

Высшее профессиональное образование

Г. Д. Курошев
Л. Е. Смирнов

ГЕОДЕЗИЯ И ТОПОГРАФИЯ

3-е издание

Учебник



Естественные
науки

Г. Д. КУРОШЕВ, Л. Е. СМИРНОВ

ГЕОДЕЗИЯ И ТОПОГРАФИЯ

*Рекомендовано
Учебно-методическим объединением
по классическому университетскому образованию
в качестве учебника для студентов
высших учебных заведений, обучающихся
по специальностям 020401 «География»,
020501 «Картография»*

3-е издание, стереотипное



Москва
Издательский центр «Академия»
2009

УДК 528.4(075.8)
ББК 26.12я73
К935

Рецензенты:

кафедра картографии и геоинформатики МГУ им. М. В. Ломоносова
(зав. кафедрой засл. деятель науки РФ, д-р геогр. наук, проф. *А. М. Берлянт*);
д-р техн. наук, проф. *С. А. Коробков* (Санкт-Петербургский государственный
горный институт (Технический университет))

Куровшев Г. Д.

К935 Геодезия и топография : учебник для студ. вузов / Г. Д. Куровшев, Л. Е. Смирнов. — 3-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2009. — 176 с.

ISBN 978-5-7695-6477-2

В учебнике описаны основные этапы истории развития геодезических измерений и топографических съемок. Приведены общие сведения о погрешностях измерений, правила и методы измерения углов и расстояний, решения задач по определению плановых координат и высот пунктов местности. Дано описание наиболее распространенных приборов, применяемых для проведения полевых и камеральных работ. Рассмотрены способы и технологии полевых наземных и аэротопографических съемок, содержание топографических карт.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «География» и «Картография».

УДК 528.4(075.8)
ББК 26.12я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение
любым способом без согласия правообладателя запрещается*

© Куровшев Г. Д., Смирнов Л. Е., 2006

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2006

ISBN 978-5-7695-6477-2

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2006

ПРЕДИСЛОВИЕ

В учебнике изложены начала геодезии и топографии, знание которых необходимо студентам для выработки навыков и умений в обращении с приборами и инструментами, а также в проведении вычислений и графических построений.

Содержание и структура учебника соответствуют программе курса «Геодезия и топография» для студентов географических, геологических и почвенных специальностей всех видов обучения.

При написании учебника учитывались требования к профессиональной подготовке специалистов в области естественных наук, ведущих сбор материалов и исследование в полевых экспедиционных условиях. Вместе с тем курс «Геодезия и топография» должен не только обучить студентов самостоятельно проводить необходимые измерения и съемки местности, но и дать им представление о Земле как небесном теле, имеющем определенные размеры, форму и ряд других свойств.

Данный учебник относится к теоретической части названного курса, включающего также зимнюю лабораторную практику и летнюю учебную полевую практику.

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры картографии и геоинформатики МГУ им. М.В.Ломоносова во главе с доктором географических наук, профессором А.М.Берлянтю, а также доктору технических наук, профессору Санкт-Петербургского государственного горного института С.А.Коробкову за ценные замечания при просмотре рукописи.

ВВЕДЕНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ГЕОДЕЗИИ И ТОПОГРАФИИ

Геодезия (от греч. *geodaisia* — землеразделение) — одна из наук о Земле. В настоящее время содержание геодезии понимается значительно шире, и геодезия характеризуется как наука о методах определения пространственных характеристик предметов и явлений. Таким образом, объектом изучения геодезии является пространство в его предметном выражении, т.е. пространство, которое окружает людей, и прежде всего — это географическая оболочка Земли.

Современная геодезия выступает как самостоятельная наука, включающая практику и методы исследования. Геодезисты делят также геодезию на высшую (собственно геодезию) и прикладную (инженерную геодезию).

Научные задачи геодезии заключаются, во-первых, в изучении фигуры и размеров Земли, ее внешнего гравитационного поля, а также их изменений во времени и, во-вторых, в разработке способов, приемов и средств геодезических измерений на земной поверхности.

Практические задачи геодезии (геодезического производства) состоят в создании сети геодезических пунктов, т.е. закрепленных на местности точек, плановые координаты и высоты которых определены геодезическими измерениями. Их создание и развитие предшествуют топографическим съемкам и картографированию территории, и необходимы для решения различных научно-исследовательских и инженерно-технических задач. Кроме того, геодезия связана с навигацией, где решается задача определения положения, курса и скорости движения судов, самолетов.

Задачи геодезического метода состоят в «обслуживании» других наук о Земле: географии, геологии, геофизики и т.д. Эти задачи включают определение пространственного положения отдельных объектов, их перемещения, а также развития природных процессов, например движения ледников, течения рек, уровня вод, роста оврагов, вертикального и горизонтального перемещения земной коры и т.п.

История геодезии уходит корнями в глубь веков. Геодезия возникла из практических потребностей людей еще до нашей эры на Востоке, где требовалось, как, например, в Египте, определение границ земельных участков после каждого разлива Нила.

Первоначально геодезия была лишь частью зарождавшейся геометрии. Затем прикладные методы геометрии оформились как особые задачи, решением которых и занялась геодезия.

В IV в. до н. э. геодезия выделилась в самостоятельную науку, современное название которой предложил Аристотель. В дальнейшем геодезия приобрела тесные связи с математикой, астрономией, а также географией и картографией.

На рубеже XVII—XVIII вв. И. Ньютоном была высказана идея об эллипсоидальности Земли. С этого времени основным предметом геодезии стало определение размеров земного эллипсоида и его сжатия. В этот период зародились начала гравиметрии. Возникло понятие об особой форме Земли — геоиде. Выяснилось, что фигура Земли связана с ее внутренним строением, тем самым круг интересов геодезии сомкнулся с проблемами науки, названной геофизикой.

С середины XIX в. геодезия стала изучать форму Земли более детально. Ее интересовали отступления геоида от первоначально принятой геометрической фигуры. Эта задача решалась астрономо-геодезическими и гравиметрическими методами. Так возникла геодезическая гравиметрия.

Современный период в развитии геодезии связан с запуском искусственных спутников Земли. Появилась космическая геодезия, а затем «селенодезия» и другие геодезии планет. Геодезия усилила свои связи с геофизикой и занялась изучением динамики земной коры, а также изменений во времени формы, размеров и гравитационного поля Земли. Данные геодезии стали использовать для решения проблем геологии и планетологии.

Историю геодезии в нашей стране обычно изучают с эпохи Древней Руси и становления Московского государства. Но интенсивно геодезия начала развиваться во времена Петра I, когда были организованы первые астрономо-геодезические экспедиции и сделаны крупные географические открытия. В XIX в. астрономы и геодезисты активно работали над развитием геодезической сети по территории России, главным образом ее европейской части.

В XX в. наша страна была полностью покрыта сплошной сетью геодезических пунктов, достаточной для того, чтобы обеспечить топографической съемкой всю территорию государства. В конце XX—начале XXI в. получили развитие новые спутниковые способы создания геодезических сетей.

Топография — раздел картографии, тесно примыкающий к геодезии. В топографии карты и планы достаточно крупных масштабов составляют на основании натурных съемок местности.

Термин «топография» впервые был введен знаменитым греческим географом и астрономом Птолемеем примерно во II в. н. э. Слово «топография» образовано из двух греческих слов «топос» — местность и «графо» — пишу.

Зарисовкой окружающей местности в виде примитивных планов люди стали заниматься в незапамятные времена. Более или менее точные топографические съемки начались с изобретения нивелира и почти через 100 лет — теодолита. Однако следует отметить, что первые очень простые приборы для съемок появились еще до нашей эры. Например, нивелир упоминается в трудах древнегреческого ученого-механика Герона Александрийского (I в. н.э) и римского архитектора Марка Витрувия (I в. до н.э.).

Однако в XVI в. они претерпели принципиальные изменения и стали включать в себя все те элементы, которые сохранились и до сих пор: оптические трубы, уровни, отсчетные приспособления, сетки нитей. С этого времени топографические планы и карты приобрели необходимую точность и достоверность.

В последующие столетия топография прошла длинный путь систематического совершенствования. В XIX в. топографические съемки достигли высокого исполнительского мастерства. Топографические карты России, созданные в прошлом столетии, отличаются высокой достоверностью и надежностью передачи содержания, особенно рельефа.

В начале XX в. при топографических съемках стали использовать сначала наземные, а затем аэрофотографические снимки. Была разработана и внедрена в производство аэрофототопографическая технология создания карт, которая является основной в топографо-геодезическом производстве, но и она все чаще использует для создания топографических карт материалы космических съемок.

В России систематические топографические съемки начались при Петре I, но велись медленно, и к началу XX в. топографические карты были составлены лишь для европейской части государства и очень малой части Сибири.

Громадная работа по съемкам начала производиться топографо-геодезической службой страны с 30-х годов XX в. К 50-м годам были составлены топографические карты всей страны масштаба 1 : 100 000, а к настоящему времени и карты масштабов 1 : 25 000 и частично 1 : 10 000.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ГЕОДЕЗИЯ

Глава 1

РАЗМЕРЫ И ФОРМА ЗЕМЛИ

1.1. Эволюция представлений о форме и размерах Земли

Представления о мироздании, форме, размерах и положении Земли в космосе, существовавшие в разные времена, были весьма различными, порой просто фантастичными, как, например, в Средние века. Однако мысль о шарообразности Земли высказывалась не один раз многими учеными.

Впервые идея о шарообразности Земли была выдвинута, вероятно, халдейскими жрецами в VI в. до н.э. С таким же утверждением выступал грек Филолай (V в. до н.э.). Ту же мысль высказывал Аристотель в IV в. до н.э. В качестве доказательства они ссылались на то обстоятельство, что шар — это самая «совершенная» из геометрических форм. Наблюдения за уходящими за горизонт кораблями также наталкивали на мысль о том, что Земля круглая.

Попытки измерить Землю, вероятно, делались в древние времена не один раз. Однако первое исторически достоверное измерение Земли проделал древнегреческий ученый Эратосфен в III в. до н.э. Он заметил, что в двух египетских городах, расположенных на Ниле, в одно и то же время солнце стоит в Сиене (нынешнем Асуане) почти в зените, тогда как в Александрии светит под углом. Зная расстояние S между городами (на рис. 1.1 дуга сферы AC) и измерив с помощью гномона, закрепленного в полусферической чаше, угол z (зенитное расстояние), Эратосфен вычислил радиус Земли R : $R = (180^\circ \cdot S) / (\mu\pi)$, $z = \mu$.

Поскольку расстояние между городами в то время измерялось в стадиях, мы не можем сейчас сказать, насколько точен был результат измерений Эратосфена. Стадией греки называли расстояние, которое проходил человек спокойным шагом от момента появления края солнца над горизонтом до момента появления всего его диска, что составляет примерно 158—185 м. Современные расчеты, выполненные при этих приблизительных значениях, дали результат $R = 6\,311—6\,320$ км, который следует признать вполне удовлетворительным, поскольку сейчас мы принимаем радиус Земли равным 6 371 км.

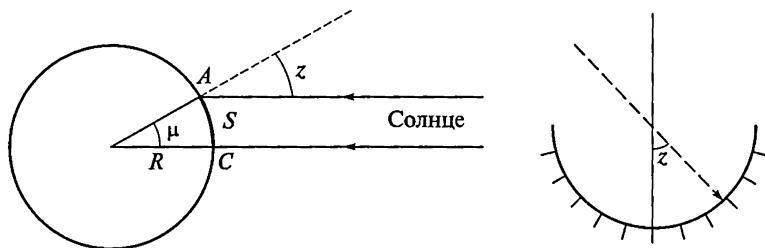


Рис. 1.1. Определение радиуса Земли Эратосфеном

В Средние века в развитии всей науки, в том числе и геодезии, наступил застой. Церковь и инквизиция передовое представление о мироздании объявили ересью. Интерес к геодезии вновь возник в эпоху Возрождения. Известные кругосветные путешествия в период Великих географических открытий подтвердили опытным путем, что Земля — шар.

И. Ньютон в опубликованном трактате в 1687 г. «Математические начала натуральной философии» утверждал, что из-за вращения вокруг своей оси Земля должна быть сплюснутой у полюсов и представлять собой сфероид или эллипсоид вращения, т. е. фигуру, которая получается, если вращать эллипс вокруг малой оси. Эта идея требовала подтверждения. Для этого Парижская академия наук организовала две экспедиции: одну в Перу поближе к экватору, другую в Лапландию — на север Финляндии. Экспедиции должны были произвести измерения длин дуг меридианов, один градус которых, если Земля действительно сплюснута у полюсов, должен быть неодинаков на севере и на юге.

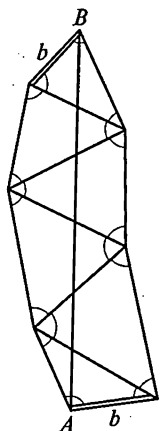


Рис. 1.2. Триангуляция

Для измерения длин дуг меридианов в XVII в. голландский астроном и математик В. Снеллиус предложил метод *триангуляции*. Он заключается в том, что расстояние между точками A и B определялось косвенно из вычисления рядов треугольников, в которых измерялись углы, а на концах ряда определялись длины базисных сторон b (рис. 1.2).

Первоначально проделанные по триангуляционным измерениям расчеты показали вместо сплюснутости Земли у полюсов вытянутость. Но после обнаружения ошибки результат определенный подтвердил сфероидальность Земли.

Градусные измерения неоднократно проводили и другие страны. В России они впервые были осуществлены в первой половине XIX в. и охватывали территорию от Северного Ледовитого океана до Дуная. Работа выполнялась под руководством астрономов и геодезистов К. И. Теннера и

В. Я. Струве. Результатом было вычисление параметров эллипсоида для территории России — эллипсоида Струве. В 1743 г., по возвращении экспедиции из Лапландии, французский ученый А. Клеро открыл зависимость периода колебания маятника от конкретной территории, т. е. связь ускорения силы тяжести с шириной места и, следовательно, сжатием Земли.

Так возник гравиметрический метод изучения формы Земли, который практически стал использоваться значительно позднее. П. С. Лаплас предложил свой вариант: определять форму Земли по колебаниям орбиты Луны. Эта идея была осуществлена лишь после запуска геодезических спутников Земли и по наблюдениям искусственных спутников Земли (ИСЗ) по трассе полета.

1.2. Современные воззрения на форму Земли

Физическая или топографическая поверхность Земли образует физическую или действительную форму Земли с ее неровностями, рельефом, которые изображаются на картах. Но для геодезических построений они создают неудобство, поскольку такая поверхность сложно описывается математически, не аппроксимируется простыми геометрическими формами.

В 1873 г. физик И. Б. Листинг предложил использовать для описания формы Земли понятие «геоид» (от греч. «ге» — земля и «ейдос» — вид). Таким образом получилось, что форма Земли «землеподобна». Несмотря на странность такого термина, он подчеркивает индивидуальность Земли и поэтому, вероятно, распространяется среди геодезистов.

Под *геоидом* понимается уровенная поверхность морей и океанов (без приливов-отливов, сгонов и нагонов), продолженная под материками. Во всех точках уровенной поверхности геоида отвесная линия перпендикулярна касательной к данной точке. Геоид — всюду выпуклая поверхность. Очевидно, что форма геоида связана с распределением масс в теле Земли, вращением ее вокруг оси, взаимодействием сил тяжести и центробежных сил. Поэтому фигура геоида оказалась достаточно сложной и, как позднее установили, принципиально неопределимой. В связи с этим выдающийся отечественный ученый М. С. Молоденский предложил перейти к поверхности «*квазигеоида*» (якобы «геоида»), которая однозначно определяется по наземным измерениям и совпадает с геоидом на морях и океанах и очень близко подходит к нему на суше.

Для научного и практического использования выбрана простая математическая аппроксимация фигуры Земли — *земной эллипсоид*, или *эллипсоид вращения*, размеры которого подбираются при условии наилучшего соответствия фигуре квазигеоида для Земли

в целом или отдельных ее частей. Эллипсоид, подходящий для всей Земли, называют *«общеземным эллипсоидом»*, а для территории отдельной страны или нескольких стран — *«референц-эллипсоидом»*.

В 1940 г. отечественные ученые Ф. Н. Красовский и А. А. Изотов завершили вычисление размеров референц-эллипсоида для геодезических построений и картографирования территории бывшего СССР. В 1946 г. он был введен для всеобщего использования.

Параметры эллипсоида Красовского таковы: большая полуось (радиус экватора) $a = 6\,378\,245$ м, полярное сжатие $\alpha = 1 : 298,3$ (в геодезии для определения эллипсоида как фигуры чаще всего используют параметры a и α ; $\alpha = (a - b)/a$, где b — малая полуось эллипсоида). Соответствующие параметры общеземного эллипсоида. — $6\,378\,137$ м и $1 : 298,257\,223\,563$. Как видно, Земля очень мало отличается от шара с радиусом $6\,371,032$ км.

Таким образом, форма Земли как планеты может быть представлена двояко: во-первых, точной метрикой (каталоговой, осуществляемой с помощью геодезических сетей) и, во-вторых, картографически. Обе модели сформировались в середине XX в. и продолжают развиваться и совершенствоваться. В последние годы форму и размеры Земли уточняют посредством данных, получаемых из наблюдений искусственных спутников Земли. При этом выявлен целый ряд особенностей в конфигурации поверхности планеты.

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

2.1. Общие понятия о системах координат

Под системами отсчета понимают совокупность систем координат и систем измерения времени. Различают теоретическое описание системы отсчета и ее конкретное воплощение. В действительности системы отсчета реализуются косвенным методом. Для этого совокупностью материальных тел (звезды, квазары, геодезические пункты на земной поверхности) фиксируют некоторую систему координат, служащую для указания положений любых других тел в пространстве, вместе с совокупностью связанных с телами произвольно идущих часов, служащих для указания времени.

Координаты — величины, определяющие положение любой точки на поверхности Земли или в пространстве относительно принятой системы координат.

Система координат устанавливает начальные (исходные) точки поверхности или линии отсчета необходимых величин — начало отсчета координат, единицы их измерения.

В геодезии и топографии получили применение системы географических, геодезических, пространственных прямоугольных, плоских прямоугольных и полярных координат.

Темп течения времени различен и зависит от относительной скорости и разности потенциалов в рассматриваемых точках. В современной геодезии определение положения конкретного объекта относится к определенному времени (эпохе). С развитием космической геодезии вопросы синхронности определения координат и времени стали особенно актуальны.

2.2. Географические и геодезические координаты

Географические координаты ввел во II в. до н. э. греческий ученый Гиппарх. Земля представлялась в то время как однородный шар.

Географическими координатами являются угловые величины, называемые широтой и долготой, определяющие положение точки земной поверхности относительно экватора и начального меридиана.

Плоскость экватора проходит через центр Земли и перпендикулярна к ее оси вращения. В качестве начального меридиана из-

бран меридиан, проходящий через Гринвичскую обсерваторию (Англия). Однако сама Гринвичская обсерватория в настоящее время не функционирует и сохраняется лишь как историческое место. Следует заметить, что на почетную роль начального меридиана в разное время претендовали Пулковский, Парижский, Лиссабонский и другие меридианы. Плоскость любого меридиана проходит через ось вращения Земли.

Долгота — двугранный угол (λ) между плоскостью начального меридиана и плоскостью меридиана, проходящего через данную точку, измеряемый в экваториальной плоскости (рис. 2.1, *a*) вправо и влево от начального меридиана, т.е. долгота бывает восточная (+) и западная (–) от 0 до 180°.

Широта — угол (φ) между радиусом шара, проходящим через данную точку, и плоскостью экватора. Широта на экваторе равна 0, на полюсах: северном +90°, на южном –90°. Такие координаты были основными указателями положения точки на Земле на историческом этапе «от Аристотеля до Ньютона».

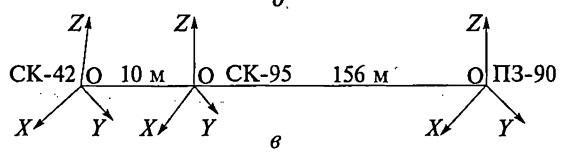
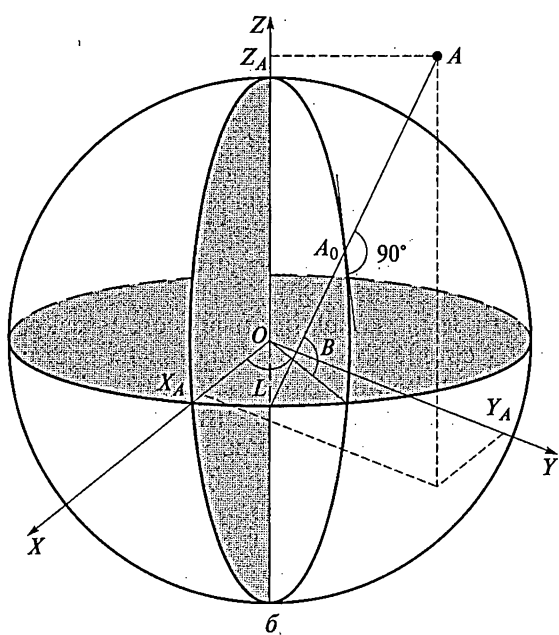
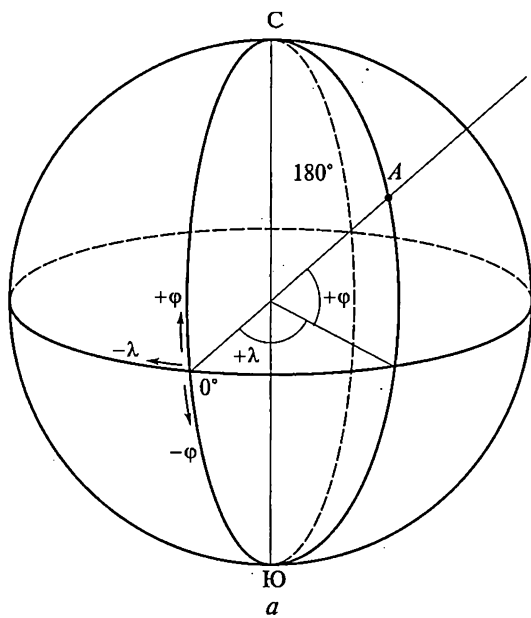
Широту места достаточно точно определяли по высоте Полярной звезды или по высоте Солнца в истинный полдень. Вопрос определения долготы оставался без ответа столетиями. В XVII и XVIII столетиях Англия, обладавшая наиболее мощным флотом, усиленно захватывавшая новые колонии за океанами, терпела большие убытки от несовершенства морских методов определения долгот. За способ, позволяющий определять долготу хотя бы с точностью до полуградуса, правительства ряда стран обещали награды: в 1598 г. Испания — 10 тыс. дукатов (36 кг золота), в 1606 г. Голландия — в 3 раза больше, в 1713–1714 гг. Парламент Англии — 20 тыс. фунтов стерлингов (150 кг золота). В 1759 г. английский механик Джон Харрисон изобрел хронометр и вопрос определения долготы был решен. В 1765 г. Джеймс Кук взял с собой в путешествие хронометр, который за три года плавания отстал на 7 мин 45 с. Координаты, получаемые из непосредственных полевых наблюдений светил, стали называть астрономическими.

Астрономической широтой (φ_A) — угол, образованный отвесной линией в данной точке и плоскостью, перпендикулярной к оси вращения Земли.

Астрономическая долгота (λ_A) — двугранный угол между плоскостями астрономических меридианов данной точки и начального меридиана. Астрономический меридиан образуется сечением

Рис. 2.1. Системы координат. Определение координат точки *A*:

a — географической долготы (λ) и широты (φ) на шаре; *б* — в эллипсоидальной (*B*, *L*, *H* = *AA*₀) и пространственной системах координат (*X*_A, *Y*_A, *Z*_A); *в* — взаимное расположение систем координат: геоцентрической (ПЗ-90) и референсных (СК-42 и СК-95)



земной поверхности плоскостью, проходящей через отвесную линию в данной точке параллельно оси вращения Земли.

Системы координат, применяемые в современной геодезии, можно разделить на две группы: эллипсоидальные, определяющие положение точки на поверхности эллипсоида; прямоугольные (двухмерные на плоскости, трехмерные в пространстве). К эллипсоидальным относятся геодезические координаты.

Геодезическая широта (B) — угол между нормалью к поверхности эллипсоида в данной точке и плоскостью экватора (рис. 2.1, б).

Геодезическая долгота (L) — двугранный угол между плоскостями меридианов на поверхности эллипсоида данной точки и начального меридиана.

В настоящее время географические координаты рассматриваются как обобщенное понятие об астрономических и геодезических координатах, когда отклонения отвеса от нормали к эллипсоиду не учитываются.

Геодезическую систему координат, связанную с общеземным эллипсоидом, распространенную на всю планету и предназначенную для решения научных и практических задач на планетарном или региональном уровнях, называют *общеземной системой*. В настоящее время широкое распространение получила координатная система WGS-84 (World Geodetic System, 1984). Начало координат ее пространственной прямоугольной системы координат находится в центре масс Земли. Ось Z направлена на точку условного земного полюса; оси X и Y находятся в плоскости экватора: ось X располагается в плоскости Гринвичского меридиана, а ось Y дополняет систему до правой (рис. 2.1, б). Такую систему координат называют также геоцентрической. В России без участия западных стран создана общеземная геоцентрическая система координат СК-90 (ПЗ-90; Параметры Земли, 1990).

На поверхности Земли координатные системы закрепляют пункты геодезических сетей, которые являются их составной частью. Поэтому из-за неравномерности размещения геодезических пунктов, погрешностей измерений, особенностей их математической обработки общеземные системы координат различаются между собой.

Геодезическую систему координат, связанную с референц-эллипсоидом, распространяемую в пределах материка или территории того или иного государства, называют *референцной системой*.

Геодезические системы координат включают:
параметры эллипсоида;
высоту геоида над эллипсоидом в начальном пункте;
исходные геодезические даты (геодезические широта и долгота начального пункта, азимут с начального пункта на ориентирный пункт геодезической сети).

В работах по геодезии, картографии и топографии, выполняемых в СССР и затем в России, с 1946 г. принят эллипсоид Красовского, начальный пункт Пулково; превышение геоида над референц-эллипсоидом в начальном пункте равно нулю. Система координат получила название СК-42. С 1 июля 2002 г. в России введена новая единая государственная система координат (СК-95).

Система координат СК-95 принята при условии параллельности ее осей пространственным осям системы координат ПЗ-90. За отсчетную поверхность в СК-95 принята поверхность референц-эллипсоида Красовского с его параметрами. Поверхность эллипсоида преобразуется в плоскую с помощью проекции Гаусса — Крюгера, сохранены неизменными координаты начального пункта Пулково.

Положение начала системы координат СК-95 относительно начал систем координат СК-42 и ПЗ-90 приведено на рис. 2, в.

Положение пунктов в принятой системе координат может задаваться следующими координатами:

- пространственными прямоугольными координатами X, Y, Z (направление оси Z совпадает с осью вращения отсчетного эллипсоида, ось X лежит в плоскости нулевого меридиана, а ось Y дополняет систему до правой; началом системы координат является центр отсчетного эллипсоида);
- геодезическими координатами: широтой — B , долготой — L , высотой — H . Геодезическая высота H отсчитывается от точки на земной поверхности по нормали до поверхности эллипсоида;
- плоскими прямоугольными координатами x и y , вычисляемыми в проекции Гаусса — Крюгера. Третья координата — абсолютная высота измеряется от среднего уровня Балтийского моря (см. гл. 8, 9).

2.3. Переход от реальной (физической) земной поверхности к поверхности эллипсоида

Связь астрономических долгот и широт с геодезическими. Астрономические долготы и широты, обозначаемые соответственно буквами φ_A и λ_A , как уже было сказано, получаются из прямых полевых наблюдений небесных светил, а геодезические обозначаются буквами B и L и связаны с размерами и ориентированием конкретного референц-эллипсоида в теле Земли и могут быть только вычислены. Началом координат в геодезической системе (на референц-эллипсоиде) служит точка ориентирования эллипсоида с известными астрономическими координатами (у нас в стране — это сигнал «А», т.е. центр Пулковской обсерватории).

Геодезические координаты относятся к нормали к поверхности эллипсоида, а географические — к отвесной линии, т. е. нормали к уровенной поверхности, или к геоиду. Отвесная линия, нормаль к эллипсоиду и радиус-вектор эллипсоида, проведенные через одну и ту же точку на поверхности эллипсоида, занимают разные положения в пространстве.

Угол между отвесной линией и нормалью к поверхности эллипсоида называют *уклонением отвесной линии*, оно составляет от 2—3" до 30—40" и более в аномальных районах. Угол в 1" на поверхности Земли соответствует дуге в 30 м. Из-за этого различия в астрономических и геодезических координатах могут колебаться от сотни метров в среднем до километра и более в аномальных районах. Поэтому для перехода от астрономических широт и долгот к геодезическим необходимо определять в разных пунктах Земли уклонения отвесных линий. Учет этих различий при расчетах обязателен для всех топографических карт. Игнорировать их можно только при мелкомасштабном картографировании.

Редуцирование результатов измерений на поверхность эллипсоида. Для математической обработки геодезических измерений необходимо перейти с реальной земной поверхности на референц-эллипсоид. Между тем расхождение поверхности геоида и, тем более, физической поверхности Земли с поверхностью эллипсоида достигает многих метров. Поэтому необходимо результаты натурных измерений проектировать (редуцировать) на поверхность референц-эллипсоида путем введения соответствующих поправок за переход от одной поверхности к другой.

Необходимо выбрать некоторую *поверхность относимости*. Ею может быть уже упомянутый референц-эллипсоид или сфера, или даже плоскость, если контур, выделенный на ней, не превышает площади, окомленной окружностью радиусом не более 10 км.

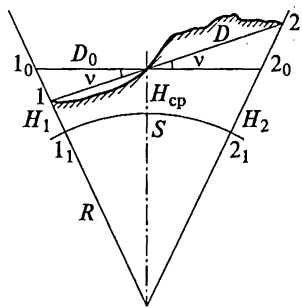


Рис. 2.2. Редуцирование линии на поверхность относимости

Редуцирование натурных измерений на поверхность относимости приводит к тому, что искажаются длины линий (рис. 2.2): D — длина линии, непосредственно измеренная в натуре между точками 1 и 2; D_0 — горизонтальное проложение; S — длина той же линии D на поверхности эллипсоида, которую нужно определить. Задачу решим в два этапа. Сначала найдем D_0 . Приблизненно $D_0 = D - (H_2 - H_1)^2 / (2D)$, где H_i — геодезическая высота — расстояние по нормали от поверхности Земли до поверхности эллипсоида.

Но удобнее решить ее через угол наклона v , так как он может быть измерен непосредственно в натуре.

Тогда $D_0 = D \cos v = D(1 - 2 \sin^2(v/2))$.

Отсюда получаем

$$D_0 = D - 2D \sin^2(v/2), \quad (2.1)$$

или

$$D - D_0 = \underbrace{2D \sin^2(v/2)}_{\text{Поправка}}. \quad (2.2)$$

Эта поправка достаточно велика и учитывается всегда. Теперь найдем S :

$$S = D_0 - (H_{\text{ср}} D_0)/R. \quad (2.3)$$

Эта поправка невелика. Например, при длине линии 6 400 м на высоте 1 000 м над поверхностью эллипсоида она будет равна 1 м. Отсюда получаем, что для линии длиной 600 м на высоте 100 м поправка 1 см.

2.4. Плоские прямоугольные координаты

Астрономические и геодезические координатные системы трудно применять на практике для обоснования съемочных и инженерных работ. Погрешность координат, даже при точных определениях, остается довольно большой. При определении широты она составляет в дуговой мере $0,1 - 0,2''$; при определении долготы $0,3 - 0,5''$, что в линейной мере равно соответственно 3—6 и 5—10 м. Поэтому в практику геодезических и топографических работ была введена система плоских прямоугольных координат (рис. 2.3). По сути дела, это известные декартовы координаты, хотя в геодезии принята правая система координат — оси x и y поменялись местами.

Особенность прямоугольных координат заключается в том, что они могут быть наложены на плоское изображение земной поверхности. Для этого она должна быть изображена в некоторой картографической проекции.

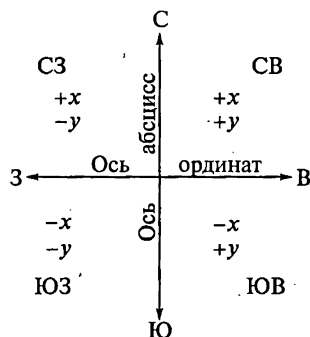


Рис. 2.3. Оси прямоугольной системы координат с обозначением знаков абсцисс и ординат и названия четвертей

2.5. Общие понятия о картографических проекциях

При создании карт поверхность эллипсоида вращения, как математическая поверхность Земли, не может быть развернута на плоскости без складок или разрывов, поэтому используют картографические проекции, в которых отображение поверхности эллипсоида на плоскости происходит по определенным математическим законам. Эти законы выражают функциональную связь координат точек картографируемой поверхности и плоскости.

В основу такого отображения картографической проекции положена система геодезических координат, координатными линиями которой являются меридианы и параллели. Линии меридианов на картографируемой поверхности получают путем сечения ее плоскостями, проходящими через ось вращения эллипсоида (они будут эллипсами), а линии параллелей — путем сечения картографируемой поверхности плоскостями, перпендикулярными к оси вращения эллипсоида (параллели имеют вид окружностей). Эти же координатные сетки в виде меридианов и параллелей на картах строят по определенным математическим правилам.

Возможен выбор различных правил перехода к плоскости, т.е. построение изображения в разных картографических проекциях. Математическая основа картографических проекций позволяет производить на картах точные измерения. Однако для этого нужно знать закон распределения искажений каждой проекции.

Картографические проекции различают по разнообразным признакам, прежде всего по характеру сохраняемых свойств и виду сетки меридианов и параллелей. По первому признаку проекции делят на:

равновеликие, сохраняющие площади;

равноугольные (или *конформные*) проекции, которые сохраняют углы и, следовательно, формы контуров, но сильно искажают соотношение размеров (например, проекция Меркатора);

проекции, сохраняющие длины линий в некоторых направлениях или во всех направлениях из одной какой-нибудь точки;

производные, не сохраняющие полностью никаких свойств, но более или менее удобные для потребителя карты, распределяющие искажения по всему изображению.

По виду сетки меридианов и параллелей проекции подразделяют на следующие основные виды, обозначенные на рис. 2.4.

В нормальной *конической проекции* меридианы изображают прямыми линиями, сходящимися в одной точке. Параллели — дуги концентрических окружностей, центр которых находится в точке схода меридианов. Радиусы параллелей зависят от условий равноугольности или равновеликости.

В нормальной *цилиндрической проекции* меридианы и параллели изображают взаимно-перпендикулярными прямыми линиями. По

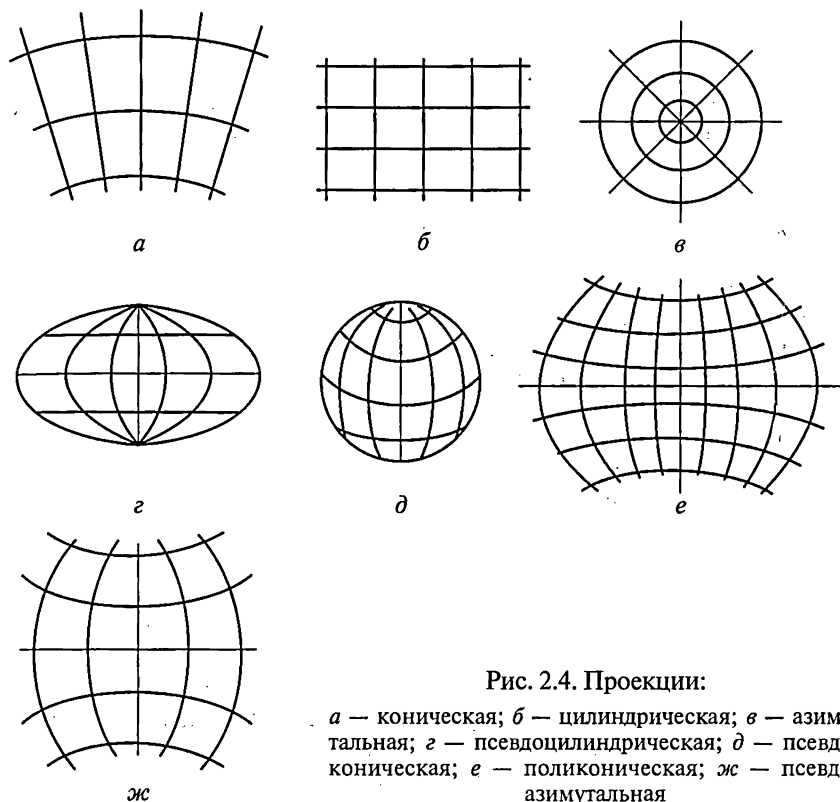


Рис. 2.4. Проекции:

a — коническая; *б* — цилиндрическая; *в* — азимутальная; *г* — псевдоцилиндрическая; *д* — псевдоконическая; *е* — поликоническая; *ж* — псевдоазимутальная

свойствам изображения они могут быть равноугольными, равновеликими и производными.

В *азимутальной проекции* меридианы изображают прямыми линиями, пересекающимися в одной точке. Параллели — концентрические окружности с центром в точке пересечения меридианов. Применяются для территорий округлой формы и карт мелких масштабов.

На *псевдоцилиндрических проекциях* параллели изображают прямыми линиями. Меридианы — кривые: синусоиды или эллипсы. Применяются при создании карт океанов или всей Земли мелкого масштаба.

На *псевдоконических проекциях* параллели изображают дугами концентрических окружностей. Меридианы — кривые, симметричные относительно осевого меридиана. Применялись ранее для карт отдельных государств; теперь используются для показа поверхности всей Земли и других планет.

На *поликонической проекции* параллели изображают дугами эксцентрических окружностей, центры которых находятся на осе-

вом прямолинейном меридиане. Меридианы — кривые, симметричные относительно осевого прямолинейного меридиана. Применяется для создания карт мира.

На *псевдоазимутальных проекциях* параллели изображают концентрическими окружностями. Меридианы — кривые, за исключением двух взаимно-перпендикулярных, которые служат осями симметрии.

Круговые проекции имеют параллели и меридианы, изображаемые окружностями или дугами окружностей.

Производные проекции получают различными видоизменениями имеющихся проекций.

В геодезии и топографии применяют *проекцию Гаусса—Крюгера* — это такое конформное (равноугольное) изображение поверхности земного эллипсоида на плоскости, при котором осевой меридиан изображают прямой линией с сохранением масштаба, экватор — также прямой, перпендикулярной осевому меридиану, а все остальные меридианы и параллели — кривые линии. Проекцию Гаусса—Крюгера нередко истолковывают как поперечную цилиндрическую равноугольную проекцию (Меркатора), но это неточно.

Систему координат Гаусса—Крюгера не следует отождествлять с применяемой за рубежом зональной системой координат в поперечно-цилиндрической проекции Меркатора (Universal Transverse Mercator — UTM). Их главное отличие состоит в том, что в проекции UTM проектирование земного эллипсоида сначала производится на сферу, а затем на плоскость в проекции Гаусса—Ламберта с дальнейшим равноугольным преобразованием элементов проекции Гаусса—Ламберта на плоскости с условием сохранения постоянного масштаба по осевому меридиану. По двум меридианам, удаленным от осевого меридиана примерно на 180 км в обе стороны, масштаб длин $m = 1$, а по осевому меридиану масштаб составляет 0,999 60. Этим достигаются меньшие искажения на краях зоны, чем в проекции Гаусса—Крюгера, но существенно осложняется математическая обработка сетей.

2.6. Использование проекции Гаусса—Крюгера в геодезии

В любой проекции изображение получается тем более искаженным, чем больше картографируемая территория. Поэтому прямоугольная система координат не может быть распространена на большую территорию. Приходится решать задачу по частям.

В 1825 г. К. Ф. Гаусс впервые решил общую задачу по изображению одной поверхности на другой с сохранением подобия в бесконечно малых частях. Частным случаем этой задачи является отобра-

жение поверхности эллипсоида вращения на плоскости. Предложенная К. Ф. Гауссом проекция практически не применялась. В 1912 г. А. Крюгер вывел и опубликовал рабочие формулы этой проекции. После этого проекция получила название проекции Гаусса — Крюгера и нашла широкое применение в топографо-геодезических работах.

Геометрическая интерпретация проекции Гаусса — Крюгера выглядит следующим образом. Поверхность земного эллипсоида условно делят меридианами на зоны, соответствующие 6° по долготе. Средний меридиан зоны называется осевым. Затем эллипсоид вписывается в поперечно расположенный цилиндр так, чтобы плоскость его экватора совместились с осью цилиндра, а один из осевых меридианов оказался касательной к его боковой поверхности. Эту зону, а затем и последующие по определенному математическому закону проектируют на внутреннюю боковую поверхность цилиндра (рис. 2.5, *а*). После проектирования поверхность цилиндра разворачивают в плоскость, разрезав цилиндр по образующим, касательным земных полюсов. Спроектированные аналогично последовательно одна за другой зоны соприкасаются между собой в точках, расположенных по линии экватора, как это показано на рис. 2.6, *а*, получается, что вся поверхность Земли разбивается на 60 зон, считая от начального — Гринвичского меридиана (0°). Через каждую зону от Северного до Южного полюса проходит прямолинейный осевой меридиан зон. Долгота осевого меридиана n -й зоны равна $(6n - 3)^\circ$. Нумерация зон идет с запада на

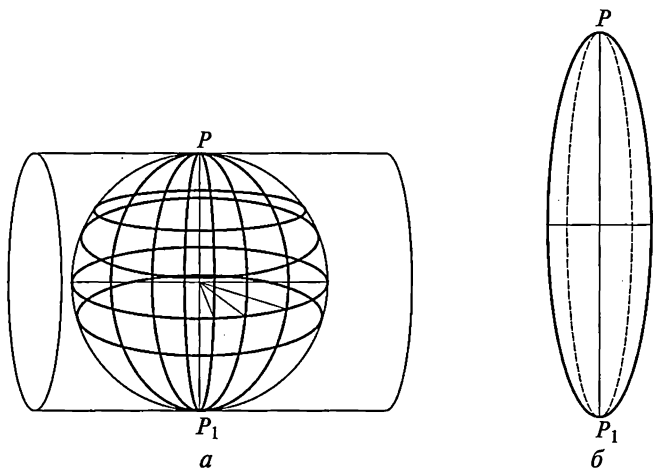


Рис. 2.5. Схема образования проекции Гаусса — Крюгера:

а — геометрическое представление получения изображения зоны; *б* — спроектированное на плоскость изображение зоны (---- — действительные размеры зоны, — — размеры зоны в проекции)

восток, начиная от Гринвичского меридиана. Территория России располагается примерно в 29 зонах: от 3 до 32. В пределах каждой зоны плоская координатная система располагается самостоятельно. Оси x и y размещаются по осевому меридиану зоны и экватору. Начало отсчета координат в их пересечении. Поскольку территория России расположена в Северном полушарии, то все значения x всегда будут положительными. Сложнее получается со значениями координаты y , которая в каждой зоне может быть и положительной и отрицательной. Чтобы избежать этих неудобств, начало отсчета ординат искусственно сдвигают на запад на 500 км (рис. 2.6). Другими словами, к значению y прибавляют 500 км. Ширина полузоны по долготе составляет всего 3° , т. е. около 333 км, поэтому все значения y станут положительными. Поскольку в каждой зоне координаты могут совпадать, в значении y указывается также номер зоны. Например, если координаты точки даны в виде: $x = 6\,650\,457$, $y = 4\,307\,128$, то это значит, что точка расположена от экватора на расстоянии 6 650 457 м; в значении координаты y цифра 4 означает номер зоны, а от оставшегося числа следует отнять 500 000 м, тогда получим расстояние нашей точки от осевого меридиана, а именно — 192 872 м. Такие координаты называют *преобразованными*. Для удобства пользования плоскими координатами каждую зону покрывают сеткой квадратов, так называемой километровой сеткой (сторона квадрата равна 1 км), которая изображается на топографических картах.

Такая зональная система координат, принятая в качестве государственной, обеспечивает возможность построения на территории всей Земли системы плоских прямоугольных координат и

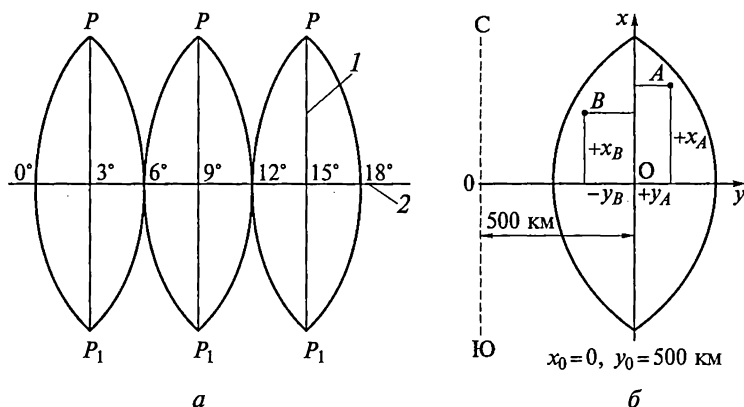


Рис. 2.6. Зональная система координат в проекции Гаусса — Крюгера:
 а — деление поверхности Земли на зоны (1 — осевой меридиан, 2 — экватор);
 б — определение плоских координат в зоне

позволяет получать практически без искажений довольно большие участки земной поверхности.

Искажения, имеющие место в шестиградусных зонах, превышают допустимые пределы при создании планов наиболее крупных масштабов. Для создания планов масштаба 1 : 5 000 и крупнее используют трехградусные зоны. Средние меридианы трехградусных зон совпадают со средними меридианами шестиградусных зон или с их крайними (граничными) меридианами. Первая трехградусная и первая шестиградусная зоны имеют один и тот же средний меридиан с длиной 3°, поэтому длину средних меридианов трехградусных зон можно рассчитать по формуле $L_c = 3^\circ n$.

Линейные искажения в трехградусных зонах на территории России не превышают 1/3 500.

2.7. Искажения при изображении поверхности эллипсоида на плоскости в проекции Гаусса—Крюгера

Искажения в длинах линий. На рис. 2.7 показан порядок искажения размеров окружности в различных точках зоны. Обозначим: D — длина отрезка прямой ab в проекции Гаусса—Крюгера; S — длина того же отрезка на поверхности эллипсоида. Из рисунка следует, что $D/S = 1 + y^2/(2R^2)$, где y — полусумма ординат концов отрезка прямой (ордината середины отрезка); R — радиус Земли. Можно также написать

$$D - S = \Delta S = (Y^2 S)/(2R^2); \Delta S/S = Y^2/(2R^2), \quad (2.4)$$

где ΔS — величина искажения длин линий, $\Delta S/S$ — значение искажения в относительной мере. На краях зоны в южных широтах оно составляет около 1 : 800, а в северных широтах примерно 1 : 16 000.

Топографический план. В топографии изучают небольшие участки земной поверхности, которые можно считать плоскими, а отвесные линии — параллельными между собой и совпадающими с нормальными к поверхности эллипсоида. Съёмки, выполненные на таких территориях в масштабах от 1 : 500 до 1 : 5 000, не учитывают кривизны земной поверхности. Следует знать, как велик радиус такого участка земной поверхности, который можно принимать за плоскость.

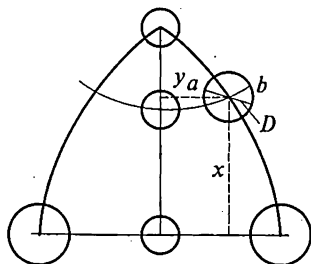


Рис. 2.7. Искажения длин и размеров на плоскости в проекции Гаусса—Крюгера

Представим участок земной поверхности в виде части поверхности сферы радиусом R , который заменяется частью горизонтальной плоскости. Из рис. 2.8 видно, что с удалением от точки m разница ΔS в длине дуги S и ее проекции на плоскость S' возрастает, а расстояние между ними (высота точки местности) $\Delta h = Bb$ увеличивается. Из данных рис. 2.8 получаем

$$S' = R \operatorname{tg} \varphi; S = R\varphi; \Delta S = S' - S = R(\operatorname{tg} \varphi - \varphi).$$

Сделав ряд преобразований, запишем

$$\Delta S = S^3/(3R^2). \quad (2.5)$$

Можно также определить значение Δh , учитывая малость Δh относительно R и близость S и S' ,

$$\Delta h = S^2/(2R). \quad (2.6)$$

Из расчетов по полученным формулам видно, что при длине линии 10 км ΔS составляет только 1 : 1 000 000 ее длины. Поэтому считается, что участок радиусом 10 км можно принять за плоский при съемке планов без рельефа. При пониженных требованиях к точности линейных измерений его площадь может быть увеличена. Значительно быстрее возрастают расхождения между высотами точек на сфере и на плоскости. При той же длине линии 10 км разность высот достигает уже 7,8 м, поэтому значение Δh приходится учитывать даже при малых расстояниях.

Искажение углов. При проекции сферической поверхности или поверхности эллипсоида на плоскость искажаются также значения углов, образуемых линейными отрезками какой-либо фигуры. При переходе от эллипсоида на плоскость в проекции Гаусса — Крюгера это искажение углов не принимается во внимание из-за его малости. На краю зоны при длинах до 10 км оно составляет 8".

В общем случае при переходе от сферической поверхности на плоскость избыток (эксцесс) угловых величин может быть подсчитан. Расчеты показывают, что при проецировании участка земной поверхности площадью 100 км² искажение углов составляет 0,5", что соответствует точности современных высокоточных угловых измерений. В обычной топографо-геодезической практике точность измерения углов существенно ниже, и поэтому угловые искажения, впрочем, как и линейные, не принимаются во внимание. Однако в высшей геодезии и при высокоточных работах инженерной геодезии эти искажения учитываются.

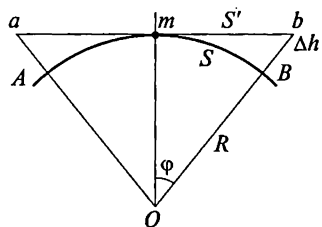


Рис. 2.8. Искажение длины линии и изменение высоты точки при переходе от сферической поверхности к горизонтальной

2.8. Полярные координаты

Система полярных координат может быть задана на плоскости, сфере или поверхности эллипсоида и состоит из точки M — начала координат (рис. 2.9) и полярной оси MA , относительно которых положение точки определяется координатами: углом положения α (дирекционный угол, или румб на плоскости, азимут на сфере и эллипсоиде) и кратчайшим расстоянием S между точками M и M_1 , считаемым по поверхности: на сфере — это дуга большого круга — геодезическая линия.

За полярную ось (начальное направление) обычно принимают: на плоскости — направление, параллельное оси абсцисс, прямоугольных координат, а на сфере и эллипсоиде — северное направление меридиана, проходящего через точку M .

2.9. Связь плоской прямоугольной и полярной систем координат

Прямая геодезическая задача. Задача формулируется так: заданы x_A и y_A — плоские геодезические координаты точки A (рис. 2.10). Измерено непосредственно в натуре расстояние S между точками и α — угол положения (направления). Из рисунка находим приращения координат:

$$\Delta x_{AB} = S \cos \alpha; \Delta y_{AB} = S \sin \alpha. \quad (2.7)$$

Получаем искомые координаты точки B :

$$x_B = x_A + \Delta x_{AB}, y_B = y_A + \Delta y_{AB}. \quad (2.8)$$

Обратная геодезическая задача. Дано x_A и y_A ; x_B и y_B — координаты точек A и B (см. рис. 2.10). Следует найти угол положения и расстояние S_{AB} . Из рисунка видно, что

$$\operatorname{tg} \alpha_{AB} = \frac{\Delta y_{BA}}{\Delta x_{BA}} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A}; S_{AB} = \frac{\Delta y_{AB}}{\sin \alpha_{AB}} = \frac{\Delta x_{AB}}{\cos \alpha_{AB}}; \quad (2.9)$$

$$S_{AB} = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} = \sqrt{\Delta x_{BA}^2 + \Delta y_{BA}^2}. \quad (2.10)$$

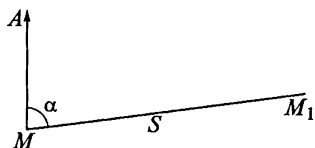


Рис. 2.9. Схема полярных координат точки M_1

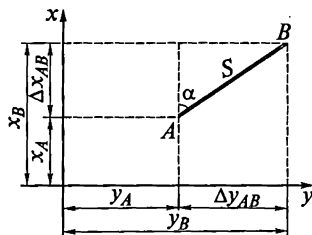


Рис. 2.10. Решение прямой и обратной геодезических задач

2.10. Системы измерения времени

По рекомендации Международного астрономического союза с 1991 г. введены три шкалы времени: барицентрическое координатное время (TCB) — время, которое показывали бы часы, будучи помещенными в барицентр Солнечной системы; геоцентрическое координатное время (TCG) — время, которое показывали бы часы, будучи помещенными в центр масс Земли; земное время (TT) — время, которое показывают часы в пунктах земной поверхности, расположенных на уровне моря на широте 45° .

За основную единицу измерения времени принимается продолжительность одного полного оборота Земли вокруг своей оси, называемая сутками.

В зависимости от принятого начала отсчета и используемых единиц в астрономии различают две системы измерения времени: звездную и солнечную.

Из-за неравномерности вращения Земли и постоянно возрастающих требований науки и техники было введено равномерно текущее, так называемое эфемеридное, время, связанное не с суточным вращением Земли, а с годичным движением Земли вокруг Солнца — тропическим годом. Единицы эфемеридного времени постоянны с точностью до $1 \cdot 10^{-10}$. Для составления эфемерид Солнца, Луны и планет используют эфемеридное время.

С 1 января 1972 г. во всех службах времени введено атомное время (AT), не зависящее от вращения и движения Земли. За единицу атомного времени принята секунда, которая равна 9 192 631 770 периодам колебаний излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133. Точность атомных часов порядка $1 \cdot 10^{-12}$. Стабильность частоты современных квантовых генераторов на атомном водороде достигает $5 \cdot 10^{-14}$.

Все передаваемые отечественными радиостанциями сигналы времени формируются на основе единообразной системы атомного времени и шкалы, воспроизводимой Государственным эталоном времени и частоты, которая согласована со шкалой UTC МБВ (Международного бюро времени).

ОРИЕНТИРОВАНИЕ ЛИНИЙ

3.1. Ориентирные углы направлений

Ориентированием линий называется определение их направлений относительно другого направления, принятого за исходное.

В геодезии ориентирование линий местности и их отображений на планах и картах осуществляется относительно следующих направлений: геодезического и астрономического (истинного) меридианов, магнитного меридиана и осевого меридиана зоны (оси абсцисс прямоугольной системы координат).

При этом следует иметь в виду, что линии меридианов на поверхности референц-эллипсоида, отображающиеся на картах, носят название геодезических меридианов, а плоскость астрономического меридиана относится к поверхности геоида.

Ориентирными углами направлений являются: азимуты (геодезический, астрономический или магнитный), дирекционный угол и румб (рис. 3.1, 3.2).

Геодезический азимут A_r — горизонтальный угол в данной точке, отсчитанный по часовой стрелке, между северным направлением геодезического меридиана N и заданным направлением.

Астрономический азимут — двугранный угол, отсчитываемый по направлению часовой стрелки, от плоскости астрономического меридиана точки наблюдения до вертикальной плоскости, проходящей через заданное направление.

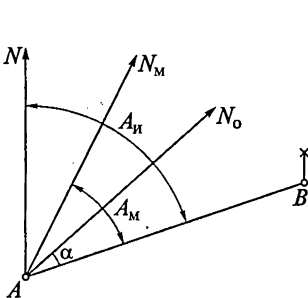


Рис. 3.1. Измерение азимутов: магнитного (A_M), истинного (A_n) и дирекционного угла α

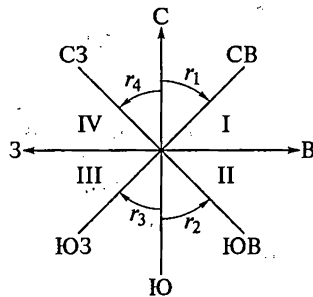


Рис. 3.2. Отсчет румбов по четвертям круга

Плоскость астрономического меридиана может определяться на местности специальными приборами — гиротеодолитами или методами астрономических наблюдений. В этом случае отвесные линии в точках стояния и наблюдения перпендикулярны геоиду (уровенной поверхности). Азимут измеряется от 0 до 360°. Так же как и географические координаты, географические азимуты — обобщенное понятие геодезического и астрономического азимутов.

Магнитный азимут A_m — двугранный угол между направлением N_m на северный магнитный полюс, который указывается северным концом магнитной стрелки, и направлением на точку наблюдения. Магнитный азимут измеряется по часовой стрелке от 0 до 360°.

Дирекционный угол α — угол между северным направлением координатной линии, параллельной осевому меридиану N_0 зоны, и направлением на точку наблюдения. Он считается от северного направления по часовой стрелке от 0 до 360°.

Румб r (геодезический) — угол, отсчитываемый от ближайшего конца линии, параллельной осевому меридиану зоны и проходящей через точку стояния. Таким образом, величина румба может быть в пределах от 0 до 90°. Для того чтобы не возникало путаницы, румб должен быть обозначен по четверти круга, к которому он принадлежит: СЗ, ЮЗ, СВ или ЮВ. Румбы также бывают магнитными и истинными, если в качестве исходных используются направления магнитного или истинного меридиана.

Следует отметить, что румбы применяют и в морской навигации: круг делится на 32 румба, в румбе 11° 15'. В метеорологии весь горизонт обычно делят на 16 румбов.

3.2. Связь и взаимные преобразования ориентирных углов

Азимуты и дирекционный угол имеют прямое и обратное значение. Как видно из рис. 3.3, *а*, прямой и обратный дирекционные углы, измеренные соответственно из точки A на B и из B на A , различаются на 180°: $\alpha_{AB} = \alpha_{BA} \pm 180^\circ$.

Прямой и обратный геодезические азимуты различаются между собой на 180° и на величину γ , называемую *сближением меридианов*. Оно возникает из-за того, что все меридианы сходятся в одну точку. Из рис. 3.3, *б* можно записать зависимость $A_{AB} = A_{BA} \pm 180^\circ + \gamma$, где γ — сближение меридианов между точками A и B .

Если расстояние между точками A и B не более 50 км, то достаточно точно сближение меридианов вычисляют по формуле

$$\gamma = l \sin B, \quad (3.1)$$

где l — разность долгот точек A и B ; B — широта точки, в которой определяется сближение меридианов.

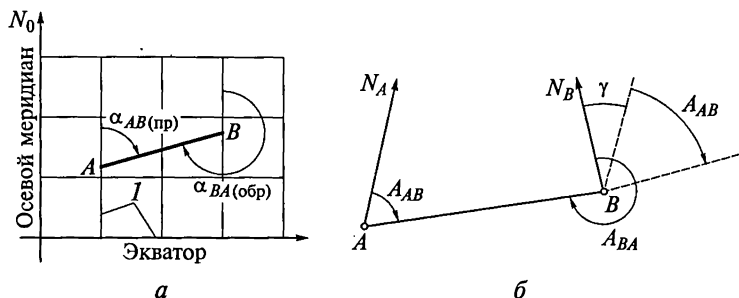


Рис. 3.3. Прямой и обратный дирекционные углы (а) и геодезические азимуты (б):

I — линии координатной сетки

Из формулы (3.1) следует, что сближение меридианов на экваторе равно нулю и по мере удаления от него отдельных точек линии оно возрастает, достигая на полюсе разности долгот точек. На плоскости в проекции Гаусса—Крюгера для удобства перехода от азимута к дирекционному углу существует понятие *гауссова сближения меридианов*, которое выражается также вышеприведенной формулой, но $l = L - L_0$, где L — долгота данной точки, L_0 — долгота осевого меридиана зоны. По знаку величины l видно, что значение γ положительно для всех точек зоны, расположенных к востоку от осевого меридиана (восточное сближение), и отрицательно для всех точек, расположенных к западу (западное сближение). Из рис. 3.4, а вытекает алгебраическая зависимость между азимутом и дирекционным углом

$$A_n = \alpha + \gamma. \quad (3.2)$$

В проекции Гаусса—Крюгера все меридианы, кроме осевого, изображаются кривыми линиями. Поэтому для некоторой точки A в проекции Гаусса—Крюгера сближением меридианов будет угол между северным направлением меридиана на полюс и прямой, параллельной осевому меридиану.

Поскольку Северный полюс географический и магнитный не совпадают, между геодезическим и магнитным меридианами образуется угол, называемый *магнитным склонением* (или склонением магнитной стрелки, рис. 3.4, б); знак магнитного склонения определяется, как это показано на рис. 3.4, в

$$A_r = A_m + \delta. \quad (3.3)$$

Магнитное склонение непостоянно. Вековые изменения магнитного склонения достигают нескольких десятков градусов, годовые — 14—16'. Суточные изменения, возникающие из-за магнитных бурь, могут быть значительными.

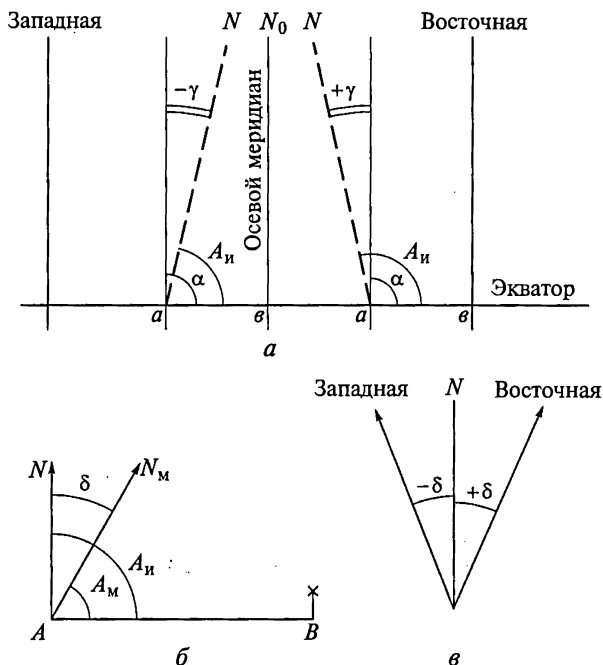


Рис. 3.4. Определение знака сближения меридианов (а), магнитного склонения (б) и знака магнитного склонения (в)

Из формул (3.2) и (3.3) выведем так называемую общую поправку направления, связывающую азимуты и дирекционный угол с магнитным склонением и сближением меридианов. Поскольку обе формулы выведены относительно $A_{и}$, приравняем их правые части и получим

$$A_M + \delta = \alpha + \gamma \text{ или } A_M = \alpha - (\delta - \gamma), \alpha = A_M + (\delta - \gamma),$$

где $(\delta - \gamma) = \Pi$ — поправка направления.

При решении обратной геодезической задачи возникает вопрос о переходе от румба к дирекционному углу при вычислениях по формуле

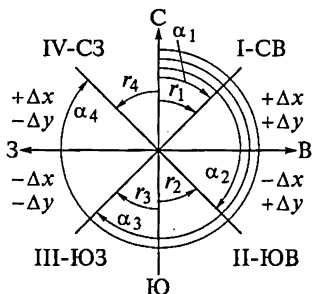
$$\operatorname{tg} r = \operatorname{tg} \alpha = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \text{ или } r = \operatorname{arctg} \left| \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \right|.$$

Из рис. 3.5 устанавливается следующая связь румбов с дирекционными углами:

- I — СВ, $r_1 = \alpha$;
- II — ЮВ, $r_2 = 180^\circ - \alpha_2$;
- III — ЮЗ, $r_3 = \alpha_3 - 180^\circ$;
- IV — СЗ, $r_4 = 360^\circ - \alpha_4$.

Рис. 3.5. Связь румбов с дирекционными углами

По знакам приращений координат ($\pm \Delta y = y_B - y_A$; $\pm \Delta x = x_B - x_A$) определяется название румба или четверти, в зависимости от которых находится значение дирекционного угла по одной из вышеприведенных формул.



3.3. Измерение ориентирных углов

Азимут магнитный может быть определен непосредственно в поле с помощью компаса или буссоли, которые бывают разных конструкций, но все содержат магнитную стрелку и кольцо с градусными делениями (рис. 3.6). Они снабжены также арретирами для закрепления стрелки в неподвижном положении при транспортировке, а также двумя визирами для фиксирования направления. Они могут надеваться на руку или прикрепляться к планшету, сумке и др. Следует заметить, что есть буссоли, в которых роль стрелки выполняет подвижное намагниченное кольцо с градусными делениями.

Буссоли и компасы отличаются в основном тем, что градусные деления компаса оцифрованы по часовой стрелке, а у буссоли — против часовой стрелки.

Внутренняя рамка топографических карт образована линиями меридианов и параллелей с подписанными значениями их геодезических координат. Таким образом, на карте имеются две линии нанесенных меридианов. Кроме этого, соединив линией на нуж-

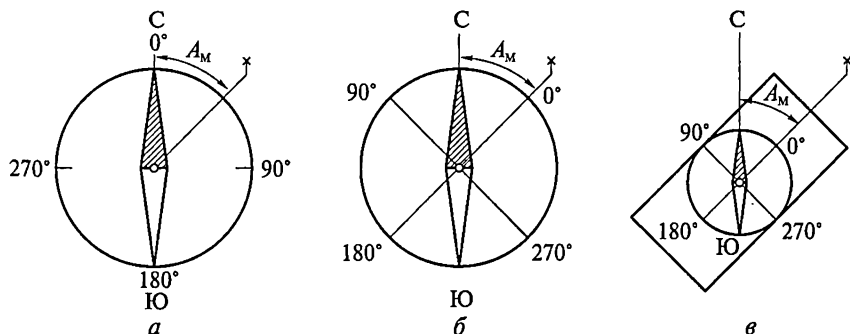


Рис. 3.6. Определение магнитного азимута компасом (а), буссолью (б) и горным компасом (в)

ном участке карты одноименные значения долгот на северной и южной параллелях рамки карты, мы получим положение меридиана.

При работе с топографической картой самым простым способом может быть непосредственно измерен дирекционный угол, так как вертикальные линии сетки прямоугольных координат параллельны осевому меридиану. Для удобства перехода к азимутам на каждом листе топографической карты под нижней ее рамкой дается в виде схемы ориентировка вертикальных линий сетки относительно геодезического и магнитного меридианов и указываются величины сближения меридианов и склонения магнитной стрелки.

При необходимости магнитное склонение может быть определено из натуральных наблюдений следующим образом. На площадке под открытым небом устанавливают мензульный столик с планшетом, на котором закрепляют лист бумаги с вычерченными концентрическими окружностями с интервалом 1—2 см. В центре помещают гномон (достаточно длинный гвоздь). Затем в течение целого дня с восхода и до захода Солнца наблюдатель следит за изменением длины и направления тени от гномона и отмечает все моменты касания конца тени окружностей. В результате получается последовательность точек, дающая ветвь параболы, ось которой будет указывать направление астрономического меридиана. Теперь следует приложить к этой линии компас, отпустить стрелку и отметить, насколько она отклоняется от линии меридиана. Это и будет величина магнитного склонения.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ**4.1. Единицы измерений**

С 1 января 1963 г. в нашей стране ГОСТом введена в действие Международная система единиц, сокращенно обозначаемая СИ.

В геодезии приходится измерять преимущественно углы и длины. В системе СИ за единицу длины принят метр (м). В конце XVIII в. во Франции по предложению специально созданной комиссии с участием П. Лапласа и других французских ученых метр был определен как $1 : 40\,000\,000$ часть длины Парижского земного меридиана. Были проведены градусные измерения, на основании которых был изготовлен эталон метра в виде Х-образного платиноиридиевого бруска с нанесенными на нем штрихами, обозначающими длину метра. В настоящее время прототип метра хранится во Франции в городе Севре в Международном бюро мер и весов.

С прототипа была изготовлена 31 копия. По жребию России достались две копии (№ 11 и № 28), из которых копия № 28 хранится в С.-Петербурге в Научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ). В сентябре 1918 г. декретом СНК РСФСР эталон № 28 был утвержден в качестве государственного первичного эталона метра.

В 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам утвердила новый естественный и неразрушаемый эталон единицы длины — метр, выраженный через длину световых волн. Новое определение метра, введенное в СИ, звучит так: метр — длина, равная $1\,650\,763,73$ длины волны в вакууме излучения (оранжевая линия в спектре изотопа криптона с атомным весом 86).

Это чрезмерно громоздкое определение в 1983 г. было заменено новым эталоном и более кратким определением: метр — расстояние, которое проходит свет в вакууме за $1 : 299\,792\,458$ с. В 1984 г. во ВНИИМе создан новый государственный эталон метра, соответствующий последнему определению.

В стране создана Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ), задача которой состоит в обеспечении передачи единицы измерений от первичных государственных эталонов через образцовые средства измерений к рабочим мерам и средствам измерений, используемым на практике.

Международной системой единиц (СИ) установлена также единица плоского угла — радиан (р).

Радииан — угол между двумя радиусами круга, вырезающими на окружности дугу, длина которой равна радиусу. Однако в геодезической практике для измерения углов используют другие, более мелкие единицы, прежде всего градусы, минуты, секунды.

Найдем, как радианы и градусы соотносятся между собой. Известно, что $1^\circ = 60' = 3600''$. В то же время 1° — это 360-я часть окружности, откуда $1^\circ = 2\pi R/360^\circ = \pi/180$ рад, или приблизительно равняется 0,017 453 29... . Отсюда получаем перевод радиан в градусы, минуты и секунды: $\rho^\circ = 180^\circ/\pi = 57,3^\circ$; $\rho' = 3437,7'$; $\rho'' = 206\,264,8''$.

В геодезическом инструментоведении все чаще стала использоваться другая мера углов — десятичная. В ней прямой угол приравняется 100 градам, или гонам: $90^\circ = 100^g$. Более мелкие деления углов получаются из деления более крупных следующим образом:

0,01 гона = 1 сантигону = 1° (градовой минуте);

0,001 гона = 1 миллигону = 10^{cc} (градовым секундам). В радианной системе связь выглядит так:

1 град (гон) = 0,0157 рад;

1 град (гон) = $0,9^\circ = 54' = 3240''$;

1 рад = 67,3 град (гона).

4.2. Процесс и виды измерений

При измерениях в различных геометрических построениях на земной поверхности или на картах размеры отдельных физических величин (отрезка линии, угла между направлениями линий и др.) выражают в виде некоторого числа принятых единиц, которое называют значением физической величины или результатом измерения. Следовательно, измерение на местности или на карте есть процесс нахождения значения заданной физической величины с помощью технических средств.

Измерения бывают прямые и косвенные. *Прямое измерение* выполняется непосредственным сравнением измеряемой величины с другой однородной ей величиной, принятой за единицу измерения (например, измерение расстояния на местности с помощью мерной ленты или рулетки; измерение отрезка линии на карте по миллиметровой шкале линейки; измерение угла между прочерченными на карте направлениями с помощью транспортира и т.д.).

Косвенные измерения основаны на использовании известной функциональной зависимости между определяемой величиной и другими величинами, непосредственно измеряемыми (например, измерение расстояния на местности с помощью электромагнитных или оптических дальномеров, определение превышений между точками местности и др.).

В процессе измерения участвуют следующие компоненты: объект измерений; техническое средство для производства измерений; метод измерений; исполнитель измерения или регистрирующее устройство, воспринимающее результат; внешняя среда, в которой происходит процесс измерения.

Совокупность этих компонентов образуют *условия измерений*, которые непосредственно формируют окончательный результат и определяют его точность. Результаты измерений, полученные в однородных условиях, называют *равноточными*. При изменении условий измерений (нарушении компонентов измерений) результаты измерений называют *неравноточными*.

При математической обработке топографо-геодезических измерений используют понятия о *необходимом* и *избыточном* числе измерений, при этом наличие избыточных измерений является обязательным. Например, для определения трех углов плоского треугольника необходимо измерить два его угла, измерение третьего угла является избыточным. При измерении одной величины необходимо одно измерение, остальные измерения — избыточные. *Избыточные* измерения дают возможность оценить качество геодезических построений: провести первичный контроль результатов измерений в целях выявления ошибок; проконтролировать качество измеренных элементов по невязкам в уравнениях, отвечающих геометрическим соотношениям сети; по полученным невязкам судить о правильности применяемой методики измерений.

4.3. Погрешности измерений

Под *точностью* измерения понимают степень приближения его результата к истинному значению измеряемой величины. Под *истинным* подразумевают такое значение измеряемой величины, которое соответствовало бы его теоретическому значению или идеальным образом отражало бы количественное свойство данного объекта.

Для оценки точности измерений вычисляют погрешности. Под *погрешностью* измерения понимают отклонение результата измерения от его истинного значения. При этом возможно двоякое исходное положение.

1) Истинное (точное) значение измеряемой величины A известно, что бывает редко и создается в значительной мере искусственно. Например, так бывает, когда вычисляют высоты точек замкнутого нивелирного хода или координаты точек теодолитного хода, опирающегося на «твердые» точки, координаты которых получены с погрешностью, существенно меньшей, чем у вычисляемого теодолитного хода.

Допустим, что в результате измерений получены значения: $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$. Если значение A известно, то можно вычислить истинные погрешности каждого измерения, как разность $a_1 - A = \Delta_1$, и относительные погрешности каждого измерения:

$$\Delta_{\text{отн}} = \frac{1}{A / \Delta_i}, \quad (4.1)$$

где i — порядковый номер измерения.

2) Истинное значение измеренной величины неизвестно. Если значение A неизвестно, то вместо него принимают *вероятнейшее значение* измеренной величины, как среднее арифметическое из результатов всех равноточных измерений

$$X = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}{n} = \frac{[a]}{n},$$

где $[a]/n$ — вероятнейшее значение измеренной величины.

Теперь найдем истинную погрешность арифметической середины

$$[a]/n - A = (\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \dots + \Delta_n)/n = [\Delta]/n,$$

$X - A = [\Delta]/n$ — истинная погрешность арифметической середины. Отклонения измеренных значений от арифметической середины называют *вероятнейшими погрешностями*. Вероятнейшая погрешность одного измерения $\delta_i = a_i - X$. Вероятнейшую относительную погрешность измерения получают из отношения

$$\delta_{\text{отн}} = \frac{1}{X/\delta_i}.$$

В большинстве случаев для оценки погрешности измерений предпочтение отдается не вероятнейшей погрешности, а *средней квадратической погрешности*, которая получается при извлечении квадратного корня из отношения суммы квадратов погрешностей всех измерений к количеству измерений.

Если значение A известно, средняя квадратическая погрешность отдельного измерения может быть вычислена по формуле

$$m = \sqrt{[\Delta^2]/n}.$$

Если же A неизвестно, а взято как вероятнейшее (среднее арифметическое) значение измеренной величины, формула примет вид

$$m = \sqrt{[\delta^2]/(n-1)}. \quad (4.2)$$

Среднюю квадратическую погрешность вероятнейшего значения вычисляют по формуле

$$M = \sqrt{\frac{[\delta^2]}{n(n-1)}}. \quad (4.3)$$

Следовательно, средняя квадратическая погрешность среднего арифметического значения в $\sqrt{n}$ меньше средней квадратической погрешности отдельного результата измерений.

Среднюю квадратическую погрешность равноточных повторных измерений величин оценивают по их разностям по формуле

$$m = \sqrt{\frac{[d_i^2]}{2n}}, \quad (4.4)$$

где n — число парных измерений и их разностей d_i .

Если результат косвенного измерения F является функцией прямых независимых измерений $x_1, x_2, \dots, x_n$, т. е.

$$F = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (4.5)$$

и известны средние квадратические погрешности аргументов $m_{x1}, m_{x2}, \dots, m_{xn}$, то среднюю квадратическую погрешность функции вычисляют по формуле

$$m_F^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 m_{x1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 m_{x2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 m_{xn}^2, \quad (4.6)$$

где $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ — частные производные по аргументам x_i .

Например, требуется определить среднюю квадратическую погрешность площади треугольника, полученную по измеренным на плане основанию треугольника $a = 5,1$ см и его высоте $h = 7,5$ см. Средние квадратические погрешности измерений на плане составляют 0,2 мм.

В данном примере функцией F будет формула, выражающая площадь треугольника $P = \frac{1}{2} ah$.

Согласно формуле (4.6), частные производные $\frac{\partial P}{\partial a} = \frac{1}{2} h$ и $\frac{\partial P}{\partial h} = \frac{1}{2} a$.

Следовательно,

$$m_P^2 = \left(\frac{hm_a}{2}\right)^2 + \left(\frac{am_h}{2}\right)^2 = \left(\frac{7,5 \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{2}\right)^2 + \left(\frac{5,1 \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{2}\right)^2 = 82,3 \cdot 10^{-4}$$

и $m_P \approx 0,08$ см².

Часто требуется знать погрешности нанесения точек на карту или план. Например, погрешность нанесения контурной точки A полярным методом на плане масштаба 1:5 000, если $S = 100$ м.

Примем погрешность построения угла транспортиром $m_\beta = 10'$ и погрешность отложения расстояния m_S по направлению 0,2 мм на плане, что соответствует на местности 1,0 м.

Для составления функции примем полярную ось за ось абсцисс в прямоугольной системе координат, где

$$x_A = S \cdot \cos \beta; y_B = S \cdot \sin \beta.$$

Тогда, согласно формуле (4.6),

$$m_x^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial S} m_S \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \beta} \cdot \frac{m'_\beta}{\rho} \right)^2 = m_S^2 \cos^2 \beta + S^2 \cdot \sin^2 \beta \frac{m_\beta^2}{\rho^2};$$

$$m_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial S} m_S \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \beta} \cdot \frac{m'_\beta}{\rho} \right)^2 = m_S^2 \sin^2 \beta + S^2 \cdot \cos^2 \beta \frac{m_\beta^2}{\rho^2}. \quad (4.7)$$

Так как средняя квадратическая погрешность положения точки A относительно начала координат (полюса) вычисляется по формуле $m_A = \sqrt{m_x^2 + m_y^2}$, то с учетом выражений (4.7)

$$m_A = \sqrt{m_S^2 + \left(S \frac{m'_\beta}{\rho'} \right)^2}. \quad (4.8)$$

Подставив в нее числовые значения, получим

$$m_A = \sqrt{(1,0)^2 + \left(\frac{100 \cdot 10'}{3438'} \right)^2} \approx 1,1 \text{ м.}$$

Для практических целей часто используют *предельную погрешность*, которую вычисляют по формуле $\Delta_{\text{пред}} = 2m$ или $\Delta_{\text{пред}} = 3m$.

Истинную, вероятнейшую, среднюю квадратическую и предельную погрешности называют *абсолютными*.

Отношение абсолютной погрешности к истинному или вероятнейшему значению измеренной величины, выраженное дробью с числителем, равным единице, называют *относительной погрешностью*. В зависимости от того, какая погрешность при этом используется, относительная погрешность называется: средней квадратической относительной, вероятнейшей относительной, истинной относительной или предельной относительной. Знаменатель относительной погрешности целесообразно округлять до целых десятков, если он выражается в сотнях, до сотен, если он выражается в тысячах, и т.д. Например: $m_S = 0,4 \text{ м}$; $S = 215 \text{ м}$, то

$$\frac{1}{S/m_S} = \frac{1}{540} \text{ или } m_S = 0,13 \text{ м, } S = 275 \text{ м, то } \frac{1}{S/m_S} = \frac{1}{2400}.$$

Общая погрешность измерения порождается источниками, заложенными в отдельных компонентах условий измерения. По происхождению их делят на приборные, личные, внешние и методические.

Приборные погрешности обусловлены несовершенством технического средства измерений, погрешностями градуировки их шкал и т. д.

Личные погрешности зависят от несовершенства органов чувств, индивидуальных особенностей и квалификации исполнителя.

Внешние погрешности порождаются непостоянством окружающей среды и связаны с изменением температуры, давления, влажности воздуха и т. д.

Методические погрешности зависят от способа реализации процесса измерения, его теоретической основы, строгости учета условий измерения.

Каждая из перечисленных погрешностей вызывается целым рядом различных причин, которые могут возникать с неизбежностью (систематически), а могут — случайно. В связи с этим погрешности измерений по своим свойствам подразделяют на *систематические* и *случайные*. Кроме того, результаты измерений могут содержать *грубые ошибки*.

Грубыми считают ошибки, существенно превышающие ожидаемые погрешности для данных условий измерений. Они являются результатом промахов (просчетов), возникающих вследствие невнимания или недостаточной квалификации исполнителя, незамеченных неисправностей технических средств измерений, нарушения технологии, режима работы и других причин. Такие ошибки выявляются повторными измерениями и исключаются из дальнейшей обработки.

Если результат измерений не содержит грубых ошибок, то в нем одновременно присутствуют систематические и случайные погрешности.

Систематической погрешностью называют составляющую ее часть, которая остается постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той же величины. Систематические погрешности могут сопутствовать каждому из компонентов условий измерений, в связи с чем их обычно подразделяют на приборные, методические, личные и вызванные влиянием внешней среды.

Приборные систематические погрешности нередко возникают вследствие неправильного выбора единиц измерения. Систематические погрешности измерительного прибора устраняются его поверками и юстировками.

Если изучены природа возникновения или закономерности воздействия систематических погрешностей, то величину их вли-

яния исключают из результатов измерений путем введения соответствующих поправок. Несмотря на это, полностью исключить влияние систематических погрешностей невозможно, поэтому общая погрешность всегда в той или иной мере содержит систематическую составляющую. Однако существуют критерии, позволяющие пренебречь ее влиянием по сравнению со случайной составляющей и тем самым упростить обработку результатов измерений и оценку их точности.

Когда результаты измерений практически не содержат систематических погрешностей, то их отклонение от истинного значения в основном определяется величиной случайной составляющей.

Случайной погрешностью измерения называют составляющую часть общей погрешности, изменяющуюся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Такая изменчивость случайной составляющей обусловлена суммарным воздействием на результат измерения множества неконтролируемых факторов (например, округление результата при отсчитывании показаний измерительного средства, случайные колебания температуры и др.).

Поэтому при проведении повторных измерений в одинаковых условиях каждая из многих возможных, но незначительных причин случайных изменений результатов может либо появиться, либо нет.

Характерно, что в серии измерений малые погрешности встречаются чаще, чем большие, и степень вероятности положительных и отрицательных знаков погрешностей одинакова.

Отсюда следует вывод: 1) при бесконечно большом числе измерений арифметическое среднее из суммы случайных погрешностей равно нулю; 2) при конечном количестве измерений арифметическое среднее из суммы случайных погрешностей стремится к нулю.

В связи с этим рекомендуется измерение одной и той же величины (угла, расстояния) производить неоднократно, как минимум, дважды.

Влияние случайных погрешностей избежать нельзя, но можно его уменьшить, определяя и учитывая их при использовании данных измерений, применяя более совершенные приборы и технологические схемы.

При математической обработке геодезических измерений часто используют термин «невязка». *Невязка* представляет собой истинную погрешность функции (формулы, выражающей геометрическое соотношение в геодезическом построении) при подстановке в нее вместо истинных значений аргументов их измеренных значений. Например, отклонение суммы измеренных углов в плоском треугольнике от 180° .

4.4. Приближенные числа

Теперь мы знаем, что все измеренные величины: длины, высоты, площади и т.д. получаются с некоторой погрешностью. Она иногда указывается, иногда нет, но мы всегда можем судить, какова погрешность, если известен результат измерений. Считается, что погрешность равна половине единицы последней значащей цифры числа. Например, указана длина измеренной стороны теодолитного хода, равная 125,16 м, но не сообщено, с какой погрешностью произведено измерение. В этом случае можно рассуждать следующим образом. В этом числе все цифры значащие, цифры 125,1 — верные, цифра 6 в конце числа сомнительная. Согласно установленному правилу, мы вправе считать, что все число с погрешностью запишется так: $125,16 \pm 0,005$ м. В качестве примеров рассмотрим другие числа:

0,000 389 (или $3,89 \cdot 10^{-4}$) — в этом числе три значащие цифры, нули впереди них определяют порядок числа;

206 264,8 — в этом числе семь значащих цифр, ноль в середине числа является значащей цифрой;

$5\,800,0 \pm 0,5$ — в этом числе четыре значащие цифры, один ноль в конце числа лишний, так как он, как значащая цифра, не обеспечен точностью измерений. Правильно следовало написать: $5\,800 \pm 0,5$;

$5\,633 \pm 50$ — в этом числе две значащие цифры, две последние цифры не обеспечены точностью измерений. Следует написать так: $5\,600 \pm 50$.

Правила округления приближенных чисел. 1. Если отбрасывается последняя цифра числа, то следующая увеличивается на единицу, если отбрасываемая цифра более 5, и не изменяется, если менее 5. Например, 125,44 округленно — 125,4; 125,47 округленно — 125,5.

2. Если отбрасываемая цифра 5, то следующая цифра увеличивается на единицу, если она нечетная, и не меняется, если она четная. Например, 125,45 округленно — 125,4; 125,35 округленно — 125,4.

Погрешность измерений, действия с приближенными числами.

1. Точность результатов вычислений, в которые введены числа с различными погрешностями, определяется величиной самой большой погрешности. Например, если длины всех сторон полигона измерены с погрешностью не более 4 см на 100 м хода и только одна сторона измерена с погрешностью 20 см, то и погрешность в определении периметра хода будет определяться этой погрешностью.

2. При косвенных измерениях погрешность результата не может быть меньше погрешности величин, введенных в вычисления. Невозможно путем математических операций повысить точность ре-

зультата вычислений относительно точности исходных данных. Например, при вычислении приращений координат теодолитного хода нельзя получить их значения до миллиметра, если длины сторон хода измерялись на местности с погрешностью в несколько сантиметров.

3. Сложение и вычисление приближенных чисел. Даны два приближенных числа: $a \pm \Delta a$ и $b \pm \Delta b$. Сложим эти два числа $C \pm \Delta C = a + b \pm \Delta a \pm \Delta b$. Из этого равенства очевидно, что погрешность результата сложения C будет равна или больше разности погрешностей слагаемых, а также равна или меньше суммы погрешности слагаемых, т.е.

$$(\Delta a - \Delta b) \leq \Delta C \leq (\Delta a + \Delta b).$$

Отсюда, оценивая погрешность результата, мы вправе взять ее максимальное значение

$$\Delta C = \Delta a + \Delta b. \quad (4.9)$$

4. Умножение и деление приближенных чисел. Даны два приближенных числа: $a \pm \Delta a$ и $b \pm \Delta b$. Перемножим эти два числа $C \pm \Delta C = (a \pm \Delta a)(b \pm \Delta b)$. Преобразуем равенство $C(1 \pm \Delta a/a)b(1 \pm \Delta b/b)$ или перепишем иначе $C(1 \pm \delta C) = ab(1 \pm \delta a)(1 \pm \delta b)$.

Раскрыв скобки, получим $\pm \delta C = \pm (\delta a + \delta b) \pm \delta a \cdot \delta b$.

Произведением погрешностей пренебрежем по малости и получим окончательно:

$$\pm \delta C = \pm (\delta a + \delta b). \quad (4.10)$$

Из формул (4.9) и (4.10) следует, что суммарная погрешность результатов любых арифметических действий с приближенными числами определяется самой большей погрешностью среди чисел, участвующих в вычислениях.

Общие правила вычислений. Для математической обработки результатов геодезических измерений используют компьютеры и в полевых условиях широкое применение находят микрокалькуляторы.

Чтобы не оперировать с лишними цифрами, которые не соответствуют точности исходных аргументов, при записях и вводе данных в счетные машины значения чисел надо округлять согласно описанным выше правилам.

Для записей результатов вычислений необходимо пользоваться специальными схемами, бланками и ведомостями, определяющими последовательность вычислений и обеспечивающими промежуточный и общий контроль.

В процессе вычислений цифры следует писать четко и аккуратно вычислительным шрифтом. В вычислительных схемах цифры одинаковых разрядов в столбцах чисел следует располагать одну под другой. При этом дробная часть числа отделяется запятой.

Записи вычислений производят чернилами, ошибочные результаты аккуратно зачеркивают одной линией и сверху пишут исправленные значения.

Все вычисления обязательно выполняют с контролем. Для контроля используют другой ход решения задачи или независимое повторное вычисление (в «две руки»). Перед вычислением тщательно проверяют все исходные данные.

При вычислениях запрещается пользоваться черновиками, так как переписывание цифрового материала часто сопровождается ошибками в повторных записях и приводит к лишним трудозатратам.

Глава 5

ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИН ЛИНИЙ

5.1. Мерные устройства

В качестве мерных устройств применяют проволоки, ленты, рулетки.

Для измерения длин линий в геодезии применяют три типа приборов:

- мерные устройства: проволоки, ленты, рулетки;
- оптические (или геометрические) дальномеры: нитяной дальномер, оптические насадки;
- электронные (или физические) дальномеры: электронно-оптические (светодальномеры), радиоэлектронные (радиодальномеры).

Проволоки изготавливают из инвара — сплава никеля, железа и кобальта, обладающего малым температурным расширением. Длина проволок 24 м. На концах — шкалы с наименьшими делениями 1 мм для отсчетов при измерениях. На остальной части проволоки маркировки длины нет. Поэтому проволоками измеряют расстояния, равные длине между штрихами (24 м). Расстояния, не кратные 24 м, измеряют инварными рулетками. В створе линии, закрепленной на местности геодезическими знаками и подлежащей измерению, устанавливают через 24 м специальные штативы с целиками. Затем, начиная с первого 24-метрового пролета, проволоки натягивают на блоки над штативами так, чтобы шкалы проволок слегка касались целиков. Выполняя отсчеты с помощью шкал по перекрестиям целиков, измеряют длину первого, а затем последующего пролетов. Проволоки применяют для измерений, например, длин базисов при триангуляционных определениях, требующих высокой точности. Они хранятся намотанными на барабан.

Мерные ленты изготавливают из стали длиной 20 м, реже — 24, 30 и 50 м и шириной 1,5 — 2,0 см. Они бывают двух разновидностей: штриховые и шкаловые.

Штриховые ленты имеют на концах крючки, к которым прикрепляются ручки для натягивания ленты (рис. 5.1, а). Каждый метр на ленте обозначен пластинкой с указанием числа: на противоположных сторонах счет идет от различных концов ленты. Каждые 50 см обозначены заклепкой, а через 10 см пробиты отверстия. В комплект входят 6 или 11 стальных шпилек, которыми обозначаются каждые отложенные 20 м. Длину отсчитывают с точ-

ностью до сотых долей метра делением дециметровых частей между отверстиями на глаз.

Шкаловые ленты, например землемерная шкаловая лента ЗЛШ, имеют на концах шкалы с миллиметровыми делениями (рис. 5.1, б). Длины отрезков на концах ленты с миллиметровыми делениями равны 10 см. Номинальной длиной ленты является расстояние между нулевыми штрихами шкал. Они предназначены для более точных измерений.

Рулетки — стальные или тесемочные ленты, стальные — шириной 10—12 мм с делениями через 1 мм по всей длине или только на первом дециметре. Лента наматывается на барабан и помещается либо в обычный круглый закрытый корпус (З), либо в корпус в виде крестовины (К). Длина рулетки может быть от 1 м и более и указывается в шифре: РЗ-10, РЗ-20, РЗ-30, РЗ-50, РК-50, РК-75 и др. Для измерения коротких отрезков металлические рулетки делают изогнутыми по ширине. Тесемочные рулетки состоят из плотного полотна с металлическими, обычно медными, прожилками. Их используют, когда не требуется высокая точность измерений. Тесемочные рулетки свертывают в пластмассовый корпус.

Перед измерениями длина ленты должна быть определена на специальном устройстве — *компараторе* путем сравнения с эталоном. Простейший полевой компаратор состоит из деревянных брусьев с ровной горизонтальной поверхностью, закрепленных на деревянных столбах.

На концах компаратора закрепляются металлические пластинки, расстояние между которыми соответствует 20 м. На компараторе сначала растягивается образцовая лента и на его концевых пластинках отмечается длина ленты $L_{обр}$, затем растягивается компарируемая (рабочая) лента или рулетка и по ней определяется длина $L_{изм}$ ранее отложенного интервала. Длина рабочей ленты составит

$$L_{раб} = 20 \text{ м} + \Delta L, \text{ где } \Delta L = L_{обр} - L_{изм}.$$

Пример: $L_{обр} = 19,989 \text{ м} = 20 - 0,011 \text{ м}$, $L_{изм} = 19,971 \text{ м}$, $\Delta L = 19,989 - 19,971 = 0,018 \text{ м}$ на одну ленту. Длина рабочей ленты $L_{раб} = 20 + 0,018 = 20,018 \text{ м}$.

В производственных условиях длины мерных приборов чаще всего определяют на полевых компараторах. Эти компараторы создаются на ровных участках местности преимущественно с твердым покрытием длиной, близкой к 120 м. Такая длина компарато-

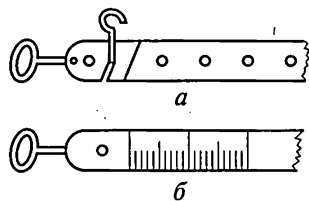


Рис. 5.1. Стальные мерные ленты:
а — штриховая; б — шкаловая

ра выбирается для того, чтобы длина мерного прибора уложилась несколько раз. Концы компаратора закрепляются геодезическими знаками иногда специальной конструкции. Длина компаратора заранее находится из более точных измерений. В процессе компарирования компаратор измеряется мерной лентой в прямом и обратном направлениях. Поправка за компарирование вычисляется по формуле

$$\Delta L = (L_k - L_n)/n, \quad (5.1)$$

где L_k — длина компаратора; L_n — измеренная длина компаратора; n — число уложений мерного прибора.

Пример: длина полевого компаратора, составляющая 100,134 м, из измерений 20-метровой лентой получилась равной 100,180 м. Следовательно, длина эталонируемой ленты $L_{\text{раб}} = 20 - 0,009$ м.

В процессе измерений в каждую отложенную полную ленту вводят поправку с тем же знаком, который входит в уравнение рабочей ленты. Точность измерений линий зависит от условий работы в поле и обычно составляет 1 : 1 000 — 1 : 2 000 длины линии. Когда требуется более высокая точность измерений, учитывается температурная поправка за счет линейного расширения материала, из которого изготовлен мерный прибор.

Процесс измерения, если расстояние превышает 300 м, начинается с вешения линии «на глаз» или с помощью прибора, например теодолита. Вдоль линии в створ через некоторое расстояние забивают колышки. Трудности возникают в тех случаях, когда помехой становится рельеф: возвышенности, овраги или какие-либо сооружения. В этих случаях используют особые приемы вешения линий.

1. Вешение линии с хорошей видимостью между начальной и конечной точками. Есть два способа. Первый — вешение вперед, когда последовательно через 50—100 м устанавливаются колышки под номерами 1, 2, 3 и т.д. Второй способ — вешение назад («на себя»), оно ведется в обратном порядке, колышки уста-

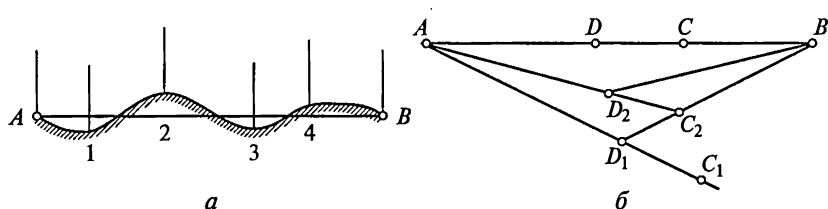


Рис. 5.2. Вешение линии между точками с хорошей видимостью (а) и между недоступными точками (б)

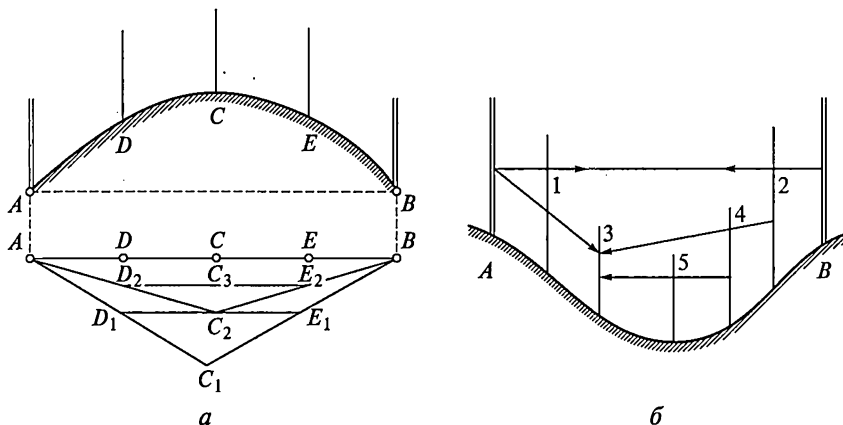


Рис. 5.3. Вешение линии через холм (а) и балку (б)

навливаются начиная с дальнего и идут к начальной точке хода (рис. 5.2, а).

2. Когда возникает необходимость провешить линию между точками, недоступными для стояния, например трубами, башнями и другими сооружениями, тогда операция вешения проводится в несколько приемов. Двое рабочих (D и C) последовательно меняют свое положение 1, 2, 3 и т.д., как это показано на рис. 5.2, б, пока точки D и C не окажутся в створе линии AB.

3. Если нужно провешить линию между точками, расположенными с разных сторон холма и при отсутствии взаимной видимости, то работа продлевается в следующем порядке. Вешение осуществляется тремя рабочими в последовательности, указанной на рис. 5.3, а. Первоначально рабочие занимают позиции в D_1 , C_1 , E_1 . Затем они поочередно меняют положение, пока не добьются того, что все точки D, C и E не займут положение в створе точек A и B.

4. Вешение линий через ложину, балку или овраг между точками A и B производится методом последовательных приближений, как и в двух предыдущих случаях. Порядок перемещения рабочего и установок вешек показан на рис. 5.3, б.

Порядок измерения длин линий в поле. Измеряют линию два человека. Задний мерщик устанавливает начало ленты над исходной точкой и закрепляет ее шпилькой. Передний мерщик вытягивает ленту в сторону второй точки по указаниям первого мерщика, контролируя правильность направления по кольшкам вешения. Заняв нужное положение, передний мерщик натягивает ленту и закрепляет ее конец шпилькой, после чего мерщики двигаются дальше. Задний мерщик, достигнув точки 2, закрепляет ленту за шпилькой, оставленной передним мерщиком, а передний, установив ленту в створе, снова натягивает ее и закрепляет в кон-

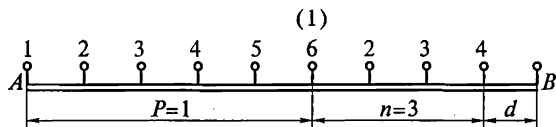


Рис. 5.4. Порядок измерения длины линии мерной лентой

це ленты точку 3. Так повторяется до отрезка 5—6. Если у переднего мерщика в начале работы было в руках 5 шпилек и одна оставалась у заднего в точке 1, то в точке 6 следует произвести передачу шпилек вперед. Одновременно с этим можно отметить, что измерено 100 м.

На нашем примере (рис. 5.4) последний раз лента полностью уложилась в отрезке 3—4. Оставшаяся часть линии — домер — определяют по ленте, протянутой вперед; длину (в см) измеряют линейкой. Таким образом, общая длина линии AB :

$$S = 100P + 20n + d, \quad (5.2)$$

где P — число передач шпилек, в нашем случае $P = 1 = 100$ м; n — число шпилек в руках заднего рабочего; d — домер.

В эту формулу следует ввести поправки за компарирование: общая поправка за компарирование ленты равняется $q\Delta l$, где q — общее число использованных шпилек $q = 5P + n$.

Поправка домера $(\Delta L/L)d$.

В реальной полевой обстановке измеряемые линии могут быть в разной мере наклонены по отношению к горизонту. Для дальнейшей обработки, например, теодолитного хода необходимо наклонные линии привести к горизонту. Для этого в поле кроме длины линии S измеряется также угол наклона местности v .

Задача состоит в том, чтобы, зная эти величины, найти горизонтальное проложение линии D . Из рис. 5.5 видим, что

$$D = S \cos v, \quad (5.3)$$

$$\Delta S = S - D = S - S \cos v = S(1 - \cos v) \text{ или}$$

$$\Delta S = 2S \sin^2 v / 2. \quad (5.4)$$

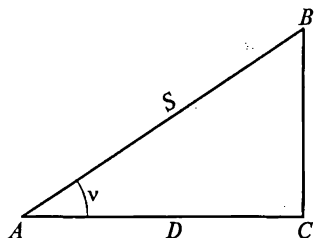


Рис. 5.5. Приведение наклонной линии к горизонту

Определение неприступных расстояний. Если по условиям местности (овраг, река и др.) не представляется возможным измерить линию непосредственно мерным прибором, то используют косвенный метод. На рис. 5.13 приведена схема геометрического построения для определения неприступного расстояния $D = AB$ через реку. На местности измеряют базисы b_1 и b_2 и углы $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$. Искомое расстояние для контроля находится из решения двух треугольников по теореме синусов

$$D = b_1 \sin \alpha_1 \operatorname{cosec} \varphi_1 = b_2 \sin \beta_2 \operatorname{cosec} \varphi_2, \quad (5.12)$$

где $\varphi_1 = 180^\circ - (\alpha_1 + \beta_1)$, $\varphi_2 = 180^\circ - (\alpha_2 + \beta_2)$.

Расхождение между двумя значениями стороны AB не должно превышать $1/2\,000 - 1/1\,000$ ее длины.

Для уменьшения объема линейных измерений на рис. 5.13, б точка D находится в створе линии AC . Отрезок DC составляет несколько метров, $b_1 = AD$, $b_2 = AD + DC$. Формулы для вычисления неприступного расстояния будут аналогичные вышеприведенным, но $\varphi_2 = 180^\circ - (\beta_1 + \beta_2)$.

5.2. Оптические (геометрические) дальномеры

В основе теории геометрических дальномеров лежит решение вытянутого равнобедренного или прямоугольного треугольника. Дальномеры применяют в трубах геодезических приборов или в виде оптических насадок на трубы, поэтому их называют *оптическими*.

Показанные на рис. 5.6 величины S , β и l связаны между собой формулой

$$S = (l \operatorname{ctg} \beta / 2) / 2. \quad (5.5)$$

Из трех элементов формулы один элемент S (расстояние) всегда определяется. В зависимости от того, какой из двух оставшихся элементов сохраняется постоянным, существуют геометрические дальномеры двух разновидностей: с постоянным углом (меняется и измеряется l) и с постоянной базой (меняется и измеряется β).

Относительная погрешность измерения длин линий дальномерами зависит от их типа и изменяется от 1:400 до 1:5 000 длины измеряемой линии.

Нитяной дальномер (с постоянным углом β) — оптическое устройство, вмонтированное в зрительную трубу геодезических приборов. Оно представ-

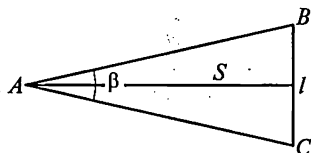


Рис. 5.6. Принципиальная схема геометрического дальномера

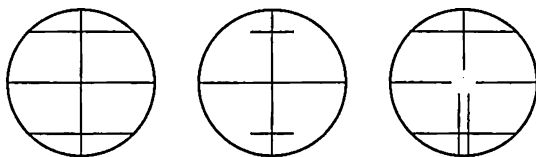


Рис. 5.7. Визирные нити в различных приборах

ляет собой закрепленное в металлической обойме отшлифованное оптическое стекло, на котором выгравированы линии (нити): вертикальная и ряд горизонтальных. В разных приборах набор нитей несколько различный (рис. 5.7). Для измерения расстояний используют две горизонтальные нити (обычно, крайние), расположенные симметрично относительно средней нити и называемые дальномерными.

Рассмотрим, каким образом работает нитяной дальномер, помещенный в зрительную трубу геодезического прибора (рис. 5.8): AB — дальномерная рейка с делениями и отрезок L на ней, который наблюдается в зрительную трубу, как отрезок l , заключенный между крайними нитями дальномера; KK_1 — визирная ось трубы; f — фокусное расстояние объектива; δ — отрезок трубы от оси вращения до объектива. При сделанных обозначениях расстояние D вычисляется так: $D = D_1 + f + \delta$, где $f + \delta = C$ — постоянная дальномера. Обратим внимание на подобие двух треугольников: abF и ABF , откуда получается $D_1/f = L/l$ или $D_1 = (fL)/l$, где $f/l = K$ — коэффициент дальномера. Теперь можем записать формулу в окончательном виде

$$D = KL + C. \quad (5.6)$$

Однако для приборов с короткими трубами и внутренней фокусировкой величина C очень мала и ею обычно пренебрегают.

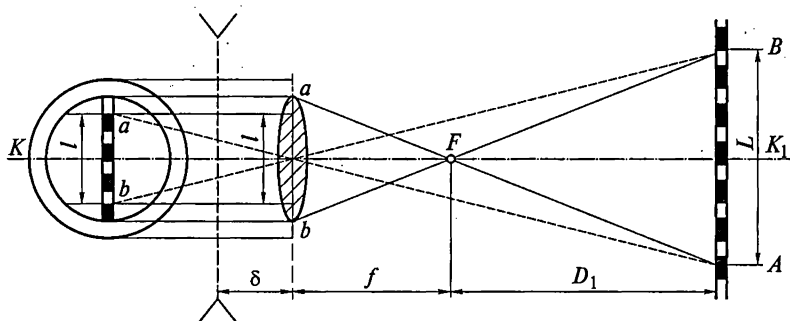


Рис. 5.8. Принципиальная схема работы нитяного дальномера

Для удобства измерений чаще всего рассчитывают нитяной дальномер так, чтобы $K = 100$, т.е. $l = 0,01f$. Тогда получается, что наблюдаемое в трубу количество сантиметров на рейке между нитями дальномера соответствует расстоянию до нее в метрах.

Если же появляется необходимость в определении коэффициента дальномера опытным путем в натуре, то измеряют лентой расстояния в 80 и 100 м, устанавливают на одном конце прибор, а на другом — рейку с делениями, отсчитывают количество сантиметров делений, заключенных между нитями дальномера и рассчитывают K из отношения D/L . Для избежания грубых промахов проделявают это дважды.

При измерении нитяным дальномером наклонной линии S ее необходимо редуцировать на горизонтальную плоскость и определить длину D (рис. 5.9). Видно, что $S = KL_1 + C$, но $L_1 = L \cos v$. Отсюда $S = KL \cos v + C$, или $D = (KL \cos v + C) \cos v$, или, приближенно,

$$D = (KL + C) \cos^2 v. \quad (5.7)$$

Относительная погрешность измерения нитяным дальномером расстояний составляет примерно 1 : 400 измеряемой длины.

Оптический дальномер с постоянным базисом представляет собой оптическое устройство, которое закрепляется на зрительной трубе прибора со стороны объектива. В комплект входит также постоянный базис обычно длиной 1 м, который устанавливается горизонтально на штативе и центрируется над точкой. Дальномерные насадки имеют отсчетные приспособления (микроскопы), позволяющие с высокой точностью измерять углы $\beta/2$ и расстояния от 50 до 700 м с погрешностью 8 см на 100 м длины линии. В настоящее время дальномеры с постоянной базой практически не используют.

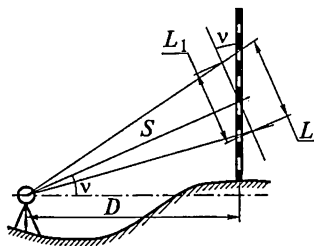


Рис. 5.9. Редуцирование наклонной линии на горизонтальную плоскость

5.3. Электронные (физические) дальномеры

К дальномерам этого типа относят радио- и светодальномеры. Они бывают импульсные и непрерывного излучения (фазовые); с угольным (трипель-призмой) или пассивным отражателем (светодальномеры) и активным отражателем (радиодальномеры). Трипель-призмы обладают тем конструктивным свойством, что весь падающий на них свет или излучение они отражают строго в обратном направлении независимо от их разворота (рис. 5.10).

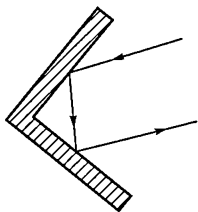


Рис. 5.10. Принцип работы
углового отражателя

В основе электронных средств измерений расстояния D лежит известная из курса физики формула

$$D = (1/2)vt, \quad (5.8)$$

где t — время распространения электромагнитных колебаний вдоль измеряемой линии и обратно; $v = c/n$ — скорость распространения в воздухе электромагнитных волн, равная $\approx 300\,000$ км/с; c — то же, в вакууме; n — коэффициент

преломления в атмосфере, равный $1,000\,28 - 1,000\,35$.

Если измерить время прохождения электромагнитных волн от электронного дальномера, установленного на одном конце измеряемой линии, до отражателя — на другом ее конце и обратно, то при известной скорости распространения электромагнитных волн можно вычислить искомую длину линии.

Время распространения электромагнитных колебаний может быть определено как прямым, так и косвенным методами.

Импульсные дальномеры служат для прямого определения промежутка времени t по запаздыванию принимаемого после отражения электромагнитного импульса по отношению к моменту его излучения. С появлением оптических квантовых генераторов при известной длительности импульсов время t подсчитывают с помощью электронного счетчика методом дискретного счета.

В навигационных радиолокационных системах для определения времени прохождения импульса используют электронно-лучевые трубки (ЭЛТ), на экране которых отражается момент излучения импульса и приема отраженного сигнала на кольцевой шкале с делениями времени.

Косвенный метод основан на измерении какого-либо параметра электромагнитных колебаний, являющегося определенной функцией временного интервала, в частности разности фаз исходного и принятого колебаний. Такие дальномеры называют фазовыми.

Дальномеры фазовые используют при фазовом методе измерения расстояний, который наиболее точный, поэтому рассмотрим несколько подробнее его основы.

Из физики известно, что электромагнитные волны представляют собой периодически изменяющиеся колебания во времени t по синусоидальному закону

$$a = A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (5.9)$$

где a — проекция вектора A на ось y (мгновенное значение амплитуды A в момент времени t), дважды достигающая максимального значения (при $\varphi = \pi/2$ и $\varphi = 3/2\pi$) и дважды минимального значения (при $\varphi = 0$ и $\varphi = \pi$); A — вектор (амплитуда колебания), вра-

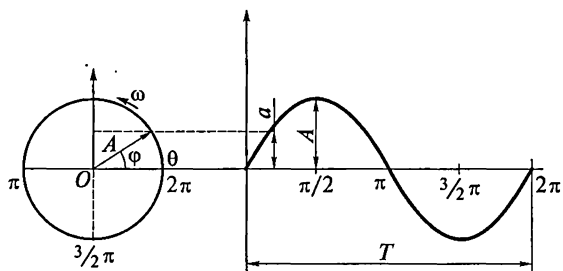


Рис. 5.11. Параметры электромагнитных колебаний

шающийся вокруг точки O (рис. 5.11); $\varphi = \omega t$ — угол, определяющий положение вектора A в рассматриваемый момент времени t и называемый фазой колебания; ω — скорость вращения вектора A , называемая круговой, или циклической, частотой, рад/с; φ_0 — начальная фаза колебания (при $t = 0$, $\varphi = \varphi_0$).

Фазы, отличающиеся друг от друга на четное число π , т.е. на $2N\pi$ (где $N = 0, 1, 2, 3, \dots$), считаются одинаковыми. Фазы, отличающиеся друг от друга на нечетное число π , называются противоположными.

Среди характеристик электромагнитных колебаний часто используют их частоту и период T . Частота колебаний f , Гц, показывает, сколько полных оборотов совершает вектор A за 1 с ($1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$). Период колебаний T — это время одного полного оборота вектора A вокруг точки O , или время, за которое фаза колебаний изменится на 2π . Они связаны между собой следующими зависимостями:

$$\lambda = vT; T = 1/f. \quad (5.10)$$

Расстояние может быть вычислено по формуле

$$D = N(\lambda/2) + \varphi \cdot \lambda/2 \text{ или } D = c(N + \varphi)/2nf, \quad (5.11)$$

где N — целое число уложений длин волн λ в длине D ; φ — разность фаз посланного и отраженного сигналов, соответствующая части $\Delta\lambda$ длины волны λ (рис. 5.12).

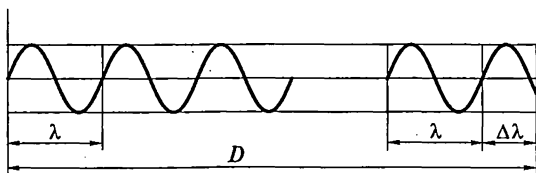


Рис. 5.12. Измерение расстояния фазовым методом

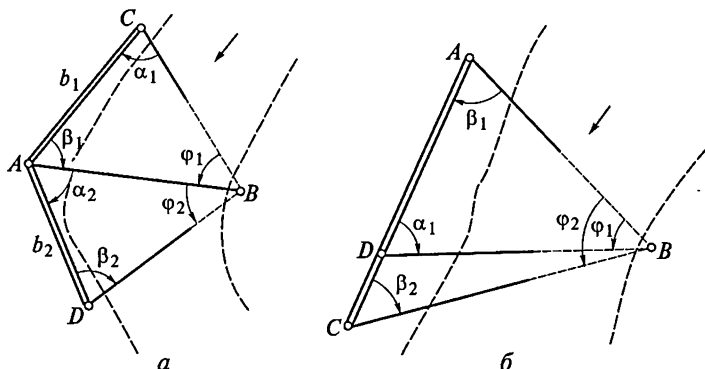


Рис. 5.13. Определение неприступных расстояний

В этих формулах два неизвестных D и N , поэтому возникает неоднозначность измеряемого расстояния, свойственная всем фазовым дальномерам.

Чтобы решить задачу, нужно иметь, по крайней мере, систему из двух уравнений. Именно для этого измерения делают при разных частотах или длинах волн.

С внедрением полупроводниковых лазерных источников излучения и цифровых методов обработки данных при измерении разности фаз появились импульсно-фазовые светодальмеры, в основе которых лежит фазовый метод определения временного интервала при импульсном методе излучения.

Радиодальмеры фазовые с активным отражателем представляют собой комплект приборов, состоящий из двух взаимозаменяемых станций: ведущей и ведомой. Ведущая станция излучает колебания с частотой f (сантиметровые длины волн). Ведомая станция принимает сигнал, трансформирует его в излучение с другой частотой в отношении $2/3$ или $3/2$ к исходящей частоте и посылает обратно сигнал с частотой f_2 .

Индикатор на ведущей станции измеряет разность фаз излучаемых и принимаемых волн после обратной трансформации их частоты. Измеряемое расстояние вычисляют по формуле (5.11).

Для разрешения неоднозначности в радиодальмерах используют набор фиксированных масштабных частот.

Работа светодальмеров существенно зависит от состояния атмосферы. Радиодальмеры почти лишены этого недостатка.

Светодальмеры, использующие электромагнитные колебания оптического (светового) диапазона, широко применяют для геодезических и инженерно-геодезических измерений. Из-за особенностей излучения, приема и распространения радиоволн радиодальмеры используют преимущественно при измерении сравнительно больших расстояний и в навигации.

Существуют светодальномеры с пассивным отражением, которые используют отражательные свойства самих предметов, например отечественный светодальномер КТД2. Светодальномером фирмы «Лейка» (Швейцария) измеряют расстояния до 50 м с погрешностью 2 мм. Не требуют отражателей лазерные рулетки, выпускаемые некоторыми зарубежными фирмами. Их применяют в основном для измерений на строительных площадках и в помещениях.

Глава 6

ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ

6.1. Теодолиты. Их типы и устройство

Теодолит — угломерный прибор, предназначенный для измерения горизонтальных и вертикальных углов. Теодолиты различают по типу (конструкции) и точности измерений. В последнем случае они делятся на высокоточные, точные и технические. Технические теодолиты обеспечивают точность измерения углов с погрешностями более 10" и находят самое широкое применение в топографических съемках и съемках для обеспечения полевых географических, геологических, землемерных работ.

По конструкции теодолиты подразделяют на механические (с металлическим лимбом), оптические, электронные и лазерные (электронный теодолит со встроенным лазером). Они различаются между собой главным образом системой отсчета по лимбу. В настоящее время все еще широко используются оптические теодолиты со стеклянными лимбами и шкаловыми микроскопами или оптическими микрометрами для отсчетов и начинают внедряться электронные теодолиты.

Некоторыми конструктивными особенностями обладают теодолиты, предназначенные для маркшейдерских и астрономических работ. Отдельно следует упомянуть гироскопические теодолиты, в конструкцию которых включен гироскоп, выполняющий роль гирокомпаса — механического указателя направления истинного (географического) меридиана, что необходимо для определения азимута ориентируемого направления, особенно при маркшейдерских работах (прокладке тоннелей и др.).

Марки наиболее распространенных технических теодолитов Т15, Т30, 2Т30, 2Т30П, 3Т30, 4Т15П, 4Т30П. В этих обозначениях: цифра перед буквой — номер модели, Т — теодолит, 15, 30 или другие числа — средняя квадратическая погрешность измерения угла в секундах. Более поздние серии теодолитов имеют некоторые конструктивные особенности. Например, буква «П» означает, что труба прибора дает прямое изображение. Теодолитами серии 4Т может производиться нивелирование с помощью уровня на зрительной трубе. Вращением специального винта может выполняться перестановка лимба. Съемная подставка со встроенным оптическим центриром позволяет работать по специальному методу трехштативной системы.

Рассмотрим принципиальную схему теодолита 2Т30П (рис. 6.1).

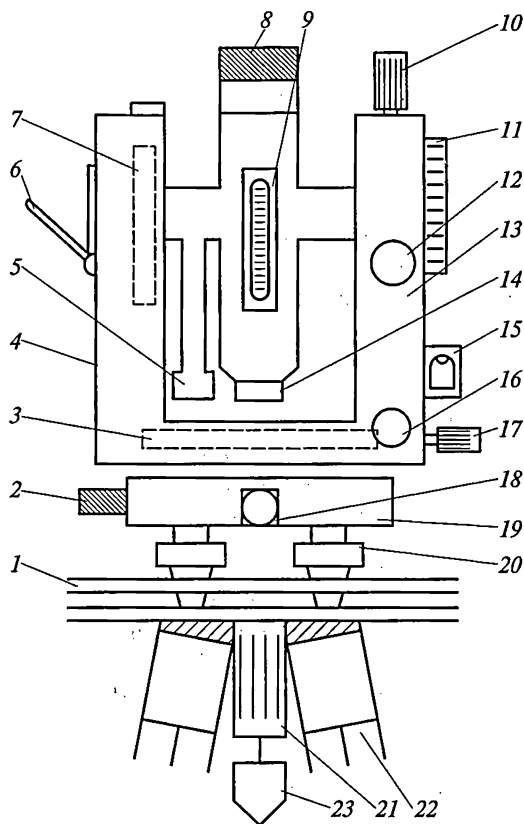


Рис. 6.1. Схема теодолита 2Т30П:

1 — основание; 2 — наводящий винт горизонтального круга; 3 — горизонтальный лимб; 4 — боковая крышка; 5 — окуляр микрометра; 6 — зеркало для подсветки лимбов и отсчетных шкал; 7 — вертикальный лимб; 8 — зрительная труба, объектив трубы; 9 — уровень при трубе; 10 — закрепительный винт трубы; 11 — кремальера для наведения изображения в трубе на резкость; 12 — наводящий винт трубы; 13 — колонка; 14 — диоптрийное кольцо окуляра; 15 — уровень при алидаде; 16 — наводящий винт алидады; 17 — закрепительный винт алидады; 18 — закрепительный винт горизонтального круга; 19 — подставка; 20 — подъемные винты; 21 — становой винт; 22 — тренога (штатив); 23 — отвес

Зрительная труба предназначена для визуального наблюдения удаленных предметов. До недавнего времени почти все геодезические трубы давали «обратное», т. е. перевернутое, изображение. Сейчас все чаще изготавливают трубы с прямым изображением.

Увеличение изображения в трубе может быть от $15\times$ до $50\times$ в зависимости от требуемой точности визирования и точности из-

мерения углов. В теодолите 2Т30П увеличение трубы $20\times$. Увеличение трубы V может быть подсчитано по формуле

$$V = \frac{\alpha}{\beta} \approx \frac{f_{\text{об}}}{f_{\text{ок}}},$$

где α — угол, под которым объект виден в трубу; β — угол, под которым объект виден невооруженным глазом; f — фокусное расстояние объектива и окуляра.

Поле зрения трубы может быть от $30'$ до 2° . У теодолита 2Т30П оно равно 2° .

В окуляре трубы установлена сетка нитей (рис. 6.2). Она выгравирована на стекле, вставленном в металлическую обойму, которая закрепляется исправительными винтами (или без них) в поле зрения трубы со стороны окуляра. Наводка на резкость сетки нитей осуществляется с помощью кольца окуляра. Прямая, проходящая через центральное перекрестие сетки нитей и центр объектива, называется *оптической осью* трубы (теодолита).

Лимбы — плоское кольцо с нанесенными на боковой поверхности штрихами, делящими окружность на равные части (градусы, минуты). В теодолитах различных конструкций и точностей дробность делений может быть разной. В теодолите 2Т30П горизонтальный и вертикальный лимбы разделены через 1° . Горизонтальный лимб оцифрован по часовой стрелке от 0 до 360° , а вертикальный лимб — от 0 до $+75^\circ$ и -75° .

Уровни служат для установки всего прибора или его частей, в частности лимбов, в определенное положение по отношению к отвесной линии. Так, горизонтальный лимб в рабочем состоянии должен занять горизонтальное положение. Уровни теодолита обычно *цилиндрические*. Но в других приборах встречаются также менее точные *круглые* (шаровые) уровни.

Цилиндрический уровень — запаянная с одной стороны ампула, в которой помещен сернистый эфир в количестве, при котором образуется воздушный пузырек (рис. 6.3). Внутренняя

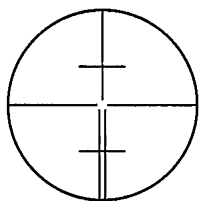
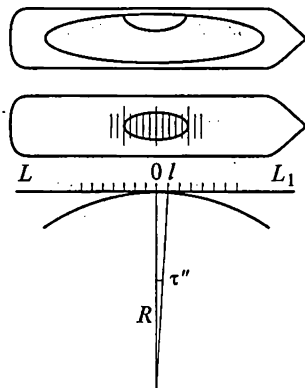


Рис. 6.2. Сетка нитей зрительной трубы теодолита 2Т30П

полость стеклянного цилиндра выточена по дуге окружности радиусом R , а на поверхности цилиндра нанесены штрихи. Расстояние между соседними штрихами $l = 2$ мм. Точность уровня зависит от радиуса дуги выточенной поверхности и частоты штрихов и вычисляется по формуле $\tau'' = l/R$, где τ'' — цена деления уровня. Обычно τ'' теодолитных уровней составляет от 4 до $60''$. В технических теодолитах $\tau'' = 45 - 60''$. Стеклянная ампула цилиндрического уровня помещается в металлический патрон и закрепляется на приборе так, чтобы один

Рис. 6.3. Цилиндрический уровень:

LL_1 — ось уровня; R — радиус дуги выточенной поверхности; l — дуга между двумя штрихами; 0 — нуль-пункт уровня



конец уровня с помощью исправительных винтов мог быть поднят или опущен в процессе проверок прибора.

Отсчетные устройства необходимы для взятия отсчетов по шкалам лимбов горизонтального и вертикального кругов, когда оптическая ось трубы наведена на одну из точек, между направлениями на которые измеряется угол. Отсчет — это величина дуги между нулевым штрихом шкалы лимба и отсчетным индексом. Отсчетное устройство — микроскоп — состоит из приспособлений для рассматривания штрихов лимба и оценки доли деления лимба.

В точных и технических оптических теодолитах применяют *шкаловые* и *штриховые* микроскопы. В штриховых отсчетных устройствах на деления лимба проецируется штрих, который является нуль-пунктом отсчета. В шкаловых, более точных устройствах шкала микроскопа накладывается на один из штрихов делений лимба, по которому выполняется отсчет. В поле зрения штрихового или шкалового микроскопа введены одновременно два изображения: вертикального и горизонтального лимбов. На рис. 6.4 показаны показания горизонтального лимба $132^\circ 07' 30''$, показания вертикального лимба — $1^\circ 23'$.

У *электронных теодолитов* рабочая мера (носитель информации вместо лимба) может быть в виде электротехнических элементов (резисторов и др.). Считывание информации (измеренных углов) может выполняться визуально с цифрового табло или в автоматическом режиме — с регистрацией на носитель информации (внутренняя память прибора, карточка памяти и пр.).

Существуют также теодолиты со специальными устройствами, предназначенными для повышения качества и удобства измерений. Например, лазерные теодолиты позволяют автоматически наводить прибор на точку и регистрировать отсчеты.

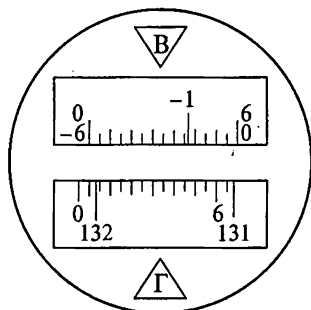


Рис. 6.4. Шкаловой микроскоп теодолита 2Т30П

6.2. Геометрические оси и проверки теодолита

Основные геометрические оси теодолита (рис. 6.5): VV_1 — вертикальная ось, HH_1 — горизонтальная ось, LL_1 — ось уровня, KK_1 — визирная ось зрительной трубы.

По устройству и своему назначению теодолит должен удовлетворять следующим требованиям:

- вертикальная ось должна быть отвесной;
- плоскость горизонтального лимба должна быть горизонтальной;
- визирная (коллимационная) плоскость теодолита должна быть вертикальной.

Эти требования будут выполнены при соблюдении следующих условий: 1) $LL_1 \perp VV_1$; 2) $KK_1 \perp HH_1$; 3) $HH_1 \perp VV_1$.

Выполнение этих условий требует проведения проверок теодолита, в процессе которых должны быть проведены также необходимые исправления (юстировка прибора).

Проверки теодолита. 1. *Ось уровня LL_1 должна быть перпендикулярна вертикальной оси VV_1* (рис. 6.6, а). На рис. 6.6, б положение оси уровня LL_1 при уровне, выведенном на середину; положение оси $L'L'_1$ при повороте теодолита вокруг вертикальной оси на 180° ; γ — угловое расхождение осей уровня в двух положениях; δ — угол, на который следует исправить положение уровня исправительными винтами. Видно, что $(90^\circ - \delta) + (90^\circ - \delta) + \gamma = 180^\circ$, откуда $\gamma = 2\delta$, или $\delta = \gamma/2$.

При работе на теодолите допускается отклонение пузырька уровня от середины на одно деление, что в угловой мере соответ-

ствует $1'$. Если отклонение пузырька уровня больше, следует исправить положение уровня. Для этого в исходном положении, когда ось уровня параллельна двум подъемным винтам треножника, пузырек уровня устанавливается на середину. Затем теодолит (алидада) разворачивается на 180° и отмечается, на сколько делений ушел уровень. После этого положение пузырька следует сдвинуть к середине на половину смещения подъемными винтами треножника и вторую половину смещения исправительными винтами уровня. Затем следует проверить правильность исправления повторением операции.

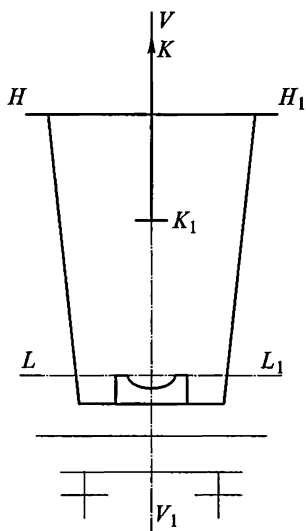


Рис. 6.5. Схема осей теодолита

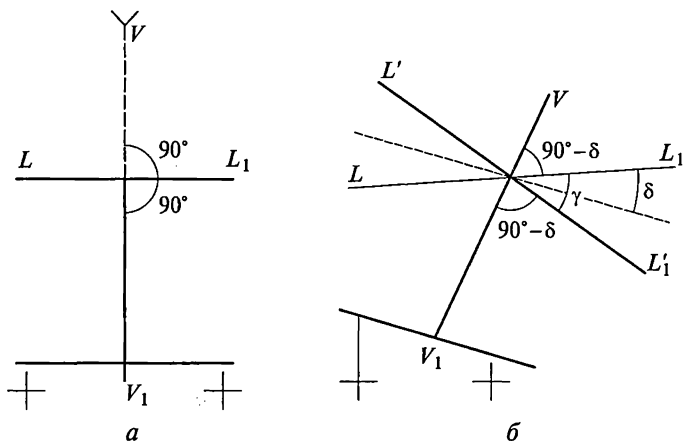


Рис. 6.6. Поверки уровня:

a — идеальное положение осей LL_1 и VV_1 ; *б* — действительное положение осей

2. Визирная ось KK_1 должна быть перпендикулярна горизонтальной оси HH_1 (рис. 6.7, *a*). При идеальном положении осей HH_1 и KK_1 визирная ось трубы KK_1 , вращаясь, образует так называемую коллимационную плоскость. При отсутствии перпендикулярности между этими осями при вращении трубы образуется два конуса. Как показано на рис. 6.7, *б*, коллимационная ошибка C обнаруживается и определяется двойным наведением трубы прибора в одну и ту же точку при положениях круга левом Л и правом П. Из двух наведений при Л и П, как это показано на рис. 6.8, запишем:

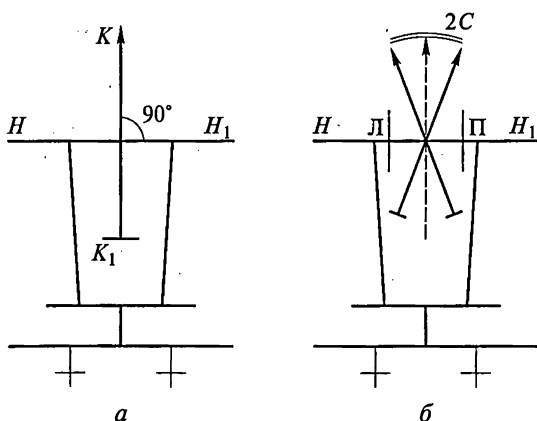


Рис. 6.7. Поверка и исправление коллимационной ошибки:

a — идеальное положение осей теодолита; *б* — действительное положение осей

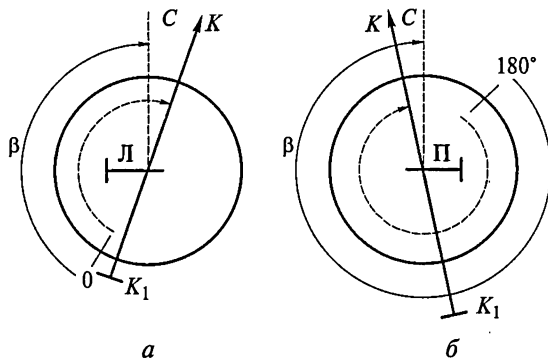


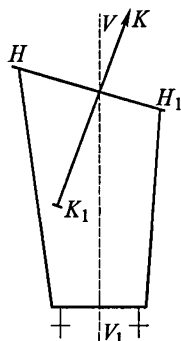
Рис. 6.8. Определение коллимационной ошибки

$$\begin{aligned}\beta &= Л - С; \\ \beta &= (П \pm 180^\circ) + С; Л = \beta + С; П \pm 180^\circ = \\ &= \beta - С; Л - (П \pm 180^\circ) = 2С.\end{aligned}$$

Исправление коллимационной ошибки производится смещением сетки нитей. Для этого находится истинный угол β , который устанавливается на отсчетном устройстве, и затем исправительными винтами сетки нитей она сдвигается вправо или влево так, чтобы перекрестие пришлось на точку наблюдения.

Пример:	Отсчеты	Исправление
	$Л = 25^\circ 30'$	$-0' 30''$
	$П = 205^\circ 29'$	$+0' 30''$
$25^\circ 30' - (205^\circ 29' \pm 180^\circ) = 2С = 1'; С = 0' 30''.$		

3. Горизонтальная ось HH_1 должна быть перпендикулярна вертикальной оси VV_1 . На рис. 6.9 показано неперпендикулярное положение осей. Условие проверяется проецированием какой-нибудь точки, расположенной под значительным углом наклона на любой предмет, расположенный под этой точкой на горизонте оси вращения трубы. Проецирование производится дважды, при левом и правом положениях вертикального круга.



Проекция точки не должны расходиться более чем на ширину биссектора (две вертикальные, параллельные нити служат для исключения погрешности сеток с одной вертикальной нитью, закрывающей знак визирования нитью) сетки нитей. Если ошибка больше, исправление производят в мастерской.

Рис. 6.9. Определение наклона горизонтальной оси

6.3. Измерение углов

Измерение горизонтальных углов. *Горизонтальным углом* называют угол между двумя пересекающимися прямыми линиями, расположенными в одной горизонтальной плоскости (рис. 6.10). Именно поэтому с помощью уровня лимбу теодолита придается горизонтальное положение. При установке визирных целей на пунктах следует иметь в виду, что все измерения относятся к центрам пунктов, поэтому все вехи, рейки, мерные шпильки должны устанавливаться точно над центрами знаков или сзади колышка в створе направления на прибор.

Горизонтальные углы измеряют способом приемов, когда на пункте только два направления (рис. 6.11), и способом круговых приемов, когда на точке три направления и более. В обоих случаях углы измеряют двумя полуприемами при двух положениях вертикального круга. Это позволяет повысить точность измерений, исключить грубые промахи и систематическое влияние коллимационной ошибки и неперпендикулярности осей вращения трубы и теодолита.

Измерение горизонтального угла способом приемов может быть выполнено при произвольно закрепленном или предварительно ориентированном лимбе, т.е. с отсчетом, близким к нулевому, взятым за начальную точку наблюдений. Измерения начинают при положении круга справа. При закрепленном лимбе поочередно наводят перекрестие сетки нитей на точки A и C , каждый раз производя отсчеты по горизонтальному кругу (a_A, a_C). Величина измеряемого угла $\beta = a_C - a_A$. Такое измерение угла называют *полуприемом*. То же самое повторяют при положении вертикального круга слева. Оба измерения составляют один полный прием. Он позволяет дважды получить значение угла. Расхождение между ними не должно превышать $2'$. В противном случае измерение угла повторяется при предварительно измененном положении горизонтального лимба.

Измерение горизонтальных углов способом круговых приемов выполняют при ориентированном и закрепленном лимбе в такой последовательности. Визирную ось (перекрестие сетки нитей) наводят на начальную точку и производят отсчет. Открыв алидаду, трубу последовательно наводят на все следующие по часовой стрелке точки, а затем измеряют и записывают

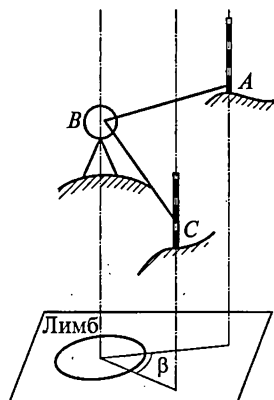


Рис. 6.10. Общий принцип измерения горизонтальных углов

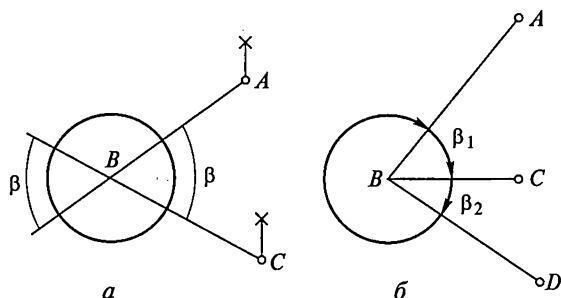


Рис. 6.11. Схема измерения углов при двух (а) и трех (б) направлениях на пункте

данные. Последнее наведение делают на начальное направление также по ходу часовой стрелки для того, чтобы убедиться в неподвижности лимба. Этот процесс называют *замыканием горизонта*. Затем всю работу повторяют в обратном направлении. Погрешность вычисленных углов из полуприемов не должна превышать $2'$.

Измерение вертикальных углов. Вертикальные углы измеряют для определения превышений методом тригонометрического нивелирования и приведения наклонных линий теодолитного хода к горизонту. Измеряют их отдельно от горизонтальных углов и обычно после измерения последних.

Вертикальные углы определяют одним полным приемом при двух положениях круга. Процесс начинается с грубого наведения визирной оси на цель. Затем устанавливается пузырек цилиндрического уровня при вертикальном круге на середину микрометрическим винтом. Если такой уровень отсутствует, то на середину сдвигается пузырек уровня при алидаде горизонтального круга. После этого горизонтальную нить сетки нитей точно наводят на визирную цель и берут отсчет по лимбу вертикального круга.

Правильность измерения вертикальных углов контролируется постоянством места нуля, колебания которого не должны превышать $1,5'$. (Об устройстве вертикального круга и о месте нуля будет рассказано в гл. 8.)

Погрешности измерения углов. 1. *Погрешность взятия отсчета по отсчетному устройству* $m = t/2\sqrt{2}$, где t — точность шкалы. Для теодолита 2ТЗ0П, у которого $t = 30''$, $m = 15''/\sqrt{2} \approx 11''$.

2. *Погрешность визирования, связанная с увеличением трубы.* Погрешность визирования в этом случае вычисляют следующим образом: $m_v = 60''/v$, v — увеличение трубы. При увеличении трубы $20\times$, как у теодолита 2ТЗ0П, ошибка визирования равна $3''$, что практически неощутимо при технических работах.

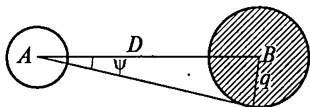


Рис. 6.12. Ошибка наведения:
 ψ — угловая; q — линейная; D —
 расстояние

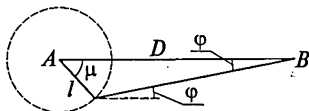


Рис. 6.13. Ошибка центрирования:
 μ — угловое смещение центра; l — ли-
 нейное смещение центра; ϕ — ошибка
 измеренного угла; D — расстояние

3. *Погрешность наведения визирной оси прибора в цель (веху).*
 В принятых на рис. 6.12 обозначениях запишем $q/D = \operatorname{tg} \psi$, или по малости угла $\psi'' = q\rho''/D$.

Пример: $q = 1$ см, $D = 100$ м, $\rho'' = 206\,264''$, $\psi'' = (1 \cdot 206\,264'')/10\,000 \approx 20''$.

4. *Погрешность центрирования прибора над точкой стояния.*
 Используя равенство углов (рис. 6.13), можно записать $D/\sin \mu = l/\sin \phi$, откуда $\sin \phi = (l \sin \mu)/D$ или по малости ϕ : $\phi'' = (l\rho'' \sin \mu)/D$.

Пример: $l = 1$ см, $D = 100$ м, $\mu = (\max) = 90^\circ$, $\rho'' = 206\,264''$,
 $\phi'' = (1 \cdot 206\,264 \cdot 1)/10\,000 \approx 20''$.

Первые три погрешности возникают при измерении горизонтальных углов. Из двух последних примеров следует, что углы, образованные более длинными сторонами, определяются с большей точностью за счет меньших ошибок центрирования и наведения. Однако нужно напомнить, что длины больших сторон измеряются с большей погрешностью.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАНОВЫХ КООРДИНАТ ТОЧЕК МЕСТНОСТИ

7.1. Прокладка теодолитного хода

Задача прокладки теодолитного хода состоит в нахождении координат (x и y) ряда точек местности, закрепленных в натуре. Назначение работы может быть различным, в том числе создание геодезической основы для последующей топографической съемки.

Последовательность работ: разбивка полигона, измерение длин сторон и углов непосредственно в поле, увязка углов теодолитного хода и нахождение линейной невязки, подсчет невязки хода и относительной погрешности, вычисление координат точек хода и оформление результатов.

Ходы бывают двух типов: разомкнутые и замкнутые (рис. 7.1). Ходы опираются на «твердые» стороны, имеющие координаты концов. Без этого невозможно получить положение точек в единой системе координат. Наиболее точными являются разомкнутые ходы, опирающиеся на две твердые стороны. Ходы, опирающиеся на одну твердую сторону, называют «висячими». Такие ходы применяют редко из-за невозможности своевременного обнаружения ошибки в измерениях.

Полевые работы начинают с разбивки полигона. На местности выбирают места для размещения точек хода, исходя как из возможности прокладки хода (видимости, отсутствия препятствий для измерения расстояний и пр.), так и учета дальнейшего использования пунктов, например для съемки местности. Все точки закрепляют колышками и отмечают «сторожками» во избежание потери.

Над каждой точкой в очередности хода устанавливают прибор на штативе. Теодолит нивелируют (ось вращения приводится в отвесное положение), центрируют (вертикальная ось совмещается с отвесной линией, проходящей через центр знака, фиксирующий в натуре вершину измеряемого угла) с точностью до 1 см. Затем прибор визируют по направлениям на вехи, установленные на точках (возможно ближе к земле во избежании ошибки в углах), производят отсчеты по лимбу и вычисляют углы. Одновременно с этим или раньше измеряют расстояния между точками хода. Длины сторон и углы измеряют дважды: линию — вперед и назад, угол — двумя приемами. Результаты должны расходиться не более чем 4 см на 100 м хода для длин и на 1,5' — для углов.

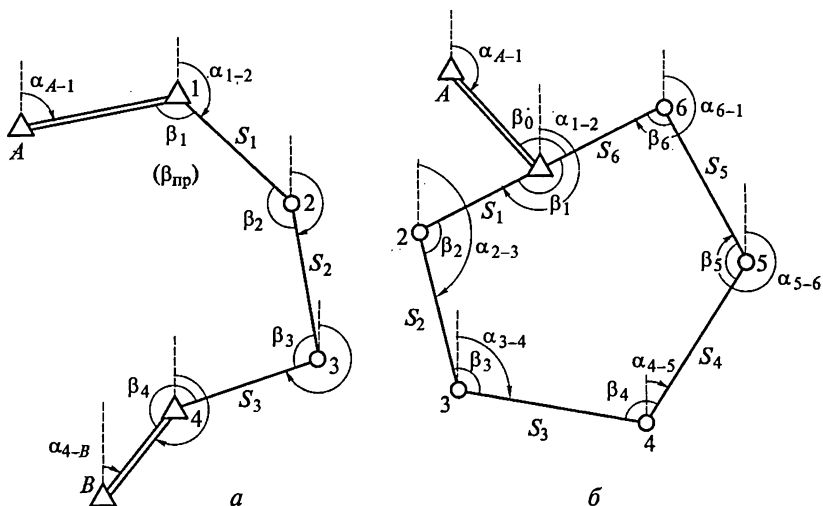


Рис. 7.1. Разомкнутый (а) и замкнутый (б) ходы

Углы можно измерять либо правые, либо левые по ходу, но никак не попеременно. В замкнутом ходе удобно измерять внутренние углы полигона. Порядок получения левых и правых углов показан на рис. 7.2. Угол левый получается по правилу: «отсчет вперед минус отсчет назад»: $\beta_{лев} = 3 - 1$; угол правый — «отсчет назад минус отсчет вперед»: $\beta_{пр} = 1 - 3$. Особое внимание должно быть обращено на случаи, когда измеряемый угол близок к 180° и на глаз левый угол неотличим от правого.

Увязка углов теодолитного хода. 1. Для замкнутого хода невязка получается по формуле $f_\beta = \sum \beta - 180^\circ(n - 2)$, n — число углов или сторон многоугольника. Допустимая погрешность

$$f_{\beta доп} = 1,5t\sqrt{n}, \quad (7.1)$$

где t — приборная точность измерения углов.

2. Для разомкнутого хода увязка начинается с вычисления обратной геодезической задачи и получения дирекционных углов твердых сторон α_{A-1} и α_{4-B} (см. рис. 7.1, а). Затем производится передача дирекционных углов на все стороны хода, как это показано на рис. 7.3:

$$\alpha_{1-2} = \alpha_{A-1} + \beta_{лев} - 180^\circ (\pm 360^\circ);$$

$$\alpha_{1-2} = \alpha_{A-1} - \beta_{пр} + 180^\circ,$$

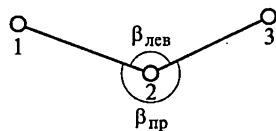


Рис. 7.2. Измерение правых и левых углов по ходу

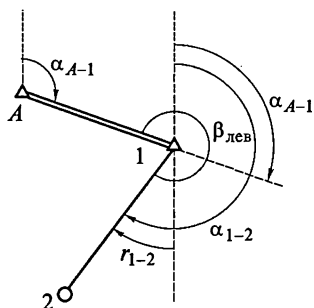


Рис. 7.3. Передача дирекционного угла

или удобнее записать так:

$$\alpha_{1-2} = \alpha_{A-1} + 180^\circ - \beta_{\text{пр}};$$

$$\alpha_{1-2} = \alpha_{A-1} - 180^\circ + \beta_{\text{лев}}.$$

Сложим все переходы от дирекционного угла первой «твердой» стороны до последней:

$$\alpha_{1-2} = \alpha_{A-1} + 180^\circ - \beta_{\text{пр}}$$

$$\alpha_{2-3} = \alpha_{1-2} + 180^\circ - \beta_{\text{пр}}$$

$$\alpha_{3-4} = \alpha_{2-3} + 180^\circ - \beta_{\text{пр}}$$

$$\frac{\alpha_{4-B} = \alpha_{3-4} + 180^\circ - \beta_{\text{пр}}}{\alpha_{4-B} = \alpha_{A-1} + 180^\circ n - \beta_{\text{пр}}}.$$

Запишем этот результат иначе

$$\sum \beta_{\text{пр}} = (\alpha_{\text{нач}} - \alpha_{\text{кон}}) + 180^\circ n.$$

Теперь получим формулы для вычисления невязок в углах: для *правых* углов

$$f_\beta = \sum \beta_{\text{пр}} - 180^\circ n - (\alpha_{\text{нач}} - \alpha_{\text{кон}}); \quad (7.2)$$

для *левых* углов

$$f_\beta = \sum \beta_{\text{лев}} - 180^\circ n - (\alpha_{\text{кон}} - \alpha_{\text{нач}}). \quad (7.3)$$

Поправка вводится во все углы поровну со знаком, противоположным знаку невязки.

Вычислим приращения координат по формулам

$$\Delta x = S \cos \alpha; \quad \Delta y = S \sin \alpha. \quad (7.4)$$

Найдем *линейную невязку теодолитного хода*: для замкнутого хода

$$f_x = \sum \Delta x = 0, \quad f_y = \sum \Delta y = 0; \quad (7.5)$$

для разомкнутого хода

$$f_x = \sum \Delta x - (x_{\text{кон}} - x_{\text{нач}}) = 0; \quad (7.6)$$

$$f_y = \sum \Delta y - (y_{\text{кон}} - y_{\text{нач}}) = 0. \quad (7.7)$$

Если невязка не равна нулю, что практически получается всегда, то она с обратным знаком распределяется во все приращения координат пропорционально длинам сторон S

$$v_x = (-f_x S)/P; \quad v_y = (-f_y S)/P; \quad P = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n. \quad (7.8)$$

Абсолютная невязка теодолитного хода

$$f_s = \sqrt{(f_x)^2 + (f_y)^2}. \quad (7.9)$$

Относительная невязка теодолитного хода

$$f_s/P = 1/(P/f_s) = 1/N. \quad (7.10)$$

Она задается в пределах от 1/1 000 до 1/2 000.

Работа с теодолитным ходом завершается оформлением результатов: составляют каталог координат всех точек хода, по которым вычерчивают схему хода в масштабе с нанесенной сеткой. На схеме фиксируют все данные хода.

7.2. Триангуляция и трилатерация

Сущность метода триангуляции заключается в том, что на местности строится ряд примерно равносторонних треугольников, имеющих между собой последовательно одну смежную сторону. Ряд из нескольких треугольников образует звено, на концах которого определяют длины сторон.

Если измеряют непосредственно длины внешних сторон крайних треугольников, что бывает при малых длинах сторон, то эти стороны называют *базисными* (рис. 7.4, сторона IG), или базисами. Если же из-за большой длины стороны определить ее невозможно, ее вычисляют опосредованно, строя так называемую базисную сеть, саму же сторону называют выходной (рис. 7.14, выходная сторона AB , базис ab).

Внутри треугольников измеряют углы с необходимой точностью. Контроль и уравнивание углов производят из сравнения полученной суммы углов с теоретической, равной 180° .

Начиная с выходной или базисной стороны, последовательно в каждом треугольнике длины двух других сторон определяют по теореме синусов:

$$BC = AB \sin \alpha / \sin \gamma, \quad AC = AB \sin \beta / \sin \gamma.$$

Перенесенная от стороны AB к стороне IG ее вычисленная длина сравнивается с результатом прямых или опосредованных измерений. Это позволяет ввести необходимые поправки и уравнивать положение всех углов треугольников, составляющих сеть пунктов триангуляции, закрепленных в природе более или менее капитально.

Изобретение электронных дальномеров позволило использовать также ме-

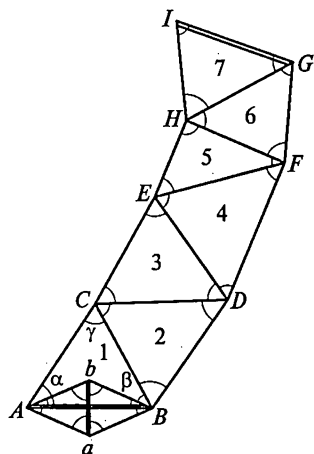


Рис. 7.4. Триангуляция

тод линейной триангуляции — *трилатерацию*, когда вместо углов в треугольниках измеряют длины всех сторон.

7.3. Геодезические засечки

В *прямой угловой засечке* даны три точки с известными координатами: $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$. Непосредственно в поле измеряют углы $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ и β_4 . Следует найти координаты точки $P(x_p \text{ и } y_p)$ (рис. 7.5).

Засечка может быть выполнена с двух точек, но результат окажется бесконтрольным. Чтобы избежать этого, засечки делают с трех точек.

Задача решается графическими построениями или аналитическими расчетами.

Для *графического решения* на планшете строят координатную сетку в избранном масштабе. По координатам наносят точки стояния 1, 2 и 3. Затем откладывают измеренные в поле углы β_1 , β_2 , β_3 . Результат считается достоверным, если все три направления пересеклись в одной точке, или был получен «треугольник погрешности» допустимой величины; вероятнейшее положение искомой точки относят к середине треугольника (центру тяжести).

Аналитическое решение задачи проводят для каждой пары засечек отдельно и сравнивают результаты. Существует много способов решения задачи с различными конечными формулами. Ниже приведено одно из наиболее простых решений, осуществляемое в следующей последовательности.

Вычисляют $\operatorname{tg} \alpha_{1-2}$ обратной геодезической задачей:

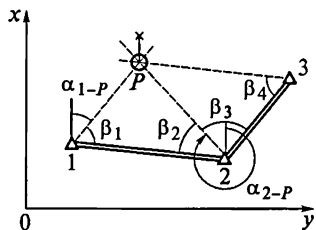
$$\operatorname{tg} \alpha_{1-2} = (y_2 - y_1)/(x_2 - x_1).$$

Определяют дирекционные углы с точек 1 и 2 на точку P 70:

$$\alpha_{1-p} = \alpha_{1-2} - \beta_1; \alpha_{2-p} = \alpha_{2-1} + \beta_2.$$

Для этих же углов можно записать уравнения:

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \alpha_{1-P} = (y_P - y_1) / (x_P - x_1); \\ \operatorname{tg} \alpha_{2-P} = (y_P - y_2) / (x_P - x_2). \end{cases}$$



Решив эту систему уравнений относительно координат точки $P(x_P, y_P)$, получим формулы решения задачи прямой засечки по дирекционным направлениям

Рис. 7.5. Прямая угловая засечка

$$\left. \begin{aligned} x_P &= x_1 + \frac{(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1) \operatorname{tg} \alpha_{2-P}}{\operatorname{tg} \alpha_{1-P} - \operatorname{tg} \alpha_{2-P}}; \\ y_P &= y_1 + \frac{(x_2 - x_1) - (y_2 - y_1) \operatorname{ctg} \alpha_{2-P}}{\operatorname{ctg} \alpha_{1-P} - \operatorname{ctg} \alpha_{2-P}}; \text{ или } y_P = y_1 + (x_P - x_1) \operatorname{tg} \alpha_{1-P}. \end{aligned} \right\} (7.11)$$

Для контроля такая же задача решается еще раз с треугольником 2, 3, P .

Для определения координат точки P по непосредственно измеренным углам используют формулы

$$x_P = x_2 + \frac{x_1 - x_2 (y_1 - y_2) \operatorname{tg} \beta_2}{1 + \operatorname{tg} \beta_2 / \operatorname{tg} \beta_1}; \quad y_P = y_2 + \frac{y_1 - y_2 (x_1 - x_2) \operatorname{tg} \beta_2}{1 + \operatorname{tg} \beta_2 / \operatorname{tg} \beta_1}. \quad (7.12)$$

Обратная угловая засечка известна в геодезии под названием «задачи Потенота». Определение положения точки на планшете в системе прямоугольных координат сводится к следующему. Если на местности имеются три опорные пункта 1, 2 и 3 с известными координатами, то положение четвертой точки P можно определить по измеренным в поле углам β_{1-2} и β_{2-3} между тремя направлениями с точки P на точки 1, 2, 3.

С изменением взаимного положения всех четырех точек углы засечек будут меняться, т. е. в каждом конкретном случае положение искомой точки P однозначно определяется углами β_{1-2} и β_{2-3} . С геометрической точки зрения положение точки P определится в пересечении двух сегментов, построенных на хордах 1–2 и 2–3. Задача заключается в нахождении радиусов окружностей, образующих эти хорды (рис. 7.6).

При мензурной и комбинированной съемках применяют другой способ нахождения точки P . Соединив точки 1, 2, 3 прямыми линиями, получим треугольник. На планшете проекции этих точек образуют треугольник, подобный треугольнику 1, 2, 3. Если в определяемой точке P планшет правильно ориентирован, то точка P графически получается в пересечении трех направлений 1 P , 2 P и 3 P . Однако существует достаточно трудоемкая технология нахождения положения точки P на мензурном планшете. На самом деле существует множество способов графического и аналитического решения задачи Потенота. Их выбор зависит от того, как взаимно расположены на планшете точки 1, 2, 3 и P . При удобном положении пунктов достаточно простым и надежным способом решения задачи является способ Болотова. Он заключается в том, что на кальке от произвольно обозначенной точки

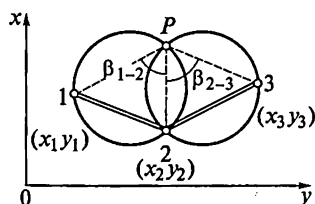


Рис. 7.6. Графическое решение задачи Потенота

прочерчивают три направления под углами засечек. Затем кальку совмещают с планшетом так, чтобы эти направления одновременно проходили через точки 1, 2, 3. Затем однозначно определяют положение точки P .

Для аналитического решения делают вспомогательные геометрические построения. Через определяемую точку P две исходные точки 1 и 3, как точки, не лежащие на одной прямой, проводят окружность. Продлив сторону $P2$ до пересечения с окружностью, получают вспомогательную точку (Коллинса) K (рис. 7.7). Далее соединяют точки 1, 3 и K прямыми. В получившемся треугольнике углы β_1 и β_2 равны одноименным измеренным углам при определяемой точке P , как опирающиеся на одни и те же дуги окружности. Далее решением прямой засечки по формулам (7.12) определяют координаты точки K . Из решения обратной задачи по направлению $K2$ находят его дирекционный угол, а следовательно, и дирекционный угол направления $2P$. Используя его и измеренные углы β_1 и β_2 , находят сначала дирекционные углы направлений $P1$ и $P3$, а затем значения для их обратных направлений, по которым с помощью формул (7.11) вычисляют координаты точки P . Один из возможных вариантов вычисления координат точки P по готовым формулам приводится ниже:

$$x_P = x_1 + \frac{(x_2 - x_1) \operatorname{tg} \alpha_2 + y_1 - y_2}{\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \alpha_1}; \quad y_P = y_1 + (x_P - x_1) \operatorname{tg} \alpha_1, \quad (7.13)$$

где

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{((y_2 - y_1) / \operatorname{tg} \beta_1 - x_2 + x_3) \operatorname{tg} (\beta_1 + \beta_2) + y_1 - y_3}{((x_2 - x_1) / \operatorname{tg} \beta_1 + y_2 - y_3) \operatorname{tg} (\beta_1 + \beta_2) + x_1 - x_3}; \quad \alpha_2 = \alpha_1 + \beta_1.$$

Прямая линейная засечка заключается в нахождении положения точки P на планшете и вычислении ее координат по трем расстояниям до нее от твердых точек 1, 2 и 3, имеющих координаты

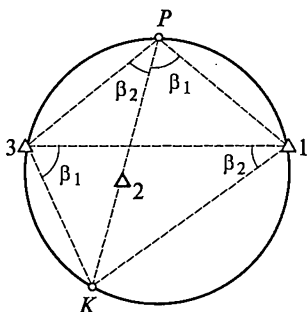


Рис. 7.7. Обратная засечка

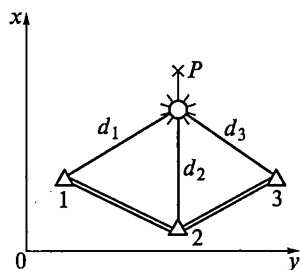


Рис. 7.8. Прямая линейная засечка

наты: $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$. Непосредственно в поле измерены расстояния d_1, d_2, d_3 (рис. 7.8). Задача решается или графически, или аналитически.

Графическое решение задачи заключается в том, что на планшет с координатной сеткой наносят по известным координатам точки 1, 2, 3. Из них радиусами, равными соответственно d_1, d_2, d_3 , делают засечки в месте их пересечения. Засечка может быть сделана из двух пунктов, но для контроля берут три направления. Если засечки пересеклись в одной точке, можно полагать, что положение точки P найдено практически без ошибки. Если же возник треугольник погрешности, считается, что вероятнейшее положение искомой точки в центре треугольника.

Аналитическое решение требует совместного решения двух уравнений:

$$\begin{cases} (x_1 - x_P)^2 + (y_1 - y_P)^2 = d_1^2; \\ (x_2 - x_P)^2 + (y_2 - y_P)^2 = d_2^2. \end{cases} \quad (7.14)$$

Обратная линейная засечка решается так же, как прямая. Однако есть и существенное различие в полевых работах. При прямой засечке точка P может быть недоступной для геодезистов, тогда как при обратной засечке недоступными могут быть точки 1, 2 и 3.

7.4. Новейшие методы определения положения

Линейные и угловые пространственные засечки, как способ определения положения в различных вариантах с использованием разнообразной и совершенной техники и технологии, все больше применяют в геодезии, навигации и для других практических нужд, например поиска потерпевших крушение или попавших в бедственное положение судов, самолетов — системы «СОС» и «Поиск».

В свое время специально для навигации были развиты системы «Лоран-С» и «Омега» с дальностью действия до 15 000 км, которые давали возможность определять положение точки с погрешностью 2—3 км. Затем была создана система «Транзит» (США) с использованием навигационных спутников Земли, выведенных на орбиту на высоте 1 000 км. В этой системе абсолютная ошибка определения положения составляла уже 50—70 м.

Сейчас действует и совершенствуется отечественная навигационная система ГЛОНАСС. Кроме того, создана глобальная позиционная система GPS (США) как универсальная навигационная и геодезическая система — НГС (NAVSTAR GPS). Точность взаимного определения смежных пунктов, которую она обеспечивает, составляет несколько миллиметров. При этом она позволяет определять высоты относительно эллипсоида с высокой точностью.

Координаты точек на земной поверхности можно определять методами космической геодезии. Космическая геодезия является одним из разделов геодезии, в котором решение научных и практических задач выполняют путем наблюдений искусственных и естественных небесных тел.

Одними из основных задач космической геодезии являются:

- определение в пространственной геодезической системе координат с началом в центре масс Земли положения референц-эллипсоида;
- изучение фигуры Земли, Луны, планет Солнечной системы;
- определение координат пунктов в системе, отнесенной к центру масс Земли;
- определение с высокой точностью взаимного положения пунктов в некоторой геодезической системе координат;
- установление связи между различными геодезическими системами.

Стремительное развитие космической геодезии связано с запуском в нашей стране 4 октября 1957 г. первого искусственного спутника Земли и последующими запусками как в России, так и в США и других странах космических объектов, позволяющих эффективно решать традиционные и новые задачи геодезии.

Развитие космической геодезии на протяжении последних 35 лет шло в основном по трем направлениям:

- 1) создание и наблюдение пассивных спутников типа «Пагеос», «Лагеос», «Эталон» методами фотографирования и лазерной локации;
- 2) создание и наблюдение специализированных геодезических спутников типа Гео-ИК;
- 3) создание и применение спутниковых систем.

Методами космической геодезии создана Международная земная опорная геодезическая сеть (International Terrestrial Reference Frame — ITRF), закрепляющая положение центра масс Земли с точностью до 10 см и включающая около 100 пунктов. Под воздействием геодинамических процессов, связанных с жизнью Земли как небесного тела, геоцентрические координаты изменяются со скоростью около 1—2 см в год. Поэтому каталоги координат ежегодно уточняют, обновляют и указывают, к какой эпохе они относятся, например ITRF-89, ITRF-94 и т.д.

Координаты наземных пунктов методами космической геодезии можно определять по двум направлениям. Первое направление основано на использовании законов движения спутников и включает группу методов для совместного определения геофизических параметров Земли и координат наземных пунктов. Методы, применяемые при этом, называют динамическими. Построение пространственных геодезических сетей с помощью синхронных (одновременных) или квазисинхронных (почти одновремен-

ных) наблюдений ИСЗ, при которых точное знание законов движения ИСЗ не обязательно, составляет содержание второго направления. Применяемые при этом методы называют геометрическими, а ИСЗ рассматриваются как высоко находящиеся цели.

В геометрических методах наблюдения ИСЗ ведутся одновременно с исходных и определяемых пунктов земной поверхности. На рис. 7.9 $X'Y'Z'$ система координат, отнесенная к референц-эллипсоиду с центром в точке O' ; XYZ — общеземная система координат с началом в центре масс Земли O ; $\vec{p}$ — геоцентрический радиус-вектор ИСЗ; точки A и B — пункты наблюдений ИСЗ; $\vec{r}_1$ и $\vec{r}_2$ — топоцентрические радиусы-векторы ИСЗ; $\Delta\vec{R}$ — вектор, связывающий центр референц-эллипсоида с центром масс Земли; $\vec{R}_1, \vec{R}_2$ — радиусы-векторы пунктов наблюдений в референцной системе. Считая оси координат обеих систем параллельными друг другу, на основании рис. 7.9 можно написать уравнение

$$\vec{p} = \vec{r}_i + \vec{R}_i + \Delta\vec{R} \quad (i = 1, 2), \quad (7.15)$$

которое является фундаментальным уравнением космической геодезии. Из (7.15) можно определить положение ИСЗ в референцной системе (прямая задача), если известны координаты пункта наблюдения (компоненты вектора $\vec{R}_i$) и определены все компоненты топоцентрического вектора $\vec{r}_i$.

Может возникнуть задача по определению из (7.15) центра референц-эллипсоида относительно центра масс Земли (компоненты вектора $\Delta\vec{R}$).

Чаше определяют координаты пунктов наблюдений (обратная задача) из уравнения

$$\vec{R}_i = \vec{p} - \vec{r}_i - \Delta\vec{R}. \quad (7.16)$$

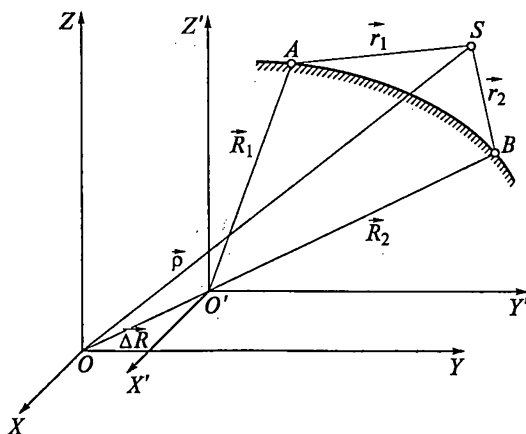


Рис. 7.9. Геометрическая сущность метода космической геодезии

При этом все компоненты вектора $\Delta \vec{R}$ должны быть известны, а компоненты векторов $\vec{r}$ и $\vec{r}_i$ определены для одного момента времени.

При выполнении синхронных наблюдений ИСЗ с двух пунктов на основании (7.16) можно написать уравнение

$$\vec{R}_1 - \vec{R}_2 = \vec{r}_2 - \vec{r}_1. \quad (7.17)$$

Из (7.17) следует, что если известны координаты одного пункта, то можно вычислить координаты второго в системе исходного пункта, при этом не нужно знать точных координат ИСЗ и точной теории движения.

Кроме указанных способов положение точек на земной поверхности можно определять с помощью спутниковых систем.

7.5. Глобальные системы спутникового позиционирования

Общие сведения. Спутниковые системы существуют более тридцати лет. Долгое время они обеспечивали навигационной информацией самолеты, морские суда и подводные лодки. Однако достигнутый с помощью таких систем высокий уровень точности определения местоположения объектов привел к широкому использованию космических навигационных систем в различных областях человеческой деятельности. Поэтому глобальные космические навигационные системы в большинстве случаев стали называть *навигационно-геодезическими (универсальными)*.

Универсальность означает возможность использования аппаратуры как в геодезических, так и в навигационных целях; на суше, море, в воздухе и ближнем космическом пространстве; динамическими и статическими пользователями; для определения абсолютного и относительного положения объекта. Возросшие возможности этих систем позволяют наряду с решением задач нахождения геоцентрических координат пунктов на уровне точности около 1 м определять относительные координаты на уровне точности, близкой к $1 \cdot 10^{-7}$.

В настоящее время применяют две системы второго поколения — американская GPS и российская ГЛОНАСС, намечается введение в эксплуатацию европейской системы под названием Galileo.

Американский генерал Х.Стехлинг предложил термин, отражающий универсальное назначение системы — позиционирование. Ему соответствует название американской спутниковой системы: Global Positioning System — GPS. Под позиционированием понимается реализация возможных способов использования системы для определения параметров пространственного состояния

объектов наблюдения. Такими параметрами могут быть координаты приемника, вектора скорости его перемещения, пространственный вектор между двумя приемниками, точное время позиционирования. Следовательно, определение местоположения объекта, скорости его перемещения, пространственного вектора между пунктами наблюдения, фиксация точного времени представляют собой частные случаи позиционирования. Спутниковые системы GPS и ГЛОНАСС обеспечивают позиционирование в любой точке земной поверхности, в любое время суток, в любую погоду.

Российская система получила название ГЛОНАСС — Глобальная навигационная спутниковая система и в соответствии с российским стандартом ГОСТ Р 51794-2001 именуется ГСП — Глобальная система позиционирования.

Система GPS полностью развернута в 1995 г., система ГЛОНАСС — в 1996 г. Однако вскоре в системе ГЛОНАСС прекратилось планомерное восстановление ИСЗ, и она до сих пор остается недоукомплектованная ими.

Техническими предпосылками создания таких систем явились высокая надежность спутников и создание сверхстабильных атомных эталонов времени. GPS действует в координатной системе WGS-84, а ГЛОНАСС работает в системе ПЗ-90.

Структура систем ГЛОНАСС и GPS. В состав каждой из систем входят три подсистемы (сегмента):

- подсистема космических аппаратов (КА) и стартовые комплексы;
- подсистема наземного контроля и управления (НКУ);
- подсистема приемной аппаратуры потребителей (АП).

Каждая из подсистем GPS и ГЛОНАСС включает группировку из 24 КА. Спутники GPS распределены в шести, а спутники ГЛОНАСС в трех орбитальных плоскостях, развернутых соответственно через 60° и через 120° по долготе восходящего узла (рис. 7.10).

Орбиты расположены так, что в любое время над любой точкой земной поверхности видно «созвездие» не менее чем из четырех КА. На каждом спутнике имеются: четыре дорогостоящих атомных эталона частоты и времени, обеспечивающие генерацию радиосигналов и меток шкал времени, средства для приема и передачи радиосигналов и др. Со спутника передаются эфемериды ИСЗ и альманахи всех ИСЗ системы и другие сведения.

Эфемериды называют данные, характеризующие орбиту ИСЗ на некотором относительно коротком интервале времени, позволяющие с высокой точностью вычислить местоположение спутника на момент измерений в общеземной геоцентрической системе координат WGS-84 или СК-90. Альманахи — сборник данных о всех спутниках GPS — содержит сведения о местоположениях спутников, времени их восхода и захода, их высотах над горизонтом и азимутах, используется для планирования измерений.

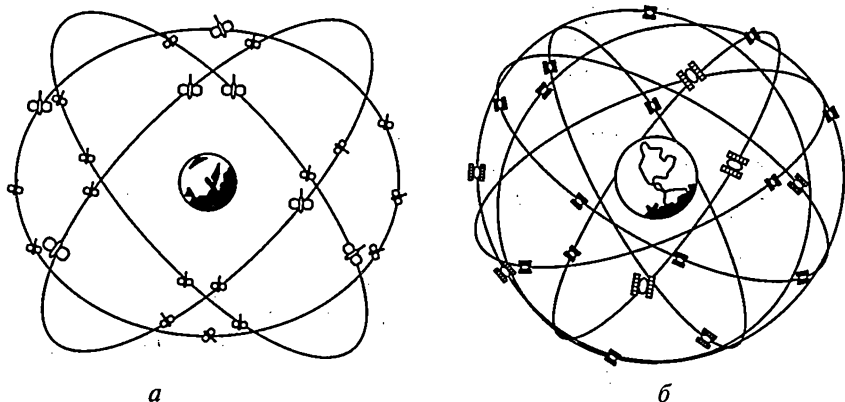


Рис. 7.10. Орбитальная группировка спутников глобальных систем позиционирования:
a — ГЛОНАСС; *б* — GPS

Подсистема НКУ состоит из станций: слежения за КА, собирающих информацию об орбитах спутников; службы точного времени; главной станции с вычислительным центром, обрабатывающей орбитальную информацию и прогнозирующей координаты (эфемериды) спутников; станций загрузки данных на борт КА. Космические аппараты принимают и хранят информацию с наземных станций, а также непрерывно распространяют ее среди потребителей радиосигналами в составе навигационных сообщений.

Подсистема потребителя GPS включает совокупность аппаратно-программных средств, реализующих возможные способы использования системы — определение навигационных данных на суше, поверхности моря, в воздухе, околоземном пространстве и геодезических положений на поверхности Земли.

Сущность местоопределения. В основе определения координат спутникового приемника лежит метод линейных засечек, или трилатерации (рис. 7.11). Роль опорных пунктов выполняют КА, координаты которых должны быть известны в любой момент времени. При помощи аппаратуры, расположенной на спутниках и на поверхности Земли, измеряют расстояния и скорости изменения КА вследствие перемещений их относительно потребителя. В геодезических целях преимущественно используются расстояния. Если от спутникового приемника известны расстояния до трех КА, то в результате пересечения трех сфер, которым соответствуют расстояния, получатся две точки. Этого достаточно для однозначного определения координат, так как из двух возможных точек расположения приемника лишь одна находится на поверхности Земли (или в непосредственной близости от нее), а вторая, ложная, — либо глубоко внутри Земли, либо очень высоко над ее поверхностью.

Однако возникает много погрешностей: из-за неточной синхронизации часов приемника и спутника, зависимости скорости света от состояния атмосферы, поворота Земли на небольшой угол и удаления от спутника за время прохождения сигналом расстояния от спутника до приемника и др. Такие искаженные расстояния называют псевдодальностями, а для нахождения верных расстояний и определения трехмерных координат GPS-приемника используют, как минимум, четыре (или более) спутника. Получив сигнал от спутников, GPS-приемник ищет точку пересечения соответствующих сфер. Если такой точки нет, процессор GPS-приемника начинает методом последовательных приближений корректировать свои часы до тех пор, пока не добьется пересечения всех сфер в одной точке.

Аналитическое решение заключается в решении системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} S_{1P}^2 &= (X_1 - X_P)^2 + (Y_1 - Y_P)^2 + (Z_1 - Z_P)^2; \\ S_{2P}^2 &= (X_2 - X_P)^2 + (Y_2 - Y_P)^2 + (Z_2 - Z_P)^2; \\ S_{3P}^2 &= (X_3 - X_P)^2 + (Y_3 - Y_P)^2 + (Z_3 - Z_P)^2; \\ S_{4P}^2 &= (X_4 - X_P)^2 + (Y_4 - Y_P)^2 + (Z_4 - Z_P)^2, \end{aligned} \right\} \quad (7.18)$$

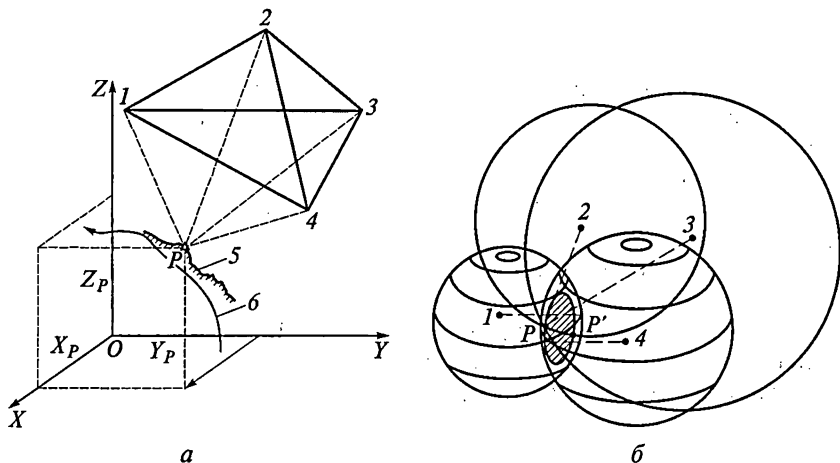


Рис. 7.11. Концепция определения положения объекта методом GPS:
 а — синхронное определение псевдодальностей от приемника GPS до спутников; б — геометрическая интерпретация определения положения объекта по четырем дальностям от него до спутников GPS; 1 — 4 — космический аппарат «GPS»; 5 — земная поверхность; б — общеземной эллипсоид; О — центр масс Земли — начало прямоугольной геоцентрической системы координат; Р — приемник на определяемом пункте

где X_P, Y_P, Z_P — искомые координаты приемника; X_i, Y_i, Z_i ($i = 1, 2, 3, 4$) — координаты спутников в пространственной системе координат, отнесенные к определенному моменту времени.

Расстояния до спутников определяют как произведение времени прохождения от них радиосигналами пути до приемника на известную скорость электромагнитных колебаний. Время получают косвенным путем, используя специальные коды или фазовые измерения.

При кодовом методе определения временной задержки спутник и приемник генерируют одновременно идентичные и уникальные последовательности неповторяющихся импульсов, которые можно представить в виде нулей и единиц, строгое закономерное чередование которых воспринимается как случайный процесс. Такие коды называют псевдослучайными последовательностями (ПСП), или псевдослучайными кодами.

Спутник передает свою последовательность в виде непрерывного радиосигнала, а GPS-приемник, будучи включенным в произвольный момент времени, принимает ее и находит величину задержки дальномерного сигнала относительно своей опорной последовательности импульсов (рис. 7.12). Для этого ПСП на спутнике и в приемнике пользователя генерируют строго синхронно. Тогда приходящая от спутника кодовая последовательность будет запаздывать по отношению к такой же последовательности в аппаратуре наземной станции на время $\tau = t_2 - t_1$, равное распространению сигнала от космического аппарата до аппаратуры пользователя, где t_1 — момент излучения сигнала на спутнике, t_2 — момент его приема на наземной станции. Поэтому время прохождения сигнала от спутника до станции определяют путем задержки сигнала, вырабатываемого на спутнике, на такое время $t_1 - t_2$, чтобы принимаемый сигнал успел его «догнать» и оба они совпали.

Следует отметить, что время прохождения сигнала со спутника составляет около 70 мс ($T = 20\,000\text{ км}/300\,000\text{ км/с} \approx 0,066\text{ с}$), а измерить такой малый интервал времени с высокой точностью (погрешность в расстоянии порядка 10 м соответствует погрешности в определении временной задержки $10/300\,000 \approx 3 \cdot 10^{-8}\text{ с}$) способны только квантовые стандарты частоты, так называемые «атомные» часы, располагаемые на спутниках. В GPS-приемниках уста-

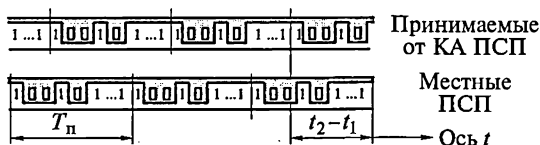


Рис. 7.12. Сравнение местных и принятых стандартных кодов

навливают менее дорогие и менее точные кварцевые генераторы, а возникающие из-за этого ошибки синхронизации часов устраняют методом определения расстояния до четвертого спутника и математической обработкой данных измерений.

Наиболее точные измерения выполняют фазовым методом. Расчетная инструментальная погрешность $\delta P_{\text{и}}$ составляет около 0,01 от длины волны и при $\lambda = 19$ см:

$$\delta P_{\text{и}} \leq 0,01\lambda = 0,01 \cdot 19 \text{ см} \approx 2 \text{ мм}.$$

В аппаратуре потребителя (GPS-приемнике) производится поиск, усиление и разделение сигналов, принадлежащих разным космическим аппаратам, определение временных задержек распространения сигналов от спутников и таким образом вычисление псевдодальностей до них.

Комплект аппаратуры потребителя зависит от его назначения. Чем точнее работы, тем сложнее аппаратура. Наиболее совершенные приемные системы применяют в геодезических целях. Комплект аппаратуры пользователя для геодезических целей включает антенну, приемник, контроллер (управляющее устройство), аккумуляторы или батареи, блок питания (для зарядки аккумуляторов и работы от сети), кабели, штативы, вешку для установки антенны, рулетку или специальное приспособление для измерения высоты антенны и прочее оснащение. Для обработки измерений обязателен персональный компьютер с программным обеспечением.

Приемники классифицируют по конструктивным особенностям, назначению и некоторым другим признакам. Так, по видам принимаемых сигналов приемники делят на кодовые и фазовые; по техническим возможностям — на односистемные (принимающие сигналы от одной системы GPS или ГЛОНАСС) или двухсистемные, ориентированные на прием сигналов как от GPS, так и от ГЛОНАСС; по назначению — для навигационных, военных, геодезических и других целей. Применяются приемники, совмещенные с электронными тахеометрами.

Глава 8

НИВЕЛИРОВАНИЕ

8.1. Понятия и термины

Нивелированием называют совокупность полевых геодезических работ в целях получения высот или превышений точек местности.

Определим некоторые понятия и введем обозначения (рис. 8.1): H — *абсолютная высота точки* — расстояние (H_A) по отвесной линии от точки местности A до уровенной поверхности NN , принятой за начальную; h_A — *условная или относительная высота* точки A , измеренная относительно некоторой условно выбранной, частной уровенной поверхности $N'N'$; Δh — *превышение* — разность высот двух точек.

В нашей стране началом отсчета высот принят средний многолетний уровень Балтийского моря, отмеченный на Кронштадтском футштоке — металлической балке со шкалой, укрепленной на устоях каменного моста (так называемая Балтийская система высот).

Все высоты и превышения могут иметь знак «плюс» или «минус», т.е. уровенная поверхность, относительно которой определяются высоты, должна быть поверхностью геоида. Если выбирается квазигеоид, то высоты называются *нормальными*.

Между квазигеоидом и поверхностью эллипсоида существует расхождение — аномалия высот, составляющая, например, для Индийского океана 113 м, для Саргассова моря — 50 м.

Нивелирование производят разными способами и высоты определяют с различной точностью. Существуют следующие методы определения превышений и отметок точек: *геометрическое, тригонометрическое (геодезическое) и физическое (барометрическое, аэро- радионивелирование, гидростатическое, спутниковое, механическое и др.) нивелирование; стереофотограмметрический метод.*

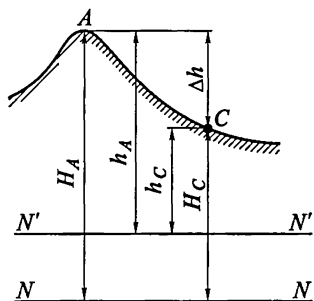


Рис. 8.1. Определение высот абсолютных, условных и превышений

8.2. Геометрическое нивелирование

Принцип геометрического нивелирования очевиден из рис. 8.2. Если мы воссоздадим горизонтальную линию, или луч, то сможем измерить отрезки a и b специальной рейкой и, следовательно, вычислить превышение Δh . Реализуется этот принцип с помощью нивелира, снабженного оптической трубой, визирной оси которой уровнем придается горизонтальное положение. В точке A устанавливается нивелир, на точке B — рейка с делениями. Измерив высоту прибора i и взяв отсчет по рейке b , можем получить превышение Δh . Зная абсолютную высоту (отметку) точки A , можно получить также абсолютную отметку точки B , как это показано на рис. 8.3, a . Возникает важный вопрос: как определяется знак превышения? Исходя из заданного направления нивелирного хода превышение и его знак вычисляют по правилу: *задний отсчет минус передний отсчет*. В нашем примере $(i)a - b = +\Delta h$, откуда $H_B = H_A + \Delta h$.

Поскольку придать визирному лучу прибора идеально горизонтальное положение практически не удастся и остается пусть небольшая, но все же ошибка, нивелирование производят обычно не из конца линии, а из середины, как это показано на рис. 8.3, b . Тогда ошибка x при вычислениях компенсируется. В нашем примере

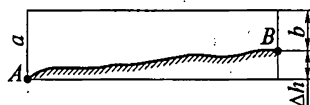


Рис. 8.2. Принцип геометрического нивелирования

$$\Delta h = a' - b' = (a + x) - (b + x) = a + x - b - x = a - b. \quad (8.1)$$

8.3. Типы и устройство нивелиров

Нивелир — геодезический прибор со зрительной трубой, визирная ось которого служит для воспроизведения горизонтальной линии. Нивелиры снабжены уровнями или компенсаторами — устройствами для достижения горизонтальности оптической оси. Таким образом, оптические нивелиры бывают двух типов: нивелиры с уровнем и нивелиры авторедукционные с самоустанавлива-

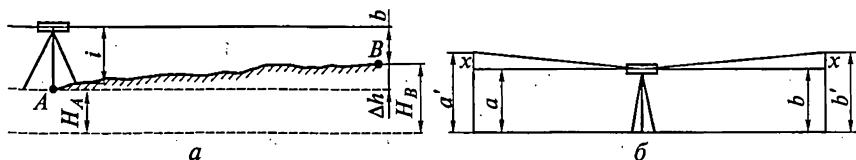


Рис. 8.3. Нивелирование из конца (а) и из середины (б) линии

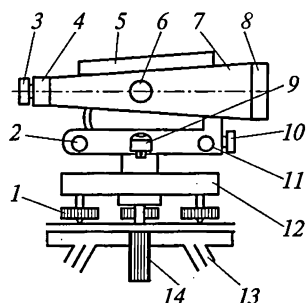


Рис. 8.4. Схема устройства нивелира Н-3:

1 — три подъемных винта подставки; 2 — головка элевационного винта; 3 — окуляр; 4 — крышка, на окуляре за которой установлена сетка нитей; 5 — коробка, в которой размещен цилиндрический уровень; 6 — винт фокусировки трубы; 7 — зрительная труба; 8 — объектив трубы; 9 — круглый уровень для предварительной установки нивелира; 10 — закрепительный винт трубы; 11 — винт наводящего устройства трубы; 12 — подставка нивелира; 13 — штатив; 14 — становой винт для закрепления нивелира на штативе

ющей линией визирования (с компенсатором). Кроме того, электронные технологии позволили создать современный многофункциональный *цифровой (электронный) нивелир*, совмещающий функции высокоточного оптического нивелира, электронного запоминающего устройства и встроенного программного обеспечения для обработки выполненных измерений.

Оптические нивелиры — самые распространенные приборы. Некоторые марки их отличаются продолжительным сроком службы (НВ-1, Н-3 и др.). Многообразие марок нивелиров обусловлено широким спектром областей применения: от изысканий, строительства до создания государственных нивелирных сетей.

Цифра перед буквой Н в марке нивелира обозначает серию. Наличие в марке следующих букв означает: К — труба нивелира снабжена компенсатором, П — зрительная труба с прямым изображением, Л — нивелир с горизонтальным лимбом.

Нивелиры также различаются по точности, что указывается в их марке. Например, у нивелиров Н-05, Н-3, 3Н5Л, Н-10 гарантированная погрешность нивелирования на 1 км хода составляет соответственно 0,5; 3; 5 и 10 мм.

Рассмотрим устройство *нивелира Н-3* (рис. 8.4). В поле зрения трубы нивелира помимо сетки нитей введено изображение двух половинок концов цилиндрического уровня, которые в момент взятия отсчета по рейкам должны быть совмещены (рис. 8.5).

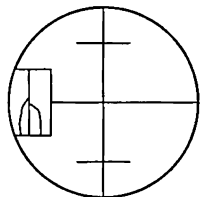
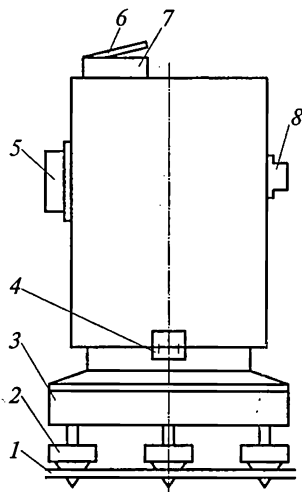


Рис. 8.5. Сетка нитей нивелира и изображение концов уровня

Устройство *компенсаторного нивелира Н-10КЛ* показано на рис. 8.6. Оптическая система нивелира с компенсатором типа Н-10КЛ представляет собой «ломаную» зрительную трубу, состоящую из объектива, нескольких призм и окуляра с сеткой нитей. Оптический компенсатор подвешен в виде маятника. Его назначение устанавливать линию визирования в горизонтальное положение в пределах отклонения ее горизонталь-

Рис. 8.6. Нивелир Н-10КЛ:

1 — пружина трегера; 2 — подъемные винты подставки; 3 — подставка; 4 — лимб и индекс для отсчета; 5 — объектив зрительной трубы; 6 — крышка — зеркало уровня; 7 — уровень круглый; 8 — окуляр



ного положения $\pm 20'$. Поэтому для приведения вертикальной оси нивелира в начальное отвесное положение достаточно крутого установочного уровня. Увеличение трубы нивелира Н-10КЛ 21,5 $\times$, изображение прямое (рис. 8.7).

В комплект любого нивелира входят также две рейки и металлические «башмаки» или костыли. Для технического нивелирования используют деревянные двусторонние рейки, на которых с каждой стороны нанесены деления через 1 см (рис. 8.8). Одна сторона — красная, другая — черная. Деления черной стороны начинаются с нуля, а деления красной стороны — с произвольного отсчета, чаще близкого к 4684 или 4784. Правильность нанесения делений на рейках проверяют специальной металлической контрольной линейкой, точная длина которой известна.

Костыли и башмаки используют для того, чтобы рейки на пикетах стояли устойчиво, не сдвигаясь ни в плане, ни по высоте. Костыли забивают, а башмаки устанавливают на грунте, иногда предварительно сняв дерн. При техническом нивелировании их нередко заменяют деревянными колышками, которыми отмечают пикеты и по которым ведется нивелирование.

Технические нивелиры Н-3Л и Н-10КЛ имеют лимб, с помощью которого измеряется угол поворота хода. Основные геометрические оси нивелира: VV_1 — ось вращения нивелира, LL_1 — ось цилиндрического уровня, KK_1 — визирная ось трубы, $V'V'_1$ — ось круглого уровня (рис. 8.9).

В рабочем состоянии нивелир должен отвечать следующим требованиям:

ось вращения прибора VV_1 должна быть отвесной;

ось цилиндрического уровня должна быть параллельна визирной оси прибора ($LL_1 \parallel KK_1$) — это главное условие в нивелире;

ось вращения нивелира и ось круглого уровня должны быть параллельны ($V'V'_1 \parallel VV_1$).

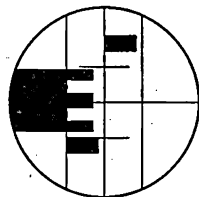


Рис. 8.7. Вид в поле зрения нивелира Н-10КЛ (видна рейка)



Рис. 8.8. Нивелирная рейка

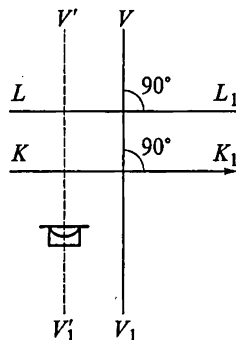


Рис. 8.9. Геометрические оси нивелира

Выполнение этих условий устанавливается путем проверок.

Основной отличительной особенностью цифровых нивелиров является встроенное цифровое устройство для считывания отсчета по специальной (штрихкодовой) рейке с высокой точностью. Использование цифровых нивелиров ускоряет процесс измерений, исключает личные погрешности и возможность изначально неверного отсчета исполнителем. Процесс измерения превышения сводится к поочередному наведению прибора на рейки нажатием всего на одну клавишу. На экране нивелира отображается измеренное значение и расстояние до рейки. Результаты измерений могут быть сохранены на специальной карте памяти или во внутренней памяти прибора, сохраняющей до нескольких тысяч значений измерений.

8.4. Поверки нивелиров

1. Ось круглого уровня должна быть параллельна оси вращения прибора. Поверка делается в таком порядке. В *позиции 1* ставим уровень так, чтобы его исправительные винты и подъемные винты подставки заняли положение, указанное на рис. 8.10, *а*. Вращая винты *А* и *В* в разные стороны, перемещаем пузырек на ось *Сс*, а затем вращением подъемного винта *С* загоняем пузырек к центру уровня.

В *позиции 2* разворачиваем нивелир на 180° . При этом исправительные винты уровня и подъемные винты подставки изменят взаимное положение. Если требуемое условие не соблюдается, пузырек уровня сместится к краю. Вращением подъемных и исправительных винтов сместим пузырек на середину, как это показано на рис. 8.10, *б*. При этом половину смещения, как было указано в поверках теодолита, устраняем исправительными винтами, половину подъемными.

Поверку можно выполнить и иначе при наличии цилиндрического уровня. После поверки цилиндрического уровня нивелир

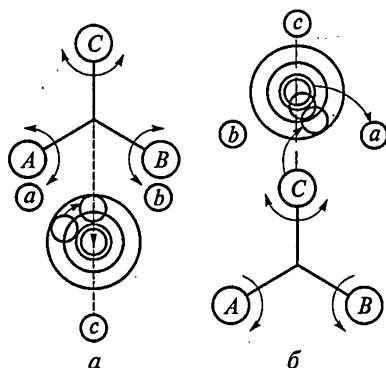


Рис. 8.10. Поверка и исправление круглого уровня

горизонтируют (устанавливают вертикальную ось по направлению отвесной линии) по нему, после чего юстировочными винтами круглого уровня выводят пузырек на середину.

2. Горизонтальная нить сетки должна быть перпендикулярна оси вращения нивелира. Нивелир устанавливают в рабочее положение и наводят трубу на неподвижно установленную рейку на расстоянии 25—30 м. Закрепляют трубу и наводящим винтом перемещают изображение рейки в поле зрения трубы от одного края к другому. На краях поля зрения отсчет не должен изменяться более чем на 1 мм. В противном случае исправительные винты сетки нитей открепляют и поворачивают оправу так, чтобы нить заняла нужное положение.

3. Ось цилиндрического уровня и визирная ось трубы должны быть параллельны. Поверку проводят двойным нивелированием вдоль одной линии. Однако существует несколько способов исполнения поверки.

Первый способ. Нивелир устанавливают в створе линии AB длиной 70—100 м, на концах которой расположены рейки. Окуляр нивелира центрируют над колышком, вплотную к рейке (рис. 8.11). Горизонтируют нивелир и измеряют его высоту над колышком до визирной оси с погрешностью не более 1 мм и берут отсчет по рейке, установленной в точке B . Сделав отсчеты, меняют местами нивелир и рейку и выполняют те же операции в точке B , получают высоту прибора и отсчет по рейке. Превышение Δh , свободное от предполагаемой погрешности x , в каждом случае нивелирования можно определить по формулам:

$$\Delta h = b_1 + x - a_1; \Delta h = b_2 - a_2 - x; \Delta h = (b_1 - a_2)/2 - (a_1 - b_2)/2.$$

Значение погрешности

$$x = (a_1 + b_2)/2 - (a_2 + b_1)/2. \quad (8.2)$$

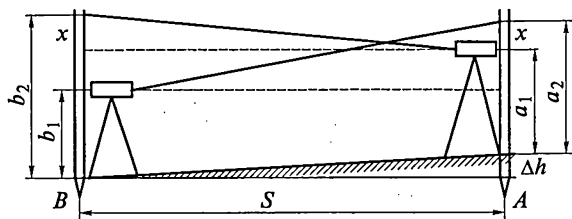


Рис. 8.11. Первый способ проверки нивелира

Если значение x более 4 мм, выполняют юстировку нивелира, не нарушая его установки в точке B . Вычисляют отсчет $a = a_1 - x$ и устанавливают на него горизонтальную нить сетки нитей элевационным винтом, а затем исправительными винтами цилиндрического уровня совмещают изображения концов пузырька уровня в поле зрения трубы.

Второй способ заключается в том, что нивелирование из середины линии сочетают с нивелированием «вперед», т.е. однажды устанавливают нивелир вместо рейки, как в первом способе. Это позволяет в первой позиции получить превышение без ошибки x , а во второй — вся ошибка войдет в определенное превышение. Отсюда возможно определение ошибки и введение поправки после вычисления правильного отсчета в последней позиции.

Перечисленные способы вызывают некоторое затруднение из-за неудобства измерения высоты прибора над точкой. Этого неудобства лишен третий способ.

Третий способ — это нивелирование с разными плечами, т.е. с разными расстояниями от нивелира до реек. В первой позиции нивелир устанавливают в середине линии длиной около 100 м достаточно точно. На концах линии AB располагают рейки. Прибор горизонтируют и берут отсчеты a_1 и b_1 , которые в одинаковой степени искажены погрешностью x , и тогда точное пре-

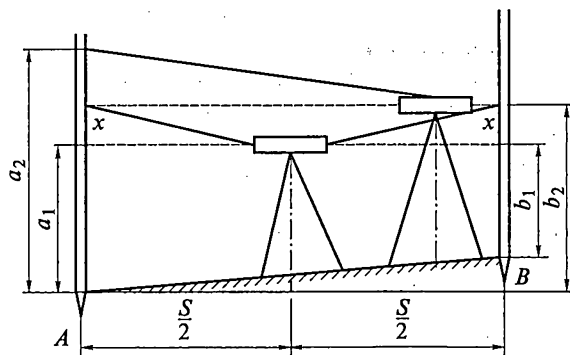


Рис. 8.12. Третий способ проверки нивелира

шение $\Delta h = a_1 - b_1$ (рис. 8.12). Затем нивелир устанавливают за (или перед) одной из реек на расстоянии 2—3 м от нее. Прибор горизонтируют и берут отсчеты по рейкам: по ближней b_2 и дальней a_2 . Погрешность x почти полностью входит в отсчет a_2 , тогда как отсчет b_2 почти полностью без погрешности, поэтому при расхождении предварительно вычисленного отсчета по дальней рейке $a = b_2 - \Delta h$ от фактического a_2 более чем на 4 мм выполняют юстировку нивелира так же, как и в первом способе.

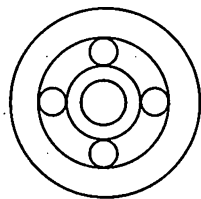


Рис. 8.13. Перемещение пузырька уровня при проверке компенсатора

Поверки нивелира с компенсатором не отличаются от поверок нивелира с уровнем. Юстировку же при проверке главного условия выполняют путем перемещения сетки нитей на предварительно вычисленный (правильный) отсчет по рейке с учетом особенностей крепления сетки в окулярной части трубы.

С помощью специальной проверки определяют исправность компенсатора. Нивелир устанавливают в рабочее положение по круглому уровню и производят отсчет по рейке, отстоящей от прибора на 30—40 м. Затем вращением подъемного винта, расположенного по направлению линии визирования, перемещают пузырек уровня в разных направлениях в пределах окружности, нанесенной на ампуле (рис. 8.13). Аналогичные перемещения пузырька производят одним из боковых винтов в поперечном направлении. Если при этом отсчет по рейке будет изменяться в пределах не более 2 мм, нивелир исправен. В противном случае он нуждается в заводской юстировке.

8.5. Производство геометрического нивелирования

Конечная цель нивелирования может быть различной:

- получение абсолютных или условных высот отдельных точек, или превышений между ними, например отметок скважин, горизонтов в разрезах и обнажениях, уровня вод и др.;
- получение профилей местности, необходимых при ландшафтных, геоморфологических, геоботанических, геоэкологических и других исследованиях;
- получение общей картины рельефа земной поверхности и ее динамики на больших или малых площадях, например, при мелиоративных, геологических и геоморфологических исследованиях и, наконец, топографических съемках и картографировании.

Эти задачи решаются в зависимости от объема и точности работ, на основе государственной высотной сети, специальных сетей и способами не столь высокоточного технического нивелирования.

Техническое нивелирование с целью получить профиль местности проводят в виде ходов, которые могут быть *замкнутыми* и *разомкнутыми*, опирающимися на два репера. Расстояние между отдельными точками (пикетами), высоты которых предстоит получить в ходе нивелирования, берется равным 100 м по горизонтальному проложению.

Следует обратить внимание на специальные термины. *Репером* называют нивелирный знак, закрепленный на местности и имеющий высотную отметку. Реперы бывают стенные, скальные и грунтовые. Они бывают также постоянными и временными. Точки нивелирного хода, высоты которых определяются в процессе прокладки профиля, являются временными. Их называют *пикетами* и отмечаются буквами П или ПК.

Работа в поле. Полевые работы начинают с разбивки хода. Вдоль трассы хода откладывают стороны по 100 м, концы их закрепляют пикетами, которые нумеруют по порядку. Если профиль вычерчивать не предполагается и требуется только передать высотную отметку от одного репера к другому, то нивелирование можно продельвать по башмакам или костылям, не закрепляя точки на местности, а расстояния между точками разрешается увеличивать до 150 м.

Работа на нивелирной станции. 1. Нивелир устанавливают между пикетами на равном расстоянии от них; систематический отход (даже небольшой) от середины линии может привести к накоплению ошибки в результатах работы.

2. Нивелир устанавливают прочно на грунте, как и колышки на точках, во избежание оседания нивелирного штатива, плохо забитых колышков или башмаков в процессе работы.

3. Реечники устанавливают рейки на колышках пикетов и поддерживают их во время работы в вертикальном положении. Этому помогают уровни, закрепленные на рейках. Удобно также пользоваться приемом покачивания рейки в плоскости наблюдения. Нивелировщик при этом фиксирует наименьший отсчет, который и будет соответствовать вертикальному положению рейки.

4. Порядок взятия отсчетов такой: назад по черной стороне рейки, вперед по черной стороне, вперед по красной стороне и назад по красной стороне рейки. Такой порядок необходим, чтобы своевременно установить изменения в пространстве прибора и реек, если это произойдет. По этой же причине не рекомендуется работать при большом ветре.

5. При отсчете по рейке следует внимательно отсчитывать сантиметры, дециметры и особенно миллиметры, которые берутся на глаз. В момент отсчета концы пузырька уровня в поле зрения трубы должны быть совмещены с помощью элевационного винта.

В летнее время при большом нагреве прибора солнцем увеличиваются размер и подвижность пузырька цилиндрического уровня, что сильно мешает работе. Пузырек можно уменьшить, для

чего в нивелирах есть специальная камера, куда можно загнать часть пузырька.

6. Наблюдения записывают в специальном журнале. При этом категорически запрещается вырывать листы, стирать ластиком, исправлять цифру по цифре, переписывать начисто, вести черновые записи. Записи производят только простым карандашом соответствующей твердости. Ошибочно записанное зачеркивают одной чертой, чтобы можно было прочитать написанное, которое может оказаться верным. Писать нужно четко и не забывать ставить знаки плюс и минус, где они должны быть.

7. После окончания наблюдений тут же подсчитывается так называемая «разность» пятков, т.е. разность отсчетов по красной и черной стороне рейки на один пикет: она должна быть постоянной и равной начальному отсчету на конце красной стороны рейки. Другой способ проверки результатов — по расхождению вычисленных по красным и черным сторонам реек превышений. Расхождения в обоих случаях не должны превышать 5 мм, иначе работу надо повторить, заново установив нивелир.

8. По окончании работы на станции нивелировщик переходит на следующую, передний реечник остается на месте, а задний, обогнав его, переходит вперед. Это делается для того, чтобы не накапливалась ошибка из-за некоторой неточности в начальных отсчетах на концах двух реек.

Уравнивание нивелирного хода. Как видно из рис. 8.14, для разомкнутого хода должно иметь место равенство $\sum \Delta h = H_B - H_A$. Для замкнутого хода $\sum \Delta h = 0$. На самом деле будет образовываться погрешность:

для замкнутого хода

$$f_{\Delta h} = \sum \Delta h; \quad (8.3)$$

для разомкнутого хода

$$f_{\Delta h} = \sum \Delta h - (H_B - H_A). \quad (8.4)$$

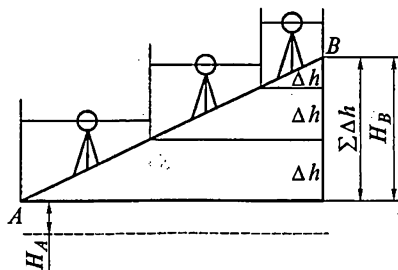


Рис. 8.14. Уравнивание нивелирного хода

Допустимая погрешность тем меньше, чем выше класс и, следовательно, установленная точность нивелирных работ. Для случая технического нивелирования допускается ошибка

$$f_{\Delta h} = 50\sqrt{L}, \quad (8.5)$$

где L — длина хода.

Специальные случаи нивелирования. Если нивелирование ведется по достаточно крутому склону и общее превышение между двумя пикетами таково, что нивелирование становится невозможным из-за отсутствия видимости рейки в визирную трубу, то стандартный 100-метровый отрезок между пикетами разбивается рядом «иксовых» точек, между которыми нивелирование производится по тем же правилам, как между пикетами. При обработке хода следует помнить, что «иксовые» точки, как и пикетные, являются связующими, т. е. общими для двух смежных станций. Если расстояние между иксовыми точками слишком мало, что затрудняет наведение на резкость изображения рейки в трубе, то нивелир выносится поочередно вправо и влево от хода, как это показано на рис. 8.15.

Если между пикетами на местности есть формы рельефа, которые следует потом отметить на профиле, то в поле берут отсчеты на так называемые «плюсовые» точки. По окончании основных наблюдений и контроля работы на станции задний реечник, отправляясь вперед, попутно встает (без колышков) на одной-двух характерных точках рельефа и по рейке (только черной стороне) берется отсчет. Эти точки (рис. 8.16) обозначаются знаком «+» и количеством метров, считая от младшего (заднего пикета).

Плюсовые точки не являются связующими, и при уравнивании хода их не принимают во внимание. Их высоты вычисляют дополнительно, когда получены уравнированные высоты пикетов и

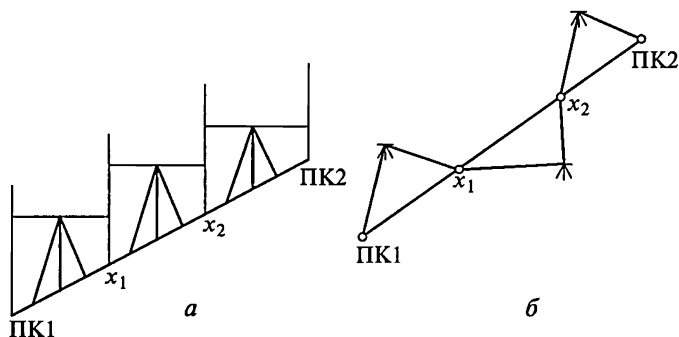


Рис. 8.15. Нивелирование крутого склона:

a — профиль; b — план

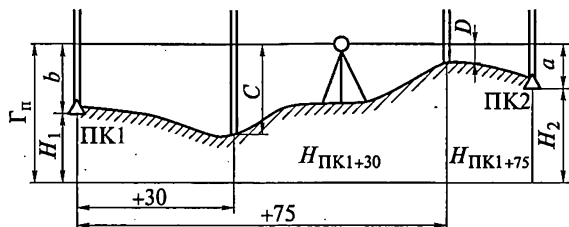


Рис. 8.16. Вычисление горизонта прибора и высот плюсовых точек

иксовых точек. Первоначально вычисляют «горизонт прибора», т. е. абсолютную отметку луча визирования. Для этого к абсолютной отметке заднего пикета прибавляют отсчет по черной стороне рейки:

$$\Gamma_{\text{п}} = H_1 + b. \quad (8.6)$$

Затем из горизонта прибора вычитают по очереди отсчеты на плюсовые точки и получают их отметки:

$$\Gamma_{\text{п}} - C = H_{\text{ПК1}+30}, \quad \Gamma_{\text{п}} - D = H_{\text{ПК1}+75}. \quad (8.7)$$

Особой задачей является нивелирование через препятствие, чаще всего — это реки. Известны два способа. Первый заключается в том, что у самого уреза воды выкапывают ямки с двух сторон реки. Они заполняются просачивающейся речной водой, и уровень воды в них устанавливается, как можно полагать, единый (рис. 8.17, а). Тогда при одновременном нивелировании по рейкам, установленным по урезу воды в лунках, можно перебросить отметку с берега на берег. Впрочем, на крутых поворотах реки с мощным течением отметка уреза воды левого и правого берегов может быть неодинаковой.

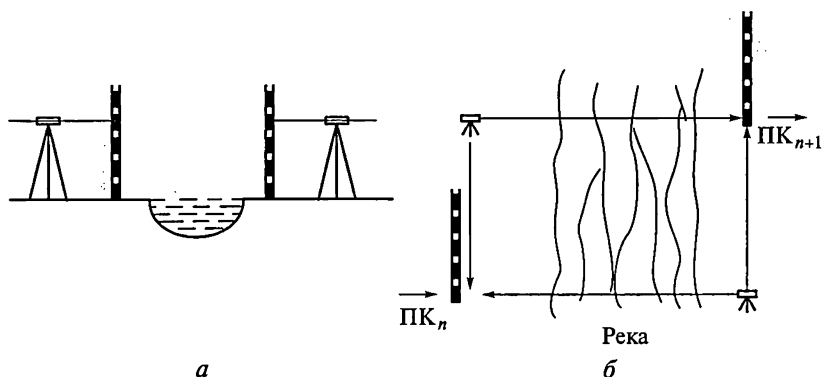


Рис. 8.17. Нивелирование через реку по урезам воды (а) и двойным ходом (б)

Другой способ, как это видно на рис. 8.17, б, заключается в двойном нивелировании пикетов, установленных на противоположных берегах.

8.6. Тригонометрическое нивелирование

Принцип тригонометрического (геодезического) нивелирования (рис. 8.18). Измерив расстояние D между точками A и B , а также угол наклона v , можно вычислить превышение

$$\Delta h = D \operatorname{tg} v. \quad (8.8)$$

На самом деле формула тригонометрического нивелирования получается несколько более сложной. Рассмотрим рис. 8.19. При сделанных обозначениях запишем

$$\Delta h' = D \operatorname{tg} v; \Delta h = \Delta h' + i - l + r; \Delta h = D \operatorname{tg} v + i - l + r, \quad (8.9)$$

где $r = \Delta_h + \Delta_r$ — поправка за кривизну Земли (Δ_h) и рефракцию (Δ_r). Поправка r принимается во внимание при $D > 300$ м; $\Delta h'$ — превышения, для которых составлены таблицы и построены номограммы, в том числе введенные в поле зрения таких приборов, как кипрегель и тахеометр, предназначенных для топографических съемок; i — высота прибора; l — высота наведения (по рейке). Для упрощения расчетов в поле делают так, чтобы эти величины были равны. При этом используют завязки на рейках и специальные раздвижные рейки, на которых начало отсчета можно устанавливать на высоту прибора. Измерение вертикального угла v производят от горизонтальной линии вверх со знаком плюс и вниз — со знаком минус. Таким образом, этот угол не может быть больше 90° , а практически он еще меньше. Сложности возникают с воссозданием горизонтальной линии. Она устанавливается с помощью уровня, но как бы он не был исправен, всегда остается некоторая ошибка. Поэтому возникает так называемое место нуля (МО).

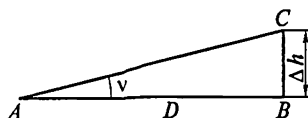


Рис. 8.18. Принцип тригонометрического нивелирования

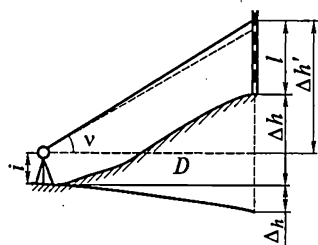


Рис. 8.19. Вывод формулы тригонометрического нивелирования

Определение места нуля. Предположим, мы добились того, что визирная ось совершенно горизонтальна, а пузырек цилиндрического уровня выведен на середину. Очевидно, что в этой ситуации угол будет равен 0° и, следовательно, отсчет по вертикальному кругу должен быть 0 или 90° в зависимости от того, как поделен на градусы лимб вертикального круга. На самом деле этого, как правило, не происходит.

Действительный отсчет по вертикальному кругу, когда пузырек уровня при вертикальном круге выведен на середину, а оптическая ось трубы горизонтальна, называется *местом нуля*.

Место нуля иногда истолковывается так же, как угол между действительной горизонтальной линией и той, которую принимают за горизонтальную при измерениях вертикального угла. В этом случае МО должно иметь знак.

Визирная ось трубы (рис. 8.20) была дважды наведена в точку A при положении вертикального круга слева (Л) и справа (П). На чертеже обозначено: KK_1 — визирная ось трубы, HH_1 — истинная линия горизонта, $I-I$ и $II-II$ — условные линии горизонта, МО — место нуля, П и Л — отсчеты по лимбу вертикального круга при его положении справа и слева.

Как видно из рис. 8.20, a , $v = П - МО$, а на рис. 8.20, б

$$v = (180^\circ - Л) + МО, \text{ или } v = МО - (Л - 180^\circ).$$

Из этих формул найдем общие формулы:

$$v = \frac{П - (Л - 180^\circ)}{2}; \quad МО = \frac{П + (Л - 180^\circ)}{2}. \quad (8.10)$$

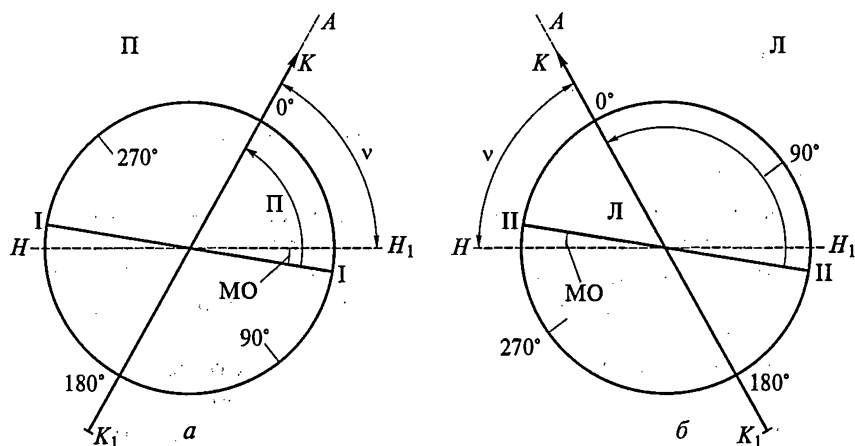


Рис. 8.20. Вывод формулы для определения МО и угла v для прибора, вертикальный круг которого разделен от 0 до 360° по часовой стрелке:

a — круг справа (П); $б$ — круг слева (Л)

Поскольку оцифровка вертикального круга у различных приборов отличается друг от друга, то и формулы для определения v и $МО$ также будут разными. Приведем основные из них.

1. Приборы с вертикальными кругами, разделенными от 0 до 360° против хода часовой стрелки (теодолиты Т5, Т30), $МО = 0^\circ$:

$$МО = \frac{П + Л + 180^\circ}{2}; v = Л - МО; v = МО - П - 180^\circ.$$

2. Теодолиты 2-й модели и выше (2Т30, 2Т30П, 4Т30П и др.) имеют вертикальный круг с секторной оцифровкой. Она позволяет определять v без дополнительных вычислений. Круг разделен на секторы: -75° и $+75^\circ$, $МО = 0^\circ$:

$$МО = \frac{Л + П}{2}; v = Л - МО; v = МО - П.$$

3. Кипрегель КН. Круг разделен на секторы: -90° и $+90^\circ$, $МО = 0^\circ$.

$$МО = \frac{П - Л}{2}; v = П - МО; v = Л + МО.$$

Для нормальной работы требуется, чтобы $МО$ сохраняло постоянство в процессе измерений, а его значение было небольшим. Существует несколько приемов исправления места нуля.

Вариант 1. Определить место нуля. Вычислить отсчет, соответствующий исправленному $МО$.

Установить правильный отсчет на лимбе вертикального круга перемещением трубы, но при этом сместится пузырек уровня.

Сдвинуть пузырек уровня при вертикальном круге исправительным винтом уровня на середину.

Пример (для оптического теодолита Т30П).

$$Л = +4^\circ 43'; П = -4^\circ 40'; МО = (4^\circ 43' - 4^\circ 40')/2 = 1,5';$$

$$v = Л - МО = +4^\circ 43' - 1,5' = +4^\circ 41,5';$$

$$v = МО - П = +1,5' + 4^\circ 40' = +4^\circ 41,5'.$$

Правильный отсчет при $Л = +4^\circ 41,5'$.

Вариант 2. Вывести пузырек уровня на середину. С помощью винтов трубы поставить отсчет на лимбе вертикального круга равным $МО$. Движением уровня свести $МО$ на 0° . Сместившийся при этом пузырек уровня вернуть на середину исправительными винтами уровня.

У теодолитов, не имеющих уровня при вертикальном круге, исправление $МО$ делается перемещением юстировочными винтами сетки нитей после того, как на вертикальном круге поставлен правильный отсчет (правильный отсчет устанавливается на вертикальном круге при соответствующем его положении). При этом перекрестие сетки нитей сместится с изображения наблюдаемой точки. Сняв колпачок с окуляра, закрывающий доступ к юсти-

ровочным винтам сетки нитей, перемещают ими сетку нитей до совмещения ее перекрестия с изображением наблюдаемой точки. В процессе юстировки необходимо следить за положением пузырька уровня и в случае смещения вывести его в среднее положение подъемными винтами подставки.

Номограммные геодезические приборы. К ним относятся ранее выпускавшиеся приборы: кипрегели КН и КА-2; тахеометры ТН, Та-2 и др. В поле зрения труб этих приборов помещены специальные номограммы, с помощью которых определяют расстояния и превышения. Номограммы в виде системы кривых наносят на стеклянную пластинку. Визуально номограмма накладывается определенным образом на дальномерную рейку так, чтобы основная (начальная) кривая попала на нулевой штрих рейки. После этого отсчет по рейке в пересечении с кривыми номограммы позволяет сразу получать и редуцированные (приведенные к горизонтальному положению) расстояния и превышения.

Рассмотрим, как берется отсчет при работе с кипрегелем КН. Устройство прибора КН требует, чтобы начало отсчета на рейке каждый раз было на высоте прибора. Для этого используют специальную раздвижную рейку. На стеклянный вертикальный круг кипрегеля КН нанесены номограммы превышений и расстояний, которые системой призм подаются в поле зрения трубы. Номограммы представлены тремя парами кривых превышений с коэффициентами ± 10 , ± 20 и ± 100 и рассчитаны для измерения при углах наклона от -40° до $+40^\circ$; номограммы расстояний с коэффициентами 100 и 200. Под начальной (нулевой) кривой расположена шкала лимба, оцифрованная через 1° . Одно деление лимба равно $5'$. В шкале указан знак угла. При работе с кипрегелем используют рейки с выдвижной пятой, которая устанавливается на высоту прибора i , а в поле зрения трубы начало отсчета по рейке совмещается с начальной кривой.

Для контроля превышений и расстояний они получают при одном наблюдении дважды, как это показано на рис. 8.21.

Прокладка и обработка высотного тригонометрического хода. Высотный ход может быть замкнутым на один репер и разомкнутым, опирающимся на два репера. Высотный ход прокладывается для получения сети высотных точек, используемых для разных целей, в частности для обоснования топографической съемки. Тогда он прокладывается по точкам

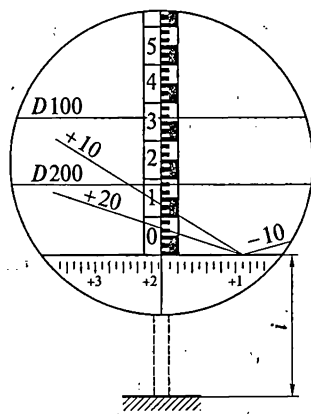


Рис. 8.21. Поле зрения трубы кипрегеля КН (при круге слева)

теодолитного или мензульного хода. Но он может также предназначаться для построения географических профилей и др. Если ход прокладывается самостоятельно, то на местности предварительно разбивается полигон и отмечаются точки наблюдения. Расстояния при этом измеряют с помощью нитяного дальномера. При тахеометрической съемке высотный ход прокладывается в процессе самой съемки, он составляет ее часть.

В процессе полевых работ прибор (теодолит, тахеометр, мензулу с кипрегелем) устанавливают на каждой точке хода, центрируют со значительным приближением, горизонтируют прибор и производят измерения вертикальных углов вперед по ходу и назад. Таким образом для последовательной пары точек превышение измеряется дважды. Результат должен получиться равным по абсолютной величине, но обратным по знаку. Допустимое расхождение зависит от назначения хода или масштаба съемки.

Завершенный полевыми наблюдениями и измерениями ход уравнивается следующим образом.

Для замкнутого хода теоретически должно быть

$$\sum \Delta h = 0. \quad (8.11)$$

Для разомкнутого хода

$$\sum \Delta h - (H_{\text{кон}} - H_{\text{нач}}) = 0. \quad (8.12)$$

На самом деле из-за неточности измерений и неистинности высот конечных точек возникает некоторая погрешность

$$f_{\Delta h} = \sum \Delta h - (H_{\text{кон}} - H_{\text{нач}}). \quad (8.13)$$

Допустимая невязка хода

$$f_{\text{доп}} = (0,04P) / (100\sqrt{n}), \quad (8.14)$$

где P — периметр хода; n — число точек хода.

Невязка с обратным знаком распределяется по всем превышениям пропорционально длинам сторон хода. Затем, последовательно прибавляя или отнимая очередное превышение к очередной полученной абсолютной отметке, получают отметки всех точек.

8.7. Физические методы нивелирования

Существуют различные способы физического нивелирования, основанные на использовании физических законов и измерении соответствующих физических величин.

Барометрическое нивелирование. Основано на использовании зависимости между атмосферным давлением и высотой точек местности. Используется для определения превышений в гористой местности и в тех случаях, когда приемлемо определение высот с

пониженной точностью. Задача состоит в одновременном измерении атмосферного давления в двух точках. Зависимость атмосферного давления от высоты над уровнем моря и ряда метеорологических условий в момент измерений описывается полной барометрической формулой, которую предложил еще П. Лаплас.

Однако на практике пользуются более простыми эмпирическими формулами М. В. Певцова и Бабинне.

Рабочая формула Певцова выведена для широт в 55° и среднего давления 740 мм рт. ст.:

$$\Delta h = 1874(1 + 0,003665t)P_1 / P_2,$$

где P_1 и P_2 — давление атмосферы в точках 1 и 2; t — температура воздуха.

Для измерения атмосферного давления применяют барометры. Они бывают ртутные, безжидкостные пружинные, или барометры-анероиды, и дифференциальные. Наиболее точные результаты дают ртутные барометры, но они неудобны для полевых работ. Одновременно с давлением измеряют и температуру воздуха термометром-пращем.

Также часто используют сокращенную формулу Бабинне:

$$\Delta h = 16\,000 \{1 + 0,004(t_1 + t_2)/2\} / (B_1 - B_2) / (B_1 + B_2),$$

где B_1 и B_2 — давление в точках 1 и 2; t_1 и t_2 — температура воздуха в тех же точках.

На практике по сокращенным формулам вычисляют данные, по которым составляют барометрические таблицы, используемые при определении высот. Все расчеты делают от уровня моря, поэтому их можно считать абсолютными. Получаются они приближенными, с достаточно большой погрешностью, так как остаются неизвестными температура воздуха и давление на уровне море в момент нивелирования.

Расчеты можно производить, основываясь на знании так называемой барометрической ступени. *Барометрической ступенью* называют расстояние (в м) по высоте, которое соответствует изменению давления на единицу измерения, например 1 мм рт. ст. Величина барометрической ступени зависит от давления воздуха и температуры, поэтому необходимо вводить соответствующие поправки.

Атмосферное давление измеряют, как уже было сказано, приборами двух типов: *ртутными барометрами*, которые устанавливаются стационарно, например, на метеостанциях, и *барометрами-анероидами*, которыми пользуются на полевых работах.

Барометры градуируются в миллибарах (мбар) или миллиметрах ртутного столба (мм рт. ст.). Некоторые анероиды градуированы в абсолютных высотах, исходя из барометрической ступени, вычисленной при условии, что на поверхности моря давление

составляет 760 мм рт. ст. при 0°C . Чтобы получить значение давления, приведенное к этим условиям, в отсчеты по anerоиду вносят ряд поправок: шкаловая, температурная (самого барометра), добавочная (индивидуальная для данного барометра).

Барометрическое нивелирование выполняется в виде замкнутых или двойных (туда и обратно) ходов. За исходную или опорную точку по возможности выбирают метеостанцию, на которой систематически ведется наблюдение за атмосферным давлением. Работу осуществляют с помощью одного, но чаще двух anerоидов и более. Барометр-анероид требует аккуратного обращения на маршруте. Чтобы гарантировать выполнение работы, в маршрут берут несколько приборов.

Первое и последнее измерения давления производят на опорном пункте. Если это метеостанция, показания anerоидов сверяют со стационарным барометром. Если опорный пункт выбран произвольно, один из anerоидов остается на нем вместе с наблюдателем, который должен вести систематическое наблюдение за ходом атмосферного давления каждые 15—20 мин. Прокладка всего хода не может быть растянута на длительное время, так как при этом ошибка определения высот возрастает. Обычно длительность хода рассчитана на 3—4 ч, чтобы достаточно точно учесть природные изменения давления и температуры воздуха.

Современные приборы барометрического нивелирования позволяют при благоприятной погоде и хороших условиях хранения приборов при переноске, заботе об их сохранности в пути определять превышения точек местности с точностью 0,5 м и выше.

Гидростатическое нивелирование. Основано на свойстве жидкости устанавливаться в сообщающихся сосудах на одном уровне. Например, превышение h между точками A и B получается по разности высот столбов жидкости a и b в сообщающихся сосудах: $h = a - b$ (рис. 8.22.). Обычно на стенках сообщающихся сосудов имеются шкалы с делениями. Этот метод позволяет определять превышения между точками при отсутствии взаимной видимости, но измеряемые превышения не должны быть больше размера сосудов, соединенных шлангами. Современные конструкции гидростатических нивелиров бывают самые разнообраз-

ные и позволяют замерить превышение между точками с точностью до десятых и даже сотых долей миллиметра.

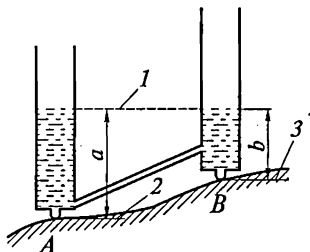


Рис. 8.22. Гидростатическое нивелирование:
1 — горизонт жидкости; 2 — горизонт точки A ;
3 — горизонт точки B

Спутниковое нивелирование. Основано на определении координат точек местности или высот водной поверхности с использованием глобальных спутниковых систем (см. подразд. 7.4). В зависимости от применяемых технологий и спутниковых приемников координаты могут определяться с точностью 1 м до сантиметров и точнее.

Нивелирование механическими приборами. Механические приборы применяют для быстрого нивелирования невысокой точности. Они обычно автоматически вычерчивают профиль местности или показывают отметки отдельных высот. Действие таких механизмов основано на применении отвеса-маятника, который в процессе движения остается в вертикальном положении. Такие нивелирные системы монтируются на каком-либо транспортном средстве. Из отечественных следует отметить нивелир-«автомат» М. Артанова, смонтированный на двухколесном велосипеде без надувных шин. Был также сконструирован высотомер такого типа, установленный на автомашине.

Такие приборы были поставлены на двух советских «луноходах». Автоматы позволяли определять профиль трассы луны и наклон местности от нее вправо и влево.

Аэрорадионивелирование. Данный метод заключается в определении превышений точек земной поверхности с помощью радиовысотомера, поставленного на летательных аппаратах-самолетах. В полете одновременно измеряется высота полета (обычно высоты фотографирования) радио- или лазерным высотомером и ведется запись разности высот точек трассы полета (точек, в которых выполняют фотографирование) так называемым дифференциальным барометром-статоскопом. Показания статоскопа позволяют судить о наклоне изобарической поверхности, т.е. систематическом изменении естественного давления вдоль трассы полета, и учесть это при вычислениях высот.

Стереοфотограмметрический метод. Этот метод позволяет на основе обработки пары снимков одного и того же места, полученных в двух точках, определять превышения между точками (см. гл. 13). Точность метода зависит от масштаба снимков, технологии их обработки и других причин.

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СЕТИ

9.1. Общие сведения о геодезических сетях

Геодезическая сеть — это совокупность закрепленных и обозначенных на местности пунктов, плановое положение и высоты которых определены в единой системе координат и высот путем геодезических измерений.

Геодезические сети строят для научных целей, а также изучения и освоения территории страны, в том числе для съемки и изысканий под проектирование и проведение хозяйственных мероприятий: строительства, мелиорации, горного дела и т.д. Для этого геодезические сети должны покрывать всю территорию страны сплошь с необходимой густотой и точностью определения положения пунктов.

Построение и поддержание в надлежащем состоянии геодезических сетей у нас в стране составляют задачу государственной топографо-геодезической службы. Это работа сложная и организационно, и технически, к тому же дорогостоящая. Поэтому принимаются все меры для сохранения в натуре сети геодезических пунктов.

Геодезические сети строятся «от общего к частному», т.е. от высокоточных, но редких сетей, к более густым, но менее точным. Они включают ряд ступеней: 1) государственные сети, обеспечивающие любые работы на местности; 2) сети сгущения на отдельных конкретных участках; 3) съемочные сети для топографических работ; 4) специальные геодезические сети, создаваемые, например, на геодинамических полигонах.

Геодезические сети, перечисленные в пунктах 2—4, как правило, создаются в местных системах координат (МСК), имеющих в большинстве случаев связь с государственной системой координат. Государственные геодезические сети делятся на плановые, высотные и гравиметрические. Гравиметрические сети создаются для изучения гравитационного поля Земли.

9.2. Государственные плановые сети

Государственная астрономо-геодезическая сеть на территории Российской Империи и СССР создавалась более 100 лет и была завершена к началу 1980-х годов. По точности она делится на четыре класса (1—4) и включает 334 тыс. пунктов.

Сеть 1 класса развивалась для научных исследований и построения единой системы координат на всей территории страны. Она разрабатывалась, как правило, методами триангуляции и полигонометрии. Триангуляционную сеть строили в виде рядов треугольников, образующих четырехсторонние полигоны со сторонами 170—200 км (рис. 9.1). Ряды треугольников были проложены преимущественно вдоль меридианов и параллелей. В пересечении рядов создавали базисные сети, измеряли длины базисов. На концах базисов или выходных (базисных) сторон производили астрономические определения долгот, широт и азимутов, необходимые

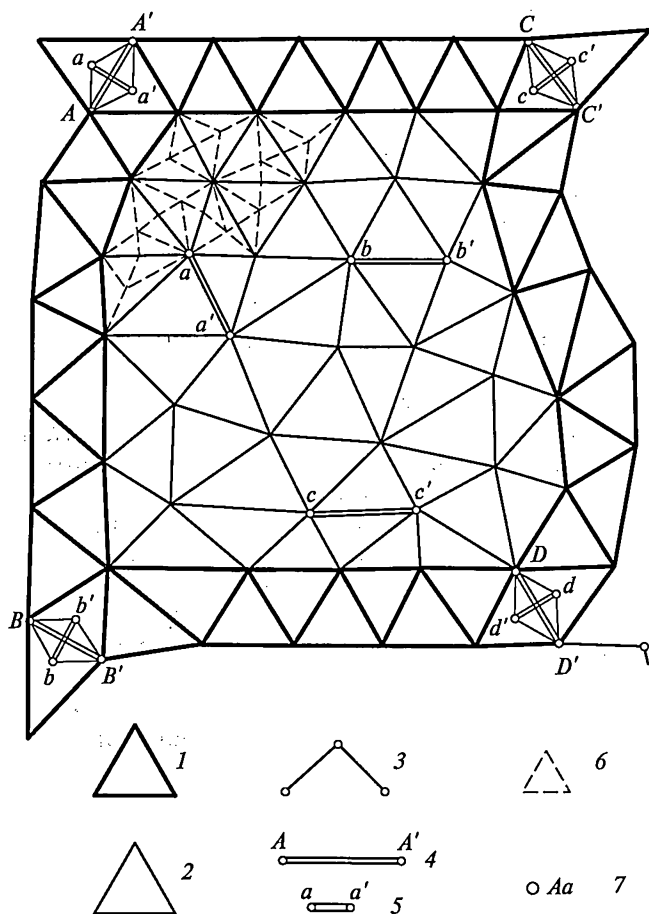


Рис. 9.1. Построение триангуляционной сети:

1 — триангуляция 1 класса; 2 — триангуляция 2 класса; 3 — полигонометрический ход; 4 — базисная (выходная) сторона; 5 — базис; 6 — триангуляция 3 и 4 классов; 7 — пункт Лапласа

для редуцирования сети на поверхность референц-эллипсоида. Это так называемые пункты Лапласа. Поэтому сети 1 и 2 классов называют астрономо-геодезическими сетями (АГС). Они составляли главную плановую геодезическую основу страны.

Стороны треугольников выбирали от 20 до 25 км. Допустимая погрешность в определении углов треугольника — $0,7''$. Погрешности в определении длин сторон треугольников допускались в пределах 7—10 см. Общая погрешность в 200-километровом звене триангуляции составляла 0,6 м.

Относительная погрешность положения пунктов триангуляции задавалась настолько малой, что при дальнейшем развитии сети пункты 1 класса можно считать определенными безошибочно.

Внутри полигонов триангуляции 1 класса была построена сплошная сеть треугольников 2 класса. В свою очередь, она заполнена сетями триангуляции 3 и 4 классов. Стороны треугольников 2 класса имеют длину от 7 до 20 км, в среднем 13 км. Длины сторон треугольников 3 класса составляют 5—8 км, а 4 класса — 2—5 км. Внутри сплошной сети 2 класса через 20—25 км определяли длины базисов, необходимых для уравнивания сети.

Углы треугольников 2 класса измеряли со средней квадратической погрешностью, не превышающей $1''$, на пунктах 3 класса погрешность не должна быть более $1,5''$, а 4 класса — $2''$.

Закрепление пунктов. Каждый пункт триангуляции надежно закрепляют на местности. Типы закладываемых центров зависят от физико-географических условий в районе работ и особенно от состава грунтов и глубины промерзания или оттаивания почвы. Центр или несколько центров (блоков) строго один над другим (рис. 9.2) закладывают в котловане, вырытом ниже глубины промерзания грунта, в песках на глубине до 6 м, в многолетней мерзлоте центр «вмораживался». В верхнюю поверхность центров заделывают чутунные марки с обозначением точкой-отверстием или крестом. Над центрами устанавливают пирамиды или сигналы высотой до 60 м. Сам металлический центр прикрывают грунтом. Сигналы сооружали из дерева (рис. 9.3, б), пирамиды — из дерева или металла (рис. 9.3, а), иногда разборными. Пункт окапывался во избежание потери знака и подлежал государственной охране.

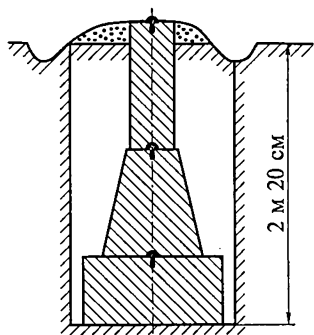


Рис. 9.2. Закладка центра пункта триангуляции 1 класса

Плотность пунктов геодезической сети. Необходимо заметить, что если сеть пунктов 1 и 2 классов покрывает обширные пространства страны, по возможности сплошь, то сети 3 и осо-

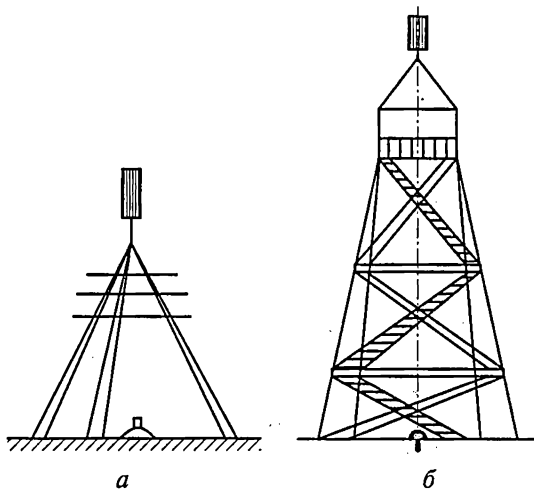


Рис. 9.3. Геодезические сигнал (а) и пирамида (б)

бенно 4 классов развивались по мере надобности, например, для обеспечения топографических съемок.

Создание электронных дальномеров, при помощи которых стали возможными измерения длин линий с высокой точностью, позволило применять их для развития геодезических сетей методом трилатерации, а также в некоторых случаях взамен рядов треугольников прокладывать полигонометрические ходы, равноценные по точности триангуляции. Полигонометрия также делится по точности на четыре класса.

Плотность государственной геодезической сети (ГГС) 1—4 классов составляет в среднем один пункт на 38 км^2 (в малообжитых и труднодоступных районах — один пункт на $75—90 \text{ км}^2$). ГГС создают подразделения Роскартографии и Военно-топографической службы (ВТС). Пункты ГГС обеспечивают мелкомасштабное картографирование страны вплоть до масштаба $1 : 10\,000$. Для топографической съемки более крупного масштаба различными ведомственными и частными организациями создаются геодезические сети сгущения (ГСС) 1 и 2 разрядов в местных системах координат (МСК). В городах геодезические сети строят с более короткими сторонами, чем в ГГС, и количество геодезических пунктов в населенных местах исчисляется тысячами, а в больших городах — десятками тысяч. Плотность геодезического обоснования в зонах застроенной территории и активной народно-хозяйственной деятельности должна составлять 3—4 пункта на 1 км^2 . Почти все местные геодезические сети, создаваемые в МСК, привязываются к ГГС.

Современное состояние ГГС. За период с 1989 по 1995 г. на территории нашей страны были определены точные координаты пунк-

тов методами космической (25) и спутниковой геодезии (162). В результате раздельной и совместной математической обработки результатов измерений космической, спутниковой и астрономо-геодезической (АГС) сетей получена сеть опорных пунктов, обеспечивающая при расстояниях между смежными пунктами в среднем 400—450 км точность их взаимного положения 0,3—0,4 м (1 : 1 000 000) по широте и 0,4—0,5 м (1 : 850 000) по долготе; при расстояниях 10—12 км — 3—5 см (1 : 250 000). Точность передачи координат на восточную часть сети составляет 1 м. На основе совместной математической обработки сетей создана система координат 1995 г. (СК-95), ориентированная на использование глобальных спутниковых систем позиционирования.

Однако быстрое развитие науки и производства требуют обновления ГГС на качественно новом, более высоком уровне точности. Построение такой сети начато в 1999 г. Сеть, как и прежде, строится по принципу от общего к частному. Она включает в себя геодезические построения различных классов точности:

- фундаментальную астрономо-геодезическую сеть (ФАГС);
- высокоточную геодезическую сеть (ВГС);
- спутниковую геодезическую сеть 1 класса (СГС-1);
- астрономо-геодезическую сеть 1 и 2 классов;
- геодезическую сеть сгущения 3 и 4 классов.

Сеть ФАГС создается в целях создания и долгосрочного поддержания высокоточной трехмерной геоцентрической системы координат. Сеть ФАГС включает в себя: постоянно действующие пункты и обсерватории для наблюдения за ИСЗ и другими космическими объектами; периодически определяемые пункты, наблюдения на которых планируется повторять через интервал не более 10 лет. Пункты ФАГС равномерно располагаются на территории страны с расстоянием между смежными пунктами 650—1 000 км. На пунктах ФАГС определяются абсолютные значения ускорения свободного падения (силы тяжести) и они геодезически связываются с пунктами АГС и реперами главной высотной основы.

Пространственное положение пунктов ФАГС определяется методами космической геодезии в геоцентрической системе координат относительно центра масс Земли со средней квадратической погрешностью 10—15 см, а средняя квадратическая погрешность взаимного положения пунктов ФАГС должна быть не более 2 см по плановому положению и 3 см по высоте с учетом скоростей их изменения во времени.

Пункты ВГС опираются на пункты ФАГС и удалены один от другого на 150—300 км. Основные функции ВГС состоят в дальнейшем распространении на всю территорию России геоцентрической системы координат и уточнении параметров взаимного ориентирования геоцентрической системы и референцной системы геодезических координат.

Пункты ВГС определяются относительными методами космической геодезии, обеспечивающими точность взаимного положения со средними квадратическими погрешностями, не превышающими $3 \text{ мм} + 5 \cdot 10^{-8} D$ (где D — расстояние между пунктами) по каждой из плановых координат и $5 \text{ мм} + 7 \cdot 10^{-8} D$ по геодезической высоте.

Основная функция СГС-1 состоит в обеспечении оптимальных условий для реализации точностных и оперативных возможностей спутниковой аппаратуры при переводе геодезического обеспечения территории России на спутниковые методы определения координат.

Пункты СГС-1 проектируют в наиболее удобных для использования местах с хорошими условиями наблюдений, со средними расстояниями между смежными пунктами около 25—35 км. При этом предусматривается максимальное совмещение пунктов с существующими грунтовыми реперами и стенными марками для исключения дорогостоящих работ по закладке центров. Средняя квадратическая погрешность определения положения пунктов СГС-1 относительно ближайших пунктов ВГС и ФАГС не должна превышать 1—2 см в районах с сейсмической активностью 7 баллов и более и 2—3 см в остальных регионах страны.

В настоящее время во всех развитых странах создан особый вид сетей — постоянно действующих референсных станций (РС): CORS (США), SAPOS (Германия), SWEPOS (Швеция), SWIPOS (Швейцария), RGP (Франция), CASS (Канада), ARGN (Австралия) и др. В странах с большой территорией (США, Канада, Австралия) созданы редкие сети станций с расстояниями между ними 100—400 км, обеспечивающие режим постобработки (обработка в камеральных условиях измерений, произведенных в поле и записанных GPS-приемником). Дальнейшее сгущение сети производится на территории активной хозяйственной деятельности для обслуживания в режиме реального времени (RT). В странах с меньшей территорией (Германия, Швейцария и др.) созданы плотные сети станций с расстояниями между ними 50—70 км, обеспечивающие RT-режим.

В России разрабатывается концепция межотраслевой системы спутникового позиционирования — проект RUPOS. Данный проект предусматривает: семь сетей РС (по числу федеральных округов), образующих единую федеральную сеть РС; 450—500 базовых и региональных РС, размещаемых через 70—150 км одна от другой. Исследования показывают, что такая сеть может обеспечить точность позиционирования мобильной станции ± 1 см в плане и ± 2 см по высоте. Таким образом, спутниковое позиционирование с использованием сетей РС найдет широкое применение в геодезии, топографии, мониторинге и кадастре земельных участков, проектировании и строительстве крупных промышленных соору-

жений, разведке и добыче природных ресурсов, сельском, лесном и других отраслях народного хозяйства.

9.3. Государственная высотная (нивелирная) сеть

Высотная сеть устанавливает единую систему высот на территории страны и является основой для научно-исследовательских (изучение современных вертикальных тектонических движений земной коры, определение разностей уровней морей, океанов, озер и уклонов рек и др.) и производственных (решение ряда вопросов в геологии, экологии, при топографической съемке, изысканиях, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений) работ.

Государственная нивелирная сеть создается методом геометрического нивелирования. За начало высот в России и ряде стран принят средний уровень Балтийского моря, определение которого начало производиться с 1825 г.

Государственные нивелирные сети делятся на четыре класса (I—IV) по точности определения пунктов (табл. 9.1). Пункты I и II классов являются главной геодезической основой и размещаются по всей территории страны. Пункты III и IV классов служат для обеспечения топографической съемки и проектируются вместе с созданием технического проекта на топографическую съемку. Высоты всех плановых пунктов по возможности определяются геометрическим нивелированием.

Нивелирные линии I класса прокладываются и повторяются каждые 25 лет по уже заранее избранному направлению, пересекающим территорию страны. Кроме того, в целях изучения движения земной коры и прогноза землетрясений сетью первоклассных нивелировок покрыты некоторые избранные участки — полигоны. На основе повторного нивелирования составляются карты современных вертикальных движений земной коры.

Нивелирные линии II класса образуют полигоны между пунктами I класса с периметром 500—600 км. Нивелирные линии III класса образуют полигоны с периметром от 150 до 300 км (послед-

Таблица 9.1

Класс нивелирования	Случайная средняя квадратическая погрешность, мм	Формула невязки хода, мм (L — длина хода, км)
I	0,5	$\sqrt{3L}$
II	0,8	$\sqrt{5L}$
III	1,6	$\sqrt{10L}$
IV	6,0	$\sqrt{20L}$

ние на севере и северо-востоке страны). Нивелирование IV класса предусматривается для топоъемок и проектируется в комплексе со всеми съёмочными работами. Следует отметить, что в настоящее время создавать высотное обоснование топографических съёмок с точностью, соответствующей геометрическому нивелированию III—IV классов, позволяют спутниковые системы ГЛОНАСС и GPS.

Все точки нивелирной сети — реперы (грунтовой, скальный, стенной) — закрепляются на местности различным образом. При нивелировании I и II классов через 50—80 км закладываются фундаментальные реперы после предварительного исследования грунта бурением на глубину до 20 м. В нивелирной сети III класса реперы закладываются через 5—7 км хода (в труднодоступных районах — через 10—15 км).

Реперы, особенно очень точно определенные по высоте, не должны испытывать случайное перемещение в пространстве со временем. Поэтому геодезисты стараются реперы закреплять в скальных грунтах, а в населенных пунктах — в цоколях капитальных зданий и сооружений.

Глава 10

ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ КАРТЫ

10.1. Разновидности карт

Географическая карта — уменьшенное, обобщенное изображение земной поверхности на плоскости, построенное по определенному математическому закону в принятой системе обозначений.

Картографическое изображение, построенное без учета кривизны поверхности Земли, называют планом.

Все карты по содержанию делят на следующие типы:

топографические, или *общегеографические*;

тематические, которые являются предметом изучения и изготовления картографии и многих географических, геологических и других наук, использующих карты при решении своих задач;

специальные, или *технические*, например навигационные.

Топографические карты имеют универсальное многоцелевое применение при изучении территории и наиболее употребительны для решения самых разнообразных задач:

- научного анализа закономерностей размещения, взаимодействия, зависимостей, динамики и прогноза развития природных явлений, происходящих на Земле;
- проектирования и производства различных хозяйственных мероприятий, в том числе мелиоративных работ, строительства, прокладке дорог и каналов и многого другого, что может быть объединено одной фразой — территориальной организации общества;
- проведения экспедиционных работ: выбора маршрутов, ориентирования на местности, привязки полевых наблюдений;
- составления тематических карт самого различного содержания.

Все топографические карты создают в стандартном ряде масштабов, единых условных знаках для каждого из масштабов и общей разграфке и обозначении листов карты, покрывающих земной шар.

10.2. Масштабы топографических карт

Отношение, показывающее, во сколько раз уменьшены линейные размеры (L) поверхности эллипсоида, шара или Земли при изображении на карте или плане (l), называют масштабом карты или плана. Следовательно, масштаб есть число отвлеченное.

Стандартный масштабный ряд общегеографических карт и планов:

топографические планы: 1 : 500, 1 : 1 000, 1 : 2 000, 1 : 5 000;
топографические карты: 1 : 10 000, 1 : 25 000, 1 : 50 000, 1 : 100 000, 1 : 200 000;
обзорно-топографические карты: 1 : 300 000, 1 : 500 000, 1 : 1 000 000;
обзорные карты (справочные): мельче 1 : 1 000 000, например справочная карта мира 1 : 2 000 000.

Обозначение масштабов. Численный масштаб $1/L = 1/(L/l = 1/m)$, или $1/m$. Для удобства пользования и сравнения все масштабы имеют однообразный вид правильной дроби, у которой числителем всегда является единица, а знаменатель непосредственно выражает степень уменьшения. Например, $(5\text{ см})/(500\text{ м}) = 1/10\,000$, или 1 : 10 000.

Именованный масштаб — то же, что численный, но выраженный иначе: «в одном сантиметре сто метров». Численный и именованный масштабы дают общую характеристику степени уменьшения и не всегда удобны для практических целей. Для построения планов или определения длины отрезков на плане применяют линейный или поперечный масштаб.

Линейный масштаб — это графическое изображение численного масштаба. Точностью линейного масштаба называют величину наименьшего деления основания масштаба. Например, построим линейный масштаб для численного 1 : 10 000 (рис. 10.1).

Графическая точность масштаба — 0,2 мм — это точность построений и измерений на планшете, карте при работе невооруженным глазом и с простейшими инструментами. Современные графопостроители, работающие на базе ЭВМ, дают более высокую точность построений, равную 0,1 мм.

Предельная (или натуральная) точность масштаба — это точность построений и измерений, перенесенная в натуру с учетом масштаба используемой карты:

1 : 10 000 0,2 мм — на местности 2 м;
1 : 25 000 0,2 мм — на местности 5 м;
1 : 100 000 0,2 мм — на местности 20 м.

Поперечный масштаб — это график или номограмма, которые строятся на планшете или гравятся на металлической пластине и используются для откладываний на карте измерений длин прямых отрезков.

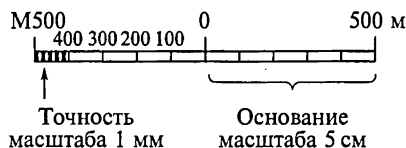


Рис. 10.1. Линейный масштаб

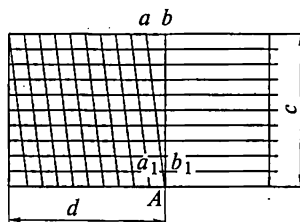


Рис. 10.2. Поперечный масштаб

На горизонтальной линии откладывают основания масштаба $d = 2$ см. В полученных точках восстанавливают перпендикуляры длиной $C = 2$ см. На крайних перпендикулярах откладывают по 10 равных отрезков ($m = 10$), через концы которых проводят параллельные линии. Верхнюю и нижнюю линии первого основания также делят на 10 равных частей по 2 мм ($n = 10$) и проводят параллельные линии, как показано на рис. 10.2. Из подобия треугольников Aab и Aa_1b_1 получаем $(a_1b_1)/(ab) = (Ab_1)/(Ab)$, где $a_1b_1 = p$ — наименьшее деление, или точность масштаба.

Справедливы равенства $a_1b_1 = p = (ab \cdot Ab_1)/(Ab)$ и $ab = d/n$; $Ab_1 = Ab/m$. Тогда $p = (d \cdot Ab)/(nm \cdot Ab) = d/(nm) = 2/(10 \cdot 10) = 0,2$ мм.

10.3. Разграфка, номенклатура и оформление топографических карт

Разграфкой называют деление территории на листы карты, *номенклатурой* — обозначение листов.

Исходными являются разграфка и номенклатура карт масштаба 1 : 1 000 000. Каждый лист карты масштаба 1 : 1 000 000 огра-

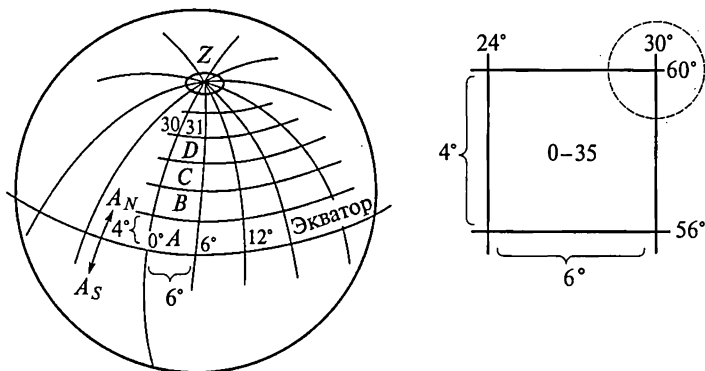


Рис. 10.3. Разграфка и номенклатура листов карт масштаба 1 : 1 000 000

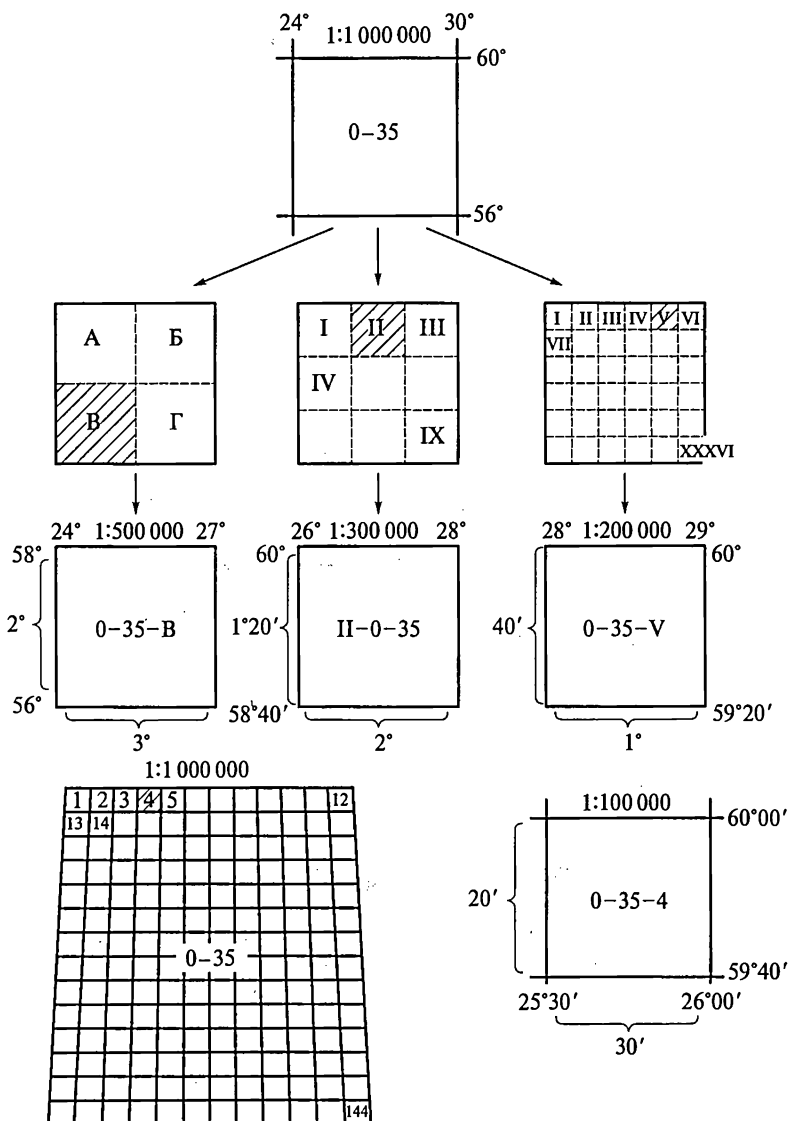


Рис. 10.4. Разграфка и номенклатура листов карт масштабов 1 : 500 000, 1 : 300 000, 1 : 200 000, 1 : 100 000

ничен меридианами и параллелями (рис. 10.3): по широте 4° (пояса), по долготё 6° (колонны). Листы обозначены буквами латинского алфавита по названию поясов от A (у экватора) и до Z (у полюса) и номерами колонн, считающимися от меридиана с долготой 180° на восток, поэтому номер колонны отличается от

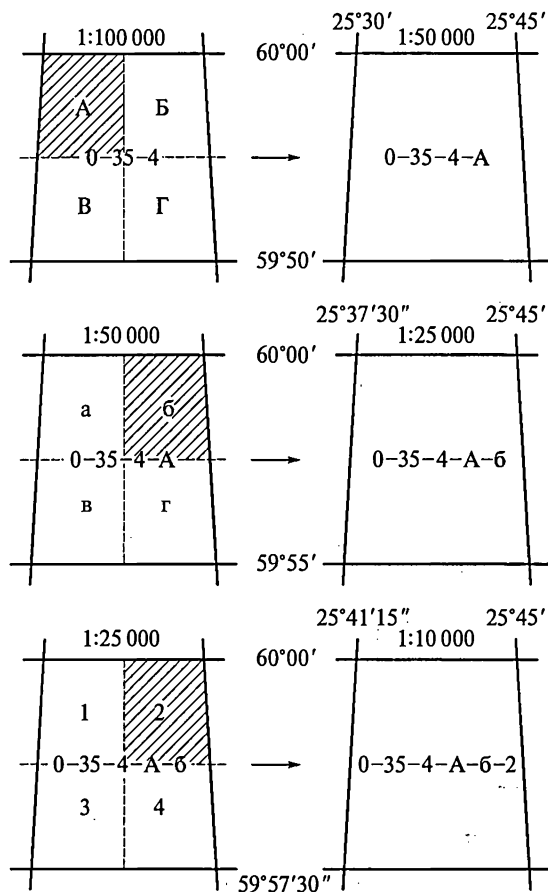


Рис. 10.5. Разграфка и номенклатура листов топографических карт масштабов 1 : 50 000, 1 : 25 000 и 1 : 10 000

номера зоны на 30°, а Гринвичский меридиан находится между 30 и 31 колоннами.

Для территорий, расположенных севернее 60° широты, листы масштаба 1 : 100 000 составляются сдвоенными, поскольку сближение меридианов делает их слишком узкими (например, Р-36-1,2 и др.).

Разграфка листов карт от масштаба 1 : 500 000 до масштаба 1 : 50 000 приведена на рис. 10.4 и 10.5. На рис. 10.5 показано получение листов карт от масштаба 1 : 50 000 до масштаба 1 : 5 000. Чтобы составить листы планов масштаба 1 : 5 000, площадь листа 1 : 100 000 делят на 256 частей и обозначают так: 0-35-4(16). Разделив каждый лист 1 : 5 000 на 9 частей, получают листы плана в масштабе 1 : 2 000 и листы обозначают, например, так:

0–35–4(16–е). Планы более крупных масштабов 1 : 1 000 и 1 : 500 получаются последовательным делением, начиная с листа масштаба 1 : 2 000.

Оформление топографических карт. Каждый лист карты, как сказано было выше, ограничивается меридианами и параллелями. Таким образом на топографических картах меридианы и параллели — это внутренние рамки карты. В углах рамки указываются их геодезические координаты: долготы и широты. Внешняя рамка карты делится на минуты для удобства определения геодезических координат любой точки внутри карты.

Каждый лист топографической карты покрыт километровой или координатной сеткой. Ее оцифровка помещена между внутренней и внешней рамками карты. Поскольку приходится пользоваться картами, покрывающими территории на границах зон, на крайних листах зоны приведена также оцифровка километровой сетки соседней зоны.

Не следует забывать, что ординаты задаются в зашифрованном виде: к ним впереди приписан номер зоны и к истинной координате прибавлено 500 км, чтобы избежать отрицательных значений.

Каждый лист карты над верхней рамкой имеет надпись индекса номенклатуры и название самого крупного населенного пункта или иного географического объекта на изображенной территории.

Под нижней рамкой даются сведения о магнитном склонении и сближении меридианов, приводится масштаб карты в численном, именованном и линейном (графическом) виде, а также указывается сечение рельефа и дается график, называемый масштабом заложения (см. подразд. 10.5), для определения уклонов местности. На внешних рамках карты по всем четырем сторонам обозначается номенклатура соседних листов, а за внешней рамкой иногда приводится схема расположения соседних листов. Наконец, даются сведения о времени съемки и обновления карты.

10.4. Содержание топографических карт

Объекты земной поверхности, которые показываются на топографических картах, следующие:

- пункты геодезической сети и отдельные отметки высот (например, урезы воды и глубины на реках и озерах, высоты террас и глубины оврагов);
- рельеф местности в целом и отдельные формы рельефа;
- элементы гидрографии и их характеристики;
- растительный покров и грунты;
- населенные пункты;
- промышленные и сельскохозяйственные объекты;

- пути сообщения и транспортировок.

Совокупность всех перечисленных объектов как естественно-го, так и искусственного происхождения, кроме рельефа местности, называют местными предметами или ситуацией. Местные предметы изображаются на топографических картах соответствующими условными знаками.

Условные знаки топографических карт — единые для всех карт данного масштаба. Естественно, со временем они пересматриваются, поскольку, во-первых, все меняется на местности и карты нужно обновлять, во-вторых, изменяются требования потребителей карт. В некоторых случаях, учитывая пожелания некоторых отраслей производства и науки, создаются специализированные топографические карты, дополненные сведениями, интересными, например, для сельского хозяйства или геологии.

В топографии используют от 350 до 580 условных знаков (они едины для России) это:

- графические символы (различные значки, иногда имитирующие вид самого объекта);
- цветовые различия (синие — воды, зеленые — леса и кустарники, желтые и красные — дороги, коричневый — рельеф естественный и черный — рельеф антропогенный: насыпи, выемки, карьеры);
- шрифты и цифры, указывающие, например, тип дороги, названия населенных пунктов и их ранг, характеристики лесов, мостов и др.

Условные знаки разделяют на несколько видов:

- масштабные (площадные или контурные), которые объекты местности изображают с соблюдением масштаба карты или плана (состоят из обозначения контуров лесов, лугов, болот и соответствующих значков, заполняющих контуры);
- внес масштабные условные знаки, изображающие предметы местности, не выражающиеся в масштабе карты или плана, но необходимые по назначению (колодцы, отдельные сооружения, деревья, камни, указатели на дорогах и пр.);
- линейные знаки, которые точно передают местоположение объектов по оси их наибольшего протяжения, но в большинстве случаев преувеличивают их ширину (шоссе и железные дороги, канавы и каналы, линии связи, энергосети, трубопроводы и др.);
- пояснительные обозначения буквенные, цифровые и др. (направление и скорость течения реки, глубина болота, характеристики мостов, бродов, дорог, населенных пунктов и др.).

Картографическая генерализация. Генерализация состоит в целенаправленном, осмысленном обобщении и отборе всего того, что показывается на карте. Факторы, которые определяют характер генерализации, это масштаб карты, ее назначение и тип, ха-

рактен местности. Всякая генерализация требует правильного географического истолкования местности и учета требований, которые предъявляются к картам данного типа, например топографическим.

Картографическая генерализация заключается в продуманном обобщении количественных и качественных характеристик объектов и явлений, целенаправленном отборе их по значению и сознательном утировании некоторых сторон картографического изображения.

Обобщение может быть, во-первых, формальным и заключаться в упрощении форм, очертаний контуров, объединении деталей и отсечении мелких извилин контуров. Во-вторых, оно может быть содержательным, когда составители карт переходят от частных характеристик к обобщенным, собирательным. Так, на карте можно разделить леса на сосновые, еловые, березовые, но можно показать только леса лиственные и хвойные или же обозначить только леса вообще.

Отбор состоит в том, что исключаются все объекты и явления, несущественные с точки зрения содержания и назначения карты, или объекты временные, случайные. Отбор объектов можно также провести на формальной основе, например, исключить часть мелких озер, чтобы разрядить изображение, сделать его читаемым. Отбор может быть также содержательным, что более характерно для тематических карт, например геологических, чем для карт топографических.

Утирование заключается в преднамеренном преувеличении размеров объектов, например ширины дорог, улиц в населенных пунктах, которые, если строго придерживаться масштаба карты, следовало бы изображать слишком тонкой линией.

10.5. Изображение рельефа на топографических картах

Рельефом местности называют совокупность неровностей физической поверхности Земли. Различают положительные и отрицательные формы рельефа. К положительным относят формы рельефа, которые возвышаются над окружающей местностью (гора, холм, хребет), к отрицательным — находящиеся ниже поверхности горизонта (котловина, долина, лощина).

Задачи, которые стоят перед создателями топографических карт, заключаются в том, чтобы показать внешние очертания рельефа, его расчлененность, абсолютные и относительные высоты основных точек местности, уклоны поверхности и при этом сохранить метрические свойства картографического изображения, т. е. возможность измерений на карте.

В картографии разработаны три принципиально различных вида воспроизведения рельефа.

1. **Плоские изображения.** Рассчитаны на умозрительное восприятие рельефа, которое отчасти может быть иллюзорным:

изолинии — горизонтали (изогипсы) для изображения рельефа суши и изобаты (линии равных глубин) для изображения рельефа дна водоемов. В отечественной и зарубежной топографии это главный способ изображения рельефа на картах;

послойная, или *гипсометрическая*, окраска — цветовая шкала, в которой низины показываются зеленым цветом, холмистая местность — желтым, горы — коричневым. Этот способ широко используется в географической картографии, хотя и подвергается критике за условность. В топографической практике не применяется;

отмывка, или *оттенение рельефа*, — один из самых выразительных способов изображения рельефа на плоскости. Широко используется в картографии, а в топографии — ограниченно. В отечественной топографии не применяется, но за рубежом, например в Великобритании, используется на топографических картах;

штрихи (в настоящее время в отечественной топографии и картографии этот способ не используется, но в некоторых странах применяется, например в Японии; был очень распространен в прошлом, когда карты создавались методом гравирования, и были разработаны разные системы штрихов);

перспективный рисунок нередко применяют в мелкомасштабной картографии, особенно при создании карт для широкого использования и в учебных целях.

2. **Физические модели.** Рельефные топографические карты стали широко распространяться у нас в стране и за рубежом с тех пор, как был изобретен простой способ формования рельефных карт из пластика.

3. **Стереоскопические карты.** Рассчитаны на рассматривание их с помощью стереоскопических устройств, прежде всего через анаглифические (красно-синие) очки. Топографические карты в таком варианте у нас в стране создавались, но не нашли достаточно широкого использования, поскольку без использования очков они не пригодны для работы.

Отдельно рассмотрим способ изображения рельефа горизонталями, поскольку он является основным при создании топографических карт и профессионалы (географы, геологи, почвоведы и др.) должны уметь пользоваться этим способом при различных съемках местности.

Горизонтالي — это линии, соединяющие точки с равными высотами. Предварительно все точки местности должны быть ортогонально спроецированы на горизонтальную плоскость, например планшет мензульной съемки.

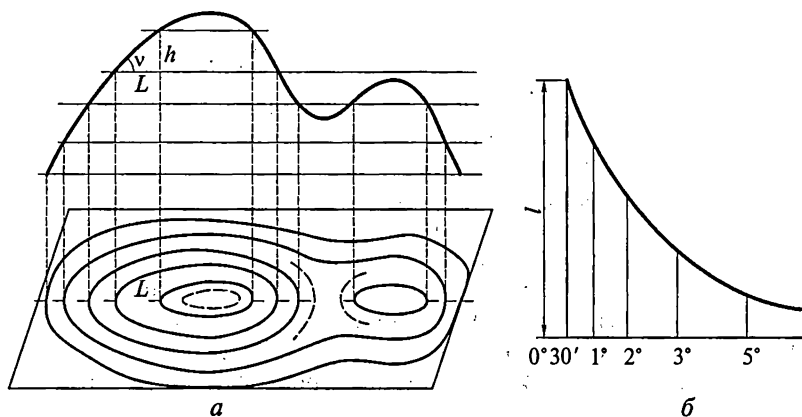


Рис. 10.6. Схема получения горизонталей (а) и масштаб заложений (б):
 ---- — дополнительная горизонталь; v — угол наклона местности; h — высота сечения; L — заложение; $L = h \operatorname{ctg} v$; $l = L/m$; $L = (h \operatorname{ctg} v)/m$

Если мы мысленно рассежем рельеф плоскостями, параллельными уровенной поверхности, через интервал, называемый высотой сечения, а затем спроецируем линии пересечения на горизонтальную поверхность, как это показано на рис. 10.6, а, то получим серию замыкающихся кривых линий, которые и будут горизонталями (или изогипсами). Для большей выразительности на картах обозначают короткой черточкой (бергштрихом, скатоуказателем) направление склона, горизонтали через заданный интервал утолщают, их подписывают, при этом их оцифровка должна быть кратной величине сечения. В местах с малыми углами наклона местности применяют дополнительные горизонтали, проводимые прерывистой линией с различной длиной штриха через половину основного сечения (полугоризонтали).

Расстояние между горизонталями связано с углом наклона местности. Это позволяет на каждой карте помещать так называемый масштаб заложений, по которому, зная расстояние l по заданному направлению между смежными горизонталями (заложение), можно сразу определить угол наклона (рис. 10.6, б). Кратчайшее расстояние между горизонталями соответствует направлению наибольшей крутизны ската.

10.6. Цифровые карты

Цифровые топографические карты создаются путем цифрования (преобразование графических документов в форму цифровых записей) картографических источников, цифровой регистрации данных полевых съемок, фотограмметрической обработки данных

аэрокосмических съемок. При этом цифровая модель земной поверхности формируется с учетом законов картографической генерализации в принятых для карт проекции, разграфке, системе координат и высот местности. В свою очередь цифровые топографические карты служат основой для изготовления бумажных и электронных тематических карт.

Основой цифровой карты является цифровая модель местности (ЦММ) или математическая модель местности, представляемая множеством точек земной поверхности с их координатами и закодированными качественными или количественными признаками (атрибутами), характеризующими пространственный объект.

По содержанию ЦММ разделяют на цифровые модели контуров местности и на цифровые модели рельефа (ЦМР). Контуры местности задаются координатами x и y точек, определяющих предметы на местности. Рельефные точки, представляющие рельеф, задаются координатами x , y и H .

Подробно описать в цифровом виде рельеф довольно сложно из-за многообразия его форм, поэтому существуют различные способы составления ЦМР. Наиболее распространенным способом цифрового представления рельефа является модель пространственных данных, основанная на аппроксимации рельефа многогранной поверхностью с высотными отметками в узлах треугольной сети.

Для создания и использования цифровых карт применяют специальное программное обеспечение.

СЪЕМКА МЕСТНОСТИ

11.1. Общие сведения о съемке

Съемкой называют совокупность полевых работ в целях получения карты или плана местности. Это — задача топографии.

Методы съемок. *Графические съемки:* мензульная, тахеометрическая, полуинструментальные, в том числе буссольная, глазомерная; съемка приборами спутникового позиционирования.

Фототопографические съемки: фототеодолитная, аэрофототопографические — комбинированная и универсальная (стереотопографическая).

Факторы, влияющие на выбор метода съемок: точность будущей карты, ее масштаб, форма и содержание карты, географические условия местности, размеры площади съемки и сроки производства работы, экономические соображения, допустимые затраты на работу и, наконец, технические возможности исполнителей работ: наличие нужной техники, приборов и кадров, подготовленных к определенным видам съемки.

Основным видом съемки в целях картографирования России является аэрофототопографическая съемка.

Порядок выполнения работ. 1. Изучение района съемок. Разработка редактором карты указаний для исполнителей, выбор условных знаков. Составление проекта работ.

В топографо-геодезическом производстве надежность содержания карт гарантируется редактированием. Эту работу выполняют инженеры-редакторы (или географы-редакторы), которые входят в состав экспедиций и камеральных производственных подразделений и имеют задачу обеспечить достоверность и полноту содержания топографических карт, ясность и наглядность изображенной на них ситуации. Редактор собирает и изучает географические, картографические и аэросъемочные материалы на район работ; обследует его непосредственно в поле. В результате он составляет редакционные указания, где разъясняется исполнителям, каким образом истолковывать различные природные и антропогенные объекты и как показывать их на картах во время съемки. В поле и при камеральной обработке полевых материалов редакторы контролируют результаты работы.

Редакторы участвуют также в составлении проектов топографо-геодезических работ, в которых на основании производственного задания характеризуется характер и содержание про-

ектируемых работ и приводятся сметы затрат на производство работ.

2. Геодезическое обоснование съемки, которое содержит три ступени: государственную геодезическую сеть, развитие сети сгущения и создание съемочной сети.

Густота опорных пунктов *государственной геодезической сети*, конечно, недостаточна для обеспечения съемки местности. Напомним, что стороны треугольников 3 класса составляют 5—8 км, а 4 класса — 2—5 км, поэтому возникает необходимость в дополнительной более густой сети пунктов. Эти сети делят на сети сгущения и съемочные сети.

Сети сгущения государственной геодезической сети подразделяют на аналитические сети 1 и 2 разрядов, развиваемые методами триангуляции, полигонометрические сети 1 и 2 разрядов и высотные сети, которые создаются методом геометрического нивелирования.

Относительные погрешности определения длин сторон в наиболее слабых местах триангуляции 1 и 2 разрядов не должны превышать, соответственно, 1 : 20 000 и 1 : 10 000. Относительные погрешности ходов полигонометрии 1 и 2 разрядов соответственно не должны превышать 1 : 10 000 и 1 : 5 000.

Допустимая погрешность нивелирования — 25 мм на 1 км хода.

Новые технологии в геодезии позволяют использовать спутниковые приемники ГЛОНАСС/GPS на работах, связанных с созданием и поддержанием на должном уровне современных геодезических съемочных сетей, основанных на линейно-угловых измерениях.

Съемочные сети прокладываются между пунктами сетей сгущения, доводя количество пунктов планового и высотного обоснования съемки до требуемой плотности, исходя из следующих общих требований:

- густота точек должна быть такой, чтобы обеспечивалась съемка всей площади без «мертвых» зон, с другой стороны, не должно быть излишних точек, удорожающих работу;

- сами точки должны располагаться на площадках, удобных для установки и работы с мензулой, тахеометром или другим прибором, которым ведется съемка;

- желательно иметь с каждой точки максимально полный обзор местности в радиусе съемки 150—200 м;

- для ориентирования планшета или прибора с каждой точки должна быть обеспечена видимость не менее двух вех на других точках съемочной сети;

- вежа на самой точке должна быть видна не менее чем с двух, но для контроля лучше с трех других точек съемочной сети или точек государственной сети и сети сгущения, если они помещаются в пределах планшета.

Съемочные сети создаются двумя методами: аналитическим и графическим. Под аналитическими методами понимается, главным образом, прокладка теодолитных ходов и определение координат точек спутниковыми приемниками ГЛОНАСС/GPS. Графические методы — это геометрические сети, мензульные ходы, отдельные засечки. Однако прежде чем рассматривать графические методы подробно, следует познакомиться с устройством и поверками мензулы и кипрегеля.

11.2. Мензула и кипрегель. Их устройство и поверки

Мензульный комплект включает планшет, штатив, подставку (треножник), с помощью которой планшет крепится на штативе, кипрегель, одну или две дальномерные рейки, мензульную буссоль, центрировочную вилку, полевой зонт.

Мензулой называют закрепленный на штативе планшет, образующий столик для работы — съемки.

Мензула должна быть прочной, легкой и устойчивой. Последнее проверяется легкими соприкосновениями со столиком, отчего он не должен менять положение в пространстве и упруго реагировать на легкие толчки.

Планшет должен быть плоским. Это условие проверяется прикладыванием к планшету выверенной линейки, между ними не должно возникать зазора.

Планшет должен быть перпендикулярен вертикальной оси вращения на треножнике. Проверяется поворотом планшета на 360° , при этом на нем устанавливается кипрегель с выверенным уровнем. Если планшет при вращении описывает «восьмерку» и пузырек уровня то убегает, то возвращается на место, мензула непригодна к использованию. Исправляют ее в мастерской.

Мензула не должна содержать стальных, железных деталей, иначе будет невозможно ориентировать планшет по буссоли.

Кипрегель (в отличие от теодолита-прибора угломерного) является прибором углоначертательным. Он служит для визирования с точки стояния на объекты местности, подлежащие съемке, определения расстояния до них и превышения. Последняя отечественная модель кипрегель КН (кипрегель номограммный) позволяет определять превышения и расстояния, приведенные на горизонтальную плоскость, при одном наведении трубы на рейку.

Кипрегель КН (рис. 11.1) состоит из металлической линейки 14 (служит основанием прибору) с уровнем 12 для горизонтирования одновременно мензулы и кипрегеля, колонки 1 с вертикальным кругом и цилиндрическим уровнем при нем и зрительной трубы с объективом 11. На дополнительной линейке 15 поме-

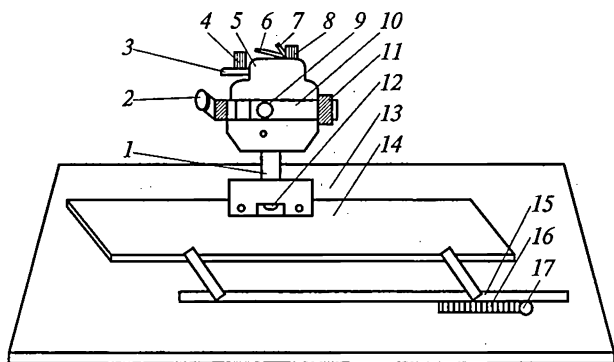


Рис. 11.1. Схема кипрегеля КН:

1 — колонка; 2 — окуляр зрительной трубы; 3 — закрепительный винт; 4 — наводящий винт; 5 — цилиндрический уровень при трубе; 6 — зеркало; 7 — цилиндрический уровень при вертикальном круге; 8 — установочный винт уровня; 9 — кремальера для наведения изображения в трубе на резкость; 10 — зрительная труба; 11 — объектив зрительной трубы; 12 — цилиндрический уровень; 13 — планшет; 14 — металлическая линейка; 15 — дополнительная линейка; 16 — съемная масштабная линейка; 17 — наколочный штифт

щается съемная масштабная линейка 16 с наколочным штифтом 17 для нанесения на планшет 13 пикетов. На колонке имеются наводящее устройство трубы 4, совмещенное с закрепительным винтом 3 рычажного типа, и винт 8 уровня устройства, предназначенного для горизонтальной установки отсчетных индексов вертикального круга. Цилиндрический уровень 5 при трубе с зеркалом 6 позволяет использовать кипрегель в качестве нивелира. Окуляр зрительной трубы, находящийся к ней под углом 30° , поворачивается вокруг своей оси, что дает возможность наблюдателю выбрать удобное положение при наблюдениях.

Требования к взаимному положению геометрических осей кипрегеля (рис. 11.2). Основные геометрические условия, при выполнении которых кипрегель может быть использован для съемки, состоят в следующем:

- ось уровня при линейке LL_1 должна быть параллельна нижней плоскости линейки PP_1 ;
- визирная ось зрительной трубы KK_1 должна быть перпендикулярна горизонтальной оси вращения зрительной трубы NN_1 ;
- горизонтальная ось вращения зрительной трубы NN_1 должна быть параллельна нижней плоскости линейки PP_1 ;
- визирная ось зрительной трубы KK_1 должна быть параллельна скошенному краю линейки.

Чтобы убедиться в этом, а также в том, что выполняется ряд других условий, делаются, как обычно для геодезических приборов, поверки кипрегеля.

Поверки кипрегеля. 1. Скошенный край линейки должен быть прямой линией, а нижняя поверхность — плоской. Для проверки этого условия на планшете проводят остро отточенным карандашом линию вдоль ребра линейки. Затем, развернув кипрегель на 180° , прикладывают к линии линейку ребром с другой стороны. Линейка всюду должна плотно прилегать к прочерченной линии. В противном случае линейка непригодна для работы. Нижнюю поверхность линейки проверяют на выверенной поверхности планшета: линейка всюду должна плотно прилегать к плоскости планшета.

2. Линии, прочерчиваемые по ребру основной и дополнительной линеек, должны быть параллельны. Для проверки прочерчивают линии по обеим линейкам при разном разводе между ними и проверяют, постоянно ли расстояние между ними. Отклонение допускается не более чем 0,2 мм.

3. Ось цилиндрического уровня на линейке должна быть параллельна плоскости линейки. Для проверки кипрегель устанавливают на планшете мензулы посередине так, чтобы его линейка была параллельна двум подъемным винтам подставки. Подъемными винтами смещают пузырек уровня на середину — в нуль-пункт. Кипрегель переставляют на 180° . Если при этом пузырек уровня остался на середине, то условие выполнено. Если же пузырек уровня «убежал» в сторону от середины, то его возвращают на половину смещения подъемными винтами подставки, а на другую половину — исправительными винтами уровня. Затем еще раз делают поверку, чтобы убедиться в правильности исправления.

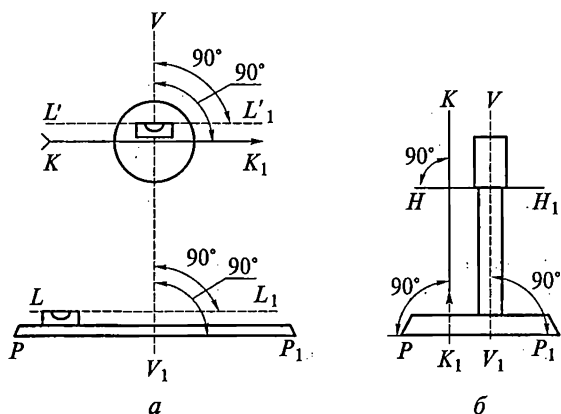


Рис. 11.2. Геометрические оси кипрегеля:

a — вид сбоку; b — вид вдоль основной линейки кипрегеля; VV_1 — вертикальная ось; KK_1 — визирная ось зрительной трубы; LL_1 — ось уровня при линейке; $L'L'_1$ — ось уровня при вертикальном круге; PP_1 — нижняя плоскость линейки; HH_1 — горизонтальная ось вращения зрительной трубы

4. *Визирная ось трубы должна быть перпендикулярна оси вращения трубы.* Для выполнения этой проверки дважды наводят кипрегель при двух положениях вертикального круга на одну и ту же точку, каждый раз прочерчивая линию вдоль линейки. Линии должны совпадать или быть параллельными. В противном случае получается некоторый угол в пересечении линий, равный двойной коллимационной ошибке. Неисправность устраняется в мастерской.

5. *Вертикальная нить сетки должна лежать в коллимационной плоскости кипрегеля или быть перпендикулярна оси вращения трубы* (рис. 11.2, б). Напомним, что *коллимационной плоскостью* называют плоскость, описываемую визирной осью трубы при вращении ее вокруг горизонтальной оси при условии, что коллимационная ошибка отсутствует, т.е. угол между осью HH_1 и KK_1 равен 90° .

Для проверки наводят вертикальную нить на отчетливо видимую точку и, опуская или поднимая трубу наводящим винтом, следят за тем, сойдет точка с линии или нет. Во втором случае исправление делают в мастерской. Эту же проверку можно сделать по нити отвеса.

6. *Коллимационная плоскость трубы, образуемая при вращении визирной оси вокруг ее горизонтальной оси, должна быть перпендикулярна нижней плоскости основной линейки.* Для проверки этого условия кипрегель наводят на некоторую высоко расположенную точку и, опуская трубу вниз, отмечают точку ее наведения. Затем при другом положении вертикального круга наводят вновь на верхнюю точку и опускают трубу вниз. При выполнении требуемого условия нижняя точка должна совпадать. При расхождении более чем на 4 мм кипрегель бракуется или им можно работать только при одном положении вертикального круга.

7. *Коллимационная плоскость трубы должна совпадать со скошенным краем основной линейки кипрегеля или быть ему параллельной.* Кипрегель наводят на точку, видимую невооруженным глазом. Затем вдоль скошенного края линейки по двум концам ее накалывают две булавки или иголки и, отодвинув кипрегель, смотрят, видна ли точка наводки в створе двух булавок. Неисправность устраняется в мастерской. Кипрегелем можно работать в поле только при одном положении вертикального круга.

8. *Ось уровня, установленного на трубе, должна быть параллельна визирной оси трубы.* На расстоянии 100—150 м от прибора устанавливают рейку. При двух положениях вертикального круга дважды на рейку наводят визирную ось и по ней берут отсчеты при пузырьке уровня, находящегося посередине. Из них находят среднее значение отсчета, на котором устанавливают перекрестие сетки нитей, и исправительными винтами уровня пузырек выводят на середину. При этом положении пузырька уровня и трубы отсчет по вертикальному кругу, т.е. место нуля (МО), должен быть равен 0° , а отсчет по кривой превышений равен нулю.

9. Номограммы в поле зрения трубы прибора должны быть установлены правильно. При горизонтальном положении визирной оси трубы и оси уровня вертикального круга кипрегеля кривые превышений ± 10 , начальная кривая H и вертикальная линия сетки нитей должны пересекаться в одной точке. При нарушении этого условия неисправность устраняется в мастерской.

10. Место нуля вертикального круга должно быть постоянным или близким к 0° . Поверка делается так же, как у теодолита. При двух положениях вертикального круга дважды наводят трубу на одну и ту же точку и, предварительно установив пузырек уровня при вертикальном круге на середину установочным винтом, берут отсчет по вертикальному кругу. МО вычисляют по формуле: $МО = (П - Л) / 2$.

11. Определение коэффициентов номограммных расстояний и превышений. Коэффициенты номограммных расстояний K_S и превышений K_h зависят от точности установки коэффициента дальномера и места нуля. Чтобы проверить тщательность выполнения юстировки и определить действительные значения указанных коэффициентов, сравнивают известные значения длин линий и превышений, полученные из измерений иными, более точными средствами, с результатами измерений кипрегелем. Коэффициент номограммных расстояний определяется на шести интервалах различной длины (20, 40, 60, 100, 120 и 160 м) на полевом компараторе, длина которого измерена с относительной погрешностью не более $1 : 3\,000$, и вычисляется для каждого интервала по формуле $K_S = S_0 K_S^0 / S$, где S_0 — длина интервала, полученная из точных измерений, S — длина, измеренная кипрегелем, $K_S^0 = 100$ — номинальное значение коэффициента дальномера.

В случае если K_S отличается от номинального более чем на 0,2, в зависимости от масштаба съемки вводят поправки или устанавливают коэффициент, близкий к номинальному. Поправки вычисляют через 10 м на весь диапазон измеряемых величин расстояний и вводят непосредственно в расстояния в процессе их определений по номограмме.

Коэффициенты номограммных превышений K_{10} , K_{20} , K_{100} рассчитаны соответственно для углов наклона местности $0 - 10^\circ$, $10 - 20^\circ$, $20 - 30^\circ$. Положительные и отрицательные значения K определяют отдельно из сравнения превышений по нескольким интервалам полевого компаратора, измеренным кипрегелем и полученным ранее из геометрического нивелирования. Превышения определяют многократно в прямом и обратном направлениях. Значения превышений не должны различаться между собой более чем на 5 см. Коэффициент K_h вычисляют по формуле: $K_h = h_0 K_h^0 / h$, где h_0 — превышение, известное из геометрического нивелирования, h — превышение, определенное по номограмме кипрегеля с учетом номинального значения коэффициента кривой K_h^0 .

Подготовка планшета к полевым работам. На планшет наклеивают по краям лист хорошей влажной чертежной бумаги, на которой будет вестись съемка. Высохнув, лист натянется и плотно прижмется к поверхности планшета. Поверх основного листа также по краям наклеивают лист белой бумаги, так называемую «рубашку», которая должна защищать основной лист от загрязнения.

На планшете строят координатную сетку с помощью специальной линейки ЛБЛ, масштабной линейки и измерителя. Построенную сетку тщательно проверяют, сравнивая диагонали квадратов между собой с помощью измерителя. Отклонения допускаются в пределах 1—0,2 мм. Сетку оцифровывают и наносят по координатам все имеющиеся точки опорной сети с указанием их высот. Правильность нанесения пунктов проверяют по расстояниям между ними, полученными из непосредственных измерений и вычислений и снятых с планшета. Расхождения не должны превышать 0,3 мм.

Всю эту работу прodelывают на «рубашке», после чего точки пересечения сетки и все опорные точки аккуратно перекалывают на планшет. В производственных условиях нередко поступают иначе, сетку строят сразу на основном планшете и там же наносят пункты, а потом покрывают «рубашкой».

Создание съемочной сети графическими способами. *Геометрическая сеть* строится в такой последовательности.

1. В центре участка выбирают базис, отмечаемый на местности колышками. Его произвольно (или по координатам точек на концах) наносят на планшет в масштабе съемки.

2. По всему полю съемки выбирают съемочные точки, исходя из требований, которые сформулированы в начале этой главы. На них устанавливают веши, высоты которых заранее измеряют.

3. Планшет на штативе устанавливают на одной из точек базиса, ориентируют по линии базиса на вторую точку, нивелируют и затем производят поочередное наведение кипрегеля на веши геометрической сети. Прочерчивают направление и измеряют превышение (рис. 11.3).

4. Планшет переносят на вторую точку базиса. Ориентируют его на первую точку и повторяют все операции с засечками вех.

5. Для контроля мензулу устанавливают на уже засеченных точках, ориентируют на другие веши и проводят контрольные направления, которые, в идеале, должны пройти через пересечения линий, полученных с концов базиса. На

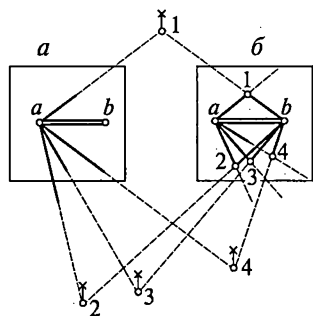


Рис. 11.3. Построение геометрической сети:

a — первое положение мензулы; *b* — то же, второе

самом деле за счет накопления случайных ошибок получится «треугольник погрешностей», который может иметь длину стороны не более 2—3 мм. Полученные засечками новые точки накалывают так, чтобы накол пришелся на основной лист. Вычисляют превышения и абсолютные или относительные высоты всех точек, образуя из линий засечек замкнутый полигон, включающий все точки, в том числе опорные и базисные.

6. Если в качестве концов базиса избраны опорные точки, имеющие плановые координаты в единой системе, то вся геометрическая сеть будет ориентирована внутри этой системы координат. Если же базис избран произвольно, его ориентируют, как и планшет, на любой точке сети, с помощью ориентир-буссоли, входящей в мензульный комплект.

Мензульный ход может быть проложен как замкнутый, так и разомкнутый. Обычно он опирается на твердые точки, нанесенные на планшет по координатам и имеющие высотные отметки. Если же он опирается на произвольно избранную точку, то ориентируется с помощью буссоли.

В процессе работы мензулу поочередно устанавливают на точках, начиная с первой; опорной, и, вынося вперед по ходу веху или рейку, устанавливают их на следующую точку. Кипрегель визируют на новую точку, прочерчивают направление, определяя расстояние по рейке и измеряя превышение. Расстояние откладывают в масштабе съемки и накалывают положение точки (только на «рубашке» до уравнивания хода). На каждой последующей точке повторяют операцию, дополняя работу тем, что превышение для контроля берут еще и на заднюю вешку.

Превышения точек вычисляют и уравнивают по правилам для обработки высотного хода при тригонометрическом нивелировании. Плановую увязку хода осуществляют графически.

Графические способы применяют при мелкомасштабной (1 : 5 000 и мельче) или упрощенной съемках.

Мензульная съемка в поле. Съемка начинается с установки мензулы на точке, которая включает следующие действия.

1. Штатив устанавливают над точкой и сверху закрепляют планшет.

2. Планшет центрируют над точкой. В отличие от теодолита, который центрируют по отвесу в продолжении вертикальной оси вращения алидады прибора, в мензуле центрируют точку на планшете, на которой устанавливают прибор. Для этого используют деревянную «вилку», которую надевают сбоку на планшет так, что одним концом она касается точки, а другой приходится на эту же точку снизу, где и подвешивается отвес. Однако точность центрирования зависит от масштаба съемки.

3. Планшет нивелируют с помощью уровня на линейке кипрегеля обычным способом. Ставится кипрегель линейкой параллель-

но двум подъемным винтам треножника (подставки) и, вращая их в разные стороны, выгоняется пузырек уровня на середину. Кипрегель переставляют на 180°. Если при этом пузырек уровня «убежал» в сторону от середины, то его возвращают на половину смещения подъемными винтами подставки, а на другую половину — исправительными винтами уровня. Эту операцию повторяют для контроля.

4. Планшет ориентируют по одной из точек, веку над которой можно наблюдать в трубу. Для этого кипрегель устанавливают так, чтобы скошенный край линейки соединил на планшете точку стояния с точкой наблюдения и, разворачивая планшет, наводят его вместе с кипрегелем на веку. Затем ставят кипрегель, соединив точку стояния с другой точкой ориентирования, и если все сделано правильно, мы увидим вторую веку в перекрестии нитей трубы. В противном случае следует искать, в чем кроется ошибка.

Следует отметить, что все операции по центрированию, нивелированию и ориентированию планшета стараются выполнить одновременно методом приближений.

Удостоверившись, что все точки опорного и съемочного обоснования переколоты с «рубашки» на основной лист, «рубашку» удаляют, осторожно разрезая и загибая ее части. Открывают сравнительно небольшой участок, с которого и начинают съемку.

Съемку производят полярным способом. Один или двое реечников обходят участок съемки, устанавливая рейки в соответствии с формами рельефа, а также на изломах границ лугов, пашен, лесов, огородов, по линиям дорог, рек, ручьев, линий связи, у домов и других сооружений. Снимающий наводит кипрегель на рейку, сохраняя точку стояния на планшете на скошенном крае линейки, определяет дальность и превышение точки. По этим данным откладывает расстояние до точки, накалывает ее и подписывает отметку.

Сразу же после взятия очередного пикета на контуре зарисовывают ситуацию на планшете. Горизонтالي проводят после взятия не более 10 — 12 пикетов, чтобы наблюдатель мог сопоставить пикетные точки на плане с соответствующими точками на местности. Рисовка ситуации и горизонталей обязательно ведется в поле и во избежание грубых ошибок не может быть выполнена по памяти камерально.

По ходу работы составляют кальки высот и контуров в целях исключения ошибок в процессе камерального вычерчивания планшета по завершении полевых работ. Кальку высот получают прямым копированием заснятого участка ежедневно и до того, как будут подняты горизонтали. На кальке высот обозначают пункты геодезического обоснования, пункты теодолитных ходов, реечные точки, гидрографическую сеть с отметками уреза воды.

Все полевое вычерчивание производят простым карандашом. Окончательное вычерчивание и оформление планшетов производят в камеральных условиях. Планшет вычерчивают тушью, изображение ситуации выполняют в принятой для данного масштаба системе условных знаков. Работу начинают с нанесения геодезической сети точек. После этого вычерчивают гидрографическую сеть, населенные пункты, дороги и сооружения при них, элементы рельефа, изображаемые условными знаками, и, наконец, горизонтالي. Затем выделяют контуры сельскохозяйственных угодий, лесов, лугов, кустарников и др. Делают все необходимые надписи и подписи. При этом карандашный рисунок полностью стирают. Вычерчивание производят в принятом стандартном цвете.

В завершение работы вычерчивают рамку планшета и делают обычное зарамочное оформление топографических карт.

Вычерченный план аккуратно срезают с мензульного планшета с помощью скальпеля или бритвы, которой по линейке обрезают лист готовой карты. Он легко отделяется от планшета, на котором остаются только приклеенные к краям закраины.

ДРУГИЕ ВИДЫ ГРАФИЧЕСКИХ СЪЕМОК**12.1. Тахеометрическая съемка**

Слово «тахеометрия» означает «быстрое измерение». Действительно, одно из преимуществ тахеометрической съемки — быстрота исполнения, а также работа с одним из приборов: теодолитом или тахеометром без громоздкой мензулы. Вместе с тем недостатком тахеометрической съемки является то, что она ведется «на запись», а вычерчивается план камерально, когда топографы не имеют возможности видеть местность перед собой.

Тахеометры. Тахеометрическую съемку выполняют либо техническими теодолитами типа Т30, Т15 и другими, либо специально сконструированными для таких работ приборами-тахеометрами, которые бывают различных типов.

Тахеометры номограммные имеют в поле зрения трубы номограмму, с помощью которой определяют расстояния и превышения.

Тахеометры с дальномерами двойного изображения имеют оптические устройства, которые позволяют по горизонтальной рейке определять горизонтальное проложение наклонных линий (это тахеометры ТД, Редта 002 и др.).

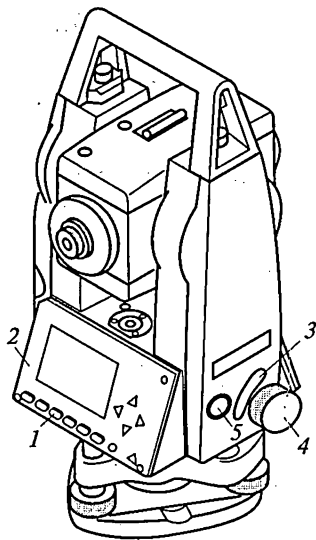
Тахеометры внутрибазовые используются для съемок труднодоступных участков местности и могут работать без рейки. Тахеометры указанных типов в настоящее время не выпускают, но иногда еще применяют на практике.

Рейки, используемые при тахеометрической съемке, — либо обычные дальномерные рейки для съемки, либо специальные с выдвижной пяткой для установления нуля рейки на высоту прибора, аналогичные тем, которые применяют при мензульной съемке кипрегелем КН.

Электронные (цифровые) тахеометры. Электронный тахеометр объединяет в себе возможности электронного теодолита, высокоточного светодальномера и полевого компьютера. Основу угломерной части тахеометров с электронным считыванием составляют датчики накопительного или позиционного типа. Дальномеры электронных тахеометров могут оснащаться разнообразными дальномерными блоками, позволяющими измерять расстояния по призме, отражающей пластинке или пленке, и без отражателя. Центрирование прибора выполняют с помощью лазерного отвеса. В качестве источника электропитания в электронных тахеометрах пре-

Рис. 12.1. Электронный тахеометр Leica TC307:

1 — клавиши управления; 2 — жидкокристаллический экран; 3 — клавиша записи результатов измерения; 4 — бесконечный микрометричный винт для наведения на наблюдаемую цель; 5 — кнопка включения



имущественно используют литий-ионные аккумуляторные батареи.

Управление процессом измерений осуществляется с помощью многофункциональных клавиш (рис. 12.1). Результаты измерений отражаются на жидкокристаллическом экране тахеометра и могут записываться во внутреннюю память прибора емкостью 10—20 тыс. измерений. Кроме результатов измерений на экране могут постоянно отображаться некоторые наиболее важные характеристики настройки прибора: вид режима измерения расстояния, уровень зарядки батареи и т. д.

Набор прикладных программ тахеометра позволяет в режиме реального времени вычислять: наклонные расстояния; горизонтальные проложения; координаты и высоты наблюдаемых точек; превышения и дирекционные углы между точками, выбранными из памяти или выведенными с клавиатуры; координаты новой станции по наблюдениям известных (обратная засечка) и другие элементы. Дополнительные программы позволяют уравнивать теодолитный ход, решать задачи по выносу в натуре геометрических элементов проектируемых и строящихся сооружений. Результаты измерений и предварительной обработки могут переписываться затем в ЭВМ для последующей обработки.

Простейшие тахеометры с минимальной автоматизацией и ограниченным программным обеспечением дают точность измерений углов $5-10''$, линий — $(3 + 5 \cdot 10^{-6} \cdot D)$ мм.

Универсальные приборы с расширенными возможностями обеспечивают точность измерения углов $1-5''$, линий — $(2 + 3 \cdot 10^{-6} \cdot D)$ мм.

Наиболее совершенные приборы могут быть модернизированы до тахеометра-робота, управление которым осуществляется оператором на расстоянии или с помощью специальной компьютерной программы без участия человека.

В настоящее время электронные тахеометры находят самое широкое применение при создании геодезических сетей (съемочно-обоснования), в проведении топографических съемок местности, землеустроительных работах, геодезическом обеспечении

строительства, монтаже и юстировке промышленного оборудования.

Геодезическое обоснование тахеометрической съемки. Съемка может производиться с точек теодолитного хода, проложенного для этой цели, или точек, полученных заранее другими способами. Чаще всего прокладываются специальные *тахеометрические ходы*, либо раздельно со съемкой, либо в едином с ней процессе. Работу по измерению длин сторон хода, горизонтальных углов проводят примерно так же, как это описано при проложении теодолитного хода.

Особенности тахеометрического хода заключаются в измерении сторон хода с помощью нитяного дальномера и определении вместе с координатами x и y отметок точек хода. Следует отметить, что при использовании электронных тахеометров исключается процесс измерения нитяным дальномером.

В случае проложения тахеометрического хода вместе со съемкой последняя преимущественно выполняется полосой вдоль выбранного маршрута (рис. 12.2). Тахеометрический ход прокладывают посередине полосы, и относительно него производят съемку контуров и рельефа полярным способом. Пункты поворота хода определяют с таким расчетом, чтобы с них были видны детали окружающей местности, подлежащие съемке. Поэтому в качестве таких станций для прибора выбирают пункты на возвышенных местах. Но в некоторых случаях приходится отступать от этого правила и выполнять съемку с дополнительных точек. Такие точки связываются с основным добавочным ходом и определяются методом засечек или при помощи геометрических построений. Расстояние между станциями должно согласовываться с масштабом

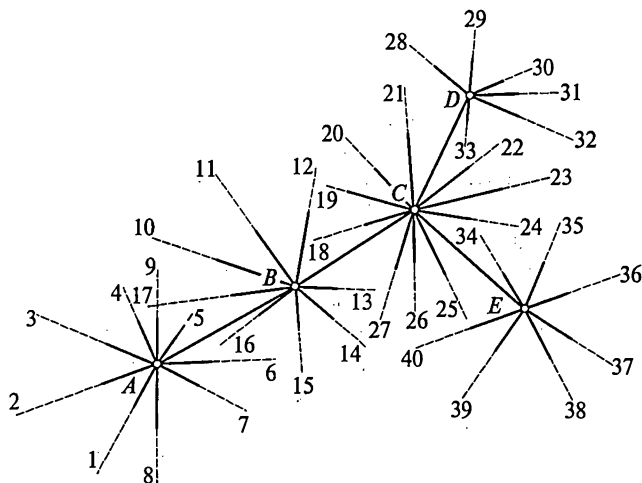


Рис. 12.2. Схема тахеометрического хода и пикетов

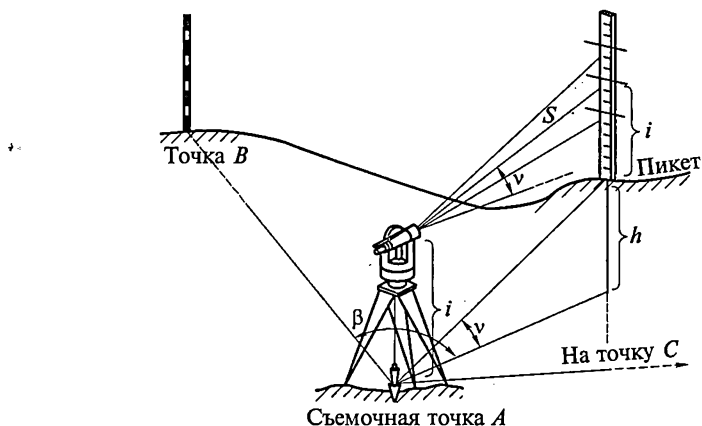


Рис. 12.3. Схема работы с тахеометром на съемочной точке

будущего плана. Чем крупнее масштаб, тем короче должны быть линии визирования со станции на станцию.

Прокладку хода одновременно со съемкой производят в следующей последовательности.

1. Тахеометр устанавливают на первой исходной точке, которая может быть принята за опорную с определенными координатами и высотной отметкой, а может быть просто первой по ходу точкой и тогда весь снятый план, являясь строгим построением, в то же время не будет привязан к единой системе координат. В последнем случае для ориентирования плана в процессе работы должны измеряться магнитные азимуты сторон хода. По ним можно также контролировать правильность измеренных углов.

- Итак, установленный на исходной точке тахеометр центрируют, горизонтируют, ориентируют либо по примычному углу, либо по магнитному меридиану (по буссоли). Измеряют высоту прибора над точкой стояния (рис. 12.3).

2. Измеряют горизонтальные углы между направлениями хода и вертикальные углы по ходу вперед и назад при круге левом и правом. Азимут сторон по буссоли определяют также вперед и назад.

3. Измеряют расстояния дальномером по ходу вперед и назад.

4. Вычисляют значения горизонтальных и вертикальных углов и определяют место нуля для контроля.

5. Ориентируют лимб горизонтального круга 0° вперед (или назад) по линии хода (всегда одинаково) и закрепляют до конца съемки на данной точке. Пункты поворота хода и все станции закрепляют на местности.

Выполнение тахеометрической съемки. При съемке пикетов, которую производят полярным способом, измерения ведут более

упрощенным способом, с меньшей точностью и с меньшим контролем. Углы измеряют при одном положении вертикального круга прибора. Для определения превышений трубу наводят преимущественно на высоту прибора. Если место нуля выражается малой величиной (например, $0^{\circ}01'$), можно ее не принимать в расчет и считать место нуля равным нулю.

Особо важное значение при тахеометрической съемке имеет правильный выбор пикетов, причем главное внимание обращается на съемку рельефа. Пикеты должны быть расположены по всем характерным линиям рельефа местности и характерным местам, составляющим его остов: по водоразделам, тальвегам, на всех вершинах холмов, на дне впадин, по подошве холмов и впадин, по бровкам оврагов, террас и др. Пикеты выбирают настолько близко друг к другу, чтобы местность между парой соседних пикетов имела один скат (без перегибов).

Одновременно пикеты должны дать возможность изобразить существенные контуры местности: гидрографию, дорожную сеть, границы угодий, здания и пр.

Пикеты на местности ничем не отмечают. Степень их густоты зависит от степени наличия контуров и прежде всего от характера рельефа. Сложный, сильно расчлененный рельеф требует пикетов значительно больше, чем легкий, спокойный. При этом всегда следует учитывать масштаб плана и стремиться к тому, чтобы даже при сложных рельефе и ситуации на 1 см^2 плана было не более четырех-пяти пикетов, при среднем рельефе на 1 см^2 достаточно одного пикета, а при легком — еще реже.

Расстановка реек по пикетам должна подчиняться продуманной системе. Так, рейку можно направить сначала по контурам (дороге, бровке оврага, берегу реки), а затем по основным формам рельефа (водоразделу, тальвегу и т.д.). Результаты наблюдений пикетов записывают в полевой журнал, нумерация их сквозная, т.е. продолжается на каждой последующей съемочной станции. Обычно, чтобы не спутать нумерацию пикетов, номер последнего пикета, взятого на каждой станции, подчеркивают в кроки (см. ниже) и в полевом журнале. Нумерацию пикетов необходимо все время сверять. Обязательной должна быть проверка каждого 10-го, 20-го и т.д. пикетов.

Против каждого пикета делают пометку, характеризующую его. Кроме того, все пикеты отображаются на специальном схематическом плане, называемом «*абрис*» (нем. Abriß) или «*кроки*» (фр. croquis — чертеж) (рис. 12.4). Такой чертеж составляют на глаз в довольно крупном масштабе. На нем показывают основные элементы местности: контуры угодий; застройку; названия; какую форму примерно должны иметь горизонтали, направления их интерполирования и другие сведения, характеризующие ситуацию и рельеф. Полевой журнал и кроки являются необходимыми до-

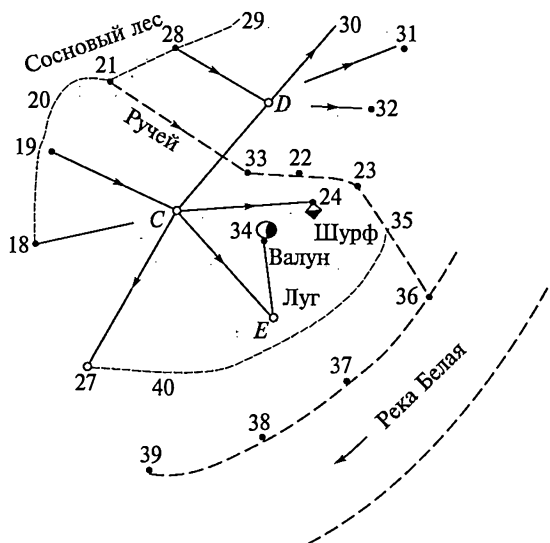


Рис. 12.4. Абрис

кументами для последующих камеральных работ и составления топографического плана.

Камеральная обработка материалов тахеометрической съемки. В камеральных условиях вычисляют координаты (условные или в единой системе прямоугольных координат) всех точек тахеометрического хода. Для хода, в котором измерения длин его сторон проводили нитяным дальномером, допустимую погрешность в положении точек (м) вычисляют по формуле $f_s = \sum S / (400\sqrt{n})$, где S — периметр (длина хода), м; n — число сторон хода.

Для получения высотных отметок всех точек хода вычисляют и уравнивают высотный ход, допустимая ошибка (см) которого равна $f_{\Delta h} = 0,04 \sum S / \sqrt{n}$.

Создание топографического плана начинается с нанесения станций по координатам, с которых выполнялась съемка. Накладка станций должна контролироваться путем определения расстояний между нанесенными точками.

Нанесение пикетов на план представляет довольно трудоемкую работу и производится с помощью специального транспортира. Существуют различные конструкции транспортиров: полукруглые, круглые с миллиметровой линейкой (рис. 12.5, а и б), бумажные, металлические, целлулоидные и др. В центре полукруглого транспортира, показанного на рис. 12.5, а, имеется тонкое отверстие для установки его наколкой на плане в точке стояния прибора. На диаметре AB указаны миллиметровые деления с подпи-

сью их в обе стороны от центра. Для нанесения пикета транспортёр поворачивают так, чтобы по ориентирной линии (начальное — нулевое направление со съёмочной станции на смежную точку, по которой ориентировался лимб тахеометра), проведенной заранее на плане, получился отсчет, соответствующий отсчету в поле по лимбу тахеометра. Затем на бумаге по нулевому диаметру помечают точку, отстоящую от центра на расстояние, соответствующее расстоянию (в масштабе плана) пикета от станции.

Так, на рис. 12.5, *a* по отсчету $128^{\circ} 05'$ и расстоянию 26,8 м нанесен пикет *a* в масштабе 1 : 1 000. Если бы отсчет был $308^{\circ} 05'$, то получилась бы точка *a'*. (На рис. 12.5, *a* за начальное направле-

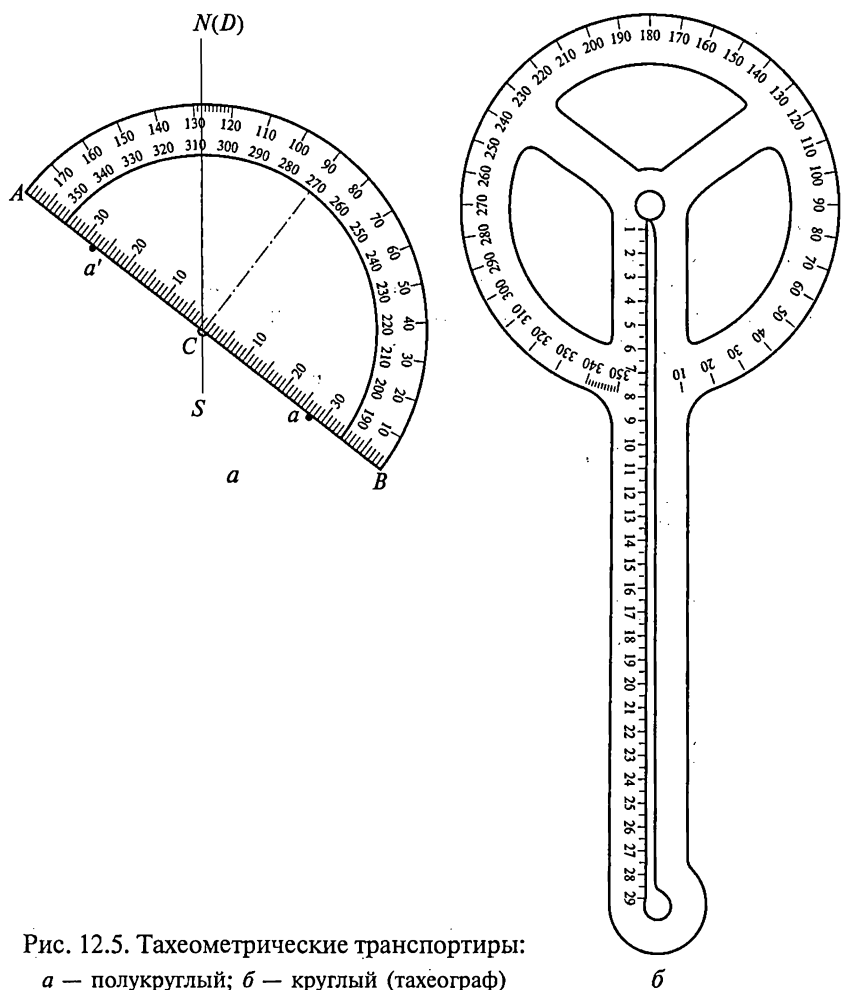


Рис. 12.5. Тахеометрические транспортиры:
a — полукруглый; *б* — круглый (тахеограф)

ние принято направление геодезического меридиана N .) По нанесенным таким способом пикетам согласно крокам и пометкам в полевом журнале производят рисовку рельефа и ситуации с соблюдением условных знаков.

При выполнении съемки электронным тахеометром последовательность всех операций сохраняется, но сами результаты измерений записываются исполнителем не в полевой журнал, а нажатием клавиши прибора в его внутреннюю память. Затем полевые измерения переписываются в ЭВМ. Это могут быть непосредственно сами измерения или уже по ним вычисленные координаты и высоты точек тахеометрического хода и пикетов. Если при производстве съемки выполнялось кодирование точек, то, используя набор специальных программ, можно выполнить рисовку ситуации и рельефа местности и напечатать готовый план на плоттере.

Лучшим способом контроля составленного плана является сопоставление изображения ситуации и рельефа с местностью.

12.2. Упрощенные виды съемок

Буссольная съемка. Такая съемка относится к разряду полуинструментальных. Ее точность ниже мензульной и тахеометрической съемок. Однако для географических и геологических исследований она может быть достаточной. В то же время буссольная съемка не требует громоздких приборов, проста в исполнении.

Центральная деталь буссоли — это стрелка с арретиром для закрепления ее в нерабочем состоянии. Буссольное кольцо имеет градусные деления (по часовой стрелке или против нее) либо румбические. Визирование на предметы выполняется через целик на обойме буссоли. Перед работой буссоль подвергается поверкам:

- стрелка должна быть уравновешена в горизонтальной плоскости, т. е. когда буссоль отnivelирована по уровню, стрелка не должна «клевать» одним концом;
- стрелка должна быть достаточно чувствительной и подвижной; для проверки к установленной буссоли подносят железный предмет, стрелка должна чутко на него реагировать, а после изъятия предмета устанавливаться на том же отсчете по кольцу;
- стрелка не должна иметь эксцентриситет; проверяется отсчетами по двум концам стрелки при разном положении кольца;
- магнитная и геометрическая оси стрелки должны совпадать; проверяется путем снятия стрелки и переворота ее на другую сторону, при этом в обоих положениях отсчеты по концам стрелки должны совпадать.

Работу в поле следует производить в следующем порядке.

1. Разбить полигон. Расставить и закрепить точки, с которых будет вестись съемка. Измерить между ними расстояния землемер-

промерами от магистрали или просто единичными промерами. После этого наносят всю остальную ситуацию в условных знаках топографических карт с абрисов, которые составляют в поле по ходу.

Если есть результаты барометрического нивелирования, наносят пункты с отметками высот и, если это возможно, проводят горизонтали.

Глазомерная съемка. Выполняется для получения приближенного плана местности в короткие сроки и с минимумом затрат. Быстрота съемки достигается тем, что длины линий и углы измеряют простейшими приборами, а содержание плана заполняют на глаз.

Однако несмотря на простоту исполнения глазомерная съемка требует от исполнителей достаточных навыков и умения в производстве топографических съемок, и особенно ценен в данном случае опыт, приобретенный на мензурной съемке.

Глазомерная съемка бывает *сплошная* (съемка площади) и *маршрутная* в виде полосы вдоль пути следования. Принципиальная схема глазомерной съемки такая же, как инструментальных и полуинструментальных съемок. Ходы прокладывают для контроля в виде замкнутых многоугольников. Прокладку хода и съемку подробностей выполняют одновременно, как, например, при буссольной и тахеометрической съемках. Ход и положение объектов местности сразу же фиксируют на листе бумаги. В некоторых случаях глазомерную съемку можно производить по «скелету», полученному со старых карт. Рельеф изображают либо на глаз, проводя горизонтали по значительным уклонам местности, либо показывают только отдельные формы рельефа: обрывы, овраги и др.

Для производства глазомерной съемки нужно иметь планшет с прикрепленным листом чистой белой бумаги, компас, который также может быть закреплен на планшете, визирную линейку (треугольного сечения) и карандаш. Иногда в процессе глазомерной съемки проводят барометрическое нивелирование, тогда в маршрут берут anerоид.

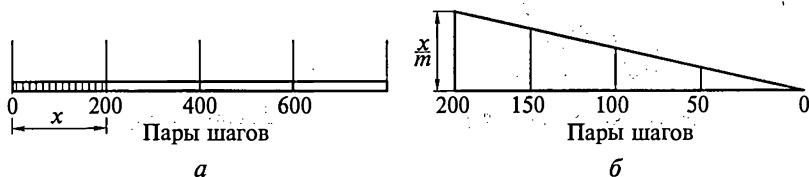


Рис. 12.7. Масштабы шагов:

a — линейный; b — клиновой; t — знаменатель масштаба

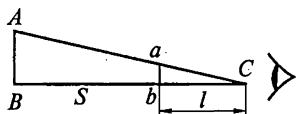


Рис. 12.8. Глазомерное определение расстояний

Расстояния измеряют шагами, чаще всего парами шагов. Для этого рассчитывают и вычерчивают *масштаб шагов*, с помощью которого количество отсчитанных шагов по трассе переводят в метры в масштабе съемки. Вдоль измеренного на ровном участке отрезка длиной 100 м дважды, туда и обратно, проходят

ровными шагами, считая пары шагов под левую или правую ногу. Затем составляют отношение $n_{\text{пар шагов}} = 100 \text{ м}$, а $200_{\text{пар шагов}} = X \text{ м}$. Отсюда $X = 200 \cdot 100 / n$. По этим данным строят линейный или клиновой масштаб шагов (рис. 12.7). Линейный масштаб вычерчивают на полоске бумаги, которую наклеивают на визирную линейку. Клиновой масштаб вычерчивают на краю планшета (листа бумаги).

Съемку начинают с того, что накалывают на планшет первую, исходную точку маршрута так, чтобы весь остальной участок или полоса съемки разместились удачно на листе бумаги. Потом разворачивают перед собой планшет, ориентируя его по компасу, и визируют направление, по которому предстоит следовать дальше. Прочерчивают линию и после промера шагами вдоль нее откладывают расстояние между точками 1 и 2. На точке 2 операция повторяется. Ход завершается тем, что с последней точки исполнитель визирует планшет на первую точку, замыкая ход. Съемщик должен убедиться, что визирная линия совпала по направлению на первую точку, а измеренные на нее расстояния в натуре и на планшете не расходятся значительно. Разумеется, что допускаются значительно большие расхождения, чем при инструментальных съемках. Однако следят за тем, чтобы они не были чрезмерно большими, это может привести к искажению конфигурации всего хода и, следовательно, плана местности.

По ходу работы съемщик заполняет планшет содержанием, засекая положение отдельных объектов и зарисовывая детали на глаз.

Во время съемки расстояния могут измеряться и глазомерно, как это показано на рис. 12.8; C — глаз наблюдателя; l — длина вытянутой руки; ab — линейка; AB — объект, высота которого известна. Из подобия треугольников ABC и abC следует $S/l = AB/ab$, откуда $S = lAB/ab$.

12.3. Съемка приборами спутникового позиционирования

Как отмечалось ранее, спутниковые приемники выделяются по назначению и имеют широкий диапазон применения. Для гео-

графических, геологических, геофизических и иных исследований выпускают малогабаритные приемники ручного формата, оснащенные внутренней антенной.

На рис. 12.9, *а* приведен общий вид приемника GARMIN GPS 12 корпорации GARMIN International (США). Он объединяет GPS-приемник и управляющий компьютер. На его корпусе расположена кнопка Power, включающая и выключающая приемник, пять функциональных клавишей и кнопка перемещения курсора. Управляющий компьютер приемника имеет порт и интерфейс подключения к другому компьютеру для обмена данными. При включении GARMIN GPS 12 определяет местоположение в течение нескольких десятков секунд. Средняя квадратическая погрешность позиционирования равна 15 м. Приемник имеет компас, предоставляет текущие трехмерные координаты и позволяет сохранять в памяти до 500 путевых точек, а также другие данные. Сервисные функции обеспечивают проложение прямолнейных маршрутов и применение построителя карты. Используя GARMIN GPS 12, можно определять координаты важных объектов, выполняя съемку второстепенных объектов на глаз.

Стремительное развитие спутникового приборостроения и использование достижений географических информационных систем (ГИС) обусловили создание принципиально новых спутни-

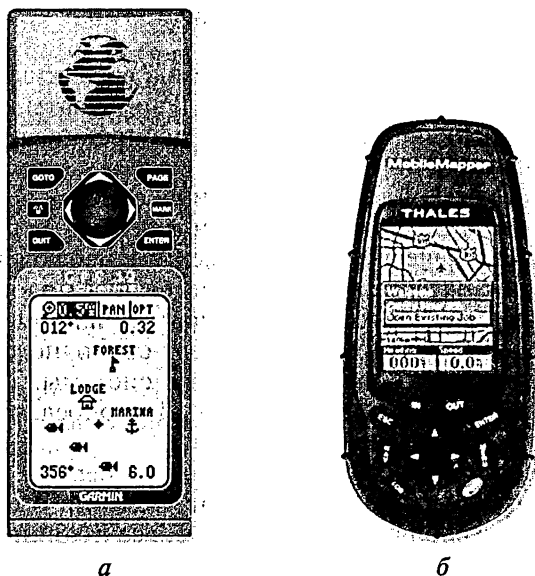


Рис. 12.9. GPS-приемники:
а — GARMIN 12; *б* — Mobile Mapper

ковых приемников, работающих с геоинформацией и обеспечивающих точность определения координат меньше 1 м.

На рис. 12.9, б показан 12-канальный GPS-приемник Mobile Mapper французской компании Thales Navigation, выполняющий измерения в абсолютном и относительном режимах наблюдений. Погрешность определения местоположения составляет около 0,6 м в системе координат WGS-84 или местной и не зависит от удаления подвижной станции от базовой в пределах 15 км. GPS-приемник имеет собственное программное обеспечение, в него можно загружать цифровые карты в ГИС-форматах программ ArcView, MapInfo, AutoCad. Офисная программа позволяет создавать библиотеки характеристик объектов и пояснений, которые могут быть загружены в приемник.

Объекты съемки в процессе работы отображаются на экране приемника. Прибор может измерять и отображать как отдельные точки, линии, замкнутые контуры, так и сеть равномерно распределенных пунктов. Объекты с одинаковыми характеристиками могут сниматься с помощью специальной функции повторной записи, предусмотренной для экономии времени. В случае недоступности объекта съемки имеется функция «offset», предоставляющая возможность измерить его с учетом сдвига.

12.4. Топографическая съемка морского шельфа и внутренних водоемов

Съемка шельфа и внутренних водоемов сравнительно недавно стала задачей топографической службы. Ранее карты шельфа в топографическом исполнении не делали, а внутренние водоемы (озера, водохранилища и др.) на топографических картах показывали просто голубой краской с указанием лишь отметок урезов воды.

Комплекс работ по съемке шельфа и водоемов включает создание опорной геодезической сети, уровенные наблюдения, съемку поверхности дна. Задача состоит в определении положения точек промера на поверхности водоема и исполнении промера глубины.

Для определения плановых координат съемочного судна применяют различные радиогеодезические системы, спутниковое позиционирование и простые засечки. Для определения глубин используют ручные лоты и эхолоты.

Геодезическое обоснование создается на берегу, на мелководье. Водомерные посты предоставляют сведения о систематическом изменении уровня вод, чтобы затем все глубины привести к одному исходному уровню. В результате съемки на топографических картах показывают отдельные точки с глубинами и линии равных глубин — изобаты, а также типы грунтов на дне и растительность.

ФОТОТОПОГРАФИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

13.1. Общие сведения о фототопографических съемках

Вслед за изобретением фотографии ее тотчас же стали применять для топографических съемок местности. В 1852 г. французский топограф Э.Лосседа впервые использовал перспективные наземные фотографии для составления планов местности путем развертки перспективного изображения в плановое. Этот год можно считать годом рождения *фотограмметрии*, хотя это название появилось не сразу. Свой способ топографической съемки, основанный на принципе прямой пространственной засечки, Э.Лосседа назвал «метрофотографией», что означало «измерительная фотография». Позднее появилось название «фототопография», указывающее, что этот способ съемки применяется для составления планов местности. В 1867 г. А.Майденбауэр¹, использовавший первым фотокамеру для составления планов архитектурных сооружений, ввел название «фотограмметрия», которое указывало на широкое применение данного вида съемки в различных областях науки, техники и трудовой деятельности человека, когда нужно было получить в больших объемах числовую и графическую информацию о каком-либо объекте. Дальнейшие разработки съемочной и обрабатывающей аппаратуры, теории обработки снимков, методики и технологии получения по снимкам графической и цифровой информации о сфотографированном объекте производились в разных странах. В основном это были ученые Германии, Австрии, Франции, Италии, США и России.

Значительный вклад в развитие фотограмметрии внесли русские ученые и инженеры, применявшие наземные фотографические съемки при изысканиях под строительство железных дорог. В 1897 — 1899 гг. Р.Ю.Тиле выполнил фототопографические съемки при изысканиях железных дорог в Забайкалье, Маньчжурии и Закавказье. Съемки производились фототеодолитом В.Полака, созданным венской фирмой «Лехнер». Так возникла одна из разновидностей фототопографической съемки — *фототеодолитная съемка*. В 1908 — 1909 гг. Р.Ю.Тиле издал трехтомную монографию «Фототопография в современном развитии», в которой впервые в России в единой связности были описаны история развития фо-

¹ А.Майденбауэр — основатель «Прусского фотограмметрического бюро» — первой фотограмметрической организации в мире.

тограмметрии, ее теоретические основы, используемое съемочное и обрабатывающее оборудование, применение фотограмметрии в различных областях науки и техники.

Вместе с тем началось применение фотографии для воздушной съемки с целью картографирования. С развитием авиации, начиная с 20-х годов XX в., чрезвычайно быстро развилась *аэрофототопографическая съемка*¹. К настоящему времени она стала основным методом создания топографических карт. Кроме того, по материалам аэрофотосъемок производится систематическое обновление топографических карт, необходимое для приведения в согласие содержания устаревающих карт с действительным состоянием территории.

С развитием космических съемок появилась возможность использовать мелкомасштабные снимки с ИСЗ для создания карт, однако это преимущественно карты общегеографические масштабов 1 : 500 000 и 1 : 200 000.

13.2. Фототеодолитная съемка

Наземная фототеодолитная съемка производится специальным прибором — *фототеодолитом*, представляющим собой сочетание теодолита с точной фотокамерой в совместном или раздельном исполнении (рис. 13.1). Фотокамера служит для фотографирования местности, теодолит используется для измерения горизонтальных и вертикальных углов с целью определения координат станций, на которых производилась съемка.

Точки, с которых ведется фотографирование, должны быть привязаны к государственной плановой и высотной геодезической сети. Для этого их включают в общий теодолитный ход или привязывают специальными ходами к опорным пунктам.

Фотографирование ведется с двух концов базиса, длина которого определяется в процессе геодезической привязки, как и отметки точек на концах базиса. Это дает возможность рассматривать пары снимков стереоскопически и производить измерения на специальных стереофотограмметрических приборах с высокой точностью.

Для фотографирования станции и базисы выбирают так, чтобы съемкой была покрыта вся картографируемая местность. Дли-

¹ Инженер-поручик В. Ф. Найденов (впоследствии проф. Военно-инженерной академии) был первым, кто в России с начала 90-х годов XIX в. стал проводить работы по построению планов с использованием воздушных фотоснимков. В 1898 г. он построил персептометр (фототрансформатор) для преобразования наклонных снимков в горизонтальное положение, а в 1907 г. написал первый в России учебник по воздушному фотографированию «Измерительная фотография и ее применение в воздухоплавании».

на базиса зависит от глубины фотографируемого пространства и допустимой погрешности определения координат точек местности по снимкам. Базис B определяют по формуле

$$\frac{Y_{\max}^2 \delta_P}{f \delta_Y} \leq B \leq \frac{Y_{\min}}{4}, \quad (13.1)$$

где δ_P — погрешность измерения положения (параллакс) точек на снимках; δ_Y — погрешность определения координат точек в натуре; $Y_{\max}$ — расстояние до дальней границы съемки; $Y_{\min}$ — расстояние до ближней границы съемки; f — фокусное расстояние объектива камеры.

До начала полевых работ составляют проект съемки, в котором предусматривается сгущение геодезической основы с обязательной графической частью, содержащей схему размещения съемочных базисов и так называемых корректирных точек (рис. 13.2). Здесь же наносят границы участков съемки с каждого базиса в отдельности с выделением участков, которые из-за особенностей рельефа или по иным причинам оказываются не заснятыми при фотографировании, так называемые мертвые пространства.

Полевые работы включают в себя: выбор точек съемки (базиса), выбор и установку (маркировку) корректирных точек, играющих роль контрольных пунктов, прокладку геодезических сетей или ходов для привязки точек съемки и корректирных точек, измерение базисов, фотографирование.

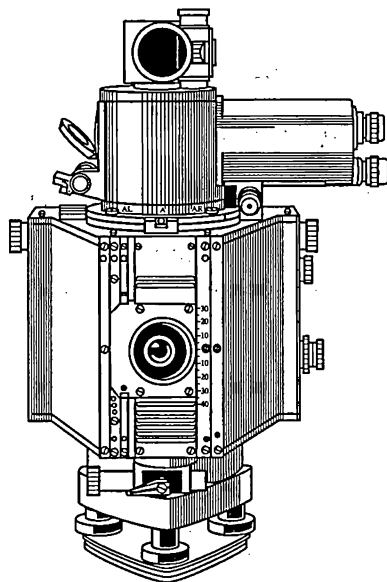


Рис. 13.1. Фототеодолит

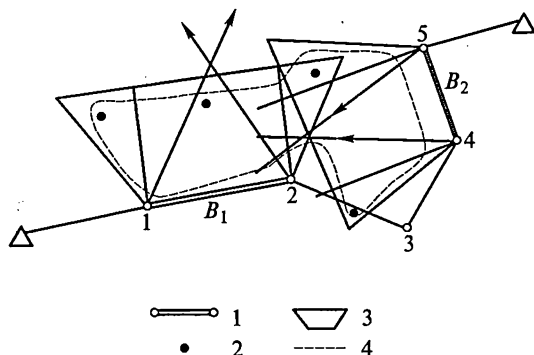


Рис. 13.2. Проект геодезической привязки, расположения базисов и корректурных точек фототеодолитной съемки:

1 — базис фотографирования; 2 — корректурная точка; 3 — площадь, снимаемая с одного базиса; 4 — граница участка съемки

Фотографирование может производиться, когда оптическая ось фотоаппарата находится в следующих положениях:

нормальном — оптическая ось перпендикулярна базису и горизонтальна, таким образом оси в двух положениях аппарата параллельны друг другу;

равнонаклонном — оптические оси взаимно параллельны и перпендикулярны к горизонтальной проекции базиса, но наклонены к горизонту на один и тот же угол;

равноотклоненном — оптические оси горизонтальны и параллельны между собой, но составляют некоторый угол с базисом, отличный от 90° ;

конвергентном — оптические оси горизонтальны, но не параллельны друг к другу.

Из перечисленных видов съемки на практике применяется, как правило, только нормальный и равноотклоненный.

Фотографирование ведется на фотографические пластинки или пленку с малой чувствительностью и высокой разрешающей способностью, поэтому снимки содержат много мелких деталей. Размеры снимков, получаемых фототеодолитами, обычно 13×18 см. В середине каждой рамки кадра отпечатываются координатные метки, соединив которые, получают положение центра снимка, необходимое при измерении координат.

В целом фототеодолит служит для фотографирования объектов местности, например зданий, мостов, карьеров и т.д., при заданных значениях угловых элементов внешнего ориентирования, а также для обеспечения возможности измерения горизонтальных и вертикальных углов, необходимых при определении положения базиса фотографирования и контроля ориентирования фотокамеры.

По конструкции фототеодолиты можно разделить на три группы.

К первой из них относятся фототеодолиты, в которых фотокамера и теодолит соединены между собой. Теодолит служит для выполнения геодезических работ и установки камеры в рабочее положение на концах базиса. В эту группу входят фототеодолиты с постоянным положением фотопластинки и фототеодолиты, в которых можно производить наклон фотоснимков.

Вторую группу составляют фототеодолиты, в которых фотокамера с теодолитом соединена в одно целое и она служит зрительной трубой, причем горизонтальные углы измеряются по кругу, а вертикальные — по кругу или с помощью шкалы, учитывающей смещение объектива в вертикальном направлении.

В третью группу входят фототеодолиты, камера и теодолит которых разделены, и работать ими могут одновременно два наблюдателя. Камера снабжена приспособлением для установки оптической оси под заданными углами к базису фотографирования. Эта группа фототеодолитов имеет камеры, приспособленные для съемок при горизонтальном, вертикальном и наклонном положениях фотопластинки.

На практике используют фототеодолиты различных типов и конструкций. Среди них известны: фототеодолит «Геодезия» (Россия), фототеодолиты «Фотео-19/1318» и С-3а (Германия) и др.

Фототеодолит 19/1318 относится к третьей группе фототеодолитов и позволяет производить съемку при горизонтальном положении оптической оси фотокамеры.

Фотокамера «УМК 10/1318» была разработана и изготовлена фирмой «Карл Цейсс» (Германия). Она снабжена широкоугольным объективом Ламегон 8,100, имеет плавную фокусировку и предназначена для съемки объектов при горизонтальном, наклонном и вертикальном положениях оптической оси фотокамеры. Специальный штатив в виде двойной подвески позволяет установить две фотокамеры и производить синхронную стереосъемку близких объектов. Фирма выпустила четыре варианта фотокамеры УМК для съемки на фотопластинки и фотопленку.

Фирмой «Вильд» (Швейцария) были выпущены фототеодолиты Р-30 с фокусным расстоянием 165 мм, минимальной дисторсией 15 мкм; наземная универсальная камера Р-31 с фокусным расстоянием 200 мм и минимальной дисторсией 4 мкм; наземная камера Р-32 с фокусным расстоянием 64 мм и минимальной дисторсией 4 мкм, а фирмой «Оптон» (Германия) — наземная измерительная камера ТМК-6 с объективом с фокусным расстоянием 60 мм и минимальной дисторсией 4 мкм, наземная измерительная камера ТМК-12 с объективом с фокусным расстоянием 120 мм и минимальной дисторсией 4 мкм; фототеодолит с измерительной камерой «Веропласт» с объективом с фокусным расстоянием

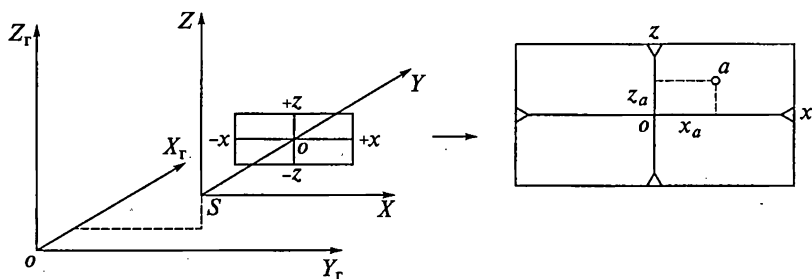


Рис. 13.3. Связь координат точки a на снимке и в геодезической системе

150 мм. Выпускают фототеодолиты и в странах СНГ: в России — фототеодолит «Геодезия», Украине — панорамный фотоаппарат ФТ-2.

При фототеодолитной съемке положение точки определяют в конечном счете в пространственной системе координат $OX_rY_rZ_r$, а непосредственные измерения проводят в системе координат снимка oxz , от которой последовательно переходят к фотограмметрической системе $SXYZ$, а затем к геодезической (рис. 13.3).

Выведем основные формулы фототеодолитной съемки. Для этого воспользуемся рис. 13.4 со следующими обозначениями: B — ба-

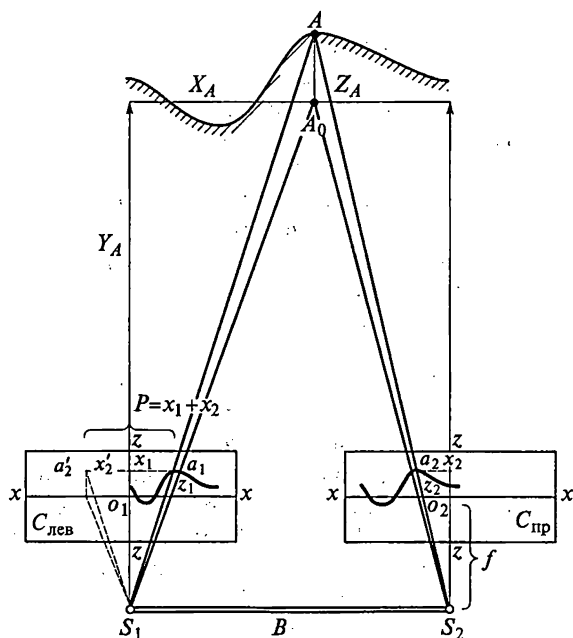


Рис. 13.4. Определение координат точек местности

зис съемки; S_1, S_2 — узловые точки объектива фотокамеры; $C_{\text{лев}}$ и $C_{\text{пр}}$ — плоскости позитивов, расположенные на расстоянии f (фокусном расстоянии объектива камеры) от точек S_1 и S_2 ; o_1 и o_2 — точки пересечения оптической оси объектива с плоскостями позитивов (снимков) — это главные точки снимков, которые получаются в пересечении линий, соединяющих координатные метки на каждом снимке; A — некоторая точка местности, которой на левом снимке соответствует точка a_1 , а на правом — a_2 .

Если принять координатные линии за оси координат x и z , то положение точек a_1 и a_2 определится на снимке парой координат: (x_1, z_1) и (x_2, z_2) . Эти координаты называют плоскими фотограмметрическими координатами.

Величина параллакса P связана с координатой x и определяется как разность абсцисс двух изображений на разных снимках. Для точки A параллакс $P_A = x_1 - (-x_2) = x_1 + x_2$. Для нормального случая съемки, который изображен на рис. 13.4, выведем основные формулы определения пространственных координат точек местности по стереопаре снимков.

Из подобия треугольников $S_1 S_2 A_0$ и $S_1 a_1 a_2^1$ следует $P/f = B/Y_A$, откуда

$$Y_A = \frac{B}{P} f. \quad (13.2)$$

Справедливы также равенства $X_A/Y_A = x_1/f$ и $X_A = Y_A x_1/f$. Выразив Y_A из формулы (13.2), получим

$$X_A = \frac{B}{P} x_1 \quad (13.3)$$

и аналогично

$$Z_A = \frac{B}{P} z_1. \quad (13.4)$$

Переход от фотограмметрических координат точек x_ϕ, y_ϕ, z_ϕ к геодезическим осуществляется по формулам

$$\left. \begin{aligned} X_r &= x_s + y_\phi \cos \alpha_0 - x_\phi \sin \alpha_0; \\ Y_r &= y_s + y_\phi \sin \alpha_0 + x_\phi \cos \alpha_0; \\ Z_r &= z_s + z_\phi, \end{aligned} \right\} \quad (13.5)$$

где X, Y, Z — геодезические координаты определяемой точки; x_s, y_s, z_s — геодезические координаты центра проекции (узловой точки объектива) при съемке с левой точки базиса; α_0 — дирекционный угол оптической оси камеры (главного луча снимка) при съемке с левой точки.

Основное достоинство фототеодолитной съемки, как и других видов аэрофототопографических съемок, состоит в том, что она

сокращает время и затраты на полевые работы. Собственно съемка, т.е. создание плана, карты происходит в значительной мере камерально, по снимкам.

Существуют два метода обработки фототеодолитных снимков: 1) *аналитический* — когда координаты точек измеряются на снимках с помощью высокоточных стереофотограмметрических приборов — стереокомпараторов, а окончательные координаты точек местности получают на ЭВМ вычислением; 2) *графомеханический* — когда снимки обрабатываются на специальных универсальных стереоприборах, при этом план местности получается непосредственно на планшетах стереоприборов.

13.3. Аэрофототопографическая съемка

Существуют два метода аэрофототопографической съемки: комбинированный и стереотопографический.

Исходным материалом для создания карты служат аэрофотоснимки. Вся процедура создания карты включает в себя собственно *съемку* — *фотографирование* с летательных аппаратов (самолетов, вертолетов), *плановую* и *высотную подготовку снимков*, *дешифрирование снимков* и работы по *обработке снимков* — фотограмметрические работы.

Общие сведения о съемке и снимках. Фотографическую съемку производят с самолетов. Существуют специально сконструированные или приспособленные для этой цели аэропланы, например отечественный АН-30 и др.

Фотографирование производится специальными аэрофотоаппаратами (АФА), снабженными объективами с различными фокусными расстояниями: 70, 100, 140, 200 мм и др. Съемка ведется на фотопленку, заправленную в кассеты. Размер кадра у стандартных отечественных АФА 18×18 см, но есть также аппараты с размерами кадра 23×23 см и 30×30 см.

Пленка для аэрофотографирования используется как черно-белая, так и цветная, однако в массовом производстве топографических карт применение находит преимущественно черно-белая пленка с эмульсией, чувствительная ко всей видимой части спектра (панхром), обладающая высоким фотографическим разрешением (детальность) изображения. Снимки печатаются контактно на тонкой глянцевой бумаге.

Процесс фотографирования максимально автоматизирован. АФА подключен к самолетной электросети и через установленный интервал времени производит экспонирование очередного кадра. Сама выдержка регулируется также автоматически с помощью фотореле.

Фотоаппарат соединен с гироустановкой, с помощью которой ему придается устойчивое положение, а пленка при съемке зани-

маст положение, максимально близкое к горизонтальному при вертикальном положении оптической оси объектива АФА. По ходу съемки радиовысотометром определяется высота фотографирования каждого снимка.

Чаще всего снимаемый участок не может быть размещен на одном снимке, поэтому возникает задача покрытия снимками всей территории картографирования, например трапеции или группы трапеций будущей карты. Тогда участок фотографируется последовательно маршрут за маршрутом. При этом соблюдается перекрытие вдоль маршрута между снимками до 57—60 % от рамки кадра и поперечное перекрытие между маршрутами — 20—40 % от рамки кадра.

Время съемки выбирается таким, чтобы солнце не было скрыто облаками и стояло над горизонтом не слишком низко и не в зените. Самый удобный сезон для дешифрирования снимков — лето, если, конечно, не имеется в виду специальный вид съемки, например состояние снежного покрова или ледостава и ледохода.

Геометрические свойства снимков. В отличие от картографических изображений, которые получаются ортогональным проектированием ситуации на плоскость относимости с последующим разворачиванием «картинки» в плоскость в любой картографической проекции, снимки являются центральным проектированием местности на плоскость. Таким образом снимки получаются во внешней перспективной проекции, в связи с чем на реальных снимках возникают такие искажения, которые не свойственны карте. Поэтому преобразование снимков в карты составляет достаточно сложную задачу.

Масштаб горизонтального аэрофотоснимка. Используя рис. 13.5, запишем формулу, связывающую масштаб фотоизображения с фокусным расстоянием f объектива АФА и высотой фотографирования H : $S_0/S_0 = ab/AB = 1/m$, откуда $1/m = f/H$, где AB — отрезок на местности (М), ab — отрезок на снимке (Сн).

Однако на наклонном снимке масштаб изображения не будет постоянным. Вместе с ним будут искажаться размеры и, что особенно важно, фигуры, конфигурации объектов, как это показано на рис. 13.6.

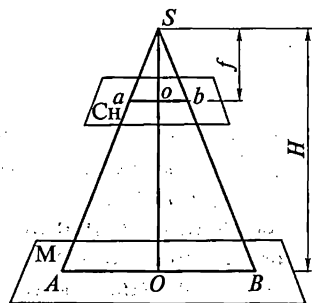


Рис. 13.5. Масштаб аэрофотоснимка

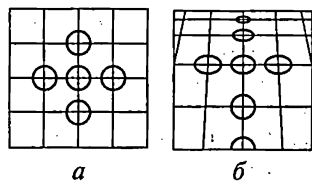


Рис. 13.6. Изображение окружности:

a — неискаженное на горизонтальном снимке; *b* — искаженное на наклонном снимке

Исправление снимков от искажений из-за наклона и приведение их к заданному масштабу называют *трансформированием*. Трансформирование осуществляется либо фотомеханическим способом, либо графическим путем с помощью проективных сеток, которые строятся на четырех общих точках, найденных на снимках и картографической основе. Между ними строят на снимках и основе два четырехугольника (трапеции), которые разбиваются на равное число более мелких трапеций. С их помощью содержание отдешифрированных снимков переносится на картографическую основу. Из-за влияния рельефа происходит сдвиг изображения, как это показано на рис. 13.7. Величина сдвига δ_h зависит от фокусного расстояния f объектива АФА, высоты фотографирования H и высоты самого объекта h . По этой причине также невозможно прямое совмещение фотоснимка с картой. Исправление искажения из-за рельефа — более сложная проблема, чем исправление из-за влияния наклона снимка. Но и она решена в виде так называемого *ортотрансформирования* на специальных ортофото- и электронных трансформаторах.

Однако само по себе наличие сдвига из-за рельефа, так называемый параллакс, дает возможность рассматривать снимки стереоскопически.

Стереоскопия — объемное видение объектов окружающей нас действительности. Мы обладаем такой возможностью благодаря наличию двух глаз. В середине XIX в. было открыто искусственное стереовидение. Для этого нужно только с двух точек, расположенных на некотором удалении друг от друга (базисе), сфотографировать и зарисовать два изображения.

Два перекрывающихся аэрофотоснимка (или два фототеодолитных снимка) составляют стереопару, которую можно рассматривать в стереоскоп и видеть местность объемно. Для этого нужно левый снимок рассматривать левым глазом, а правый — правым. Существуют разные принципы и разные стереоскопы для разглядывания снимков. На практике в аэрофототопографии используют как *оптические стереоскопы*, например линзово-зеркальные (ЛЗ), так и системы, в которых через красно-синие очки рассматриваются два стереоснимка, также окрашенные в эти два цвета — так называемые *анаглифы*.

Достоинство стереомодели состоит в том, что по ней можно делать измерения высот, а линейные измерения, в том числе параллактического сдвига, получаются с меньшими погрешностями, чем при измерении лупой.

Измерение высот по разности параллаксов. Рассмотрим рис. 13.8. Здесь S_1 и S_2 — центры проекции (объективы АФА в два момента съемки); B — базис съемки; b — базис съемки в масштабе снимка; H — высота фотографирования; f — фокусное расстояние объектива АФА; o_1 и o_2 — центры левого и правого снимков; h — высота рельефа.

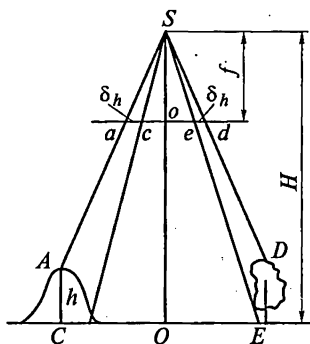


Рис. 13.7. Влияние рельефа на аэрофотоизображение

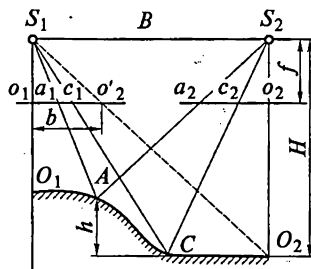


Рис. 13.8. Измерение высот по разностям параллаксов

Параллаксом (аналогично фототеодолитной съемке) называют разность координат (абсцисс) одной и той же точки на разных снимках. На рис. 13.8 параллакс точки a равен $P_a = o_1 a_1 + o_2 a_2$; $P_c = o_1 c_1 + o_2 c_2$, разность параллаксов $\Delta P = P_a - P_c$. Разность параллаксов равна нулю, если точки лежат на одной горизонтальной плоскости. Если же точки расположены с разностью высот h , то она может быть вычислена по формуле $h = H \cdot \Delta P / (b + \Delta P)$ или приближенно $h = H \cdot \Delta P / b$. Высота фотографирования H измеряется в полете радиовысотомером для каждого снимка, b — на каждой паре снимков, ΔP — для каждой определяемой высоты с помощью специальных стереофотограмметрических приборов. По конструкции они бывают простыми и сложными в зависимости от требуемой точности результатов измерений и создаваемой карты. Наиболее простыми являются параллактические линейки и пластины, параллаксомеры, работающие в комплекте со стереоскопами ЛЗ. Более точные измерения получают на стереометрах, стереокомпараторах и других приборах. Самые современные из них работают в комплексе с ЭВМ и графопостроителями, выдавая готовую карту.

13.4. Комбинированная аэрофототопографическая съемка

Суть комбинированной съемки заключается в том, что она ведется с помощью мензулы, но не на чистом листе бумаги, а на монтаже из аэрофотоснимков — фотоплане. Это упрощает процедуру съемки, так как она заменяет отчасти дешифрирование. Для получения фотоплана наклонные и равномасштабные снимки преобразуют путем трансформирования в горизонтальные заданного масштаба.

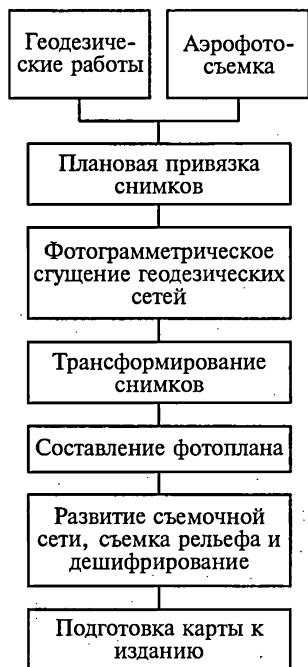


Рис. 13.9. Схема комбинированной аэрофото-топографической съемки

Последовательность работ при комбинированной аэрофото-топографической съемке показана на рис. 13.9. Работа начинается с создания геодезической основы съемки с помощью систем глобального спутникового позиционирования, прокладки полигонометрических ходов и аэрофотосъемки. После получения снимков производится их плановая привязка (подготовка). Она заключается в том, что на снимке опознаются точки, координаты которых определяются геодезическими измерениями. Теоретически таких точек на каждом снимке должно быть не менее четырех, и они должны быть размещены в определенном порядке, чтобы снимки можно было трансформировать. Практически часть точек получают в результате полевых

наблюдений, а другую часть определяют камерально путем сгущения разреженной полевой плановой основы.

Существует два метода ведения работы. По первому методу сначала делают съемку, а затем производят привязку снимков геодезически, а по второму — сначала делают маркировку точек в поле, чтобы они были видны на снимках, а затем одновременно ведут съемку и геодезические работы.

Сгущение плановой сети камеральными методами осуществляется путем развития графической *фототриангуляции* в такой последовательности.

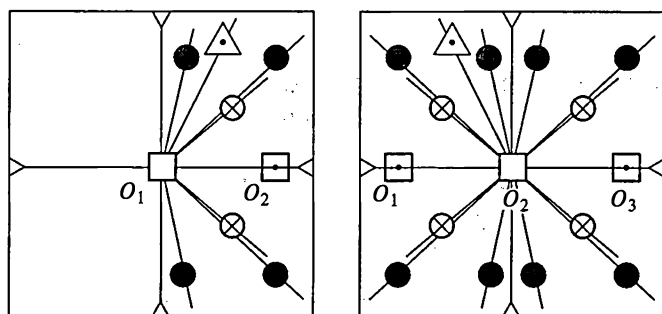


Рис. 13.10. Сгущение плановой сети точек методом фототриангуляции

1. На аэроснимках выбирают и накалывают рабочие центры снимков, по две связующие точки в верхних и нижних частях стереопары (на каждом снимке их будет, таким образом, шесть), обозначают трансформационные точки в середине отрезка, соединяющего рабочие центры с углом снимка (на каждом снимке их должно получиться четыре), накалывают положение плановых опознаков, если они есть в пределах снимка (рис. 13.10).

2. Накладывают на каждый снимок кальку и переносят все точки по нанесенным направлениям (см. рис. 13.10).

3. Монтируют кальки так, чтобы были совмещены между собой линии базисов, а также связующие точки в зоне тройного перекрытия снимков (рис. 13.11). После этого накалывают положение трансформационных точек в пересечении линий на кальку. В результате получается ромбический ряд фототриангуляции.

4. Накладывают на монтаж еще одну кальку и перекалывают центры снимков и положение трансформационных точек. Их получается по четыре на каждом снимке.

5. На специальном приборе-редукторе кальку (на просвет) приводят к заданному масштабу и получают планшетики с четырьмя точками для трансформирования снимков.

Трансформирование производят на оптическом фототрансформаторе, например ФТБ (фототрансформатор большой). Наибольшее применение имеют фототрансформаторы, изготавливаемые предприятием «Карл Цейс» Seg-I, Seg-IV и Rectimat, фирмой «Оптон» — Seg-V и «Вильд» (Швейцария) — E-4.

Монтаж фотоплана начинают с нанесения на планшет всех опорных точек, включая трансформационные и центры снимков. На самих снимках пробивают отверстия на тех же точках и затем совмещают каждый снимок с планшетом по точкам основы. Снимки монтируют с перекрытием. По этому перекрытию проводят криволинейные порезы и края снимков отбрасывают. Окончательно

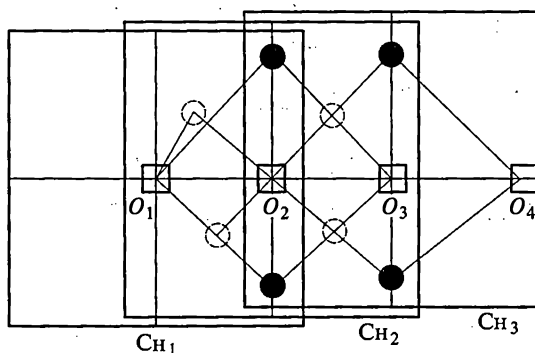


Рис. 13.11. Монтаж калек и определение трансформационных точек

монтаж получается только из центральных частей снимков, которые и наклеиваются на планшет. Для дальнейшего использования с оригинального фотоплана делают фотокопии.

Для работы в поле фотоплан прикрепляют к мензольному планшету и на нем ведут съемку. Съёмочная сеть создается известными приемами: ходами и засечками. Полученные точки наносят на фотоплан и с них производят съемку рельефа и отчасти ситуации, но в основном она дешифрируется (распознается) на снимках.

Готовый вычерченный планшет отбеливают, т.е. уничтожают все фотоизображение, и остается только графика. Затем планшет фотографируют, с него получают синюю копию, на которой на чисто вычерчивают план, идущий в печать.

Комбинированный метод съемки особенно продуктивен при работе на открытых территориях со слабо выраженным рельефом и сложной ситуацией.

13.5. Стереотопографическая съемка

При стереотопографической съемке измеряют модель местности, создаваемую с помощью стереопар аэроснимков. Каждая точка модели получается прямой засечкой с некоторого базиса фотографирования S_1, S_2 (см. рис. 13.8). В зависимости от приборов, применяемых при обработке аэрофотоснимков, разработаны два метода: дифференцированный и универсальный.

Дифференцированный метод заключается в раздельном создании плановой основы, высотной основы, рисовки рельефа и де-

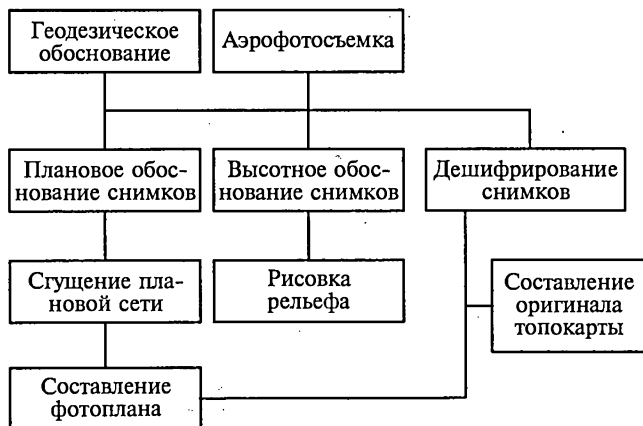


Рис. 13.12. Схема дифференцированного метода стереотопографической съемки

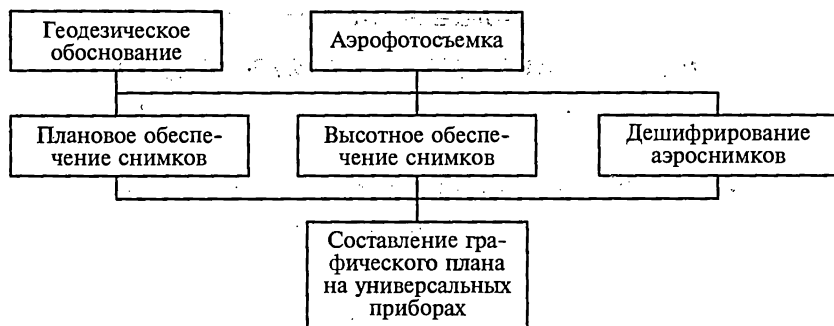


Рис. 13.13. Универсальный метод стереотопографической съемки

шифрования снимков, результаты этих работ затем сводятся на составительском оригинале топографической карты (рис. 13.12).

Геодезическое обоснование, аэрофотосъемка, плановое обеспечение снимков проводятся обычным порядком. Добавляется высотная привязка снимков для рисовки рельефа. Она делается или сплошной, по 4—6 точек на каждую стереопару снимков, или разреженной с последующим сгущением сети на стереоприборах. Дифференцированный метод удобен при работе в равнинных районах.

Дешифрование производится камеральное и полевое в сочетании, позволяющем выполнить работу надежно, экономя время и средства.

Рельеф (горизонтالي) рисуется отдельно на стереоизмерительных приборах, типа стереометров Дробышева. Затем результаты дешифрования, рисовки рельефа совмещают на фотоплане и оформляют как обычно.

Комбинированный метод обычно применяется для съемки равнинных районов.

Универсальный метод особенно эффективен, так как успешно может быть использован в самых сложных, горных и труднодоступных районах, поскольку требует минимума полевых работ, но исполнителей достаточно высокой квалификации (см. рис. 13.13).

Универсальный метод называют потому, что сгущение геодезического обоснования, рисовку рельефа и ситуации выполняют комплексно на универсальных стереофотограмметрических приборах (стереопроектор Романовского, стереографы Дробышева и стереографы ЦНИИГАиК — СЦ-1, СЦ-2 и др.). Оптико-механические и электронные устройства в ряде случаев дополняются компьютерами и средствами автоматики, которые позволяют по стереоскопическим снимкам местности (стереопарам) определять размеры, форму и положение (координаты) изображенных на них предметов (объектов), а также вычерчивать топографические планы и карты.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ КАРТ

14.1. Качественный анализ содержания топографических карт

Назначение топографических карт универсально. Их используют при решении как научных, исследовательских, так и сугубо практических задач, связанных с освоением новых территорий.

По топографическим картам можно установить наличие и изучать закономерности размещения объектов и явлений, исследовать их связи и зависимости, динамику и развитие. В своей монографии «Топографические карты. Научные основы содержания» проф. Т. В. Верещака пишет о том, что топографические карты являются источником разносторонней пространственно-временной информации, вмещающей данные дистанционного зондирования, статистические показатели, множество сведений о природных и социально-экономических объектах. Благодаря высокой точности плановой и высотной основы карт, изучаемые объекты могут быть оценены по множеству показателей: местоположению (координаты), размерам (протяженность, площадь, объем, высота, глубина), ориентировке (экспозиция, углы наклона), форме (общие очертания, вытянутость, извилистость, кривизна), плотности (густота, концентрация), расчлененности поверхности (общая, вертикальная, горизонтальная). Эти метрические характеристики тесно связаны с процессами, определяющими характер развития географических систем.

14.2. Количественный анализ содержания топографических карт. Картометрия

Измерение длин прямолинейных отрезков. Длины отрезков измеряют либо линейкой, либо измерителем с помощью линейки (поперечного масштаба). Для масштабной линейки предельная точность составляет 0,2 мм. Особенность измерений линейкой заключается в том, что ее прикладывают к линии произвольно, берут отсчеты по линейке на начале и конце отрезка линии и длину отрезка определяют по их разности. Операцию повторяют несколько раз, при этом отсчеты будут разными, но их разности должны совпадать с заданной точностью. Для обыч-

ной линейки предельная точность составляет половину цены деления, т. е. 0,5 мм.

Измерение длин кривых линий. Кривые линии измеряют либо курвиметром, либо измерителем с постоянным раствором.

Прибор *курвиметр* имеет обводное колесико и соединенную с ним стрелку, которая на круглой шкале отсчитывает сантиметры (и дюймы) хода. Перед работой определяют цену деления шкалы K . Для этого колесико прокатывают по отрезку, равному 10 или 20 см. На шкале стрелка должна пройти соответственно 10 или 20 делений, тогда $K = 1$. Если же число делений отлично от 10 или 20 (что, впрочем, бывает редко), нужно подсчитать действительное значение K .

Для измерения линий измерителем с постоянным раствором обычно используют специальное устройство с двумя иглами, расположенными на расстоянии 2—3 мм друг от друга. Им проходят по кривой и таким образом ее длина определяется как сумма хорд, что при малом растворе измерителя даст результат, мало отличающийся от истинной длины кривой линии. Если измерения проделать дважды с двумя разными растворами измерителя, то можно подсчитать длину кривой с достаточно высокой степенью точности.

Измерение углов. Углы можно измерять транспортиром, хордоугломером или вычислить, если есть необходимые данные.

Транспортиром можно измерить угол достаточно точно, если провести несколько измерений, произвольно помещая транспортир так, чтобы несколько раз взять парные отсчеты и получить разности между ними. Значения угла при разных подсчетах не должны расходиться более чем на половину цены деления шкалы. Для обычного транспортира это 0,5°.

Прибор хордоугломер представляет собой номограмму, выгравированную на металлической пластинке. Для измерения угла β ,

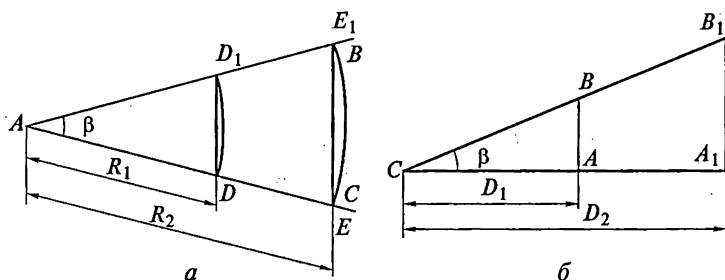


Рис. 14.1. Определение угла:

a — хордоугломером; b — через отношение отрезков

как это показано на рис. 14.1, а, двумя радиусами R_1 и R_2 проводят две дуги DD_1 и EE_1 и хорды, их стягивающие. Дважды по отношениям DD_1/R_1 и EE_1/R_2 находят значения угла по номограмме, специальным таблицам или вычисляют угол по формуле

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{DD_1}{2R_1} = \frac{EE_1}{2R_2}. \text{ Радиусы } R_1 \text{ и } R_2 \text{ берутся стандартными в целых}$$

сантиметрах.

Угол также можно определить, если отложить на одной из сторон два отрезка D_1 и D_2 и построить перпендикуляры AB и A_1B_1 .

Тогда угол определится из отношения катетов $\operatorname{tg} \beta = \frac{AB}{AC} = \frac{A_1B_1}{A_1C}$,

как это показано на рис. 14.1, б.

Измерение площадей и определение объемов. Площадь участка многоугольной формы вычисляют аналитически по координатам n вершин, ограничивающих участок многоугольника, по одной из формул

$$P = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n x_i (y_{i+1} - y_{i-1}) \quad (5.1)$$

или

$$P = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n y_i (x_{i+1} - x_{i-1}). \quad (5.2)$$

В этих формулах, если $i = 1$, то $i - 1 = n$, и если $i = n$, то $i + 1 = n$. Площади могут быть измерены: графически; с помощью палеток; механическим способом — планиметром; дигитайзером; с помощью сканера.

Графический способ состоит в разбиении общей площади, подлежащей измерению, на отдельные фигуры: треугольники или трапеции, площади которых определяются простыми измерениями и вычислениями. Разбивка делается неоднократно, и измерения повторяются по крайней мере дважды для исключения грубых промахов. Способ применим в том случае, если измеряемая фигура представляет собой многоугольник с прямыми сторонами.

Измерение площадей палетками. Палетки изготовляют из прозрачного материала: кальки, пластика, стекла, и через установленный интервал покрывают сеткой квадратов, параллельными линиями или точками в линейном порядке.

Палетку накладывают на измеряемую площадь и подсчитывают количество квадратиков, длины линий или количество точек, приходящихся на измеряемую площадь. Затем, зная (или предварительно определив) цену деления палетки, подсчитывают площадь. Для контроля измерения проводят неоднократно, размещая

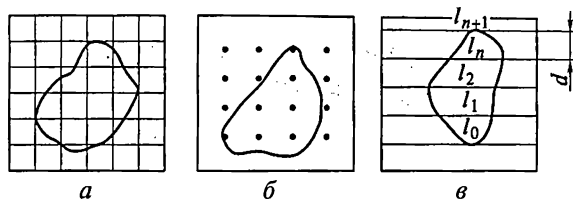


Рис. 14.2. Измерение площадей палетками

палетку разными способами (рис. 14.2). Ниже приведены формулы для определения площади в зависимости от вида палетки:

Для квадратной палетки (рис. 14.2, а):

$$S = nc, \quad (5.3)$$

где n — число квадратиков в пределах площади; c — цена деления палетки в масштабе карты (мм^2) и в натуре (м^2 , га); например, при стороне квадратика 2 мм его площадь равна 4 мм^2 , что в масштабе 1 : 5 000 составляет длину стороны 10 м и площадь $100 \text{ м}^2 = 0,01 \text{ га}$.

Для точечной палетки (рис. 14.2, б):

$$S = KT, \quad (5.4)$$

где K — цена точки, зависящая от масштаба карты, определяется путем подсчета числа точек, приходящихся на контрольный квадрат $10 \times 10 \text{ см}$; T — количество точек в измеряемой площади.

Для линейной палетки (рис. 14.2, в):

$$S = (l_0 + l_1)d/2 + (l_1 + l_2)d/2 + \dots + (l_n + l_{n+1})d/2 = \\ = d(l_0 + 2l_1 + 2l_2 + \dots + 2l_n + l_{n+1})/2,$$

где l_i — ширина фигуры в сечении i ; d — расстояние между сечениями. Принимая во внимание то, что $l_0 = 0$ и $l_{n+1} = 0$, получаем окончательно

$$S = d \sum_{i=1}^n l_i. \quad (5.5)$$

Измерение площадей планиметром. Планиметр разработан в 1814 г. английским ученым Дж. Германом. Его механическая модель, усовершенствованная в 1854 г. немецким ученым А. Амслером, была названа полярным планиметром. В настоящее время промышленность не выпускает механические планиметры, на смену им пришли электронные полярные и роликовые приборы. Однако механические планиметры применяют еще на производстве.

Механический планиметр представляет собой устройство, состоящее из двух рычагов: полюсного 3 и обводного 5, соединенных шарнирно 4 (рис. 14.3). Полюсный рычаг закрепляется с помощью иглы неподвижно, а марка в лупе 6 (либо отверстие, либо игла) на

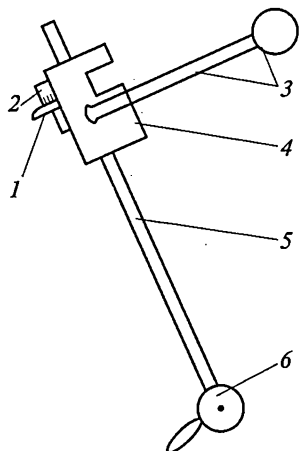


Рис. 14.3. Схема устройства планиметра:

1 — счетный механизм; 2 — мерное вращающееся колесико; 3 — полюс планиметра с рычагом; 4 — шарнир; 5 — обводной рычаг; 6 — лупа с маркой в виде крестика в ее центре или обводной шпиль

конце обводного рычага проводится по границе измеряемой площади (рис. 14.4). Счетный механизм 1 с вращающимся колесиком 2, закрепленный на обводном рычаге, накапливает счет, причем в начальной точке отсчет равен $N_{\text{нач}}$, а в конце обвода $T_{\text{кон}}$.

Перед измерениями определяют цену деления счетного устройства планиметра $c = S_{\text{эталона}} / (N_{\text{кон}} - N_{\text{нач}})$ путем обвода известной площади (так называемого $S_{\text{эталона}}$ — окружности или квадрата). Площадь обведенной планиметром фигуры вычисляют по формуле

$$S = c / (N_{\text{кон}} - N_{\text{нач}}). \quad (5.6)$$

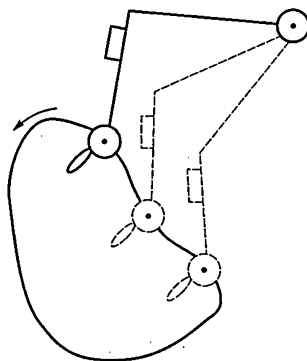


Рис. 14.4. Схема обвода контура измеряемой площади планиметром

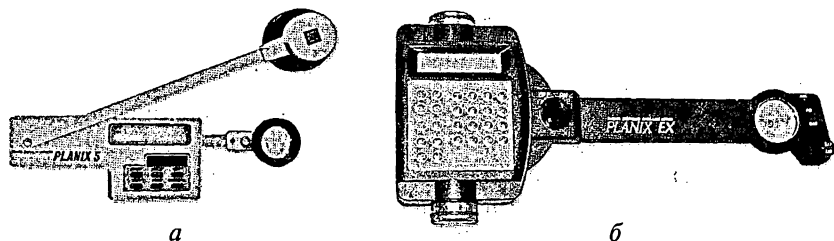


Рис. 14.5. Электронные планиметры:

а — полярного типа (PLANIX 5); *б* — роликового типа (PLANIX EX)

Электронные планиметры полярного типа (рис. 14.5, *а*), так же как и механические планиметры, имеют полюсное плечо, с помощью которого осуществляется движение в пределах измеряемой площади. Результаты измерения в виде вычисленной площади отображаются на жидкокристаллическом экране счетного устройства. Клавиатура используется для установки нужных режимов работы и операций с измерениями.

Роликовые планиметры (рис. 14.5, *б*) в отличие от полярных обеспечивают значительное горизонтальное и вертикальное перемещение измерительного механизма. Они перемещаются на двух роликах. Углом поворота роликов измеряется величина перемещения. Площадь выражается в любых единицах и масштабе, устанавливаемых с помощью цифровой клавиатуры. Размер измеряемой площади по ширине от 0,38 до 100 м. Точность измерения площади — $1/500$. Планиметр имеет память, где накапливаются результаты измерений, по которым вычисляют среднее значение. Наиболее совершенные электронные планиметры позволяют вычислять помимо площади еще и координаты, углы дуги и радиусы с учетом реального масштаба картографических материалов.

Измерение площадей дигитайзером. Дигитайзер — устройство, предназначенное для ввода в электронную вычислительную машину координат точек графического изображения.

Дигитайзер состоит из подключаемого к компьютеру планшета с электронной координатной сеткой и указателя, перемещаемого вручную подобно «мышь» по поверхности планшета. Координаты курсора указателя автоматически вводятся в компьютер.

Дигитайзеры выпускают с разным размером рабочего поля — от формата А4 до формата А0. Разрешающая способность дигитайзера — не ниже 0,1 мм.

Для определения площади участка, изображенного на графическом документе (плане, карте, аэроснимке), его закрепляют на планшете. Маркер указателя дигитайзера совмещают поочеред-

но с угловыми точками контура изображения участка и нажатием клавиши ввода вводят в компьютер их координаты, выраженные в системе планшета.

Вычисление площади изображения участка выполняется по стандартной программе, реализующей формулу (5.1) или (5.2). Для перехода от площади изображения участка к его реальной площади надо учесть масштаб изображения и различие в применяемых единицах измерения. Эти вычисления выполняют с помощью программного обеспечения, прилагаемого к дигитайзеру.

Точность измерения площади в основном зависит от точности обводки контура и аппроксимации контура изображения многоугольником и составляет $0,1 \div 0,3 \%$.

Измерение площадей с помощью сканера. Сканер — устройство для считывания информации с графических и картографических изображений для автоматизированного ввода их в компьютер в растровом формате с высоким разрешением ($300\text{—}600\text{ dpi}$ и более). То есть компьютерное изображение составляет множество точек — пикселей (pixel — от англ. picture element) одно- или разноцветных.

Для измерений на планах, картах и аэроснимках используют сканеры планшетные и барабанные путем сканирования в отраженном свете с непрозрачного или проходящем с прозрачного оригинала. Для сканирования изображений на фотопленке или стеклянной фотопластинке существуют специальные фотограмметрические сканеры, обладающие высокой точностью ($3\text{—}5\text{ мкм}$).

Контур изображения, выведенного на экран монитора, обводится с помощью «мыши» и щелчком клавиши отмечают его характерные точки. Вычисление площади изображения выполняется с использованием стандартной программы так же, как при применении дигитайзера.

С измерением площадей тесно связано *определение объемов* по картам. Такие задачи часто возникают при измерениях баланса вещества в природе, например, объемов снесенного и отложенного материала, запаса воды в снежном покрове, объема ледников и водохранилищ и т.п.

Объем можно вычислить как сумму объемов отдельных слоев, заключенных между плоскостями (с площадями S_1 и S_2) сечения рельефа горизонталями. Для этого требуется предварительно подсчитать площади всех ступеней, ограниченных горизонталями. Объем каждого отдельного слоя вычисляют по формуле

$$V = \frac{1}{3} (S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 S_2}) h, \quad (5.7)$$

где h — высота сечения рельефа горизонталями.

Иногда применяют упрощенную формулу

$$V = \frac{1}{2} (S_1 + S_2) h. \quad (5.8)$$

Как видим из изложенного выше, карты являются надежным источником информации об изображаемой территории. По ним можно определить высоты характерных точек, относительные превышения, крутизну склонов, уклон рек, установить изменения русла рек, состояние растительного покрова, рост оврагов, наличие заболоченности, появление новых населенных пунктов и дорог и получить многие другие данные.

Карты хранят полученные человеком географические знания и позволяют сделать на их основе необходимые обобщения, выявить закономерности развития природных явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берлянт А. М.* Картография. — М. : Аспект Пресс, 2001.
- Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. — М. : Недра, 1990.
- Инструкция по топографической съемке в масштабах 1 : 5 000, 1 : 2 000, 1 : 1 000, 1 : 500. — М. : Недра, 1985.
- Кузнецов П. Н.* Геодезия : в 2 ч. Ч. I. — М. : МИИГАиК, 1993.
- Курошев Г. Д.* Основы геодезии и топографии / Г. Д. Курошев, Л. Е. Смирнов. — СПб. : СПбГУ, 1994.
- Курошев Г. Д.* Руководство по летней топографической практике. — Л. : ЛГУ, 1988.
- Киселев М. И.* Основы геодезии / М. И. Киселев, Д. Ш. Михелев. — М. : Высшая школа, 2003.
- Неумывакин Ю. К.* Практикум по геодезии / Ю. К. Неумывакин, А. С. Смирнов. — М. : Недра, 1985.
- Определение площадей земельных участков / В. Н. Баландин [и др.]. — М., 2005.
- Серapiнас Б. Б.* Глобальные системы позиционирования. — М. : ИКФ «Каталог», 2002.
- Топография с основами геодезии / под ред. А. С. Харченко и А. П. Божок. — М. : Высшая школа, 1986.
- Чеботарев А. С.* Геодезия : в 2 ч. Ч. I. — М. : Геодезиздат, 1955.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абрис 136
Азимут астрономический 27
— геодезический 27
— — обратный 28
— — прямой 28
— магнитный 28, 31
Альманах 77
Анаглифы 118
- Базисная сеть 104
Базисная сторона (базис) 8, 104
Бергштрих 119
Буссоль 31, 139
- Вертикальный угол 56, 64
Время координатное 26
— — барицентрическое 26
— — геоцентрическое 26
— — земное 26
— эфемеридное 26
Высота сечения 119
Высота точки абсолютная 15
— — геодезическая 15
— — нормальная 82
— — условная 82
Выходная сторона 104
- Генерализация 116
Географическая карта 110
Геодезическая задача обратная 25
— — прямая 25
Геодезическая засечка линейная 72
— — угловая 70
Геодезическая сеть 102
— — высотная 102, 108
— — гравиметрическая 102
— — плановая 102, 103
Геодезия 4
Геоид 9
Горизонталь 118
Горизонтальный угол 56, 63
Градусные измерения 8
Грубая ошибка 39
- Дальномер оптический 49
— — нитяной 49
— — с постоянным базисом 51
— электронный 51
— — импульсный 52
— — фазовый 52
Дирекционный угол 28, 32, 67
— — обратный 28
— — прямой 28
Долгота 12
— астрономическая 12, 15
— геодезическая 14, 15
- Значение измеряемой величины вероятнейшее 36
— — — истинное 35
Зона 21
- Изобата 144
Изолиния 118
- Квазигеоид 9
Километровая сетка 22
Кипрегель 123
Кодовый метод 79
Количество измерений избыточное 35
— — необходимое 35
Коллимационная ошибка 61
Коллимационная плоскость 61
Компаратор 45
Координаты 11
— географические 11
— геодезические 15, 16
— плоские прямоугольные 17
— полярные 23, 25
— преобразованные 22
Космическая геодезия 74
Курвиметр 161
- Лимб 58
- Магнитное склонение 29, 32

- Масштаб 111
 - заложения 119
 - именованный 111
 - линейный 111
 - поперечный 111
 - численный 111
 - шагов 141
- Мензула 123
- Меридиан астрономический 12, 14, 27
 - геодезический 27
 - гринвичский 12, 14, 21
 - магнитный 29
 - осевой 20, 21
- Мерные ленты 44
 - — шкаловые 45
 - — штриховые 44
- Мерные устройства 44
- «Место нуля» 95
- Метр 33
- Микроскоп 59

- Невязка 40
 - абсолютная 68
 - линейная 68
 - относительная 69
- Нивелир оптический 83
 - электронный 84
- Нивелирный ход
 - — замкнутый 90
 - — разомкнутый 90
- Нивелирование аэрорадионивелирова-
 - ние 82, 101
 - барометрическое 82, 98
 - геометрическое 82, 83, 89
 - гидростатическое 82, 100
 - механическое 82, 101
 - спутниковое 82, 101
 - стереофотограмметрический метод 82, 101
 - тригонометрическое 82, 94
- Номенклатура 112
- Номограммные геодезические прибо-
 - ры 97

- Ориентирный угол 27
- Ориентирование линий 27
- Ортотрансформирование 154

- Параллакс 151, 155
- Пикет 90
- План 23
- Планиметр 163
- Плечо 88
- «Плюсовые точки» 92

- Поверхность относимости 16
- Погрешность измерений 35
 - — абсолютная 38
 - — — вероятнейшая 36
 - — — истинная 36
 - — — предельная 38
 - — — средняя квадратическая 36
 - — общая 39
 - — — внешняя 39
 - — — личная 39
 - — — методическая 39
 - — — приборная 39
 - — — относительная 38
 - — систематическая 39
 - — случайная 40
- Позиционирование 76
- Проекция Гаусса—Крюгера 15, 20, 23, 24
 - картографическая 18
 - UTM 20
- Псевдодальность 79
- Псевдослучайный код 79
- «Пункты Лапласа» 104

- Радииан 33
- Разграфка 112
- «Разность» пяток 91
- Результат измерений неравноточный 35
 - — равноточный 35
- Рельеф 117
- Репер 90
- Румб 28

- Сближение меридианов 28, 115
 - Гауссово 29
- Система измерения времени 26
- Система координат 11
 - — географическая 14
 - — геодезическая 14
 - — геоцентрическая 14
 - — квазигеоцентрическая 14
 - — общеземная 14
 - — полярная 25
 - — прямоугольная 14
 - — — плоская 14
 - — — пространственная 14, 15
 - — референсная 14
 - — СК-42 15
 - — СК-90 14
 - — СК-95 15, 106
 - — эллипсоидальная 14
 - — WGS-84 14
- Система отсчета 11

- Ситуация 116
- Спутниковая система «ГЛОНАСС» 73, 109
 - — «GPS» 73, 109
- Стереоскопия 154
- Сутки 26
- Съемка 121

- Тахеометр 132
- «Твердая» сторона 66
- Теодолит 56
- Теодолитный ход 66
 - — «висячий» 66
 - — замкнутый 66
 - — разомкнутый 66
- Топография 5
- Точность 35
 - измерений 35
 - масштаба 111, 112
- Трансформирование 154
- Триангуляция 8, 69, 103

- Трилатерация 69

- Уклонение отвесной линии 16
- Уровень
 - теодолита 58
 - нивелира 84, 85
- Условия измерений 35

- Фазовый метод 52
- Фототеодолит 146

- Широта астрономическая 12
 - геодезическая 14

- Эллипсоид вращения 9
 - Красовского 10
 - «общеземной» 10
 - «Референц-эллипсоид» 10
 - Струве 9
- Эфемерида 77

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение. Определения, основные задачи и краткая история геодезии и топографии	4

Часть первая ГЕОДЕЗИЯ

Глава 1. Размеры и форма Земли	7
1.1. Эволюция представлений о форме и размерах Земли	7
1.2. Современные воззрения на форму Земли	9
Глава 2. Геодезические системы отсчета	11
2.1. Общие понятия о системах координат	11
2.2. Географические и геодезические координаты	11
2.3. Переход от реальной (физической) земной поверхности к поверхности эллипсоида	15
2.4. Плоские прямоугольные координаты	17
2.5. Общие понятия о картографических проекциях	18
2.6. Использование проекции Гаусса—Крюгера в геодезии	20
2.7. Искажения при изображении поверхности эллипсоида на плоскости в проекции Гаусса—Крюгера	23
2.8. Полярные координаты	25
2.9. Связь плоской прямоугольной и полярной систем координат	25
2.10. Системы измерения времени	26
Глава 3. Ориентирование линий	27
3.1. Ориентирные углы направлений	27
3.2. Связь и взаимные преобразования ориентирных углов	28
3.3. Измерение ориентирных углов	31
Глава 4. Общие сведения об измерениях	33
4.1. Единицы измерений	33
4.2. Процесс и виды измерений	34
4.3. Погрешности измерений	35
4.4. Приближенные числа	41
Глава 5. Измерения длин линий	44
5.1. Мерные устройства	44
5.2. Оптические (геометрические) дальномеры	49

5.3. Электронные (физические) дальномеры	51
Глава 6. Измерения углов	56
6.1. Теодолиты. Их типы и устройство	56
6.2. Геометрические оси и поверки теодолита	60
6.3. Измерение углов	63
Глава 7. Определение плановых координат точек местности	66
7.1. Прокладка теодолитного хода	66
7.2. Триангуляция и трилатерация	69
7.3. Геодезические засечки	70
7.4. Новейшие методы определения положения	73
7.5. Глобальные системы спутникового позиционирования	76
Глава 8. Нивелирование	82
8.1. Понятия и термины	82
8.2. Геометрическое нивелирование	83
8.3. Типы и устройство нивелиров	83
8.4. Поверки нивелиров	86
8.5. Производство геометрического нивелирования	89
8.6. Тригонометрическое нивелирование	94
8.7. Физические методы нивелирования	98
Глава 9. Геодезические сети	102
9.1. Общие сведения о геодезических сетях	102
9.2. Государственные плановые сети	102
9.3. Государственная высотная (нивелирная) сеть	108

Часть вторая ТОПОГРАФИЯ

Глава 10. Топографические карты	110
10.1. Разновидности карт	110
10.2. Масштабы топографических карт	111
10.3. Разграфка, номенклатура и оформление топографических карт	112
10.4. Содержание топографических карт	115
10.5. Изображение рельефа на топографических картах	117
10.6. Цифровые карты	119
Глава 11. Съёмка местности	121
11.1. Общие сведения о съёмке	121
11.2. Мензула и кипрегель. Их устройство и поверки	123
Глава 12. Другие виды графических съёмок	132
12.1. Тахеометрическая съёмка	132
12.2. Упрощенные виды съёмок	139
12.3. Съёмка приборами спутникового позиционирования	142
12.4. Топографическая съёмка морского шельфа и внутренних водоемов	144

Глава 13. Фототопографические съемки	145
13.1. Общие сведения о фототопографических съемках	145
13.2. Фототеодолитная съемка	146
13.3. Аэрофототопографическая съемка	152
13.4. Комбинированная аэрофототопографическая съемка	155
13.5. Стереотопографическая съемка	158
Глава 14. Использование топографических карт	160
14.1. Качественный анализ содержания топографических карт	160
14.2. Количественный анализ содержания топографических карт. Картометрия	160
Список литературы	168
Предметный указатель	169

Учебное издание

**Курошев Герман Дмитриевич,
Смирнов Леонид Евгеньевич**

Геодезия и топография

Учебник

**Редактор Т. Ф. Мельникова
Технический редактор Н. И. Горбачева
Компьютерная верстка: Л. А. Смирнова
Корректоры Г. Н. Петрова, Н. В. Савельева**

Изд. № 103112245. Подписано в печать 05.05.2009. Формат 60×90/16.
Гарнитура «Таймс». Печать офсетная. Бумага офсетная № 1. Усл. печ. л. 11,0.
Тираж 2000 экз. Заказ № 28347.

Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru
Санитарно-эпидемиологическое заключение № 77.99.02.953.Д.004796.07.04 от 20.07.2004.
117342, Москва, ул. Бутлерова, 17-Б, к. 360. Тел./факс: (495) 330-1092, 334-8337.

Отпечатано в соответствии с качеством предоставленных издательством
электронных носителей в ОАО «Саратовский полиграфкомбинат».
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 59. www.sarpk.ru

ГЕОДЕЗИЯ И ТОПОГРАФИЯ

