных поверхностей и др. Решение таких задач производится на ЭВМ по стандартным подпрограммам.

Методы сетевого планирования и управления (СПУ) используют при решении задач рационального планирования комплекса работ. Сущность метода состоит в том, что весь комплекс расчленяют на отдельные операции, которые называют термином «работа». Работы взаимосвязаны между собой, могут выполняться параллельно или последовательно. Факт начала или окончания одной или нескольких параллельно выполняемых работ называют термином «событие». Если изобразить работы стрелками, а события кружками (с соответствующим номером), то комплекс работ можно изобразить графически на так называемом сетевом графике, простейший пример которого приведен на рис. 168. Если задать расчетную продолжительность каждой работе (на рис. 168 она указана условно цифрой над стрелкой), то можно рассчитать время выполнения всего комплекса работ — так называемый «критический путь». Его длина будет определяться самой большой суммой продолжительностей работ, соединяющих начало комплекса работ (событие 0) с его завершением (событие 6). Критический путь на рис. 168 выделен жирными стрелками.

Очевидно, что успех выполнения всего комплекса работ зависит от своевременного выполнения работ, лежащих на критическом пути. Эти работы являются особо ответственными, а остальные имеют некоторые резервы времени для их выполнения. Более того, очевидно, что продолжительность комплекса работ можно сократить, если ускорить выполнение работ, лежащих на критическом пути, за счет некоторого удлинения остальных работ.

Сетевые графики применяют для планирования и организации работ в экспедиции в период подготовки к полевому сезону.

Экономико-математические методы имеют широкое применение в экономических исследованиях и анализе, наряду с применением традиционных методов математической статистики, теории корреляции и регрессионного анализа. Представив реальный экономический объект или процесс в виде экономико-математической модели, мож-

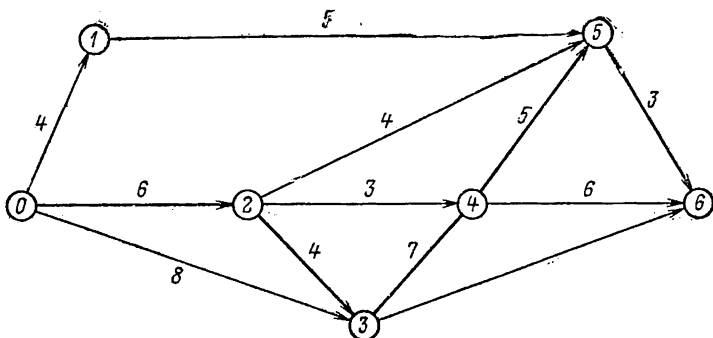


Рис. 168. Иллюстративный пример сетевого графика

но легко провести исследование характера и результатов влияния на его состояние тех или иных управленческих решений.

На базе ЭВМ и ЭММ разрабатываются автоматизированные системы управления (АСУ).

В ГУГК разрабатываются отраслевая автоматизированная система управления (ОАСУ ГУГК), автоматизированная система управления предприятием (АСУП) и автоматизированные системы обработки информации (АСОИ).

ОАСУ ГУГК создается как система информационно-советующего типа, предназначенная для совершенствования планирования, оперативного управления, учета материально-технического снабжения, использования кадров и научно-технической информации.

АСУП разрабатываются с целью решения ряда задач управления производственно-хозяйственной деятельностью предприятий, также на уровне системы информационно-советующего типа, органически связанной с отраслевой системой.

АСОИ автоматизируют процесс сбора, обработки и хранения различного рода технической, технико-экономической, технологической информации, облегчения ее поиска и агрегатирования и механизации учета.

Технической базой систем являются ЭВМ, средства кодирования, передачи и декодирования информации, средства малой вычислительной техники, бухгалтерские машины и другое оборудование. Функционирование развивающихся систем обеспечивают специально созданные в предприятиях информационно-вычислительные центры (ИВЦ). Эти центры в широких масштабах ведут обработку технической информации — вычислительные работы, включая составление каталогов геодезических данных.

VI.11. ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА В ИЗЫСКАТЕЛЬСКИХ ОРГАНИЗАЦИЯХ*

Государственная изыскательская организация выполняет работы для капитального строительства в соответствии с утвержденными планами. Ее деятельность строится на сочетании централизованного

* Глава VI.11 написана Е. В. Грозовым.

руководства с хозяйственной самостоятельностью и инициативой организации.

Изыскательская организация, так же как и предприятия ГУГК, осуществляет свою деятельность на основе хозяйственного расчета, обеспечивает достижение в интересах народного хозяйства наибольших результатов при наименьших затратах трудовых, материальных и финансовых ресурсов, максимально использует внутрихозяйственные резервы, строго соблюдает режим экономии, внедряет новейшие достижения науки, техники и передового опыта, снижает себестоимость изыскательских работ и повышает их рентабельность.

Изыскательская организация, исходя из контрольных цифр, разрабатывает при широком участии работников проекты перспективного и годового планов по всем видам своей деятельности в соответствии с установленными показателями. Составляет и представляет на утверждение вышестоящему органу тематический план изыскательских работ, подлежащих выполнению в планируемом году. Вышестоящий орган с участием изыскательской организации рассматривает и утверждает перспективные и годовые плановые задания по установленным показателям. Все плановые задания доводятся до изыскательской организации только вышестоящим органом.

В соответствии с установленными показателями плана и заключенными договорами (наряд-заказами) изыскательская организация разрабатывает развернутый годовой, квартальный и месячный планы производственно-хозяйственной деятельности, которые утверждаются руководителем изыскательской организации. В этих планах приводятся количественные и качественные показатели для производственных подразделений организации, обеспечивающие выполнение установленных плановых заданий с наибольшей экономической эффективностью.

Устанавливаемые изыскательской организацией плановые задания должны быть взаимно увязаны и предусматривать эффективное использование производственных основных фондов и оборотных средств. Вышестоящий орган обеспечивает изыскательскую организацию соответствующими материально-техническими и финансовыми ресурсами, выделением фонда заработной платы, необходимыми для выполнения плановых заданий. Изменение плановых заданий может производиться вышестоящим органом в исключительных случаях, с предварительным согласованием этих вопросов с руководством изыскательской организации в установленном порядке и в определенные сроки. Одновременно с изменением планового задания вносятся изменения во все взаимосвязанные плановые показатели, а также расчеты изыскательской организации с бюджетом.

Исходя из плановых заданий и в соответствии с нормами расхода и запасов товарно-материальных ценностей, изыскательская организация определяет нормативы собственных оборотных средств по элементам затрат в пределах общего норматива, установленного вышестоящим органом.

Изыскательская организация разрабатывает в пределах, установленных действующим законодательством, сметы и расчеты окупаемости затрат на проведение мероприятий по разработке и внедрению новой техники, новых материалов, по механизации и автоматизации изыскательских работ, модернизации оборудования, улучшению технологии изыскательских работ. Эти расчеты утверждаются руководителем. Изыскательская организация имеет право списывать с балансового учета морально устаревшее изношенное

и непригодное для дальнейшего использования оборудование, транспортные средства, инвентарь и инструмент, когда восстановление его невозможно или экономически нецелесообразно.

Исходя из необходимости всемерной экономии средств, изыскательская организация разрабатывает смету затрат на производство изысканий с учетом объемов работ и размера прибыли, а для содержания аппарата управления составляет смету расходов в рамках установленных предельных ассигнований. Сметы затрат и расходов утверждаются руководителем организации. Изыскательская организация имеет право выделять на отдельный баланс свои подразделения (отделения, экспедиции и т. п.).

Структура изыскательской организации устанавливается с учетом условий работ, принятой технологии производства изысканий и, как правило, включает управление, центральное производство и отделения.

Управление организации включает руководство, планово-финансовые и материально-технические органы. В центральное производство входят производственные отделы и обеспечивающие производственную службу. Отделения изыскательской организации находятся на самостоятельном балансе, их структура аналогична структуре изыскательской организации.

В зависимости от технологии изыскательских работ производственные подразделения создаются в виде комплексных или специализированных отделов. Комплексные производственные отделы выполняют, как правило, топографо-геодезические и инженерно-геологические работы на небольших по объему изысканий площадях. Для выполнения значительных объемов изысканий создаются специализированные по видам работ производственные отделы.

В зависимости от условий работ комплексные отделы могут обслуживать определенные территории или определенные виды строительства. Поэтому в изыскательских организациях создаются комплексные территориальные изыскательские отделы и комплексные отделы, обслуживающие гражданское, сельскохозяйственное или промышленное строительство. Для выполнения работ в производственных отделах создаются камеральные группы и полевые экспедиции, партии и отряды.

Изыскательскую организацию возглавляет директор или управляющий. Директор организует всю работу и несет полную ответственность за состояние и деятельность организации. Главный инженер несет ответственность за правильное осуществление технического руководства, обеспечивает внедрение в производство прогрессивных методов и средств, научной организации труда и одновременно является заместителем директора.

Для осуществления оперативного управления и руководства изыскательскими работами директор организации назначает руководителей структурных подразделений (отделов, групп, экспедиций и т. д.), которые выполняют свою работу в соответствии с действующими в изыскательской организации положениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалов Н. А., Голубцов А. И., Синдеев А. А. Экономико-математические методы в топографо-геодезическом производстве. М., Недра, 1983.
2. Брыкин П. А. Экономика, организация и планирование топографо-геодезических работ. М., Недра, 1979.
3. Брыкин П. А., Нейман Б. Н. Эффективность и качество топографо-геодезического производства. М., Недра, 1983.
4. Экономика топографо-геодезического производства. Под ред. Н. А. Беспалова М., Недра, 1982.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абрис 233, 236, 244
Абсолютные интерференционные измерения 6
Алидада 217, 239
Амплитудный фотоэлектрический датчик 365
Анализ аэроснимка 258
Аналитическая фототриангуляция 300
Аналоговые фазовые измерения 12, 21
Атмосферное давление 138—142
Аэрофотосъемка: перекрытие продольное 311

База на рейке 222, 226

Базис 162, 223, 224

— вспомогательный 174, 175

— короткий 173

— несимметричный 171

— симметричный 173

Базисная система координат аэроснимка 285

Базисные условия 68, 69, 74

Барический градиент 145

Барическая ступень высоты 140

Барометрическая станция 143

Барометрические таблицы 139

Бипризма 222, 223

Биэкспоненциальная модель атмосферы 17

Буссоль (ориентир) 249

Верньер 220, 228

Веса измеренных величин при уравнивании полигонометрии:

дальномерной 182

светодальномерной 181

с инварными проволоками 181

Веха 204, 215, 223

Вешение линий 164

Визирная марка 156, 157

— ось 218, 251

Визирные поверки 158

Визир оптический 217, 223, 243

Водомерный пост 338

Время-импульсный датчик 366

Высота пункта (знака) 204

— визирной цели 205

— инструмента (прибора) 237

— сечения рельефа 210, 243

— точки 204

Выходная сторона 199

Генеральный план 356
Геодезические сети сгущения 147
Геодезический четырехугольник 70, 77
Геодинамический полигон 94, 95
Геометрическая схема построения нивелирной сети 117, 120—122
Геометрические приборы нивелирования 117, 120—122
Геометрическая методика нивелирования 117, 120—122
Геофизические методы разведки 336
Гетеродинные фазовые РГС 46
Гетеродинный интерферометр 6
Гидравлический радиус 344
Гидрографические характеристики 346
Гидрометрический створ 342
Гиперболические радиогеодезические системы 45
Главнейшие источники ошибок взгляда и превышения 123
Главное условие нивелира 98, 110, 115
Главная точка снимка 259
— — схода 259
Годовой экономический эффект 414
Горизонталь 210, 256
Горизонтальное проложение 203, 227, 228, 230, 237
Горизонт инструмента 245
Горные выработки 334
Государственная геодезическая сеть 147
Государственная нивелирная сеть 94, 95
Градиент индекса преломления 17, 20
Групповая скорость 14
Густота пунктов 199

Дальномер внутрибазный 241, 242
— двойного изображения 219, 225
Дальномерная насадка 202, 220
— редуционная 220
Дальность действия светодальномеров 22
— — радиодальномеров 39
Деформация аэропленки 264
Дешифрование 207
Диафрагма щелевая 222
Дисперсионный метод определения показателя преломления воздуха 16
Дисторсия 263
Дифференциальная формула поправок в приращения координат 179
Длиномер 216, 218, 219

«Жесткое» построение 90

Задача Гандена 195
Заложение 206
Замыкание горизонта 200
Засечка 191, 193, 199, 201, 204, 205, 215
— прямая многократная 198
— — однократная 193, 194
— обратная многократная 196
— — однократная 194

Затухание электромагнитных волн в атмосфере 13

Знак 199

Зонная пластина 380

Зрительная труба 217, 237, 241, 249

Измерение линий точными оптическими дальномерами 171, 173

Измерение метеоэлементов 16

Измерение углов в полигонометрии 4 класса, 1 и 2 разрядов 160

Измерительный преобразователь (датчик) 363

Изыскания технические инженерно-геодезические 329

— — инженерно-геологические 331

— — инженерно-гидрометеорологические 337

Изыскания экономические 327

Изыскательские планы 330

Импульсная дальнометрия 4

Инварная проволока 162—166, 181

Инверсоры 269, 271

Индекс преломления воздуха 14

Инженерно-геологические карты 332

Интерферометр Вьяйсяля 8

Интерферометр Майкельсона 6

Исследование нивелира 109, 113

— реек 115

— уровней 112

Источники ошибок при измерении углов 159

Искажение направлений за наклон 266

— — за рельеф 266

Калибровка 317

Калька высот 256

— контуров 256

Карта 206—207

Картограмма земляных работ 358

Кипрегель 201, 206, 248

Классификация сооружений 326

Клистронный генератор 37

Когерентные радиогеодезические системы 46

Коллимирование лазерного луча 379

Коллимационная плоскость 218, 251

Коллиматор 223

Комбинированная сеть 91

Комбинированный метод аэрофотосъемки 267

Компаратор 163, 164

Компарирование проволок 152, 182

Компарирование реек 115

Компенсатор 100, 221, 224, 225

— маятниковый 101

— оптико-механический 102

— линзовый 103

— смещающий луч параллельно самому себе 104

Компенсационный метод фазовых измерений в дальномерах 12

Контур 207, 256

Координаты аэроснимка и местности 261

Координатные условия 71

Координаты центра тяжести 152, 182

Коррелата 200
 Коррекционные устройства стереометра 289
 Космическая съемка фотографическая 307, 310
 Космические фотосъемочные камеры:
 топографические 312
 дешифровочные 312
 звездные 312
 многозональные 313, 316
 Коэффициент дальнометра 224, 241
 — кривых превышений 252
 — земного преломления 136
 — неоднозначности 11
 — систематического влияния 169
 — случайного влияния 169
 Кремальера 249
 Кривизна Земли 97
 Критерии вытянутости полигонометрического хода 155
 Круг горизонтальный 218
 — вертикальный 238, 239
 Круговые радиогодезические системы 45

 Лазер 21
 Лазерные дальнометры 28—30, 36
 Лазерные интерферометры 6
 Лазерный визир 385
 — прибор ЛАГ 386
 — — ПИЛ 387
 — — СКП 388
 Лента инварная 163
 — мерная 216, 218
 Линейная модель атмосферы 17, 20
 Линейка Дробышева 235, 247
 — кипрегеля 249
 — масштабная 249
 Линейное искажение за кривизну Земли и рефракцию 264
 — — за наклон снимка 264
 — — за рельеф 265
 Линейно-угловая сеть 63, 90, 91

 Магнитный демпфер 392
 Марки 201, 204, 222
 Масштаб съемки 198, 199, 201, 202, 206, 209
 — аэроснимка 262
 Масштабная частота 10
 Масштабы высоты 17
 Мензула 201, 248
 Место нуля 205, 239
 Методы нивелирования:
 барометрическое 97
 геометрическое 97
 гидростатическое 97
 механическое 97
 моторизованное 97, 123
 тригонометрическое 97, 132
 Метод пересечения створа 47

- проектирования 61
- сгущения геодезической основы 147
- счисления пути 390
- Методы съемки контуров 232—234
- Метод Урмаева — Крюгера 76, 78
- Микробарометр оптический 140, 142, 145
- Микробаронивелир 141—143
- Микроскоп шкаловой 216, 217, 221, 243
 - штриховой 217, 218
- Микроэкзаменатор 112
- Модели атмосферы 17
- Модель местности цифровая 208
- Модуляторы света 21
- Монтаж фотопланов 275
 - фотосхем 275
- Моторизованное геометрическое нивелирование 123

Начальное направление 81

Невязка координат поперечная 149, 151, 162

- — продольная 149, 151
- в углах 149, 162

Невязки в приращениях координат 150

«Нежесткое» построение 90

Несвободная сеть 60

Несущая частота 37

Неустойчивость штативов 168

Нивелир 98, 104, 106, 201, 204

Нивелирование барометрическое 138, 140, 143, 144

- прибора 201
- поверхности 236, 243
- техническое 204, 206
- тригонометрическое 201, 204, 205, 207

Номенклатура топографических карт 208, 209

- — планов 209

Номограмма кипрегеля 252

Нулевое направление 81

Нуль-пункт 239, 251

Объектив 217, 220, 248

Обоснование съемочное 204, 214

Обращенный треугольник 193, 195

Окуляр 217, 221, 243, 248

Оптические дальнометры 171

Оптический центрир 156, 158, 163, 164, 216, 226

Опорные световые плоскости 383

Ориентирование аэроснимков 290

Ориентирование мензульного планшета 253

Ориентированные направления 83, 84, 86, 91

Ориентирующие углы 78, 81, 84, 85, 87, 88

Основное уравнение фазовой дальнометрии 9

Относительные интерференционные измерения 8

Оценка точности линейных измерений 169

- — измерения углов 161, 162

Ошибка допустимая 202

- средняя квадратическая угла 199, 202, 203, 241

- — — стороны 199, 249
- — в положении на плане контуров 201, 210
- — съемки рельефа 201, 211
- относительная 199
- за вешение 166
- влияние температуры 168
- за наклон мерного прибора 167
- компарирования 167
- собственного измерения 168
- Ошибка линейного хода 150
 - продольного хода 150
 - поперечного хода 150
 - угловая 149

- Параллакс поперечный 281
 - продольный 280
- Параллактические звенья 173
 - — с коротким базисом 174—177
- Пикет 207, 212, 244, 246
- Пикетаж 246
- Пикосекундные оптические импульсы 5
- Планшет 201, 247, 248
- Поверки теодолита 218
 - дальномера 222
 - мензулы 250
 - кипрегеля 250
- Подвесной мерный прибор 166
- Поднесущая частота 140
- Показатель преломления воздуха 14
- Полигонометрический ход с измеренным азимутом 154
- Полигональные условия 71
- Полюсные условия 70
- Поляризационный угломерный датчик 373
- Поперечный уклон реки 341
- Поперечный профиль местности 246
- Поправка за приведение линии на плоскость в проекции Гаусса 169
 - — — к уровню моря 169
 - — — за температуру 168
- Поправка в углы 200
 - логарифмы синусов сторон 200
 - за наклон линии 216, 225, 228
 - за температуру 225
 - в расстояния, измеренные нитяным дальномером 240
- Поразрядный способ 11
- Правило Шрейбера 82—84
- Превышение 204—206, 237
- Предварительные вычисления в полигонометрии 177
- Приборы с преобразованными связками 293
- Привязка проекта 354
- Привязочные работы 191
- Привязка к пунктам геодезической сети 214, 215
- Применение расчетных формул в полигонометрии 155
- Продольный профиль реки 339
- Проект вертикальной планировки 357
 - производства геодезических работ 358
 - типовой 354

Проектирование сооружений 354

Проекция ортогональная 258

— центральная 269

Промеры глубин 341

Психрометр Ассмана 16

Рабочие чертежи 356

Равносигнальная зона оптического луча 382

Радиодальномеры 37

Радиолаг 353

Радиомензула 353

Радиус кривизны траектории электромагнитной волны 20

Разграфка карт 208, 209

Разрешающая способность объектива 314

— — фотографическая 314

— — системы 314

Разрешение неоднозначности в фазовых дальномерах 10

Расход водотока 345, 348

Редуцирование измеренных расстояний на поверхность относимости 55

Редуцирование фототриангуляции 269

Рейки нивелирные 108, 205

— шашечные 108

— дальномерные 219, 227

Рейка для нивелирования целиков 163

Рельеф местности 201, 204, 206, 212, 256

Рен 220, 223

Рекогносцировка 200, 202, 216

Репер фундаментальный 95

— грунтовой 96

— скальный 95

Рефракционное удлинение траектории электромагнитных волн 13, 20

Русловые съемки 343

Светодальномеры 22

Свободная сеть 60

Сдвиг изображения 263

Себестоимость 401

Сетка нитей 218, 223

— координатная (километровая) 209

— квадратов 245

Сеть государственная геодезическая 199, 201, 253

— геометрическая 253, 254

— геодезическая сгущения 201

— триангуляции 198, 199, 204

— съемочная (съёмочное обоснование) 201, 202, 256

Система управления КСК 317

Сметная стоимость 401

Способ отсчетов 164

— фиксации 165

Способы съемки 232, 233

Стереавтограф 306

Стереограф 297

Стереопроектор 293

Схема компенсации 391, 395
Сферический избыток 87
Съемка вертикальная 235
— внутри кварталов 232
— горизонтальная 213
Съемка мензульная 201, 236, 244, 247
— проездов 234
— тахеометрическая 208, 236
— теодолитная 208, 213—216
— ситуации и рельефа 255
— стереотопографическая 201, 207
— топографическая 207
— подземных коммуникаций 330

Тахеометр 200, 206, 216, 240
Теодолит 156, 200, 201, 216, 217, 218
Точность измерений фазовыми дальномерами 12
— определения координат радиогодезическими системами 47
— результатов геометрического нивелирования 129
— — тригонометрического нивелирования 137
— барометрического нивелирования 144, 145
Точные оптические теодолиты 156
Точность масштаба 207
— плана и карты 209
Точка переходная 255
— узловая 215
— надира 259
— нулевых искажений 259
Точки односторонней связи 340
Транспортир 205, 235
Трехштанговая система 156
Триангуляция 198—201, 204
Тригонометрическое нивелирование 132—135

Увеличение трубы 241, 248
Угломерная следящая система 370
Угол горизонтальный 237, 240
Угол вертикальный 238, 240
— засечки 233
— дирекционный 205, 229
— параллактический 224, 228
— поворота 229
— примычный 215, 229
— наклона 206, 210, 225, 239
— продольного наклона 390, 391
Уравнение связи 64, 78
— статики атмосферы 138
Уравнивание 200
Уравнивательные вычисления в полигонометрии 177
Уравнивание полигонометрического азимутального хода 185
— полигонометрических сетей 177
— полигонометрического хода любой формы 177
— — — двухгрупповым способом 182—185
— — — — коррелятным способом 178—182

- — — — — параметрическим способом 186, 188
- Уравнивание полигонометрического хода вытянутой формы 185—187
 - измерений в нивелирной сети 130—132
 - полигонометрических сетей двухгрупповым способом 189
 - — — — — коррелятным способом 189
 - — — — — коррелятным способом с дополнительными неизвестными 189
 - — — — — параметрическим способом 189
 - — — — — раздельными способами 190
 - — — — — способом последовательных приближений 190, 191
- Уравнивание полигонометрических сетей способом узлов, В. В. Попова 190, 191
- Уровень круглый 99, 112, 116, 218, 222, 223, 227
 - цилиндрический 223, 249
 - реверсивный 249
- Уровни водотока 338
- Условные уравнения поправок в полигонометрическом ходе 178
- Условия фигур 65, 74
 - горизонта 66
 - дирекционных углов 67, 68, 74
 - свободной сети 76
 - жесткости 76
- Условные знаки 207, 276
- Устройство для записи профиля 393
- Устойчивость геодезических знаков 337

- Фазовая дальнометрия 9
- Фазовая скорость 14
- Фотоэатворы 315
- Фотоплан 201
- Фото пленки 321
- Фоторедуктор 269
- Фототеодолит 305
- Фототрансформатор ФТБ 272
 - ФТМ 273
- Фототриангуляция аналитическая 300
 - аналоговая 299
 - блочная 301
 - графическая 269
 - плановая 268
 - пространственная 299
 - ромбическая 268

- Ход висячий 216, 236
 - диагональный 214
 - нивелирный 201, 243
 - мензольный 254
 - тахеометрический 202, 237
 - теодолитный 202, 203, 212, 215
- Ход полигонометрический 216

- Цена деления уровня 249
- Центрирование прибора 217
- Центральная система 70

Центр тяжести хода 149, 153, 154
Цепочка треугольников 199
Цифровой фазометр 12

Частотный метод дальнометрии 5
Число-импульсный датчик 367

Штатив 217, 238

Элементы ориентирования снимков: взаимного 283
— — — внешнего 258, 284
— — — внутреннего 258
— центральной проекции 258

Электроконтактный датчик гидронивелира 377

Электронно-лучевая трубка 37

Электронные тахеометры 25, 27, 32

Экзаменатор 112

Эккер 232

Экономическое стимулирование 400

Экспонометрия 322

Эффективная длина волны света 15

Эхолот 342

Юстировка 223

ОГЛАВЛЕНИЕ

РАЗДЕЛ III

ОСНОВНЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

III.4. Измерение расстояний свето- и радиодальномерами (В. Д. Большаков, А. Н. Голубев)	3
А. Основы электронной дальнометрии	3
III.4.1. Общие сведения о методах измерения расстояний при помощи электромагнитных волн	3
III.4.2. Фазовый метод измерения расстояний	9
III.4.3. Влияние атмосферы на дальномерные измерения	13
Б. Светодальномеры	21
III.4.4. Общие сведения	21
III.4.5. Геодезические светодальномеры	28
III.4.6. Топографические светодальномеры	30
III.4.7. Светодальномеры повышенной и наивысшей точности	33
В. Радиодальномеры	37
III.4.8. Общие сведения	37
III.4.9. Радиодальномеры РДГВ и «Луч»	38
III.4.10. Радиодальномеры «Волна» и «Трап»	40
III.4.11. Зарубежные радиодальномеры	42
Г. Радиогеодезические системы	43
III.4.12. Основные принципы радиогеодезических систем	43
III.4.13. Радиогеодезическая система «Поиск»	48
III.4.14. Радиогеодезическая система «Изумруд»	50
III.4.15. Краткие сведения о зарубежных радиогеодезических системах	51
Д. Математическая обработка измерений	54
III.4.16. Обработка измерений, выполненных свето- и радио- дальномерами	54
III.4.17. Обработка измерений, выполненных радиогеодезиче- скими системами	56
Список литературы	60
III.5. Уравнивание триангуляции, трилатерации и комбини- рованной сети (П. А. Гайдаев)	60
А. Введение	60
III.5.1. Исходные данные	60
III.5.2. Измеряемые величины. Системы координат	61
III.5.3. Редукционные поправки	61
III.5.4. О способах уравнивания	63

Б. Виды условий (условных уравнений), возникающих в триангуляции	64
III.5.5. Обозначения (на плоскости)	64
III.5.6. Угловые условия	64
III.5.7. Синусные условия	68
III.5.8. Условные уравнения для направлений	73
III.5.9. Число независимых условий. Выбор условий	74
В. Уравнивание триангуляции коррелятным способом	76
III.5.10. Критерий допустимости невязок	76
III.5.11. О способах, основанных на методе Крюгера	76
III.5.12. Упрощенный способ	77
Г. Уравнивание геодезических сетей параметрическим способом	78
III.5.13. Общие основы. Уравнения поправок	78
III.5.14. Уравнивание ориентированных направлений	83
III.5.15. Уравнивание ориентированных направлений на ЭВМ	86
III.5.16. Применение параметрического способа для уравнивания различных геодезических построений	90
III.5.17. Уравнивание типовых фигур трилатерации коррелятным способом	91
Список литературы	94
III.6. Нивелирование (М. Е. Пискунов)	94
III.6.1. Классификация нивелирных сетей СССР	94
III.6.2. Нивелирные знаки	95
А. Геометрическое нивелирование	97
III.6.3. Методы нивелирования	97
III.6.4. Нивелиры и их основные части	98
III.6.5. Типы нивелиров	105
III.6.6. Нивелирные рейки	108
III.6.7. Поверки и исследования уровенных нивелиров	109
III.6.8. Поверки и исследования нивелиров с компенсаторами	113
III.6.9. Исследование и компарирование нивелирных реек	115
III.6.10. Нивелирование I класса	117
III.6.11. Нивелирование II класса	120
III.6.12. Нивелирование III класса	121
III.6.13. Нивелирование IV класса	122
III.6.14. Техническое нивелирование	122
III.6.15. Моторизованное геометрическое нивелирование	123
III.6.16. Главнейшие источники ошибок измерений в геометрическом нивелировании	124
III.6.17. Оценка точности результатов геометрического нивелирования	129
III.6.18. Уравнивание результатов измерений в нивелирных сетях	130
Б. Тригонометрическое нивелирование	132
III.6.19. Формулы тригонометрического нивелирования	132
III.6.20. Точность тригонометрического нивелирования	137
В. Барометрическое нивелирование (В. Г. Селиханович)	138
III.6.21. Барометрические формулы	138
III.6.22. Приборы для барометрического нивелирования	140

III.6.23. Способы барометрического нивелирования	143
Список литературы	146

РАЗДЕЛ IV

ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

IV.1. Методы сгущения геодезической основы	147
IV.1.1. Полигонометрия (<i>В. Г. Селиханович</i>)	147
А. Расчетные формулы	147
IV.1.1.1. Классификация полигонометрии	147
IV.1.1.2. Основные расчетные формулы	149
Б. Измерение углов	156
IV.1.1.3. Точные оптические теодолиты	156
IV.1.1.4. Источники ошибок при измерении угла	159
IV.1.1.5. Измерение углов в полигонометрии 4 класса, 1 и 2 разрядов	160
IV.1.1.6. Оценка точности угловых измерений	161
В. Измерение линий инварными проволоками	162
IV.1.1.7. Базисные приборы	162
IV.1.1.8. Нормальные меры и компарирование проволок	163
IV.1.1.9. Способы измерения линий в полигонометрии	164
IV.1.1.10. Источники ошибок подвесных мерных приборов	166
IV.1.1.11. Вычисление длины линии	168
IV.1.1.12. Средняя квадратическая ошибка измерения линии. Оценка точности измерений	169
Г. Измерение линий точными оптическими дальномерами и параллактическим методом	171
IV.1.1.13. Дальномер Редта 002	171
IV.1.1.14. Измерение линий параллактическим методом	173
Д. Уравнительные вычисления	177
IV.1.1.15. Общие положения уравнивания полигонометрических ходов и сетей	177
IV.1.1.16. Уравнивание коррелятным способом хода любой формы, опирающегося на исходные пункты и направления	178
IV.1.1.17. Веса измеренных величин при уравнивании различных видов полигонометрии	181
IV.1.1.18. Уравнивание двухгрупповым способом хода любой формы, опирающегося на исходные пункты и направления	182
IV.1.1.19. Уравнивание азимутального хода любой формы	185
IV.1.1.20. Уравнивание хода вытянутой формы, опирающегося на исходные пункты и направления	185
IV.1.1.21. Уравнивание параметрическим способом хода, опирающегося на исходные пункты и направления	186
IV.1.1.22. Строгое уравнивание полигонометрических сетей	188
IV.1.1.23. Раздельное уравнивание полигонометрических сетей	190
Е. Привязочные работы	191
IV.1.1.24. Снесение координат. Засечки	191
IV.1.1.25. Многократные засечки	196
IV.1.2. Триангуляция 1 и 2 разрядов. Съемочные сети (<i>В. В. Баканова</i>)	198

IV.1.2.1. Триангуляция 1 и 2 разрядов	198
IV.1.2.2. Съёмочные сети	201
Список литературы	206
IV.2. Топографические методы съёмки (<i>В. В. Баканова</i>)	206
IV.2.1. Топографические карты и крупномасштабные планы	206
IV.2.2. Теодолитная съёмка	213
IV.2.3. Тахеометрическая съёмка	236
IV.2.4. Нивелирование поверхности	245
IV.2.5. Мензуральная топографическая съёмка	247
Список литературы	256
IV.3. Фототопографические методы съёмки (<i>Г. П. Левчук</i>)	258
IV.3.1. Элементы ориентирования снимков	258
IV.3.2. Анализ аэроснимка	258
IV.3.2.1. Элементы центральной проекции	258
IV.3.2.2. Связь координат точек аэроснимка и местности	260
IV.3.2.3. Масштабы аэроснимков	262
IV.3.2.4. Смещение точек на аэроснимках	263
IV.3.2.5. Искажение направлений на аэроснимках	266
IV.3.3. Комбинированный метод аэрофотосъёмки	267
IV.3.3.1. Схема комбинированного метода	267
IV.3.3.2. Плановая фототриангуляция	268
IV.3.3.3. Трансформирование аэроснимков	270
IV.3.3.4. Составление фотосхем и фотопланов	275
IV.3.3.5. Привязка аэроснимков	276
IV.3.3.6. Топографическое дешифрирование	278
IV.3.3.7. Съёмка рельефа на фотопланах	279
IV.3.4. Стереоскопический метод измерений. Элементы ориентирования снимков	279
IV.3.4.1. Стереоскопические измерения	279
IV.3.4.2. Стереоскопы	281
IV.3.4.3. Стереоскопаторы	282
IV.3.4.4. Определение элементов взаимного ориентирования и углов наклона аэроснимков	283
IV.3.5. Дифференцированный способ стереотопографической съёмки	288
IV.3.5.1. Схема дифференцированного способа	288
IV.3.5.2. Стереометры	288
IV.3.5.3. Обработка аэроснимков на топографическом стереометре	290
IV.3.6. Универсальный способ стереотопографической съёмки	292
IV.3.7. Понятие о пространственной фототриангуляции	299
IV.3.8. Наземная стереофотограмметрическая съёмка	303
Список литературы	307
IV.4. Космическая фотосъёмка (<i>Н. П. Лаврова</i>)	307
IV.4.1. Задачи космической съёмки	307
IV.4.2. Подспутниковые эксперименты	310
IV.4.3. Геометрические параметры космической фотосъёмки	310
IV.4.4. Фотосъёмочная аппаратура	312
IV.4.5. Фотографические материалы для аэрокосмических съёмок	321
IV.4.6. Измерительные свойства космических снимков	321

IV.4.7. Основы фотохимической обработки материалов космической съемки	323
Список литературы	325

РАЗДЕЛ V

ПРИКЛАДНАЯ ГЕОДЕЗИЯ

V.1. Изыскания, проектирование и строительство инженерных сооружений (В. В. Калугин)	326
V.1.1. Классификация инженерных сооружений	326
V.1.2. Назначение и виды инженерных изысканий	326
V.1.3. Состав инженерно-геодезических изысканий	329
V.1.4. Инженерно-геологические изыскания и использование их результатов	331
V.1.5. Методы инженерно-гидрометеорологических изысканий	337
V.1.6. Использование аэрометодов при гидрометеорологических изысканиях	347
V.1.7. Геодезические работы при проведении инженерных изысканий	349
V.1.8. Стадии проектирования и состав проектных документов	354
V.1.9. Составление генеральных планов объектов	356
V.1.10. Разработка проектов производства геодезических работ	358
V.1.11. Обеспечение точности геометрических параметров в строительстве	359
Список литературы	362
V.2. Автоматизация инженерно-геодезических измерений (А. В. Зацаринный)	362
V.2.1. Общие сведения	362
V.2.2. Принципы построения датчиков для автоматизации измерений	364
V.2.2.1. Фотоэлектрические датчики	364
V.2.2.2. Индуктивные датчики	374
V.2.2.3. Емкостные датчики	375
V.2.2.4. Датчики для автоматизации гидронивелирования	377
V.2.3. Способы создания референтных линий и плоскостей оптическим излучением	379
V.2.3.1. Способы создания световых референтных линий	379
V.2.3.2. Способы создания световых референтных плоскостей лазерным излучением	382
V.2.4. Методы и приборы автоматизации геодезических измерений	384
Список литературы	389
V.3. Автоматическое определение координат местности (В. И. Шиллинггер)	389
V.3.1. Общие сведения	389
V.3.2. Высотомеры-автоматы	391
V.3.3. Топопривязчики	395
Список литературы	398
	439

РАЗДЕЛ VI
ЭКОНОМИКА, ПЛАНИРОВАНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА

(К. В. Бажанов)

VI.1. Основы системы планирования и экономического стимулирования топографо-геодезического производства ГУГК	399
VI.2. Стоимость производства топографо-геодезических работ. Структура затрат	401
VI.3. Качество продукции (работ). Стандартизация	404
VI.4. Трудовые ресурсы предприятий	406
VI.5. Производительность труда. Резервы ее роста	408
VI.6. Материальные ресурсы предприятий. Пути их экономии	410
VI.7. Основы определения эффективности новой техники и технологии	414
VI.8. Планирование производства в предприятиях ГУГК	415
VI.9. Организация производства	416
VI.10. Научные основы управленческой деятельности	419
VI.11. Планирование производства в изыскательских организациях	422
Список литературы	424
Предметный указатель	425

СПРАВОЧНИК ГЕОДЕЗИСТА

(в двух книгах)

КНИГА 2

Редакторы издательства Н. Т. Куприна, Т. А. Борисова
Переплет художника А. Е. Григорьева
Художественный редактор Г. Н. Юрчевская
Технический редактор Е. С. Сычева
Корректор К. С. Торопцева

ИБ № 6191

Сдано в набор 05.02.85. Подписано в печать 22.05.85. Т-10959. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага книжно-журнальная. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл. печ. л. 23,1. Усл. кр.-отт. 23,1. Уч.-изд. л. 32,12. Тираж 30 000 экз. Заказ № 123/480—15. Цена 2 руб.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 103633, Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 1/19

Владимирская типография Союзполиграфпрома при Государственном
комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

