

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))

Курошев Г. Д.

К935 Геодезия и топография : учебник для студ. вузов / Г. Д. Курошев, 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*

© Курошев Г. Д., Смирнов Л. Е., 2006

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2006

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2006

ISBN 978-5-7695-6477-2

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

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. Берлянтом, 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 натуральных 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.

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. Стадий 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.

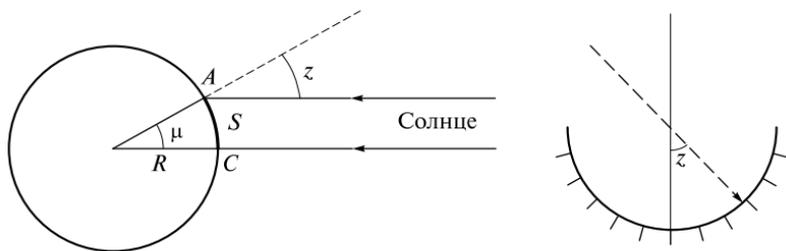


Рис. 1.1. Определение радиуса Земли Эратосфеном

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.

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 определения 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

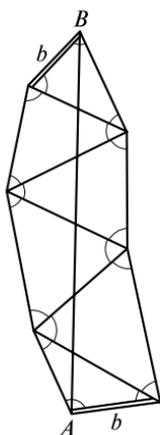


Рис. 1.2. Триангуляция

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, распространился среди геодезистов.

Под *геоидом* понимается уровенная поверхность морей и океанов (без приливов-отливов, стонов 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 $+90^\circ$, 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 наблюдений светил, стали называть астрономическими.

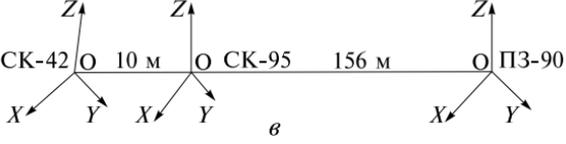
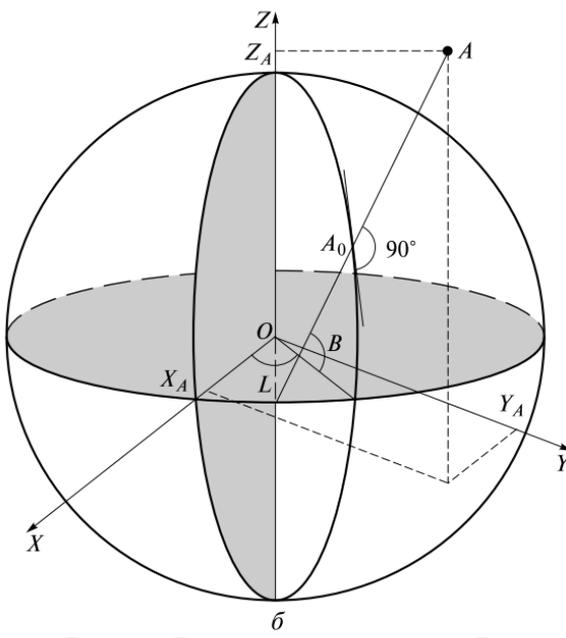
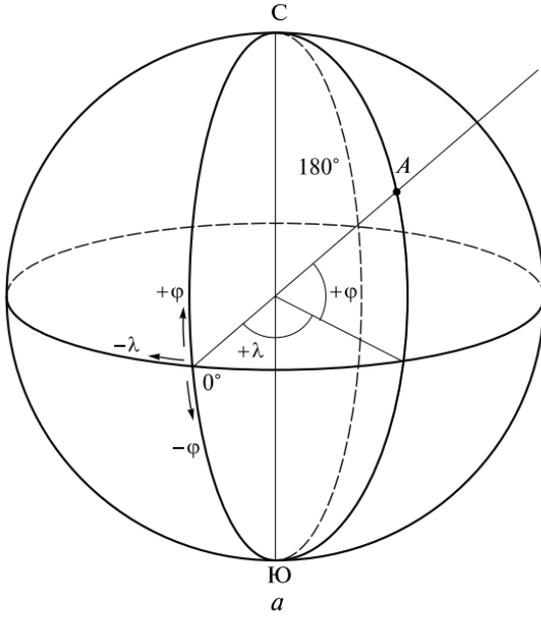
Астрономической широтой (φ_A) — угол, образованный отвесной линией в данной точке и плоскостью, перпендикулярной к оси вращения Земли.

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; *b* — 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 референционных (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 Пулковое; 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 Пулковое.

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 даваться 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 поверхностью 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.

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 . Приблизительно $D_0 = D - (H_2 - H_1)^2 / (2D)$, где H_i — геодезическая высота — расстояние по нормали от поверхности Земли до поверхности эллипсоида.

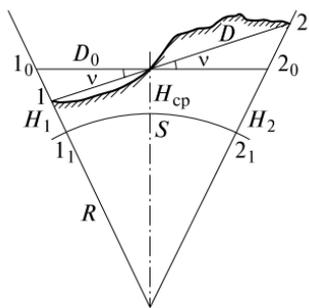


Рис. 2.2. Редуцирование линии на поверхность относимости

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

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

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