

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КАРТ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ И ВРЕМЕНИ МЕТОДАМИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ

Астрономические координаты. Астрономические координаты определяются относительно отвесной линии и оси вращения Земли без знания ее фигуры (см. Лекция 1). Это астрономические широта, долгота и азимут. Ознакомимся с принципами их определения [4].

Небесная сфера, ее главные линии и точки. В геодезической астрономии важным математическим инструментом, с помощью которого производят расчеты, является небесная сфера. Ее центр совпадает с началом используемых координат, а радиус может быть произвольным и обычно его принимают равным единице.

Рассмотрим основные точки и линии на небесной сфере (рис. 2.1). Через центр небесной сферы O проведена прямая, параллельная местной вертикали, — отвесной линии. Отвесная

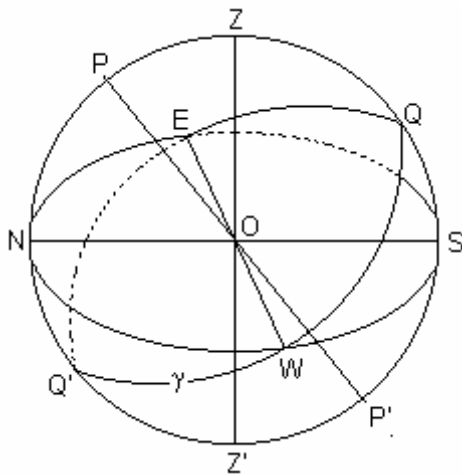


Рис. 2.1. Главные линии и точки небесной сферы

линия пересекает сферу над головой наблюдателя в точке Z — зените, и в диаметрально противоположной точке Z' — надире. Плоскость, проходящая через центр O перпендикулярно линии ZZ' , пересекает небесную сферу по большому кругу, называемому *астрономическим горизонтом*. Прямую, проведенную через центр сферы O параллельно оси суточного вращения Земли, называют *осью мира*. Она пересекает сферу в *полюсах мира* — северном P и южном P' . Северным называется тот полюс мира, с которого видно, что вращение Земли происходит против часовой стрелки. Сечение небесной сферы плоскостью, проходящей через центр O перпендикулярно оси мира PP' , определяет большой круг QWQ' — *небесный экватор*. Плоскость, проходящую через ось мира PP' и вертикаль ZZ' , называют *плоскостью небесного меридиана*. В сечении с небесной сферой она дает большой круг — *небесный меридиан*. Плоскости небесного меридиана и астрономического горизонта пересекаются по полуденной линии NS . Точку N , расположенную ближе к северному полюсу P , называют точкой севера, а диаметрально противоположную точку S — точкой юга. На линии пересечения астрономического горизонта и небесного экватора расположены точка запада W и точка востока E . Большой круг, образованный сечением небесной сферы плоскостью, проходящей через вертикаль ZZ' , называют *вертикалом*. Вертикал, проходящий через точки востока и запада, называют *первым вертикалом*.

Пересечение небесной сферы плоскостью, проходящей через её центр параллельно плоскости орбиты годового обращения Земли около Солнца, образует большой круг — *эклиптику* (рис.2.2). Эклиптика пересекает небесный экватор в точках весеннего равноденствия и осеннего равноденствия. В годовом видимом движении Солнце 21 марта переходит точку весеннего

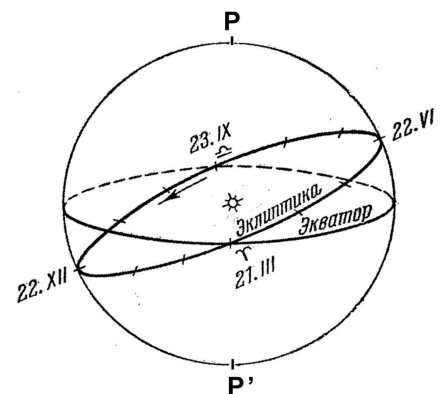


Рис. 2.2. Видимое движение Солнца по эклиптике [3, с. 23]

равноденствия. В годовом видимом движении Солнце 21 марта переходит точку весеннего

равноденствия (γ) из южного небесного полушария в северное. Плоскость эклиптики наклонена к плоскости небесного экватора и острый угол наклона в настоящее время приближенно равен $23^\circ 26'$.

По решению Международного астрономического союза с 1998 г. положение точки весеннего равноденствия определяют посредством внегалактических радиоисточников, не привязываясь к эклиптике.

Горизонтальная система координат. Основной линией в ней является направление местной вертикали ZZ' , а основной плоскостью — плоскость астрономического горизонта NWS (рис. 2.3). Положение светила σ на небесной сфере определяется астрономическим азимутом a и высотой h или зенитным расстоянием z . Азимутом a считается двугранный угол между плоскостями небесного меридиана и вертикала светила σ . Его отсчитывают от точки юга S в направлении точки запада W от 0 до 360° , или от точки юга к западу и к востоку от 0 до $\pm 180^\circ$.

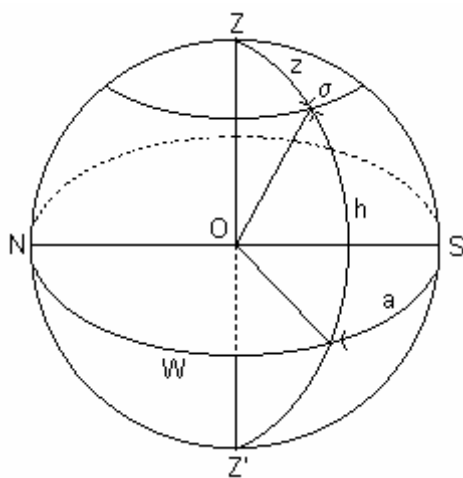


Рис. 2.3. Горизонтальная система координат

В дальнейшем, как это принято в геодезии, астрономический азимут a будем отсчитывать от точки севера N . Высоту h образует угол над астрономическим горизонтом от 0 до $\pm 90^\circ$, а зенитное расстояние z — угол, отсчитываемый от направления на зенит Z от 0 до 180° .

$$z + h = 90^\circ.$$

Круг равных высот (равных зенитных расстояний) называют *альмукуантаратом*. Положение светила определяется пересечением вертикала с альмукуантаратом.

Горизонтальные координаты удобны тем, что их можно измерить прибором типа теодолита.

Экваториальные системы координат. Основной плоскостью является плоскость небесного экватора. Различают первую и вторую экваториальные координатные системы. Большой круг, проходящий через ось мира и объект σ , называют *часовым кругом* или *кругом склонений*, а малый круг, проведенный через σ параллельно плоскости небесного экватора, — *суточной* или *небесной параллелью* (рис. 2.4). Небесное светило в видимом движении за сутки дважды пересекает меридиан: ближе к зениту в точке *верхней кульминации*, и ближе к надиру — в *точке нижней кульминации*. В Северном полушарии Земли при верхней кульминации светило проходит между Северным полюсом мира и точкой юга и имеет наибольшую высоту над горизонтом.

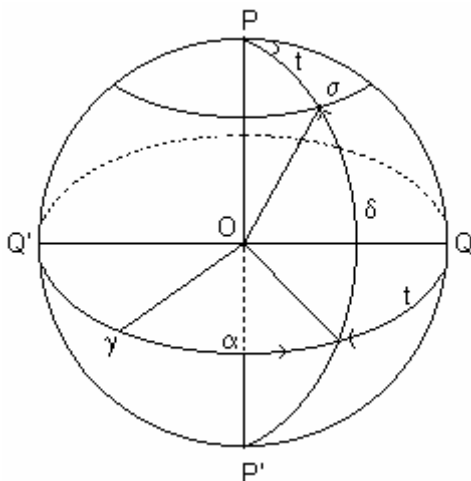


Рис. 2.4. Экваториальные координаты

В первой экваториальной координатной системе положение светила на небесной сфере определяется часовым углом t и склонением δ . Часовой угол измеряют двугранным углом между плоскостями круга склонений и небесного меридиана и отсчитывают от южной точки экватора по его дуге на запад от 0 до 24^h (часов) или от 0 до 360° . Склонение определяют углом между направлением из центра небесной сферы на объект σ и плоскостью небесного экватора. Измеряют склонение от 0 до $\pm 90^\circ$ — со знаком плюс в северной и со знаком минус в южной частях небесной сферы. Вследствие суточного вращения небесной сферы, ча-

совой угол объекта непрерывно изменяется.

Во второй экваториальной координатной системе положение светила на небесной сфере определяется *прямым восхождением* α и *склонением* δ . Прямое восхождение измеряется двугранным углом между плоскостями кругов склонений данного светила и точки весеннего равноденствия γ и отсчитывается по дуге экватора от точки весеннего равноденствия против часовой стрелки, если смотреть с северного полюса, от 0 до 24^h (от 0 до 360°). Экваториальные координаты α и δ не зависят от суточного вращения небесной сферы.* По ним можно построить глобус звёздного неба на подобие того, как по долготам и широтам строится глобус Земли.

Изменения астрономических координат. В первой экваториальной и горизонтальной системах координаты изменяются во времени из-за суточного вращения Земли. Помимо этого все небесные координаты подвержены изменениям во времени по следующим причинам:

- 1) смещения систем отсчета относительно звезд (*прецессия и нутация*) и относительно тела Земли (*движение полюсов*); эти явления рассмотрены в Лекции 1.
- 2) собственного движения светил в пространстве;
- 3) физических явлений, искажающих наблюдения (*абберация, параллакс, рефракция, отклонение световых и радио лучей в гравитационном поле*).

Собственное движение светил. Движение светил и Солнечной системы в пространстве ведет к изменению их взаимного положения и наблюдаемых с Земли координат α и δ звезд на небесной сфере. Для большого числа светил видимые собственные движения невелики, меньше 0,1" в год, и только для наиболее близких к нам звезд эти изменения могут достигать нескольких секунд, максимум 10" в год.

Абберация. Абберация — явление, состоящее в изменении направления светового луча, идущего от небесного светила, вследствие конечной скорости света и движения наблюдателя относительно светила. Абберация вызывает смещение видимого положения светила на небесной сфере в направлении движения наблюдателя. Требуется некоторый промежуток времени τ , чтобы пройти лучу со скоростью c расстояние от объектива M до креста сетки нитей N трубы астрономического прибора. За это время со скоростью v наблюдатель с инструментом переместится поступательным движением на отрезок MP (рис. 2.5). Чтобы после этого увидеть светило σ наблюдателю придётся наклонить трубу по линии NP на видимое положение объекта в точке небесной сферы σ_1 . Если u — угол между направлением движения наблюдателя и видимым направлением на светило, a — угол, на который наблюдатель наклоняет трубу, чтобы её ориентировать по линии NP , то

$$\frac{MP}{\sin a} = \frac{MN}{\sin u}; \quad \frac{v\tau}{\sin a} = \frac{c\tau}{\sin u}.$$

Учитывая малость угла a , получаем:

$$a'' = \rho'' \frac{v}{c} \sin u = k \sin u,$$

где $\rho'' = 206265$, k — коэффициент абберации.

Различают абберации, связанные с годичным и суточным движением Земли. Скорость движения Земли вокруг Солнца около 30 км/с, поэтому для годичной абберации $k = 20,5''$. Для суточной абберации наибольшее значение коэффициента k на экваторе, где он может достигь 0,3''.

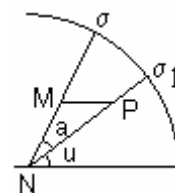


Рис. 2.5. Абберация

* Рассматривается классический случай отсчёта прямых восхождений от точки весеннего равноденствия. В лекции 1 рассматривался случай счёта прямых восхождений в системе CIRS от точки CIO, используемый при трансформировании координат из земной системы отсчёта ITRS в небесную систему отсчёта GCRS.

Известна также вековая аберрация, обусловленная движением солнечной системы вокруг центра Галактики.

Параллакс. Под параллаксом в астрономии понимают видимое изменение положения светила на небесной сфере вследствие перемещения наблюдателя. Различают параллакс, обусловленный вращением Земли (*суточный параллакс*), обращением Земли вокруг Солнца (*годовой параллакс*) и движением Солнечной системы в Галактике (*вековой параллакс*).

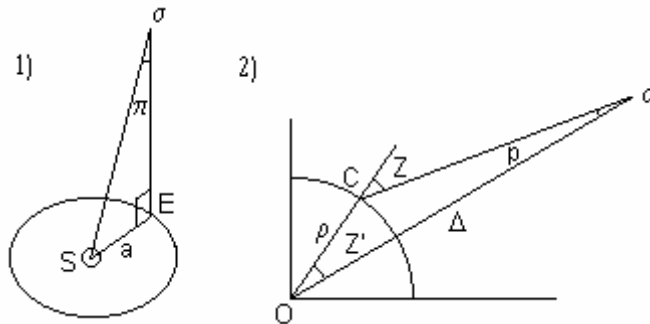


Рис. 2.6. Параллакс: 1) годичный, 2) суточный

Годичный параллакс светила σ определяется углом π , под которым виден отрезок a между барицентром S и геоцентром E (рис. 2.6.1). Годичный параллакс звезд не превышает $0,8''$ и обычно менее $0,1''$.

Суточный параллакс обнаруживается только при наблюдении близких небесных тел — Солнца, Луны, планет. Согласно рис. 2.6.2 зенитные расстояния Z' и Z , наблюдаемые соответственно с центра Земли O и с точки C на ее поверхности, различаются на величину параллакса p . Если ρ — радиус-вектор точки C , Δ — расстояние до небесного тела от центра Земли, ρ'' - число угловых секунд в радиане, то по теореме синусов и малости параллакса p , получаем:

Максимальный параллакс для Солнца $p = 8,794''$; для Луны $p = 57' 02,7''$. Они соответствуют расстояниям до Солнца 149 597 871 км и до Луны 384 403 км.

$$p'' = \frac{\rho}{\Delta} \rho'' \sin Z.$$

Астрономическая рефракция. Астрономическая рефракция — явление, приводящее к смещению изображения небесного объекта вследствие преломления светового луча в земной атмосфере (тропосфере). По этой причине истинное зенитное расстояние Z и измеряемое значение Z' различаются на угол r , определяющий влияние астрономической рефракции (рис. 2.7):

$$Z = Z' + r.$$

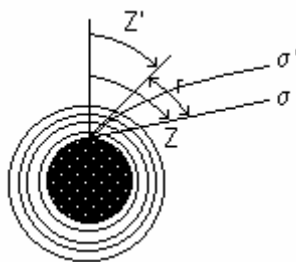


Рис. 2.7. Астрономическая рефракция

В первом приближении при нормальных метеорологических условиях поправка за астрономическую рефракцию может быть определена по формуле Лапласа:

$$r = 60,27'' \operatorname{tg} Z' - 0,067'' \operatorname{tg}^3 Z'.$$

Эта формула показывает, что лучи, идущие от светила в зените, не искривляются ($Z'=0$). В то же время поправка за рефракцию быстро растет по мере приближения объекта наблюдения к горизонту, когда световые лучи преодолевают наибольшую толщину атмосферы и испытывают максимальное искривление. По этой причине при высотах светил менее 10° астрономических наблюдений не производят.

При использовании радиоволн учитывается влияние не только тропосферы, но и ионосферы. Влияние ионосферы практически исключается измерениями на двух радиочастотах.

Помимо ионосферы радиоволна распространяется через межзвездное пространство, которое также является плазмой [2, §6.1.4].

Отклонение световых и радио лучей в гравитационном поле. Свет от звезд распространяется в гравитационном поле, которое создается другими звездами, Солнцем, планета-

ми и т.д. Для вычисления гравитационного отклонения луча света необходимо знать массу тела, расстояние до него от Земли и его координаты на небесной сфере. Вычисление отклонения луча света в поле тяготения солнечной системы не представляет особой сложности. Учет гравитационного поля звезд нашей Галактики на распространение света или радиоволн не может быть выполнен достаточно точно: до большинства звезд не известны расстояния, не точно известны их массы, существуют невидимые тела, составляющие значительную массу Галактики.

Максимальное отклонение луча света при касании лучом поверхности Солнца по расчётам составляет $1,75''$, по опытным данным – $1,3 \div 2,7''$ [2, § 6.5].

Каталоги координат. Из непосредственных наблюдений светил после введения в измеренные величины поправок за рефракцию, параллакс (для Солнца и планет) и суточную аберрацию получают *видимые* положения светил. Исключив из них влияние годичной аберрации, вычисляют *истинные* координаты светил α и δ на момент наблюдений. Вводят поправку за нутацию и получают *средние* координаты на данный момент времени. Учитывая влияние прецессии и собственное движение звезд, относят средние координаты на начало года, любую дату или на какую-нибудь эпоху. Полученные таким образом средние координаты светил сводят в каталоги, отнесенные к определенной эпохе.

Каталоги координат составлялись с древних времен. Известны каталоги *Гиппарха* (125 г. до н. э., 1022 звезды, точность около $15'$), *Улугбека* (1438 г., 1017 звезд), *Тихо Браге* (1602 г., 1005 звезд, точность $2'$), *фундаментальные каталоги FK*. Первый фундаментальный каталог содержал 539 ярких звёзд. Опубликовано в 1879 г. Каталоги последовательно совершенствовались. С 1964 г. до середины 80-х гг. применялся *FK-4*, обобщавший 149 частных каталогов. Содержал данные о 1535 ярких звездах. В 1983 г. завершены работы по составлению фундаментального каталога *FK-5* эпохи равноденствия 2000,0 (обобщено 250 современных каталогов, 3500 основных звезд). Последний на данный момент фундаментальный каталог *FK-6* объединяет результаты наземных наблюдений и данные, полученные с помощью астрометрического спутника *Hipparcos*.

Для повседневных астрономических работ на основе фундаментальных каталогов в России публикуют *Астрономические ежегодники*, содержащие координаты сотен ярких звезд и подробные таблицы Солнца, Луны и планет.

Счет времени в астрономии основан на определении часового угла светил.

Солнечное время. Смены дня и ночи, связанные с восходом и заходом Солнца, привели к появлению солнечного времени. Промежуток времени между двумя последовательными *нижними кульминациями* центра видимого диска Солнца на одном и том же меридиане называют *солнечными истинными сутками*. *Солнечное местное истинное* время определяется часовым углом центра видимого диска истинного Солнца t_{\odot} , увеличенным на 12 часов.

Часовой угол центра диска истинного Солнца в течение года не остается пропорциональным соответствующим углам поворота Земли вокруг своей оси. Поэтому перешли от неравномерного солнечного *истинного* времени к *среднему* солнечному времени t . Оно определяется *средним экваториальным* Солнцем, которое движется по экватору со средней скоростью движения истинного Солнца по эклиптике. Разность часовых углов истинного Солнца и среднего экваториального Солнца называют *уравнением времени (E)*:

$$E = t_{\odot} - t + 12^h.$$

Уравнение времени позволяет перейти от наблюдаемого солнечного истинного времени к вычисляемому среднему солнечному экваториальному времени. Значения E с точностью в date до нескольких суток даны в табл. 2.1.

Местное среднее солнечное время Гринвичского меридиана называют *всемирным временем* и обозначают английской аббревиатурой *UT (Universal Time)*. Из астрономических на-

блюдений звезд получают всемирное время, обозначаемое $UT0$. Это время, исправленное за смещения мгновенного полюса относительно принятого его среднего положения, обозначают $UT1$. Время $UT1$, исправленное за сезонные вариации, обозначают $UT2$. Практически всемирное время $UT1$ определяется углом поворота Земли вокруг оси CIP (см. Лекция 1).

Таблица 2.1

Значения уравнения времени E

Дата	uE	Дата	E
11 Февраля	$-14^m 22^s$	27 Июля	$-6^m 23^s$
16 Апреля	0 00	2 Сентября	0 00
15 Мая	+3 47	4 Ноября	+16 23
15 Июня	0 00	25 Декабря	0 00

Средне солнечное время местного меридиана (m) и Гринвичского меридиана ($UT1$) взаимосвязаны соотношениями:

$$m = T + u' = UT1 + \lambda,$$

где T - показания часов, u' - поправка к показаниям часов (разность между точным временем в какой-либо момент и показанием часов в этот же момент), исправленная за их ход (изменение поправки во времени, например, за сутки), λ астрономическая долгота места наблюдения, положительная к востоку от Гринвича и отрицательная к западу от него [5, с.124-126].

Звездное время. Для каждого меридиана существует свое *местное звездное время* s ; на меридиане наблюдений оно измеряется часовым углом точки весеннего равноденствия:

$$s = t_\gamma.$$

Промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями (обычно верхними) точки весеннего равноденствия называют *звездными сутками*.

При наблюдении часового угла t светила с прямым восхождением α в момент T показаний хронометра и поправке u к его показаниям, звездное время s равно (рис. 2.4):

$$s = T + u = \alpha + t.$$

Поправка находится при известном значении часового угла светила.

$$u = \alpha + t - T.$$

В верхней кульминации часовой угол $t = 0$, в нижней кульминации $t = 12^h$, и поправка в эти моменты определяется формулами, используемыми для её нахождения:

$$u = \alpha - T, \quad u = \alpha - T + 12.$$

Учитывается также *ход часов* - изменение поправки за сутки.

Особо выделяют звездное время на меридиане Гринвича - *гринвичское звездное время* GST (*Greenwich Sidereal Time*). Оно связано с местным звездным временем соотношением:

$$s = GST + \lambda,$$

где λ , как и в случае солнечного времени, астрономическая долгота места наблюдения.

Если нутация учитывается, наблюдения относятся к истинному равноденствию, звездное время называется истинным, обозначается как $GAST$ (*Greenwich Apparent Sidereal Time*). Если нутация не учитывается, то речь идёт о среднем звездном времени - обозначается как $GMST$ (*Greenwich Mean Sidereal Time*).

Если найдено среднее гринвичское время $GMST$, местное звездное время на меридиане долготы λ получается по формуле:

$$s = GMST + \lambda.$$

Перевод среднего времени в звездное время и наоборот. Земля вращается вокруг своей оси и одновременно движется по своей орбите. Это приводит к удлинению средних солнечных суток примерно на 4 минуты. В итоге оказывается, что в году средних суток на одни сутки меньше, чем звездных. Тропический год содержит 365,24220 солнечных средних суток и 366,24220 звездных суток. Отсюда следуют соотношения для пересчетов промежутков среднего времени (m) в промежутки звездного времени (s) и наоборот:

$$s = m(1 + \mu),$$

$$m = s(1 - \nu),$$

где коэффициенты пересчета

$$\mu = 1/365,24220 = 0,0027379093,$$

$$\nu = 1/366,24220 = 0,0027304336.$$

Например, среднее звездное время $GMST$ определяется соотношением:

$$GMST = GMST_0 + UT1 + \mu UT1.$$

$GMST_0$ - среднее звёздное время в 0^h всемирного времени; выбирается из таблицы «Звездное время» Астрономического ежегодника.

Легко получить обратную зависимость для перехода от звездного времени к солнечному:

$$UT1 = (GMST - GMST_0) - \nu(GMST - GMST_0).$$

Время $UT1$ получают из разности ($UT1 - UTC$) и принятому по радиосигналам или через глобальную сеть Интернет координированному времени Гринвича UTC :

$$UT1 = UTC + (UT1 - UTC).$$

См. также [5, с. 113, 125].

Поясное, декретное и летнее время. Для практического удобства на земном шаре введена система *поясного времени* ZT (*Zonal Time*). Земная поверхность по меридианам разделена на 24 часовых пояса, центральные меридианы которых отстоят друг от друга на 15^0 или 1^h . Действительные границы часовых поясов могут существенно отличаться от упомянутого правила. Они согласованы с государственными и административными границами. В качестве нулевого выбран часовой пояс меридиана Гринвича; его поясное время $ZT = UTC$ (равно координированному времени). Время часовых поясов к востоку от Гринвича определяется как $ZT = UTC + 1^h, +2^h, \dots, +12^h$ (имеются даже пояса $+13^h$ и $+14^h$). Поясам к западу от Гринвича соответствуют значения поясного времени $ZT = UTC - 1^h, \dots, -11^h$. На полюсах рекомендуется пользоваться временем UTC . Примерно по меридиану 180^0 проходит *линия перемены даты*: корабль, пересекающий эту линию с запада на восток, меняет дату на предыдущую, а пересекающий при курсе с востока на запад, меняет дату на последующую.



Рис. 2.8 Часовые зоны России. [Википедия]

В ряде государств мира существуют гражданские системы измерения времени, устанавливаемые законодательным путем с целью наиболее эффективного использования светлого времени суток. С 1930 г. действовала в СССР и продолжает действовать в РФ *декретное время*, отличающееся на $+1^h$ от поясного времени.

Кроме того, в некоторых странах вводится летнее время. В России до 2011 г. ежегодно с последнего воскресенья марта по последнее воскресенье октября вводилось летнее время,

которое еще на $+1^h$ отличалось от декретного времени.

В России с 26 октября 2014 г. устанавливается одиннадцать *часовых зон* с учетом максимального приближения к часовым поясам всемирного координированного времени *UTC* (рис. 2,8). Время соответствующих зон уменьшено или увеличено по отношению к московскому времени (МСК) и координированному времени (*UTC*) на целое число часов. Например, время 1-й часовой зоны МСК-1 и *UTC*+2 (Калининградская область), 2-й часовой зоны МСК, *UTC*+3, 11-й часовой зоны МСК+9, *UTC*+12 (Камчатский край и Чукотский автономный округ).[†] Сезонный перевод времени не осуществляется.

Юлианские даты. Система *юлианских дней* или *юлианских дат* принята для целей хронологий и сплошного счета суток день за днем. Введена в XVI в. Скалигером (*лат. Josephus Justus Scaliger*, 1540—1609, французский учёный). За начало счета избран средний гринвичский *полдень* на 1 Января 4713 года до н. э. Первый день имеет номер 0. Номер дня в юлианской системе означает число средних солнечных суток, протекших от начала эпохи юлианской системы до рассматриваемой даты и предваряется обозначением *JD*. Так, дате январь 0, 12 часов 1900 г. соответствует юлианская дата *JD* 2 415 020.0, а 2000 г. - юлианская дата *JD* 2 451 545.0. Столетие содержит 36 525 средних солнечных суток временной шкалы *TT*.

Имеется ряд модификаций, в которых изменены начала счёта юлианских дат.

Год. Единица времени *год* введена для измерений больших промежутков времени, равна примерно времени обращения Земли вокруг Солнца. Отметим четыре годовых периода.

Звездный год — промежуток времени, в течение которого Солнце совершает полное обращение вокруг Земли относительно направления на одну и ту же звезду.

Тропический год — промежуток времени полной смены сезонных циклов, например, между двумя последовательными прохождением центра Солнца через истинную точку *весеннего* равноденствия. За этот промежуток среднее Солнце делает по экватору один оборот в 360° .

Аномалистический год — промежуток времени между двумя последовательными прохождением центра Солнца через перигей его видимой геоцентрической орбиты.

Драконический год — промежуток времени между двумя последовательными прохождением центра Солнца через один и тот же узел лунной орбиты, например, восходящий узел орбиты Луны на эклиптике. Используется в теории затмений Солнца и Луны.

В табл. 2.2 показано, сколько в перечисленных годах имеется средних солнечных суток (на начало 2000 г.) и на сколько изменится это число за столетний период [1, с. 58].

Таблица 2.2

Продолжительность годов и их изменения за столетие

Год	Продолжительность	Изменение за столетие
Звездный	365,25636031	-0,00000011
Тропический	365,24219265	-0,00000614
Аномалистический	365,25964438	+0,00000304
Драконический	346,620063	+0,000032

С тропическим годом связан *гражданский календарь*. Первоначально в его основу был положен *юлианский* год продолжительностью в 365,25 средних солнечных суток. Однако, он не совпадает с действительной продолжительностью тропического года — их различие приводит к накоплению одних суток за 128 лет. Поэтому в 1582 году был введен более совершенный *григорианский* год продолжительностью в 365,2425 средних солнечных суток — ошибка в одни сутки накапливается только за 3330 лет. Григорианский календарь построен

[†]Подробности см. URL: <http://www.regnum.ru/news/polit/1820633.html#ixzz3DHPiZpw2> (дата обращения 18 июля 2015)

следующим образом: три года считают по 365 дней, а на четвертом (високосном) — 366 дней (на 1 день увеличивается месяц февраль). Однако при этом за 400 лет накапливается трое суток. Поэтому выбрасываются три високосных дня из трех последних годов столетий, номер которых не делится на 400. Так, годы 2100, 2200, 2300 не будут високосными.

Методы геодезической астрономии определений времени и координат. Определяемыми величинами в геодезической астрономии являются астрономические широта φ , долгота λ и азимут a направления на земной предмет. В геодезии азимут (a) отсчитывают от направления на точку севера по часовой стрелке. В астрономии его (a^*) определяют от направления на точку юга. Эти азимуты различаются на 180° .

Точность определения упомянутых величин зависит от их назначения и методики измерений. Высокоточные измерения в государственных астрономо-геодезических сетях характеризуются СКП по широте $0,3''$, по долготе $0,03''$, по азимуту $0,5-0,7''$. В других случаях СКП этих величин могут колебаться от $1-2''$ до $10''$ и даже до $1'$.

Измеряемыми величинами являются зенитные расстояния светил z , их азимуты a , горизонтальные углы Q между направлениями на светило и земной предмет, и моменты наблюдений T . Используемая астрономическая аппаратура состоит из следующих взаимосвязанных частей:

- 1) астрономической трубы, вращаемой вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, одна из которых (вертикальная) при помощи уровней совмещается с местной вертикалью;
- 2) вертикального и горизонтального кругов с отсчетными устройствами;
- 3) устройств наведения трубы на светило, позволяющих одновременно регистрировать моменты наблюдений и измерять малые угловые расстояния в пределах поля зрения (окулярных микрометров);
- 4) астрономических хронометров для измерений моментов наблюдений;
- 5) хронографов для регистрации наблюдений;
- 6) радиоприемной аппаратуры для приема сигналов времени, передаваемых радиостанциями служб времени.

В приближенных измерениях используют теодолиты, секундомеры или наручные часы.

Заданными величинами являются координаты светил в системе фундаментального каталога, постоянные параметры, характеризующие поступательно-вращательное движение Земли и шкала координированного времени *UTC*. Экваториальные координаты светил перевычисляются с эпохи каталога в видимые на момент наблюдений, а моменты времени — со шкалы *UTC* в моменты истинного гринвичского звездного времени.

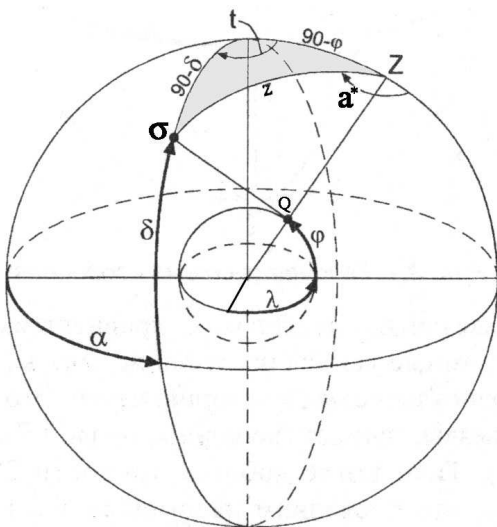


Рис. 2.9. Параллактический треугольник

Параллактический треугольник. Теория геодезической астрономии основана на формулах сферической тригонометрии, устанавливающих связь между углами и сторонами *параллактического* треугольника на небесной сфере. Вершинами треугольника являются Северный полюс, зенит Z и светило σ , его углы зависят от астрономического азимута a^* и часового угла t , стороны — от координат z , δ и астрономической широты φ точки наблюдения Q (рис. 2.9).

Сферический треугольник решают по формулам *сферической тригонометрии*. Сумма углов Σ в сферическом треугольнике больше 180° на величину *сферического избытка* ϵ :

$$\Sigma = 180^\circ + \epsilon .$$

Сферический треугольник может иметь три прямых угла, например, треугольник на глобусе, сторонами которого являются дуга экватора между двумя дугами меридианов от экватора до полюса и разностью их долгот в 90° .

Не вникая в детали сферической тригонометрии, воспользуемся её тремя теоремами.

Теорема синусов определяет отношения синусов углов и противолежащих им синусов сторон:

$$\frac{\sin t}{\sin z} = \frac{\sin(360 - a)}{\sin(90 - \delta)} .$$

Теорема косинуса стороны – косинус стороны равен произведению косинусов двух других сторон плюс произведение синусов этих сторон на косинус угла между ними. Например,

$$\cos z = \cos(90 - \delta)\cos(90 - \varphi) + \sin(90 - \delta)\sin(90 - \varphi)\cos t ,$$

$$\cos z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos t .$$

Эта формула служит для нахождения широты места наблюдения φ , часового угла светила t и поправки u к показаниям хронометра.

Применяя теорему косинусов к стороне между полюсом и светилом, получим:

$$\sin \delta = \sin \varphi \cos z + \cos \varphi \sin z \cos a .$$

Данная формула используется для определения азимута светила a по измеренному значению z .

Теорема котангенсов. Объединяет четыре элемента сферического треугольника – две стороны и два угла. Выбирается угол и противолежащая ему сторона. Произведение котангенса этой противолежащей стороны на синус другой стороны равно произведению косинуса этой другой стороны на косинус второго угла плюс произведение синуса этого угла на котангенс исходного угла. Например, в качестве исходного выберем угол u зенита, выразив его через азимут a , отсчитываемый от точки севера. Применяя теорему котангенсов, будем иметь:

$$\operatorname{ctg}(90 - \delta)\sin(90 - \varphi) = \cos(90 - \varphi)\cos t + \sin t \operatorname{ctg}(360 - a) ,$$

$$\operatorname{tg} \delta \cos \varphi = \sin \varphi \cos t - \sin t \operatorname{ctg} a .$$

Формула используется для определения азимута a светила по его часовому углу t .

Зенитальные и азимутальные методы. Методы астрономических определений делят на *зенитальные* и *азимутальные* [6]. Первые основаны на измерении зенитных расстояний светил, вторые — на измерении азимутов и использовании их в качестве исходных величин.

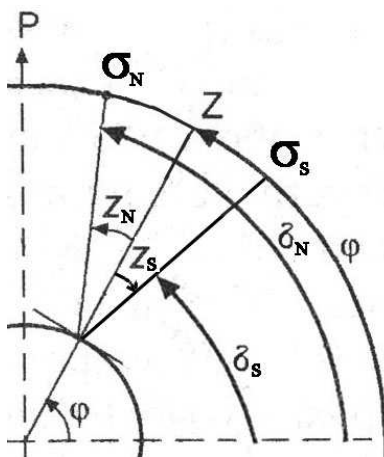


Рис. 2.10. К определению широты способом Талькотта

Определения астрономических долгот. Долгота определяется разностью местного времени и времени в Гринвиче:

$$\lambda = s - GMST = T + u - GMST ,$$

$$\lambda = m - UT1 = T + u' - UT1 .$$

Как видно, поправки к часам имеют большое значение. Знать эту поправку означает иметь возможность определять точное время и долготу места наблюдения.

Определения астрономических широт. Широты определяют по наблюдениям светил в меридиане и вблизи него. Этим достигают наименьшего влияния погрешностей заданных и измеряемых величин — погрешностей экваториальных координат, моментов наблюдений, поправок хронометров и зенитных расстояний.

Из элементарных соотношений между φ , z и δ в плоскости астрономического меридиана следует (рис. 2.10):

$$\varphi = \delta_N - z_N; \quad \varphi = \delta_S + z_S .$$

где индексом N обозначены склонение и зенитное расстояние звезды к северу от зенита, а индексом S - к югу. Если северная звезда в верхней кульминации, то

$$2\varphi = (z_S - z_N) + (\delta_S + \delta_N) ;$$

если северная звезда в нижней кульминации, то

$$2\varphi = (z_S - z_N) + (180^\circ + \delta_S - \delta_N) .$$

В меридиане светила движутся лишь по азимуту, поэтому окулярным микрометром астрономической трубы можно с высокой точностью измерить малую разность зенитных расстояний ($z_S - z_N$). Измерения именно разностей зенитных расстояний способствует повышению точности определений широт: практически исключается астрономическая рефракция.

Способ предложил в 1740 г. датский астроном П. Хорребоу. Практически способ разработал в 1857 г. американский геодезист XIX столетия Талькотт (А. Talcott). Этот способ определения широты является одним из наиболее точных.

Широта или поправка хронометра может быть определена по формуле для $\cos(z)$. При определениях широты известной полагается поправка хронометра. При определении поправки хронометра известной должна быть широта φ .

Определение широты и поправки хронометра по наблюдениям пары звёзд. Большую точность обеспечивают наблюдения не одиноких светил, а прохождений пар звезд через один и тот же альмукантарат z (через горизонтальные нити сетки нитей астрономической трубы, наклоненной на угол, соответствующий заданному зенитному расстоянию, например $z = 30^\circ$). Для выбранной пары звезд $z_1 = z_2$, и на основе формул для $\cos(z)$ имеем:

$$\cos z_1 = \cos z_2 ,$$

$$\sin \delta_1 \sin \varphi + \cos \delta_1 \cos \varphi \cos t_1 = \sin \delta_2 \sin \varphi + \cos \delta_2 \cos \varphi \cos t_2 ;$$

$$t_1 = T_1 - \alpha_1 + u; \quad t_2 = T_2 - \alpha_2 + u .$$

Заметим, что в этом случае зенитные расстояния *не измеряются*, но *фиксируются* моменты времени прохождений звёзд через один и тот же альмукантарат.

Если поправка хронометра u известна и наблюдают прохождения пары звезд через заданный альмукантарат в плоскости астрономического меридиана, то имеет место *способ определения широты М.В. Певцова* (1843-1902).

Если известна широта φ и наблюдают прохождения пары звезд через заданный альмукантарат в плоскости первого вертикала, то идет речь об определении поправки хронометра и тем самым долготы места наблюдения *способом Н.Я. Цингера* (1842-1918).

Выбор для наблюдений плоскости меридиана или первого вертикала продиктован необходимостью свести к минимуму влияния погрешностей измерений и исходных данных.

Способ совместного определения широты и поправки хронометра (долготы) основан на наблюдении n прохождений звезд через заданный альмукантарат в равномерно распределенных по азимуту вертикалах.

Зенитальный способ определения азимутов. Точные азимуты по измерениям зенитных расстояний, как правило, не определяют. Для получения азимутов с точностью 5-10" может быть использована формула теоремы косинусов стороны параллактического треугольника "полюс-светило". Из этой формулы для азимута получаем:

$$\cos a = \sin \delta \sec \varphi \operatorname{cosec} z - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{ctg} z .$$

9. Параллактический треугольник на небесной сфере.
10. Способ Талькотта определения широты.
11. Способ Певцова определения широты.
12. Способ Цингера определения поправки хронометра.
13. Определение долготы места наблюдения.
14. Зенитальный способ определения азимутов.
15. Определения азимутов по часовому углу светила.