Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования

"Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина"

Центр классического образования

Физический факультет

Учебная практика

Сферическая астрономия

Учебное пособие для студентов 1 курса

Екатеринбург, 2011

АННОТАЦИЯ

Учебно-методический материал представляет из себя электронный учебник для реализации на современном технологическом и научно-техническом уровне программы учебной практики, посвященной классической сферической астрономии.

Применение комплекса должно помочь студентам освоить на практике:

— измерение горизонтальных, вертикальных углов и определение азимута направления геодезическими и астрономическими способами;

— освоить работу с различными системами координат и счета времени и их применением для наблюдений;

— проводить астрономические наблюдения и выполнять математическую обработку результатов наблюдений;

— выполнять исследования новых геодезических и астрономических приборов и аппаратуры;

— работать в коллективе и публично защищать результаты своей работы.

Учебная практика состоит из шести тем.

В первой теме рассмотрены кратко основные системы координат, использующиеся в астрономии, а также условия наблюдения светил в различное время года в различных географических пунктах.

Вторая тема посвящена различным системам счета времени и их связи между собой.

В третьей теме рассматриваются вопросы интерполирования данных и работа с различными эфемеридными таблицами Астрономического ежегодника.

Четвертая тема посвящена астрономическим наблюдениям Солнца с целью определения азимута направления — задача ориентирования в пространстве и определения горизонтальных координат на местности. Данная тема позволяет студентам впервые познакомиться с методикой проведения и обработки результатов астрономических наблюдений.

В пятой теме рассматриваются причины изменения координат небесных светил и связанные с этим способы вычисления точных координат.

Шестая тема посвящена связи шкал звездного времени (используемого при проведении астрономических наблюдений) и среднего солнечного времени.

На изучение каждой темы отводится один учебный день. По завершению каждой темы студенты выполняют ряд самостоятельных упражнений. По завершении учебной практики студенты сдают зачет.

СОДЕРЖАНИЕ

Тема 1

Системы астрономических координат. Условия наблюдения звезд и Солнца в зависимости от их координат, широты места и времени наблюдения

1 Системы астрономических координат

1.1 Основные плоскости и точки небесной сферы

Основные плоскости и точки небесной сферы показаны на рисунке 1.1.

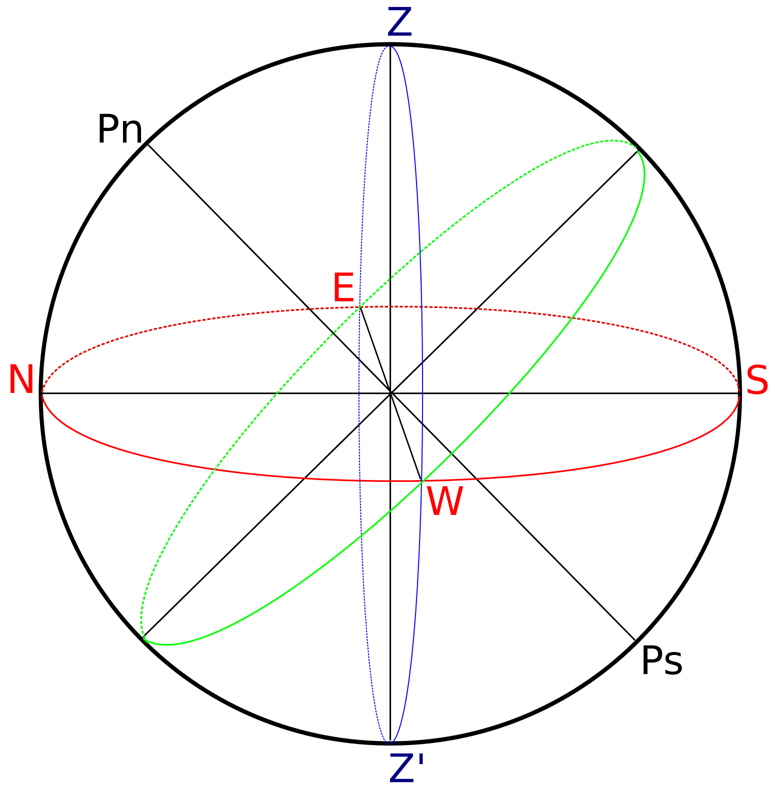


Рисунок 1.1 – Основные плоскости и точки небесной сферы

Основное направление на поверхности Земли — *отвесная линия*, которая пересекает небесную сферу в точке зенита (Z) и в точке надира (Z'). Плоскость большого круга, перпендикулярная отвесной линии, называется *математическим горизонтом.* Математический горизонт проходит через точки юга (S), севера (N), востока (E) и запада (W).

Земля вращается вокруг своей оси. Прямая, параллельная этой оси, проведенная через центр небесной сферы, называется *осью мира.* Точки пересечения оси мира с небесной сферой приняты за северный (P_n) и южный (P_s) *полюсы мира.* Тот полюс, относительно которого кажущееся вращение сферы происходит против часовой стрелки для наблюдателя в центре сферы, называется северным полюсом мира. Вблизи северного полюса мира расположена Полярная звезда. Большие круги, проходящие через оба полюса мира, называются *кругами склонений*.

Точка N математического горизонта, ближайшая к северному полюсу мира, называется *точкой севера*. Противоположная ей точка S, ближайшая к южному полюсу мира, называется *точкой юга*. Точки W и E математического горизонта, одинаково отстоящие от точек севера и юга, называются *точками запада* и *востока* соответственно.

Большие круги, проходящие через зенит и надир, называют вертикалами. Большой круг, проходящий через точки востока и запада, зенита и надира — *первый вертикал*. Большой круг, проходящий через северный и южный полюса мира и содержащий зенит, называется *небесным меридианом*.

Большой круг небесной сферы, плоскость которого перпендикулярна оси мира, называется *небесным экватором*. Небесный экватор делит сферу на две полусферы: северную и южную. Он пересекает плоскость математического горизонта в точках востока и запада.

1.2 Горизонтальная система координат

В горизонтальной системе координат направление на объект определяется относительно двух взаимно перпендикулярных плоскостей: плоскости математического горизонта и плоскости небесного меридиана.

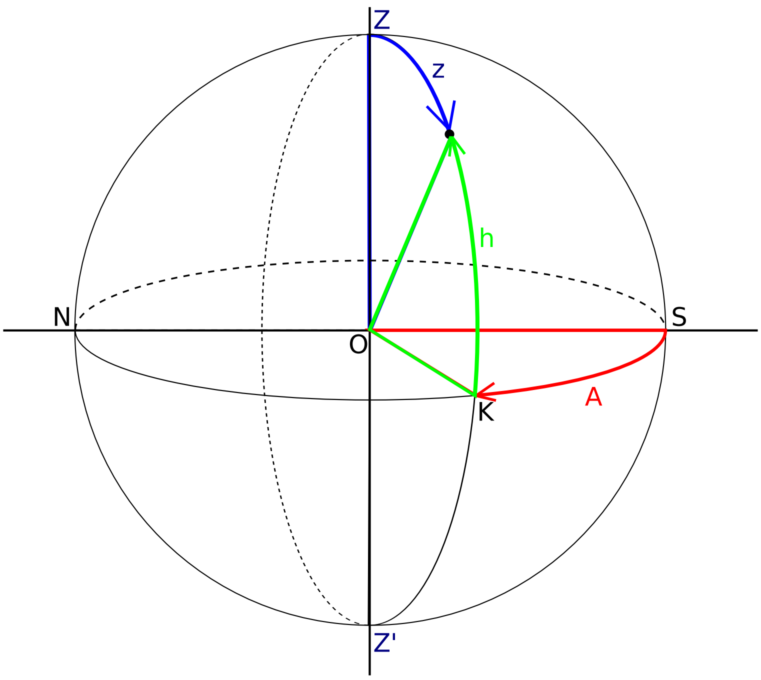


Рисунок 1.2 – Горизонтальная система координат

На рисунке 1.2 плоскость $Z\sigma K$ — вертикал светила. Положение звезды задается двумя координатами.

а) Зенитное расстояние z или высота $h = 90° - z$. Зенитное расстояние — это дуга вертикала от зенита до светила. Высотой светила называется дуга вертикала от горизонта до светила. Зенитные расстояния изменяются в пределах $0° < z < 180°$, а высоты — в пределах $0° < h < +90°$ — для звезд северного полушария, $-90° < h < 0°$ — для звезд южного полушария.

б) Азимут A (дуга математического горизонта SK)— определяет положение вертикала светила в момент наблюдения относительно плоскости небесного меридиана; астрономический азимут отсчитывается от точки юга S до пресечения вертикала светила с математическим горизонтом и возрастает к западу от $0°$ до $360°$, иногда для восточной полусферы используют отрицательные азимуты, которые отсчитываются от точки юга в направлении на восток.

Горизонтальные координаты светил можно определять из наблюдений при помощи инструментов, имеющих вертикальную и горизонтальную оси вращения и связанные с этими осями вертикальный и горизонтальный круги (например, теодолит).

В горизонтальной системе координат вследствие суточного вращения небесной сферы обе координаты светила, участвующего в суточном движении, непрерывно изменяются, т.е. зависят от времени. Поэтому любое измерение горизонтальных координат светила необходимо сопровождать и фиксацией момента времени, для которого эти координаты получены.

1.3 Первая экваториальная система координат

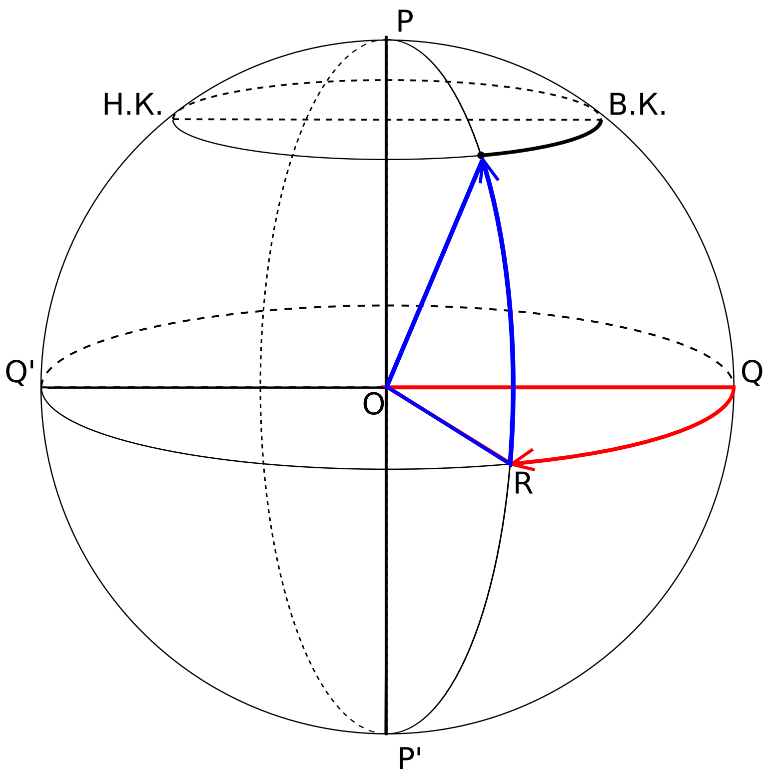


Рисунок 1.3 – I экваториальная система координат

На рисунке 1.3 дуга большого круга PP', проходящего через светило — *круг склонения*, пересекающий плоскость небесного экватора по линии OR. Параллельно плоскости небесного экватора QQ' отмечен суточный путь светила. В I экваториальной системе координат положение светила задается двумя координатами:

а) Склонение звезды δ (дуга $R\sigma$) — дуга круга склонения от экватора до светила, которая характеризует угловое расстояние светила от небесного экватора, отсчитывается склонение от плоскости небесного экватора, в направлении северного полюса изменяется в пределах $0° < \delta < 90°$, а в направлении южного полюса — в пределах $-90° < \delta < 0°$; для близполюсных звезд вместо склонения используют полярное расстояние $p = 90° - \delta$ — дуга круга склонения от северного полюса до светила. Полярные расстояния изменяются в пределах $0 < p < 180°$.

б) Часовой угол t — двугранный угол между плоскостью круга склонения и плоскостью небесного меридиана, которому соответствует угол QOR в плоскости экватора, определяющий угол поворота круга склонения относительно плоскости небесного меридиана. Отсчитывается часовой угол от южной точки экватора к западу от 0 до 24 часов.

В первой экваториальной системе координат склонения светил будут оставаться постоянными, если не учитывать собственные движения светил, а часовые угла светил при этом будут непрерывно изменяться.

1.4 Вторая экваториальная система координат

Данная система была введена для определения координат светила таким образом, чтобы они не зависели на больших интервалах времени от суточного вращения Земли. Склонение светила δ удовлетворяет этому условию, а часовой угол t — нет. Чтобы ввести вторую постоянную координату, нужно связать положение круга склонения с такой плоскостью, которая со всеми светилами участвует в видимом суточном движении. Тогда угол между кругом склонения светила и этой плоскостью будет постоянным.

На небесной сфере за начальный круг склонений принят круг, проходящий через точку весеннего равноденствия Υ, которая лежит в плоскости небесного экватора на линии его пересечения с плоскостью орбиты (эклиптики). Эту точку центр солнечного диска проходит в день весеннего равноденствия.

На рисунке 1.4 угол QOR — часовой угол светила σ, угол $QO\Upsilon$ — часовой угол точки весеннего равноденствия, угол ΥOR — *прямое восхождение* светила $\alpha = t_{\Upsilon} - t_{\sigma}$ — дуга экватора от точки весеннего равноденствия до точки пересечения экватора с кругом склонения светила. Прямое восхождение отсчитывается против часовой стрелки от 0 до 24 часов и сохраняет свое

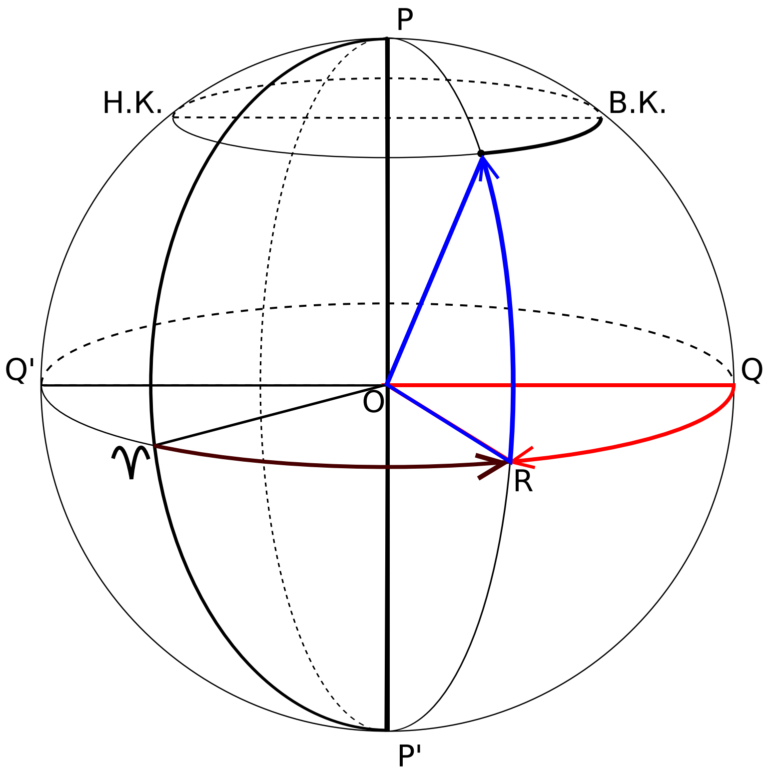


Рисунок 1.4 – II экваториальная система координат

значение, так как часовые углы светила и точки весеннего равноденствия изменяются с одинаковой скоростью в силу суточного вращения Земли. Из определения прямого восхождения следует, что

$$t_{\Upsilon} = t_\sigma + \alpha_\sigma \equiv S$$

—*звездное время*—часовой угол точки весеннего равноденствия.

Непосредственно из наблюдений звездное время определить нельзя, но в любой физический момент его можно представить как сумму часового угла и прямого восхождения светила. В момент, когда точка весеннего равноденствия проходит небесный меридиан над точкой юга, ее часовой угол равен нулю, следовательно $S = 0^{\mathrm{h}}0^{\mathrm{m}}$. Этот момент принят за момент начало звездных суток на данном меридиане. Кроме того, когда произвольное светило проходит небесный меридиан над точкой юга, его часовой угол также равен нулю, следовательно

$$S = \alpha_\sigma$$

—звездное время в момент верхней кульминации светила σ на данном меридиане.

2 Условия наблюдения звезд и Солнца в зависимости от их координат, широты и времени наблюдения

2.1 Прохождение светил через меридиан. Кульминации светил

Вращение Земли вокруг своей оси отражается для земного наблюдателя суточным вращением небесной сферы вокруг оси мира, параллельной оси вращения Земли. При этом каждая точка, связанная с небесной сферой, описывает в течение суток окружность, называемую *параллелью*. Однако, плоскость горизонта и отвесная линия остаются неподвижными, так как они не принимают участия в суточном небесной сферы. Полюс мира, как точка пересечения небесной сферы с осью вращения, также остается неподвижной. Отсюда следует, что небесный меридиан и основные точки плоскости горизонта не изменяют своего положения при суточном вращении.

Так как плоскость суточной параллели светила параллельна плоскости небесного экватора и перпендикулярна плоскости небесного меридиана, то она в двух точках пересекает небесный меридиан, т.е. светило дважды в течении суточного движения проходит через плоскость небесного меридиана. Эти моменты называют кульминациями светила. Та точка, которая расположена ближе к зениту, называется *верхней кульминацией* , противоположная ей — *нижней кульминацией*.

На рисунке 1.5 показаны суточные пути четырех светил. Из рисунка хорошо видно, что верхняя кульминация светила может произойти как к северу от зенита (на дуге меридиана P_nZ), так и к югу от зенита (на дуге меридиана ZP_s). Из рисунка не трудно понять, что зенитные

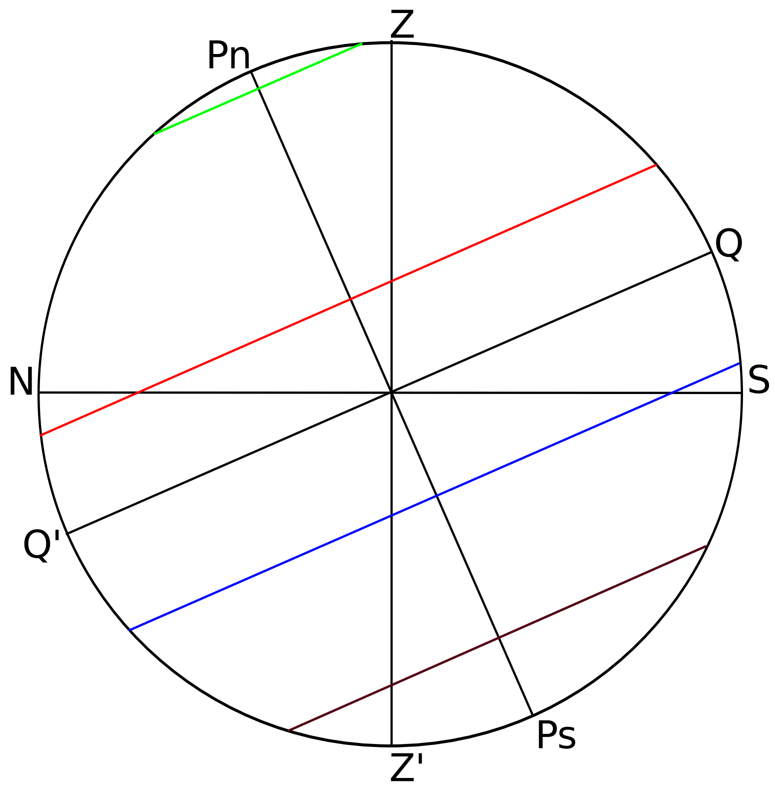


Рисунок 1.5 – Верхняя и нижняя кульминации светил

расстояния светил в момент верхней кульминации будут минимальны и связаны с широтой места наблюдения и склонением светила следующими соотношениями:

$$z_{\text{в.к.}} = \delta - \varphi \quad \text{кульминация к северу от зенита}$$

$$z_{\text{в.к.}} = \varphi - \delta \quad \text{кульминация к югу от зенита}$$

Отсюда несложно получить и соотношения для высот светила над горизонтом в верхней кульминации:

$$h_{\text{в.к.}} = 90^\circ - \delta + \varphi \quad \text{кульминация к северу от зенита}$$

$$h_{\text{в.к.}} = 90^\circ - \varphi + \delta \quad \text{кульминация к югу от зенита}$$

Очевидно, что в верхней кульминации светило имеет максимальную высоту над горизонтом в течении суток. К северу от зенита верхнюю кульминацию проходят светила, у которых $\delta > \varphi$, а к югу от зенита верхняя кульминация происходит у звезд, для которых $\delta < \varphi$.

Нижняя кульминация звезды может произойти к северу (на рисунке 1.5) или к югу от надира. Зенитные расстояния тогда можно найти по следующим соотношениям:

$$z_{\text{н.к.}} = 180^\circ - (\varphi + \delta) \quad \text{кульминация к северу от надира}$$

$$z_{\text{н.к.}} = 180^\circ + (\varphi + \delta) \quad \text{кульминация к югу от надира}$$

Наблюдения моментов прохождения звезд через меридиан позволяют определить звездное время данного меридиана. Простая связь экваториальных и горизонтальных координат светил позволяет простыми методами определить широту места наблюдения.

2.2 Прохождение светил через первый вертикал

Момент прохождения звездой через первый вертикал имеет важное значение: зенитное расстояние звезды в этом случае изменяется быстрее всего и ошибка в его измерении имеет наименьшее влияние на часовой угол. Поэтому при определении времени из измерений зенитных расстояний лучше всего выбирать звезды, расположенные близко в первому вертикалу.

При суточном вращении небесной сферы первый вертикал могут пересекать звезды, у которых $\delta < \varphi$. При этом светило проходит через первый вертикал дважды: над точкой запада и над точкой востока. Суточные параллели светил, склонение которых больше широты места наблюдения, полностью располагаются к северу от первого вертикала, поэтому такие звезды не проходят через первый вертикал. Звезды, склонение которых равно нулю, движутся вдоль экватора, поэтому пересекают первый вертикал в точках запада и востока. Звезды, склонения которых равны широте места наблюдения, проходят верхнюю кульминацию в точке зенита, поэтому их суточные параллели касаются первого вертикала также в точке зенита.

Когда звезда проходит через первый вертикал, параллактический треугольник (который позволяет связать горизонтальные и экваториальные координаты светил) становится прямоугольным, поскольку азимут светила в моменты прохождения равен $A_W = 90°$ или $A_E = 270°$. Тогда зенитное расстояние для моментов прохождения первого вертикала будет равно:

$$\cos z = \frac{\sin\delta}{\sin\varphi}$$

Очевидно, что светило будет проходить первый вертикал на этом зенитном расстоянии как над точкой запада, так и над точкой востока. Часовой угол для моментов прохождения можно определить следующим образом:

$$\cos t = \frac{\operatorname{tg}\delta}{\operatorname{tg}\varphi}$$

Из этого соотношения получается два значения часового угла: t_W — часовой угол прохождения первого вертикала на точкой запада и t_E — часовой угол прохождения первого вертикала над точкой востока. Поскольку часовой угол возрастает к западу начиная от южной точки небесного экватора, то $12^{\mathrm{h}} < t_W < 24^{\mathrm{h}}$ и $0^{\mathrm{h}} < t_E < 12^{\mathrm{h}}$. Соответствующие моменты звездного времени:

$$S_E = t_E + \alpha, \quad S_W = t_W + \alpha$$

2.3 Восход и заход светил

Для данной точки земной поверхности все светила можно разбить на три группы: *незаходящие светила*, *восходящие и заходящие светила* и *невосходящие светила*.

Суточная параллель незаходящих светил в данном месте наблюдения не пересекает плоскости горизонта и находится выше этой плоскости круглосуточно. Совершенно очевидно, что высота в нижней кульминации для таких звезд больше нуля, а зенитное расстояние, соответственно, меньше 90°. Отсюда следует, что звезды северного полушария, для которых верно $\delta \geqslant 90° - \varphi$, являются незаходящими для данной широты φ. При этом суточная параллель, отстоящая от небесного экватора на величину $90° - \varphi$, является *граничной параллелью незаходящих светил.*

Аналогичным образом можно рассмотреть невосходящие на данной широте светила. Высота в верхней кульминации у таких светил меньше нуля, а зенитное расстояние в верхней кульминации больше 90°. Значение зенитного расстояния в верхней кульминации $z = 90°$ или высоты в верхней кульминации $h = 0$ определяют *граничную параллель невосходящих* для данной широты звезд. Это условие можно записать как $\delta \leqslant -(90° - \varphi)$. Две пограничных суточных параллели — незаходящих и невосходящих звезд — определяют на данной широте границы склонения звезд, которые будут восходить и заходить в течении суток: $-(90° - \varphi) < \delta < (90° - \varphi)$

В момент восхода и захода светила $z = 90°$, тогда из формул сферического треугольника можно получить выражение для часового угла точек восхода и захода:

$$\cos t = -\operatorname{tg}\delta \operatorname{tg}\varphi$$

Часовой угол точки восхода $t_в$ будет лежать в пределах $12^h < t_в < 24^h$ (или будет отрицательным, если считать часовые углы от южной точки экватора к востоку), а часовой угол точки захода $t_з$ будет лежать в пределах $0^h < t_з < 12^h$. Время, в течении которого светило находится над горизонтом, будет равно $2|t|$. Азимуты точек восхода и захода можно найти по формуле:

$$\cos A = -\frac{\sin\delta}{\cos\varphi}$$

Значение азимута, полученного по этой формуле, также отражает как азимут точки восхода (значение азимута отрицательно или лежит в пределах $180° < A < 360°$), так и точки захода (значение азимута положительно или лежит в пределах $0° < A < 180°$). Для звезд, чьи суточные параллели совпадают с небесным экватором, значения азимутов будут равны $A_з = 90°$ и $A_в = 270°$. Для пунктов с широтами $\pm 90°$ эта формула не применима, поскольку на полюсе звезды движутся параллельно плоскости горизонта и не пересекают его.

Данные соотношения для определения часового угла и азимута дают лишь приближенные значения, поскольку они не учитывает явления рефракции, а также, в случае Солнца и Луны, их радиуса. Для Солнца, в частности, моментами захода и восхода считается момент, когда верхний край диска находится на линии горизонта. В этом случае зенитное расстояние Солнца в моменты восхода и захода можно найти по формуле:

$$z_\odot = 90° + \rho + R_\odot,$$

где $R_\odot$ — радиус Солнца, а ρ — поправка, учитывающая рефракцию. Значение радиуса Солнца можно найти в таблице "Солнце" Астрономического ежегодника[2] на каждый день года, а поправку за рефракцию — вычислить при помощи линейной интерполяции, используя таблицу "Рефракция (точность $1''$)" Астрономического ежегодника. Тогда часовой угол моментов восхода и захода Солнца:

$$\cos t_\odot = \frac{\cos z_\odot - \sin\varphi\sin\delta_\odot}{\cos\varphi\cos\delta_\odot},$$

а азимут:

$$\cos A_\odot = -\frac{\sin\delta_\odot - \sin\varphi\cos z_\odot}{\cos\varphi\sin z_\odot}$$

Склонение Солнца приводится в ежегоднике на каждый день года. Также в Астрономическом ежегоднике приводятся таблицы моментов восхода и захода Луны и Солнца по местному среднему солнечному времени для различных широт. При помощи этих таблиц, используя линейную интерполяцию, можно вычислить моменты времени восхода и захода для пункта с произвольной широтой места наблюдения и определить продолжительность светового дня.

2.4 Сумерки

После захода Солнца и перед его восходом не наблюдается резкой смены освещенности неба и поверхности Земли в месте наблюдения, поскольку солнечный свет рассеивается земной атмосферой. Плавный переход от дневного к ночному периоду времени разделен *сумерками.* Яркость сумеречного освещения земной атмосферы зависит от глубины погружения Солнца под горизонт. В зависимости от зенитного расстояния Солнца сумерки делятся на три части:

а) *гражданские сумерки* — наиболее светлая часть сумерек, длящаяся от момента видимого захода Солнца за линию горизонта до момента погружения центра Солнца под линию горизонта на $6°-7°$, что соответствует зенитному расстоянию Солнца $96°-97°$. Если гражданские сумерки продолжаются в течение всей ночи, то такая ночь называется белой.

б) *навигационные сумерки* — достаточно светлая часть сумерек, когда погружение Солнца под горизонт соответствует зенитному расстоянию в пределах $97° - 102°$.

в) *астрономические сумерки* — наиболее темная часть сумерек, когда зенитное расстояние Солнца лежит в пределах $102° - 108°$. В конце астрономических сумерек вечером на ясном небе без Луны можно видеть невооруженным глазом наиболее слабые звезды.

При дальнейшем увеличении зенитного расстояния Солнца освещенность ночного неба практически не изменяется и наступает ночь.

3 Графический метод преобразования координат и прогнозирование условий наблюдения

При прогнозировании условий наблюдений тех или иных светил (например, при планировании наблюдений) совсем не обязательно использовать формулы сферического треугольника. Существует достаточно простой и быстрый способ преобразования экваториальных координат светила в горизонтальные в определенные моменты времени с помощью сетки Вульфа. *Сетка Вульфа* (или стереографическая сетка)— это проекция меридианов и параллелей сферической поверхности (в нашем случае небесной сферы) на плоскость основного (небесного) меридиана. Сетка позволяет находить длины дуг окружностей и одновременно работать в горизонтальной и экваториальной системах координат. Ниже представлен порядок работы с сеткой при решении типовой задачи на прогнозирование условий наблюдений светила.

Условие задачи: Определить часовой угол, а также высоту и азимут звезды с экваториальными координатами $\delta = 10°$ и $\alpha = 4^{\mathrm{h}}$ в пункте с широтой $\varphi = 60°$ в момент звездного времени $S = 10^{\mathrm{h}}25^{\mathrm{m}}$.

Решение:

а) Сначала на сетке сверху закрепляется калька. На кальке нужно отметить центр сетки, а затем отметить основные направления и точки горизонтальной системы координат: линию горизонта, отвесную линию, а также отметить точки юга S, севера N, зенита Z и надира Z', а также положение полюса мира. Как известно, высота полюса мира над горизонтом (над точкой севера) — это широта места наблюдения. Для данной задачи над точкой севера нужно отложить вверх по направлению к зениту значение $60°$.

б) Далее необходимо отметить на кальке основные направления и точки экваториальной системы координат. Для этого калька поворачивается относительно центра сетки до совмещения точки полюса мира с бывшим положением зенита. После этого можно отметить плоскость небесного экватора, которая будет перпендикулярна направлению на полюс мира.

в) Поскольку нам известны экваториальные координаты светила, можно отметить суточную параллель светила в экваториальной системе координат. Как известно, высота суточной параллели относительно экватора задается склонением звезды. В данной задаче склонение равно $\delta = 10°$, поэтому нужно отложить над южной точкой экватора значение, равное $\delta = 10°$, а затем отметить суточную параллель, которая соответствует этому значению склонения. В экваториальной системе координат эта параллель будет проходить вдоль экватора.

г) Поскольку в задаче дано звездное время, можно отложить это значение непосредственно на сетке Вульфа. Для удобства момент звездного времени можно перевести в градусную меру. Как известно, звездное время — это часовой угол точки весеннего равноденствия. Часовые углы откладываются вдоль экватора от его южной точки в сторону запада. Значение $S = 10^{\mathrm{h}}25^{\mathrm{m}}$ примерно соответствует $156°.25$. Нужно отметить на экваторе соответствующую этому углу дугу, а затем вдоль меридиана подняться до пересечения с суточной параллелью звезды. Поскольку в задаче дано и прямое восхождение, то можно от точки пересечения вдоль суточной параллели светила в сторону южной точки экватора отложить градусную меру, соответствующую прямому восхождению $\alpha = 4^{\mathrm{h}}$. На суточной параллели теперь нам известно положение светила в заданный момент звездного времени. Можно было поступить по-другому: найти значение часового угла звезды в заданный момент звездного времени и от южной точки экватора в сторону запада отложить вдоль экватора значение часового угла, а затем по меридиану подняться до пересечения с суточной параллелью звезды.

д) Поскольку по условию задачи необходимо найти горизонтальные координаты светила в заданный момент звездного времени, нужно повернуть кальку относительно сетки Вульфа так, чтобы зенит встал на место. В этом случае сразу будет видно, как происходит суточное движение светила относительно плоскости горизонта. Теперь на суточной параллели светила нужно найти точку, отмечающую положение светила в заданный момент времени и снять с сетки значение высоты и азимута. Высота измеряется дугой меридиана (который играет роль вертикала) от точки на суточной параллели до линии горизонта. Азимут измеряется дугой большого круга (линии горизонта) от точки юга до пересечения плоскости вертикала светила с горизонтом.

4 Типовые задачи

4.1 Определить экваториальные координаты звезд α Boo и α Cyg. Какая из звезд раньше кульминирует и на сколько в пункте с широтой $\varphi = 45°$? Какая из звезд дольше находится над горизонтом в этом же пункте наблюдения?

Решение: Для определения экваториальных звезд используются таблица "Средние места звезд" Астрономического ежегодника. Поскольку для решения задачи высокая точность не требуется, можно воспользоваться ежегодником за любой год. В Приложении А приведен фрагмент таблицы "Средние места звезд" из Астрономического ежегодника 2011 года. Как видно из таблицы А.1, экваториальные координаты содержатся в графах "RA" (прямое восхождение) и "DEC" (склонение). При решении данной задачи достаточно взять эти координаты с точностью до секунд. Звезда α Boo в Астрономическом ежегоднике имеет номер 345, а α Cyg — номер 506. Тогда экваториальные координаты этих звезд:

— α Boo: $\alpha = 14^{\mathrm{h}}16^{\mathrm{m}}11^{\mathrm{s}}$, $\delta = +19°07'23''$,

— α Cyg: $\alpha = 20^{\mathrm{h}}41^{\mathrm{m}}49^{\mathrm{s}}$, $\delta = +45°19'19''$.

По условию задачи нужно ответить на два вопроса: какая из звезд раньше проходит верхнюю кульминацию и какая из звезд дольше находится над горизонтом в пункте с широтой $\varphi = 45°$.

Найдем время прохождения через меридиан для обеих звезд. Поскольку нам дано прямое восхождение, то можно найти звездное время как: $S = t + \alpha$. Как было указано выше, часовой угол t для момента прохождения звездой плоскости небесного меридиана равен 0. Тогда звездное время для момента верхней кульминации произвольной звезды равно прямому восхождению этой же звезды: $S_{\text{в.к.}} = \alpha$. Таким образом, звездное время в момент верхней кульминации двух рассматриваемых звезд будет равно:

— α Boo: $S_{\text{в.к.}} = 14^{\mathrm{h}}16^{\mathrm{m}}11^{\mathrm{s}}$,

— α Cyg: $S_{\text{в.к.}} = 20^{\mathrm{h}}41^{\mathrm{m}}49^{\mathrm{s}}$.

Звездное время, как любое другое время, возрастает от 0 до 24^{h}, а значит момент звездного времени $14^{\mathrm{h}}16^{\mathrm{m}}11^{\mathrm{s}}$ наступает раньше момента $20^{\mathrm{h}}41^{\mathrm{m}}49^{\mathrm{s}}$. Следовательно, α Boo проходит верхнюю кульминацию раньше, чем α Cyg.

Для того, чтобы определить, какая из этих звезд дольше находится над горизонтом в пункте наблюдения с указанной широтой, можно воспользоваться формулами сферического треугольника и найти часовой угол точки захода для каждого из светил. Часовой угол точки захода — это время, прошедшее с момента верхней кульминации светила до момента захода. Удвоенное значение этого угла и будет продолжительностью нахождения над горизонтом в пункте с данной широтой. Однако поскольку в данной задаче высокая точность не важна, можно обойтись простым графическим способом. Рассмотрим рисунок 1.6, иллюстрирующий суточные параллели двух данных нам звезд над горизонтом пункта с широтой $\varphi = 45°$.

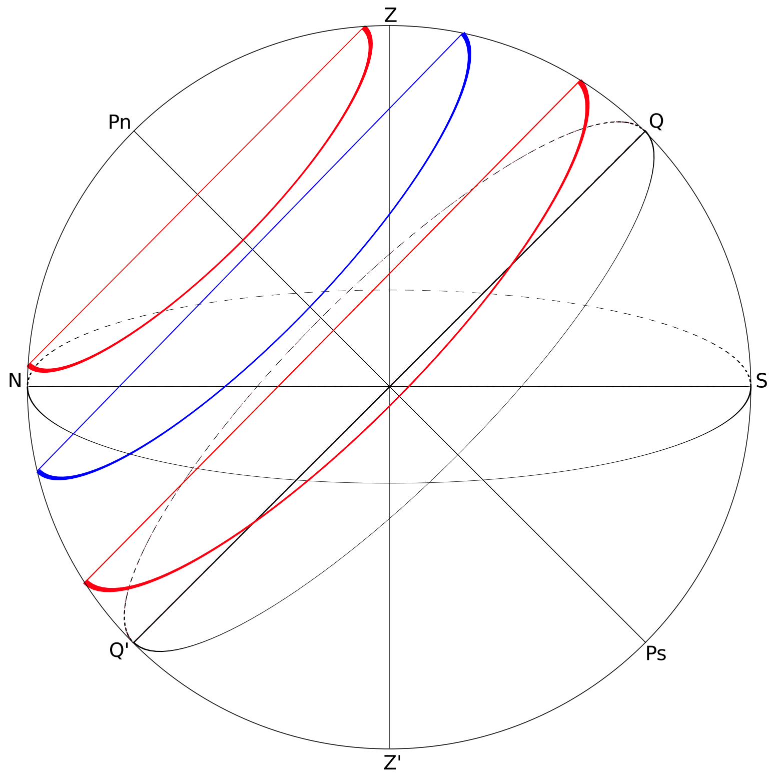


Рисунок 1.6

На рисунке показана плоскость горизонта и небесного экватора в пункте с широтой $\varphi = 45°$. Красным цветом показаны суточные параллели звезд со склонениями $\delta = +19°07'23''$ и $\delta = +45°19'19''$. Синим цветом показана суточная параллель светила со склонением между двумя заданными значениями. Из рисунка хорошо видно, что звезда со склонением $\delta = +45°19'19''$ проходит верхнюю кульминацию к северу от зенита ($\delta > \varphi$) и высота в момент нижней кульминации больше нуля, т.е. звезда α Cyg в пункте с широтой $\varphi = 45°$ находится над горизонтом в течении всех суток. В то же время α Boo опускается за горизонт, поскольку ее суточная параллель пересекает плоскость горизонта. Таким образом, α Cyg будет находиться над горизонтом пункта с широтой $\varphi = 45°$ дольше, чем α Boo. Склонение звезды, движущейся по суточной параллели, показанной синим цветом, будет больше склонения звезды α Boo. Из рисунка видно, что часовой угол точки захода этой звезды будет также больше часового угла точки захода α Boo.

4.2 При помощи сетки Вульфа описать картину суточного движения звезды α Boo (№ 345) в пункте с широтой $\varphi = 45°$:

— определить высоту и азимут звезды в момент звездного времени $\mathrm{S} = 18^{\mathrm{h}}20^{\mathrm{m}}$;

— определить высоту, часовые углы и звездное время в момент прохождения звездой первого вертикала;

— определить азимуты и часовые углы звезды в моменты восхода и захода и время ее пребывания над горизонтом на данной широте; проверить свои значения, сравнив их с точными, вычисленными при помощи сферического треугольника ($\mathrm{PZ}\sigma$).

Решение: Поскольку точность значений, получаемых при помощи сетки Вульфа, невелика, можно использовать приближенные координаты звезды: $\alpha = 14^{\mathrm{h}}16^{\mathrm{m}}$ и $\delta = +19°07'$.

На рисунке 1.7 и на рисунке 1.8 показаны два положения сетки Вульфа: горизонтальная система координат для пункта с широтой $\varphi = 45°$ и экваториальная система координат для этого же пункта наблюдения. Одно деление сетки соответствует 2°. Показаны положение полюса мира, плоскость горизонта, первого вертикала и небесного экватора.

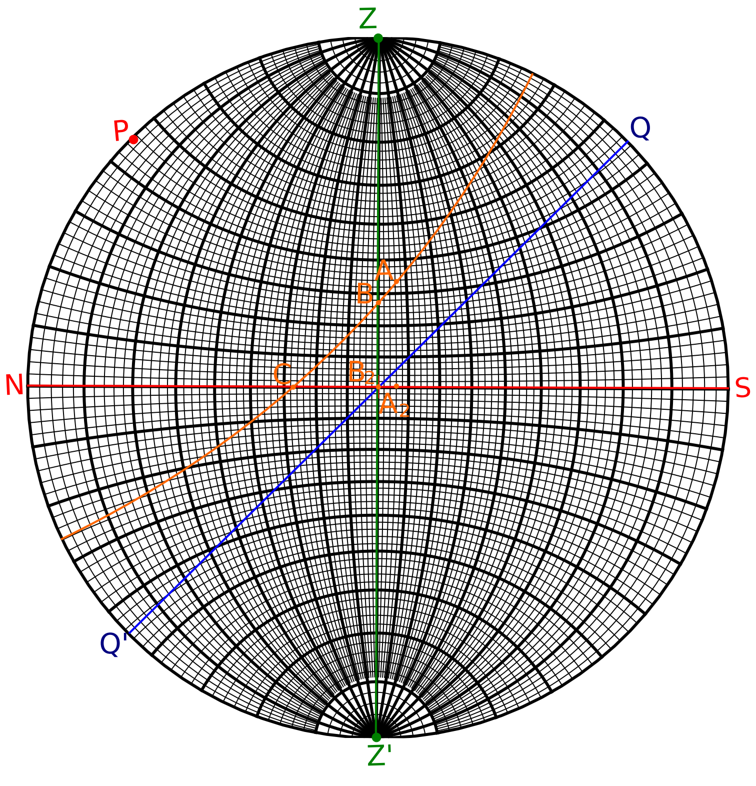


Рисунок 1.7 – Горизонтальная система координат в пункте наблюдения с широтой $\varphi = 45°$

Для решения задачи необходимо нанести на рисунки также и суточный путь звезды. Поскольку звезды движутся параллельно плоскости небесного экватора, то суточный путь звезды удобно рисовать, когда положение кальки относительно сетки Вульфа соответствует экваториальной системе координат (см. рисунок 1.8). В этом случае суточный путь звезды будет совпадать

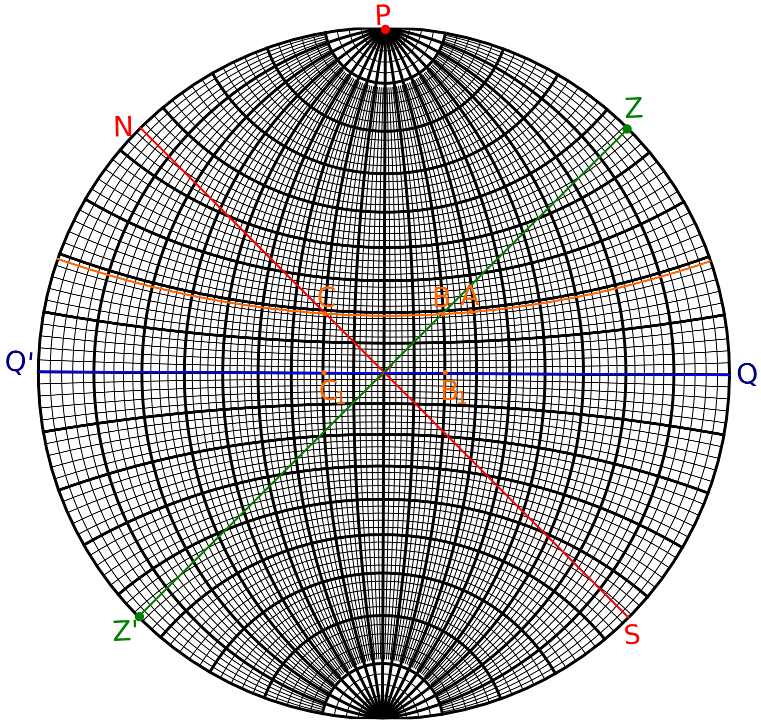


Рисунок 1.8 – Экваториальная система координат в пункте наблюдения с широтой $\varphi = 45^\circ$

с параллелью $+19^\circ$. На рисунке он показан оранжевой линией. При этом на рисунке 1.7 можно видеть, как будет происходить видимое суточное движение звезды в привычной наблюдателю горизонтальной системе координат.

Для ответа на первый вопрос задачи о положении звезды в момент звездного времени $\mathrm{S} = 18^\mathrm{h}20^\mathrm{m}$ нужно найти часовой угол звезды:

$$t = S - \alpha = 18^\mathrm{h}20^\mathrm{m} - 14^\mathrm{h}16^\mathrm{m} = 4^\mathrm{h}04^\mathrm{m} = 61^\circ$$

Значение часового угла нужно отложить в экваториальной системе координат от плоскости небесного меридиана вдоль плоскости экватора и отметить точкой на суточном пути звезды. На обоих рисунках это положение отмечено буквой A. Поскольку высота и азимут, которые требуется найти по условию задачи для этого положения звезды, это горизонтальные координаты, то кальку нужно повернуть относительно сетки против часовой стрелки. На рисунке 1.7 высота светила над горизонтом (отрезок $\mathrm{AA_2}$) равна примерно 32°, а азимут (отрезок $\mathrm{SA_2}$) равен примерно 84°.

Момент прохождения звездой первого вертикала удобно отметить в горизонтальной системе координат как точку пересечения суточного пути звезды и линии $\mathrm{ZZ'}$. На обоих рисунках эта точка отмечена символом B. Высота звезды в этот момент показана на рисунке 1.7 (отрезок $\mathrm{BB_2}$) и равна примерно 27°. Чтобы найти часовой угол, нужно путем поворота кальки относительно сетки вернуться в экваториальную систему координат. На рисунке 1.8 часовой угол для момента прохождения первого вертикала (отрезок $\mathrm{QB_1}$) равен примерно 70° или $4^\mathrm{h}40^\mathrm{m}$. Важно помнить, что звезда проходит первый вертикал дважды: в восточной полусфере (до верхней кульминации) и в западной полусфере (после верхней кульминации). Значение часового угла, найденное по сетке Вульфа, соответствует моменту прохождения первого вертикала после верхней кульминации. Часовой угол для момента прохождения первого вертикала до верхней кульминации равен $-4^{\mathrm{h}}40^{\mathrm{m}}$ или $19^{\mathrm{h}}20^{\mathrm{m}}$.

Моменты восхода и захода — это пересечение суточного пути звезды и плоскости горизонта сначала в восточной полусфере, а затем в западной, когда высота звезды над горизонтом равна нулю. Отметить эти моменты удобно, находясь в горизонтальной системе координат. На рисунках эти моменты показаны символом C. Азимут точки запада будет положительным, он показан на рисунке 1.7 (отрезок SC) и равен примерно 117°. Азимут точки восхода будет иметь противоположный знак. Часовой угол для момента захода показан на рисунке 1.8 (отрезок QC_1), приблизительно этот угол равен 110° или $7^{\mathrm{h}}20^{\mathrm{m}}$. Часовой угол для момента восхода будет иметь противоположный знак. Продолжительность нахождения звезды над горизонтом в пункте наблюдения с широтой $\varphi = 45°$ будет равна $2t$ или $14^{\mathrm{h}}40^{\mathrm{m}}$. Сравним значения, полученные при помощи сетки Вульфа, с точными результатами, используя формулы сферического треугольника. Часовой угол для моментов восхода и захода будет равен:

$$t = \pm\arccos(-\operatorname{tg}\delta\operatorname{tg}\varphi) = \pm\arccos(-\operatorname{tg}(19°07'23'')\operatorname{tg}(45°)) = \pm 110°17'15'' = \pm 7^{\mathrm{h}}21^{\mathrm{m}}09^{\mathrm{s}}$$

Азимут в момент восхода и захода равен:

$$A = \pm\arccos\left(-\frac{\sin\delta}{\cos\varphi}\right) = \pm\arccos\left(-\frac{\sin(19°07'23'')}{\cos(45°)}\right) = \pm 117°35'59''$$

Таким образом, при решении этой задачи при помощи сетки Вульфа, значение часового угла получено с ошибкой, не превышающей 2^{m}, а значение азимута — с ошибкой в $36'$!.

4.3 При помощи сетки Вульфа описать условия наблюдения Солнца в пункте с широтой $\varphi = 45°$ на 12 августа:

— определить приближенные координаты Солнца по таблице Астрономического ежегодника "Эфемерида Солнца";

— определить часовые углы Солнца для момента начала гражданских и астрономических сумерек, указать приблизительную продолжительность гражданских и астрономических сумерек, а также ночи.

Решение: Экваториальные координаты Солнца изменяются в течение года. На каждый день года значения экваториальных координат Солнца приводятся в таблице "Эфемерида Солнца" Астрономического ежегодника. В Приложении Б приведен фрагмент этой таблицы. Согласно данным ежегодника, 12 августа 2011 года экваториальные координаты Солнца были равны $\alpha = 9^{\mathrm{h}}25^{\mathrm{m}}35^{\mathrm{s}}$, $\delta = +15°08'06''$.

На рисунке 1.9 оранжевой линией показан суточный путь Солнца 12 августа в пункте с широтой $\varphi = 45°$ в экваториальной системе координат. Также показано расположение плоскости математического горизонта и небесного экватора. Поскольку сетка Вульфа дает лишь приблизительные результаты, не будем учитывать при решении конечный радиус диска Солнца.

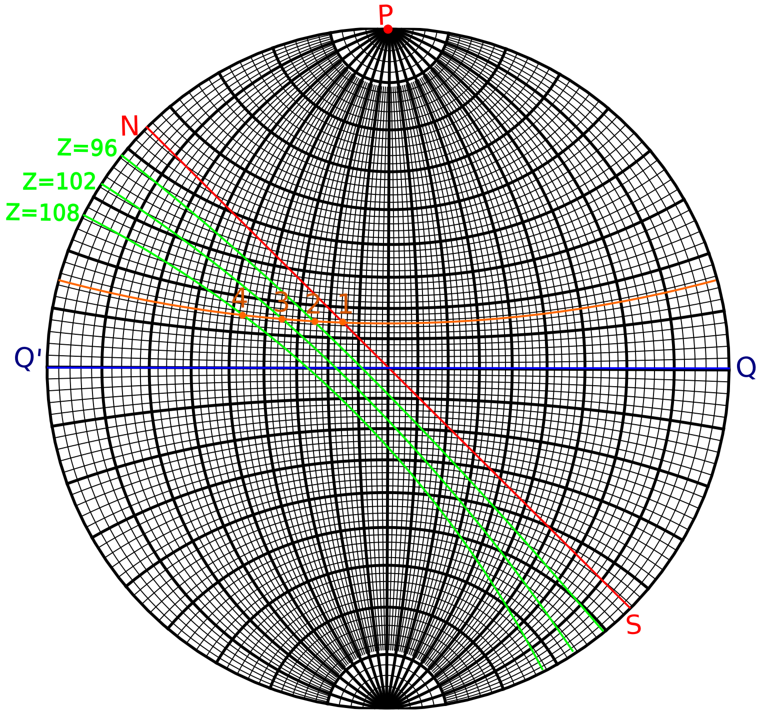


Рисунок 1.9 – Экваториальная система координат в пункте наблюдения с широтой $\varphi = 45°$. Показан суточный путь Солнца 12 августа 2011 года

По условию задачи необходимо найти часовые углы для момента начала гражданских и астрономических сумерек. Как указано выше, за начало гражданских сумерек принят момент захода Солнца за горизонт. На рисунке цифрой 1 показан момент погружения Солнца под горизонт. Часовой угол в этот момент приблизительно равен $106°$ или 7^h04^m. Гражданские сумерки длятся после захода Солнца до $z_\odot = 96°$ и перед восходом от $z_\odot = 96°$ до момента восхода Солнца. На сетке момент окончания гражданских сумерек отмечен цифрой 2, тогда их продолжительность после заката 32^m (как разность часовых углов конца и начала гражданских сумерек) и столько же перед восходом. Таким образом, 12 августа продолжительность гражданских сумерек составила приблизительно 1^h04^m.

Совершенно аналогично можно найти часовой угол начала астрономических сумерек и их общую продолжительность. На рисунке 1.9 момент начала астрономических сумерек отмечен цифрой 3, а конец — цифрой 4. Тогда по сетке же можно найти, что часовой угол начала равен приблизительно $125°$ или 8^h20^m. Продолжительность этих сумерек после захода Солнца составляет примерно 48^m, тогда общая их продолжительность будет 1^h36^m.

Ночь начинается после окончания астрономических сумерек. По сетке Вульфа часовой угол момента начала ночи равен приблизительно 137° или $9^{\mathrm{h}}08^{\mathrm{m}}$(отмечен на рисунке 1.9 цифрой 4). Продолжительность ночи найти легко: от момента начала ночи до нижней кульминации Солнца (середина ночи) проходит $12^{\mathrm{h}} - 9^{\mathrm{h}}08^{\mathrm{m}} = 2^{\mathrm{h}}52^{\mathrm{m}}$, значит после нижней кульминации до момента начала астрономических сумерек перед восходом пройдет столько же времени. Тогда общая продолжительность ночи равна $5^{\mathrm{h}}44^{\mathrm{m}}$.

4.4 Рассмотреть изменения условий наблюдения звезды α CMa (Сириус) в течение года и ответить на следующие вопросы:

— можно ли наблюдать верхнюю кульминацию данной звезды 21–22 марта вечером и почему;

— в какие дни года данная звезда и Солнце бывают над горизонтом одинаковое время;

— каким будет звездное время в полночь в эти даты; вычислить часовые углы звезды в полночь в эти даты; в соответствие со значениями звездного времени в полночь для каждой из дат указать на рисунке небесной сферы положение Солнца, звезды и точки весеннего равноденствия;

— описать изменение условий видимости Сириуса в течение года.

Решение: В первую очередь необходимо выписать из ежегодника приближенные экваториальные координаты выбранной звезды. В 2011 году координаты Сириуса равны: $\alpha = 6^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}39^{\mathrm{s}}$, $\delta = -16^\circ 43' 57''$.

Для ответа на первый вопрос нужно вспомнить, что на 21–22 марта приходится день весеннего равноденствия, когда прямое восхождение Солнца равно нулю. Тогда в полдень, в момент верхней кульминации Солнца, звездное время $S = 0$ (и прямое восхождение, и часовой угол Солнца равны нулю). В полночь часовой угол Солнца $t = 12^{\mathrm{h}}$, следовательно звездное время в полночь тоже равно $S = 12^{\mathrm{h}}$. Найдем теперь часовой угол Сириуса в полночь: $t = S - \alpha = 12^{\mathrm{h}} - 6^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}39^{\mathrm{s}} = 5^{\mathrm{h}}14^{\mathrm{m}}21^{\mathrm{s}}$. Отсюда следует, что верхняя кульминация Сириуса прошла больше 5 часов назад. Более того, склонение Солнца в день весеннего равноденствия имеет значение, близкое к нулю, т.е. суточный путь Солнца совпадает с плоскостью небесного экватора. Следовательно, часовой угол захода Солнца практически равен 6^{h} (и звездное время в этот момент), поэтому в момент захода Солнца звезда находилась в юго-восточной части неба, а вечером (в течение сумерек) прошла верхнюю кульминацию и переместилась в юго-западную часть неба.

Для ответа на второй вопрос важно понять, что Солнце и звезда проводят одинаковое время над горизонтом места наблюдения в те дни, когда они движутся по одинаковым суточным параллелям. В эти дни склонение Солнца примерно равно склонению звезды, которое остается постоянным в течение года. Используя таблицу "Солнце" нужно выбрать по склонению звезды те дни года, когда склонение Солнца примерно совпадает со склонением звезды. Поскольку склонение Солнца изменяется в течение года от $-23°$ до $+23°$ и дважды за год примерно равно $0°$ (весеннее и осеннее равноденствия), то в году будет два дня, когда суточная параллель Солнца совпадает с суточной параллелью звезды. В нашем конкретном случае склонение Сириуса равно $\delta = -16°43'57''$, поэтому, согласно ежегоднику за 2011 год, склонение Солнца примерно совпадает со склонением звезды 3 февраля ($\delta_\odot = -16°41'08''$, $\alpha_\odot = 21^{\mathrm{h}}05^{\mathrm{m}}02^{\mathrm{s}}$) и 9 ноября ($\delta_\odot = -16°41'28''$, $\alpha_\odot = 14^{\mathrm{h}}05^{\mathrm{m}}03^{\mathrm{s}}$). В эти даты Сириус и Солнце проводят над горизонтом любого пункта наблюдения одинаковое время. Мы выписали из ежегодника также и прямое восхождение Солнца в эти даты, поскольку оно понадобится для ответа на следующий вопрос.

Звездное время в полночь $S = 12^{\mathrm{h}} + \alpha_\odot$, т. к. часовой угол Солнца равен в полночь 12^{h}, следовательно:

$$\text{3 февраля:} \qquad S = 12^{\mathrm{h}} + 21^{\mathrm{h}}05^{\mathrm{m}}02^{\mathrm{s}} = 9^{\mathrm{h}}05^{\mathrm{m}}02^{\mathrm{s}}$$

$$\text{9 ноября:} \qquad S = 12^{\mathrm{h}} + 14^{\mathrm{h}}05^{\mathrm{m}}03^{\mathrm{s}} = 2^{\mathrm{h}}05^{\mathrm{m}}03^{\mathrm{s}}$$

Тогда часовой угол звезды в полночь:

$$\text{3 февраля:} \qquad t = 9^{\mathrm{h}}05^{\mathrm{m}}02^{\mathrm{s}} - 6^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}39^{\mathrm{s}} = 2^{\mathrm{h}}19^{\mathrm{m}}23^{\mathrm{s}}$$

$$\text{9 ноября:} \qquad t = 2^{\mathrm{h}}05^{\mathrm{m}}03^{\mathrm{s}} - 6^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}39^{\mathrm{s}} = 19^{\mathrm{h}}19^{\mathrm{m}}24^{\mathrm{s}}$$

На рисунке 1.10 и на рисунке 1.11 показаны положения точки весеннего равноденствия и звезды в полночь 3 февраля и 9 ноября соответственно. Также показаны плоскости горизонта, небесного экватора, отвесная линия и направление на полюс мира. На рисунке 1.10 также показан часовой угол звезды, а на рисунке 1.11 часовой угол точки весеннего равноденствия (звездное время).

Внимательный анализ двух рисунков позволяет увидеть, как изменяются условия наблюдения одной и той же звезды с февраля по ноябрь. В феврале в полночь Сириус виден в юго-западной части неба, а его верхняя кульминация происходит примерно за 2 часа до полуночи и ее можно наблюдать на ночном небе или в период астрономических сумерек. С течением времени часовой угол звезды в полночь будет возрастать, т.к. будет возрастать прямое восхождение Солнца. Затем обязательно наступит день, когда звезда и Солнце будут проходить нижнюю кульминацию практически одновременно. Не трудно понять, что в этот день их прямые восхождения практически равны. Согласно Ежегоднику 2011 года такой датой для Сириуса является 3 июля. В общем же ясно, что в летний период Сириус наблюдать нельзя. После этой даты часовой угол звезды в полночь продолжает возрастать и постепенно звезда появляется сначала на утреннем небе, практически перед восходом Солнца, затем за несколько часов до восхода и так далее до тех пор пока

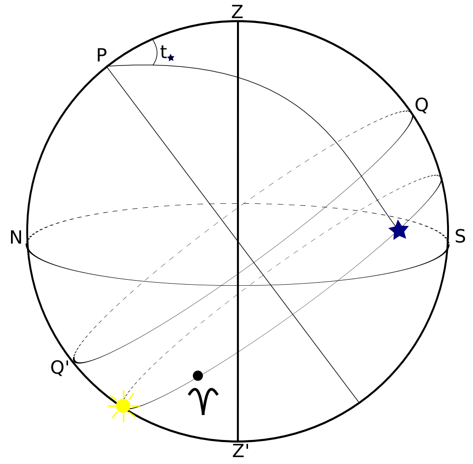


Рисунок 1.10 – Положение точки весеннего равноденствия и звезды в полночь 3 февраля. Показан часовой угол звезды

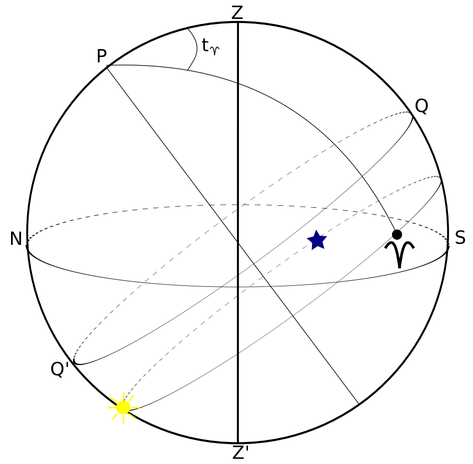


Рисунок 1.11 – Положение точки весеннего равноденствия и звезды в полночь 9 ноября. Показан часовой угол точки весеннего равноденствия

не наступает день, когда верхняя кульминация звезды наступает в полночь. В этот день, как не трудно понять, прямые восхождения звезды и Солнца отличаются примерно на 12^h. В 2011 года таким днем для Сириуса было 1 января. Таким образом, наилучшие условия для наблюдения Сириуса — зимние месяцы: в декабре звезда в полночь наблюдается до верхней кульминации, т.е. находится в юго-восточной части неба, а в феврале, как у же было сказано выше, в юго-западной части после ее верхней кульминации.

В чем причина изменения условий видимости того или иного объекта на небе? Из рисунков же можно понять, что эта причина — изменение прямого восхождения восхождения Солнца из-за годичного движения Земли по своей орбите вокруг Солнца. За счет этого происходит не только изменение условий наблюдения небесных объектов, но и непрерывный сдвиг шкалы звездного времени относительно солнечного. Как было вычислено раньше, звездное время в полночь по солнечному времени изменяется достаточно существенно с февраля по ноябрь.

5 Вопросы для самоконтроля

а) Что такое моменты нижней и верхней кульминации светила? Какова высота светила в эти моменты? Какую плоскость проходят светила в моменты кульминаций?

б) Нарисуйте плоскость небесного меридиана, укажите для двух положений точки верхней кульминации (к югу и к северу от зенита) значение высоты светила. Чему равна высота в точке нижней кульминации для этих же точек?

в) Какие светила являются незаходящими? Как проходит граничная параллель таких светил? Чему равна высота в точке нижней кульминации и δ, суточные пути которых совпадают с граничной параллелью?

г) Какие светила называются невосходящими? Где проходит из граничная параллель?

д) Какие светила называются восходящими?

е) Показать на рисунке небесной сферы точки восхода и захода для светила с $\delta > 0$ северного неба. Чему равно зенитное расстояние? Будет ли азимут этих точек больше $90°$?

ж) Что можно узнать по известному часовому углу точек восхода и захода произвольного светила?

и) Какие факторы необходимо учитывать при вычислении часовых углов захода и восхода Солнца?

к) Что такое сумерки, чем отличаются гражданские сумерки от астрономических? Как при этом изменяется зенитное расстояние Солнца?

л) Звезды с какими склонениями являются незаходящими, если наблюдатель находится на северном полюсе Земли?

м) Какие звезды будут восходящими и заходящими, если наблюдатель находится на земном экваторе?

н) Что такое плоскость I вертикала? Чему равны азимуты светила при прохождении I вертикала?

п) На какой широте светила не проходят плоскость первого вертикала?

р) Чему равно звездное время при прохождении первого вертикала над точкой востока и запада для светила с известным прямым восхождением?

6 Дополнительные задачи

а) На каком наименьшем зенитном расстоянии и наибольшей высоте бывают в Евпатории ($\varphi = +45°12'$) и Мурманске ($\varphi = +68°59'$) звезды Алиот (ε Большой Медведицы) и Антарес (α Скорпиона), склонение которых соответственно равно $+56°14'$ и $-26°19'$? Указать азимут и часовой угол каждой звезды в эти моменты.

б) В некотором месте наблюдения звезда со склонением $+32°19'$ поднимается над точкой юга на высоту в $63°42'$. Найти зенитное расстояние и высоту этой звезды в том же месте при азимуте, равном $180°$.

в) Какое склонение должны иметь звезды, чтобы в верхней кульминации проходить в зените, а в нижней кульминации — в надире, точке севера и точке юга места наблюдения? Чему равна географическая широта этих мест?

г) Чему равна разность зенитных расстояний двух звезд при одноименных кульминациях в одном пункте наблюдения?

д) Найти разность зенитных расстояний звезды при ее разноименных кульминациях в одном пункте наблюдения.

е) Найти разность зенитных расстояний при одноименных кульминациях одной и той же звезды на различных географических параллелях.

з) В Москве ($\varphi = +55°45'$) звезда η Большой Медведицы в нижней кульминации находится на высоте $+15°19'$ Круглосуточно ли пребывает она над горизонтом Нижнего Новгорода ($\varphi = +56°20'$) и Ашхабада ($\varphi = +37°45'$)?

и) На каких географических параллелях звезды Вега (α Лиры) и β Скорпиона становятся незаходящими? Склонение этих звезд соответственно равно $+38°44'$ и $-19°40'$.

Тема 2

Солнечное время: различные виды, взаимосвязь, использование в науке и повседневной жизни

1 Истинное солнечное время

Измерение истинного солнечного времени основано на видимом суточном движении Солнца; при этом за точку, определяющую своим движением течение истинного солнечного времени, принимается центр диска Солнца. Моменты верхней и нижней кульминации центра диска Солнца называются *истинным полуднем* и *истинной полночью* соответственно. Промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями центра диска Солнца называется *истинными солнечными сутками*. За начало истинных солнечных суток на данном меридиане принимается момент нижней кульминации центра диска Солнца, то есть истинная полночь. Время, протекшее от момента истинной полуночи до любого другого момента суток, выраженное в долях истинных солнечных суток, называется *истинным солнечным временем* и обозначается $T_\odot$. Истинное солнечное время на данном меридиане в любой момент равно часовому углу истинного Солнца $t_\odot$, увеличенному на 12^{h}:

$$T_\odot = t_\odot + 12^{\mathrm{h}}$$

Истинное солнечное время непригодно для практических целей. Причиной этому является неравномерность видимого движения Солнца по эклиптике, поскольку Земля неравномерно движется по своей орбите вокруг Солнца. Из-за неравномерности часовые углы истинного солнца изменяются непропорционально времени.

2 Среднее солнечное время

Для получения равномерного солнечного времени введено так называемое среднее экваториальное Солнце. Это воображаемая математическая точка, равномерно движущаяся по экватору с периодом, равным тропическому году в ту же сторону, что и истинное Солнце по эклиптике. Так как в течении тропического года прямое восхождение среднего Солнца изменяется на 24^{h}, то за одни средние солнечные сутки его изменение составит $\Delta\alpha_m = 3^{\mathrm{m}}56^{\mathrm{s}}, 555$, а за один средний час $\Delta\alpha_m = 9^{\mathrm{s}}, 856$. Момент верхней кульминации среднего Солнца на данном меридиане называют *средним полуднем*, а момент нижней кульминации — *средней полуночью*. Промежуток времени между двумя последовательными нижними кульминациями среднего Солнца на данном меридиане называется *средними солнечными сутками*. За начало средних солнечных суток на данном меридиане принимают момент нижней кульминации среднего Солнца (т.е. среднюю полночь).

Время, протекшее от момента нижней кульминации среднего экваториального Солнца до любого другого момента, выраженное в долях средних солнечных суток, называется *средним солнечным временем*. Среднее солнечное время на данном меридиане в любой момент равно:

$$T_m = t_m + 12^{\mathrm{h}},$$

где t_m — часовой угол среднего Солнца.

Среднее солнечное время является сейчас основным временем как в астрономии, так и в повседневной жизни. Его ход воспроизводится с помощью высокоточных эталонов времени.

3 Уравнение времени

Моменты истинного и среднего полудня как правило не совпадают, так как в эти моменты различны прямые восхождения истинного и среднего Солнца. Пусть S — момент звездного времени, тогда можно записать: $S = t_m + \alpha_m$, и, с другой стороны, этот же момент звездного времени: $S = t_\odot + \alpha_\odot$. Следовательно,

$$t_\odot - t_m = \alpha_m - \alpha_\odot$$

Разность часовых углов среднего и истинного Солнца называют *уравнением времени* и обозначают η. Поскольку среднее солнечное время равно часовому углу среднего Солнца, увеличенному на 12^{h}, а истинное солнечное время — часовому углу истинного Солнца, увеличенного на 12^{h}, то

$$t_\odot - t_m = T_\odot - T_m = \eta$$

Таким образом, уравнение времени позволяет перейти от среднего солнечного времени к истинному и наоборот. Значение уравнения времени на каждый день года приводится в Астрономическом ежегоднике в таблице "Солнце" на момент земного динамического времени 0^{h}. Уравнение времени изменяется непрерывно, поскольку изменяются непрерывно и с разными скоростями прямые восхождения и часовые углы истинного и среднего Солнца, кроме того, уравнение времени может быть как положительным, так и отрицательным.

4 Местное время и долгота

В астрономии местным временем называют время данного географического меридиана. Местное время может быть как звездным, так и солнечным — средним или истинным. Разность местных времен на двух меридианах в один и тот же физический момент равна разности долгот этих меридианов:

$$m_2 - m_1 = \lambda_2 - \lambda_1$$

Как было указано раньше, каждому меридиану в фиксированный физический момент соответствует свое местное время. Однако таких времен на земном шаре бесконечное множество. Поэтому на Земле введено определенное дискретное время для различных зон на Земле. Таким временем является *поясное время* T_N. Для его введения земной шар был разделен на часовые пояса, в которых используется лишь среднее время основного или осевого меридиана данного часового пояса с номером N. Нулевой часовой пояс расположен на $7°, 5$ к востоку и западу от начального меридиана. Среднее солнечное время нулевого гринвичского меридиана называют всемирным или мировым (UT). Тогда местное время любого другого меридиана будет:

$$m_\lambda = UT + \lambda^h$$

Значение $UT = 0^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{m}}$ соответствует моменту нижней кульминации среднего Солнца на начальном меридиане. Долготы основных меридианов кратны 15°: $\lambda_N = 15° * N$. Отсюда следует:

$$T_N = UT + N = m_\lambda - \lambda^h + N$$

Важно учитывать знак при долготе и номере часового пояса—для восточных относительно Гринвича меридианов долготы и часовые пояса положительны, для западных—номер часового пояса и значение долготы считаются отрицательными.

Обычно в пределах часового пояса, поскольку осевой меридиан расположен в его середине, разность между местным временем (временем на данном меридиане) и поясным временем, т.е. среднем временем осевого меридиана, не превышает получаса. Но поскольку часто границы того или иного часового пояса проходят с учетом границ государств, это не всегда соблюдается. По этой же причине возможны ошибки в определении номера часового пояса по значению долготы конкретного меридиана.

Еще один вид поясного времени-декретное, введенное в странах с северными широтами для смещения трудового дня на более светлое время суток. Декретное время определяется как:

$$T_{\text{Д}} = T_N + 1^{\mathrm{h}}$$

Кроме того, до осени 2011 года в России использовалось еще и летнее декретное время, отличающееся от поясного на два часа.

$$T_{\text{ДЛ}} = T_N + 2^{\mathrm{h}}$$

Однако осенью 2011 года на территории России переход на декретное время был отменен, поэтому теперь разница показаний часов на территории России отличается от поясного на 2^{h}.

5 Эфемеридное время как аргумент для определения положения объектов Солнечной системы. Земное время

Исторически в астрономии сложились следующие системы счета времени:

— системы звездного времени и солнечного (всемирного) времени, основанные на явлении суточного (осевого) вращения Земли;

— система эфемеридного времени, определяемая независимой переменной дифференциальных уравнений небесной механики, на которых основаны *чисто* гравитационные теории гелиоцентрического движения тел Солнечной системы в рамках ньютоновой динамики; мера эфемеридного времени определена периодом движения Земли по гелиоцентрической орбите;

— системы барицентрического и земного динамического времени, которые определены релятивистскими теориями барицентрического (отнесенного к центру масс системы) движения тел Солнечной системы;

— система атомного времени, основанная на процессе генерации электромагнитных колебаний при квантовых переходах в атомах и молекулах; мера атомного времени связана с частотой этих колебаний в определенных атомах и молекулах при переходе между определенными квантовомеханическими (энергетическими) уровнями.

Системы звездного и солнечного времени рассмотрены выше.

5.1 Эфемеридное время ET

Системы звездного и всемирного времени, связанные с явлением суточного вращения небесной сферы, точно отражающим неравномерное вращение Земли вокруг ее оси, определяют неравномерные шкалы времени: и звездная секунда, и средняя секунда, равные $1/86400$ части соответствующих суток, неодинаковы во времени и непригодны как основные единицы времени. Неравномерности в скорости суточного вращения Земли вызваны, в основном, следующими явлениями:

а) Непредсказуемым изменением положения земной оси вращения в теле Земли, называемым свободной, или Эйлеровой нутацией и проявляющимся в перемещении земных полюсов.

б) Сезонными вариациями угловой скорости суточного вращения Земли, обусловленными метеорологическими причинами.

в) Вековым замедлением вращения Земли, вызванным рассеянием энергии земного вращения из-за приливного трения.

г) Флуктуациями в угловой скорости Земли, которые, возможно, связаны с солнечной активностью.

Поэтому возникла необходимость ввести новую шкалу времени, определяемую ньютоновой динамикой гелиоцентрических орбитальных движений тел Солнечной системы; она представляет шкалу независимой переменной, фигурирующей в дифференциальных уравнениях, лежащих в основе гравитационных теорий движения этих небесных тел.

Из-за неравномерности суточного вращения Земли наблюдаемые положения небесных тел являются функциями неравномерного всемирного времени, тогда как вычисления на основе гравитационных теорий движения в рамках ньютоновой динамики дают теоретические положения в функции равномерного эфемеридного времени. Поэтому в любой момент времени наблюдения, фиксируемый в системе всемирного времени UT, наблюденные координаты небесного объекта будут отличаться от теоретических координат и тем больше, чем быстрее суточное движение этого объекта, в соответствии с изменением координат за промежуток времени ΔT между моментом наблюдения в системе UT и моментом эфемериды, дающей теоретические координаты, в системе эфемеридного времени. Величина ΔT называется поправкой за эфемеридное время и всегда имеет смысл:

$$\Delta T = ET - UT.$$

Эта поправка на практике определяется по наблюдениям Луны.

На практике из обработки астрономических наблюдений звезд непосредственно получается всемирное время, обозначаемое UT0. Наблюдения обсерваторий определяют также движение северного полюса Земли, т.е. величину и направление смещения мгновенного полюса относительно принятого среднего положения полюса. Введение соответствующей поправки в наблюденное всемирное время UT0 и дает систему всемирного времени UT (или UT1), которая составляет основу измерения времени в повседневной жизни.

5.2 Атомное время AT

Прогресс, достигнутый в области квантовой радиофизики, радиоспектроскопии и квантовой электроники, обусловил возможность создания новых эталонов частоты, основанных на естественном, повторяющемся с большой степенью точности колебательном процессе, который происходит при резонансных переходах атомов и молекул из одного энергетического состояния в другое при определенных условиях. Сочетание высокостабильных атомных и молекулярных эталонов частоты с кварцевыми часами высокой точности дает атомные часы, определяющие шкалу атомного времени AT. Система атомного времени характеризуется весьма большой степенью равномерности на продолжительных промежутках времени и совершенно не зависит ни от суточного вращения Земли, ни от теории движения тел Солнечной системы. Таким образом, каждая шкала системы атомного времени определяется конкретным атомным (молекулярным) эталоном частоты, стабилизирующим частоту конкретных кварцевых часов, т.е. конкретным комплектом атомных часов.

За единицу измерения времени в системе AT принимают атомную секунду, определяемую как промежуток времени, в течении которого совершается 9192631770 колебаний, соответствующих частоте излучения, поглощаемого атомом цезия Cs^{133} при резонансном переходе между энергетическими уровнями сверхтонкой структуры определенного основного состояния с определенными квантовыми магнитными числами при отсутствии возмущений от внешних магнитных полей.

Различные шкалы атомного времени отличаются своими нуль-пунктами; разности нуль-пунктов не сохраняют постоянных значений из-за случайных и систематических погрешностей соответствующих эталонов частоты. Для повышения надежности измерения и хранения времени формируются средние, или интегрированные шкалы времени. Одна из таких шкал — Международное атомное время TAI — устанавливается Международным бюро времени на основе показаний атомных часов, размещенных по всему миру. В 2001 году в формировании шкалы TAI участвовали примерно 200 часов.

5.3 Всемирное координированное время UTC

В 1964 году была введена система всемирного согласованного времени (координированного времени) UTC, связанная не с суточным вращением Земли, а с системой атомного времени TAI и достаточно близкая к системе всемирного времени UT. Разность показаний часов в системе UTC и одновременных показаний часов в системе TAI выражается только целым числом секунд. Значение разности TAI-UTC с 1 января 2009 года установлено равным $+34^{\mathrm{s}}$. Разности шкал $\Delta UT1$ всемирного времени UT1 и времени UTC в пределах $0.^{\mathrm{s}}1$ до 1972 года поддерживалась ступенчатыми сдвигами радиочастоты сигналов времени. После 1972 года частотные сдвиги были отменены и введено изменение показаний часов, работающих в системе UTC, на $\pm 1^{\mathrm{s}}$ с тем, чтобы разности UT1-UTC не превосходили $0.^{\mathrm{s}}90$.

5.4 Динамические системы времени

Любая динамическая шкала времени определяется как аргумент динамических теорий движения Солнца, Луны и планет Солнечной системы. С 1991 года введено в использование три основные динамические шкалы времени:

а) TCB — барицентрическое координированное время — время, которое показывают часы, находящиеся в барицентре (центре масс) Солнечной системы.

б) TCG — геоцентрическое координатное время — время, которое показывают часы, находящиеся в геоцентре.

в) TT — земное время — опорное время, вырабатываемое часами на Земле; его единица измерения совпадает с атомной секундой на геоиде с определенным нормальным геопотенциалом.

Из-за неудовлетворительности шкалы эфемеридного времени эта система была заменена в 1979 году шкалой земного динамического времени TDT. С 1991 года шкала земного времени TT рассматривается как эквивалент шкалы TDT. Именно это время используется при редукции наблюдений, проводимых с поверхности Земли. Эта система, тем не менее, сохраняет непрерывную преемственность со шкалой эфемеридного времени ET. Земное время сейчас является основным аргументом *видимых геоцентрических эфемерид.*

5.5 Связь различных шкал времени

а) Всемирное координированное время UTC отличается от международного атомного времени TAI на целое число секунд δT. С 1 января 2009 года эта разница составляет $\delta T = +34^{\mathrm{s}}$.

б) Всемирное время UT1 (или UT), определяемое вращением Земли вокруг ее средней оси, отличается от UTC на величину $\Delta UT1$, т.е. $UT1 = UTC + \Delta UT1$. Эта разница никогда не превосходит $0.^{\mathrm{s}}9$.

в) Земное динамическое время TDT или тождественное ему земное время TT отличается от международного атомного времени TAI на величину $32.^{\mathrm{s}}$ *точно*: $TT = TAI + 32.^{\mathrm{s}}184$

Тогда земное время:

$$TDT \equiv TT = UTC + (\delta T + 32.^{\mathrm{s}}184) = UT1 + (\delta T + 32.^{\mathrm{s}}184 - \Delta UT1)$$

Здесь $\delta T + 32.^{\mathrm{s}}184 - \Delta UT1$ обозначают как $\Delta T(A)$. Тогда

$$TDT \equiv TT = UT1 + \Delta T(A)$$

Значение этой поправки приводится в Астрономическом ежегоднике. В 2011 году она была равна 67^{s}. Эта поправка представляет собой приближенное значение ΔT разности между старой системой эфемеридного времени ET и всемирного времени UT.

6 Типовые задачи

6.1 Найти местное среднее, поясное, всемирное и декретное летнее время в пунктах с долготами $\lambda_1 = 4^{\mathrm{h}}50^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}}$ и $\lambda_2 = 5^{\mathrm{h}}15^{\mathrm{m}}18^{\mathrm{s}}$ в момент среднего полудня на поясном меридиане и на меридианах с долготами λ_1 и λ_2.

Решение: Первым делом нужно определить, какому часовому поясу принадлежат оба меридиана. Долготы обоих пунктов близки к долготе $\lambda_N = 5^{\mathrm{h}}$ и не отличаются от нее более чем на 30^{m}, следовательно оба меридиана лежат в 5 часовом поясе[1] (т.е. $N = 5$). Меридиан с долготой λ_1

[1] По условию задачи не даны названия пунктов, имеющих такие долготы, поэтому будем условно считать, что границы часового пояса совпадают со значениями $4^{\mathrm{h}}30^{\mathrm{m}}$ и $5^{\mathrm{h}}30^{\mathrm{m}}$

расположен западнее осевого меридиана 5 часового пояса, а меридиан с долготой λ_2 расположен восточнее осевого меридиана своей зоны.

По условию задачи на всех трех меридианах последовательно наступает средний полдень. Сначала полдень наступит на меридиане с долготой $\lambda_2 = 5^{\mathrm{h}}15^{\mathrm{m}}18^{\mathrm{s}}$. Это значит, что местного среднего солнечного времени на данном меридиане будет ровно $12^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{m}}$. Нужно найти местное время на двух других меридианах. Для этого нужно вспомнить, что разность времен равна разности долгот. Запишем это соотношение сначала для меридиана с долготой λ_2 и осевого меридиана:

$$\lambda_2 - \lambda_N = m_{\lambda_2} - T_N \Rightarrow 5^{\mathrm{h}}15^{\mathrm{m}}18^{\mathrm{s}} - 5^{\mathrm{h}} = 12^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{s}} - T_N \Rightarrow T_N = 12^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{m}} - 15^{\mathrm{m}}18^{\mathrm{s}} = 11^{\mathrm{h}}44^{\mathrm{m}}42^{\mathrm{s}}$$

Совершенно аналогично можно записать это соотношение для меридианов с долготами λ_1 и λ_2:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = m_{\lambda_2} - m_{\lambda_1} \Rightarrow 5^{\mathrm{h}}15^{\mathrm{m}}18^{\mathrm{s}} - 4^{\mathrm{h}}50^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}} = 12^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{s}} - m_{\lambda_1} \Rightarrow m_{\lambda_1} = 12^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{m}} - 24^{\mathrm{m}}46^{\mathrm{s}} = 11^{\mathrm{h}}35^{\mathrm{m}}14^{\mathrm{s}}$$

Таким образом, когда на меридиане с долготой λ_2 средний полдень, на двух других меридианах полдень еще не наступил и местного времени там будет меньше. Чтобы найти всемирное время, нужно вспомнить, что поясное время отличается от всемирного времени за величину номера часового пояса. В нашем случае меридианы лежат восточнее гринвичского (их долготы положительны), поэтому:

$$UT = T_N - N = 11^{\mathrm{h}}44^{\mathrm{m}}42^{\mathrm{s}} - 5^{\mathrm{h}} = 6^{\mathrm{h}}44^{\mathrm{m}}42^{\mathrm{s}}$$

Декретное летнее время, как известно, отличается от поясного ровно на 2^{h}, поэтому для всех трех меридианов декретного летнего времени будет:

$$T_{\text{ДЛ}} = T_N + 2^{\mathrm{h}} = 13^{\mathrm{h}}44^{\mathrm{m}}42^{\mathrm{s}}$$

Затем средний полдень наступит на осевом меридиане. В момент среднего полудня на осевом меридиане на меридиане с долготой λ_2 времени будет:

$$\lambda_2 - \lambda_N = m_{\lambda_2} - T_N \Rightarrow 5^{\mathrm{h}}15^{\mathrm{m}}18^{\mathrm{s}} - 5^{\mathrm{h}} = m_{\lambda_2} - 12^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{s}} \Rightarrow m_{\lambda_2} = 12^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{m}} + 15^{\mathrm{m}}18^{\mathrm{s}} = 12^{\mathrm{h}}15^{\mathrm{m}}18^{\mathrm{s}},$$

а на меридиане с долготой λ_1:

$$\lambda_1 - \lambda_N = m_{\lambda_1} - T_N \Rightarrow 4^{\mathrm{h}}50^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}} - 5^{\mathrm{h}} = m_{\lambda_1} - 12^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{s}} \Rightarrow m_{\lambda_1} = 12^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{m}} - 9^{\mathrm{m}}28^{\mathrm{s}} = 11^{\mathrm{h}}50^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}}$$

Всемирного времени в момент среднего полудня на осевом меридиане будет:

$$UT = 12^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{m}} - 5^{\mathrm{h}} = 7^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{m}},$$

а декретного летнего в пятой часовой зоне:

$$T_{\text{ДЛ}} = 12^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{m}} + 2^{\mathrm{h}} = 14^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{m}}$$

В последнюю очередь средний полдень наступит на меридиане с долготой λ_1, т.е. местного среднего солнечного времени там будет $m_{\lambda_1} = 12^{\text{h}}00^{\text{m}}$. В этот же момент на меридиане с долготой λ_2 местное время равно:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = m_{\lambda_2} - m_{\lambda_1} \Rightarrow 5^{\text{h}}15^{\text{m}}18^{\text{s}} - 4^{\text{h}}50^{\text{m}}32^{\text{s}} = m_{\lambda_2} - 12^{\text{h}}00^{\text{s}} \Rightarrow m_{\lambda_2} = 12^{\text{h}}00^{\text{m}} + 24^{\text{m}}46^{\text{s}} = 12^{\text{h}}24^{\text{m}}46^{\text{s}},$$

а поясное:

$$\lambda_1 - \lambda_N = m_{\lambda_1} - T_N \Rightarrow 4^{\text{h}}50^{\text{m}}32^{\text{s}} - 5^{\text{h}} = 12^{\text{h}}00^{\text{s}} - T_N \Rightarrow T_N = 12^{\text{h}}00^{\text{m}} + 9^{\text{m}}28^{\text{s}} = 12^{\text{h}}09^{\text{m}}28^{\text{s}}$$

Тогда всемирное и декретное летнее соответственно:

$$UT = T_N - 5^{\text{h}} = 7^{\text{h}}09^{\text{m}}28^{\text{s}}$$

$$T_{\text{ДЛ}} = T_N + 2^{\text{h}} = 14^{\text{h}}09^{\text{m}}28^{\text{s}}$$

6.2 Определить точное среднее солнечное время ($\pm 0.1^{\text{s}}$), а также поясное время на 28 июля 2011 в момент истинного полудня в пункте с долготой $\lambda_1 = 4^{\text{h}}02^{\text{m}}32^{\text{s}}$ (Екатеринбург, Россия). Сравнить момент истинного полудня по среднему и поясному времени для пункта с долготой $\lambda_2 = -4^{\text{h}}02^{\text{m}}32^{\text{s}}$ и пункта с λ_1 на эту же дату.

Решение: Поскольку по условию задачи нужно определить среднее солнечное время в момент истинного полудня, то, по существу, задача сводится к использованию уравнения времени. Кроме того, поскольку даны долготы двух пунктов, то необходимо определить среднее местное время. В Астрономическом ежегоднике на каждый день года в таблице "Солнце" дается значение уравнения времени в виде: $T_\odot - T_m + 12^{\text{h}}$ на момент земного динамического времени 0^{h}. Кроме того, в ежегоднике дается часовое изменение уравнения времени (столбец "Часовое изменение") $\Delta\eta$, которое отражает изменение разности прямых восхождений истинного и среднего Солнца за 1 час времени, и значение *среднего солнечного времени m_{λ_0} на момент истинного полудня на гринвичском нулевом меридиане* (столбец "Верхняя кульминация"). Знак часового изменения приводится для долгот, лежащих западнее Гринвича, поэтому для восточных долгот часовое изменение берется с обратным знаком. Для решение задачи нужно воспользоваться моментом среднего солнечного времени для верхней кульминации истинного Солнца на нулевом меридиане и учесть изменения уравнения времени на интервале долгот $\lambda_1 - \lambda_0$, где λ_0 — долгота нулевого меридиана. На 28 июля 2011 года момент среднего солнечного времени для верхней кульминации истинного Солнца на Гринвиче равен $m_{\lambda_0} = 12^{\text{h}}06^{\text{m}}30^{\text{s}}.70$, а часовое изменение $\Delta\eta = +0^{\text{s}}.0334$ для западных долгот и соответственно $\Delta\eta = -0^{\text{s}}.0334$ для восточных долгот. Сначала найдем изменения уравнения времени за тот период, что Солнце движется от меридиана с долготой λ_1 до гринвичского. Составим простейшую пропорцию:

за 1^{h} уравнение времени изменяется на $\Delta\eta$

$$\text{за интервал } (\lambda_1^{\mathrm{h}} - \lambda_0^{\mathrm{h}}) \text{ уравнение времени изменяется на } \Delta\eta_\lambda$$

Следовательно,

$$\Delta\eta_\lambda = \frac{\Delta\eta(\lambda_1^{\mathrm{h}} - \lambda_0^{\mathrm{h}})}{1^{\mathrm{h}}}$$

Тогда:

$$\Delta\eta_\lambda = \frac{-0^{\mathrm{s}}.0334 * (4^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}} - 0^{\mathrm{h}})}{1^{\mathrm{h}}} = -0^{\mathrm{s}}.0334 * 4.04222 = -0^{\mathrm{s}}.135$$

При расчете долгота была для удобства переведена в доли часа.

Если бы уравнение времени не изменялось в течении хотя бы суток, то момент среднего солнечного времени в момент истинного полудня был бы равен моменту среднего времени в момент истинного полудня на гринвичском меридиане, который дан в ежегоднике. Но поскольку уравнение времени непрерывно изменяется, то момент среднего солнечного времени на избранном меридиане в момент верхней кульминации истинного Солнца на этом же меридиане будет отличаться от момента, данного в ежегоднике, на величину $\Delta\eta_\lambda$. Следовательно, местное среднее солнечное время в момент истинного полудня на меридиане с долготой λ (или любом другом меридиане):

$$m_\lambda = m_{\lambda_0} + \Delta\eta_\lambda$$

Для долготы λ_1 тогда:

$$m_{\lambda_1} = m_{\lambda_0} + \Delta\eta_\lambda = 12^{\mathrm{h}}06^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}}.70 - 0^{\mathrm{s}}.135 = 12^{\mathrm{h}}06^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}}.565$$

Итак, когда истинное Солнце будет в верхней кульминации на меридиане с долготой $\lambda_1 = 4^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}}$, то среднего солнечного времени на этом же меридиане будет $12^{\mathrm{h}}06^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}}.565$.

Поясное время в этот момент найти легко: достаточно участь разницу долгот между осевым меридианом и меридианом с долготой λ_1. Пункт с долготой λ_1 лежит в четвертом часовом поясе и долгота осевого меридиана равна $\lambda_N = 4^{\mathrm{h}}$. Следовательно,

$$T_N = m_{\lambda_1} - (\lambda_1 - \lambda_N) = 12^{\mathrm{h}}06^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}}.565 - 2^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}} = 12^{\mathrm{h}}03^{\mathrm{m}}58^{\mathrm{s}}.565$$

На наших часах в этот момент будет летнее декретное время, отличающееся от поясного на 2^{h}, т.е. $14^{\mathrm{h}}03^{\mathrm{m}}58^{\mathrm{s}}.565$.

На меридиане с долготой $\lambda_2 = -4^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}}$ среднее солнечное время в момент истинного полудня вычисляется совершенно аналогично, только поправка, учитывающая изменение уравнения времени, теперь будет положительна. Среднее солнечное время в момент истинного полудня на данном меридиане будет равно

$$12^{\mathrm{h}}06^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}}.70 + 0^{\mathrm{s}}.135 = 12^{\mathrm{h}}06^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}}.835$$

Поясное время в момент истинного полудня на этом меридиане будет равно:

$$12^{\mathrm{h}}06^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}}.835 + 2^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}} = 12^{\mathrm{h}}09^{\mathrm{m}}02^{\mathrm{s}}.835$$

Как видно, моменты истинного полудня по среднему местному времени для этих двух меридианов практически не отличаются друг от друга. Это связано с тем, что уравнение времени за 4^{h} в это время года не изменяется значительным образом. С другой стороны моменты истинного полудня по поясному времени будут отличаться примерно на 6^{m}!

6.3 Найти часовой угол истинного Солнца на 28 июля 2011 для пункта с долготой $\lambda_1 = 4^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}}$ (Екатеринбург, Россия) на момент декретного летнего времени в Екатеринбурге $T_{\text{ДЛ}} = 17^{\mathrm{h}}09^{\mathrm{m}}$.

Решение: часовой угол истинного Солнца — это, в сущности, промежуток времени, прошедший от верхней кульминации истинного Солнца на данном меридиане до другого избранного момента времени, т.е. положения истинного Солнца на эклиптике:

$$t_{\odot} = T_{\odot} - 12^{\mathrm{h}}$$

Если при этом нам известно, например, среднее солнечное время в момент верхней кульминации истинного Солнца на данном меридиане и момент среднего солнечного времени для определенного положения Солнца, то часовой угол будет равен:

$$t_{\odot} = m_{\lambda} - m_{\lambda}^{\text{в.к.}}$$

Фактически, разность двух моментов времени, один из которых относится к верхней кульминации истинного Солнца на данном меридиане, а второй представлен в той же временной шкале (истинного времени, местного среднего, поясного или декретного летнего) дает значение часового угла истинного Солнца.

В предыдущей задаче мы нашли значение местного среднего солнечного времени в момент верхней кульминации истинного Солнца на меридиане с долготой $\lambda_1 = 4^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}}$. Этот момент времени — $m_{\lambda}^{\text{в.к.}}$ равен $12^{\mathrm{h}}06^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}}.565$. Найдем местное среднее солнечное время для момента $T_{\text{ДЛ}} = 17^{\mathrm{h}}09^{\mathrm{m}}$:

$$m_{\lambda} = T_{\text{ДЛ}} - 2^{\mathrm{h}} + (\lambda_1 - \lambda_N) = 17^{\mathrm{h}}09^{\mathrm{m}} - 2^{\mathrm{h}} + 2^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}} = 15^{\mathrm{h}}11^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}}$$

тогда часовой угол истинного Солнца будет равен:

$$t_{\odot} = m_{\lambda} - m_{\lambda}^{\text{в.к.}} = 15^{\mathrm{h}}11^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}} - 12^{\mathrm{h}}06^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}}.565 = 3^{\mathrm{h}}05^{\mathrm{m}}01^{\mathrm{s}}.435$$

Тема 3

Линейное и нелинейное интерполирование. Эфемериды Астрономического ежегодника

1 Линейное интерполирование

Линейная интерполяция — интерполяция алгебраическим двучленом $P_1(x) = ax+b$ функции f, заданной в двух точках x_0 и x_1 отрезка $[a, b]$. В случае, если заданы значения в нескольких точках, функция заменяется кусочно-линейной функцией.

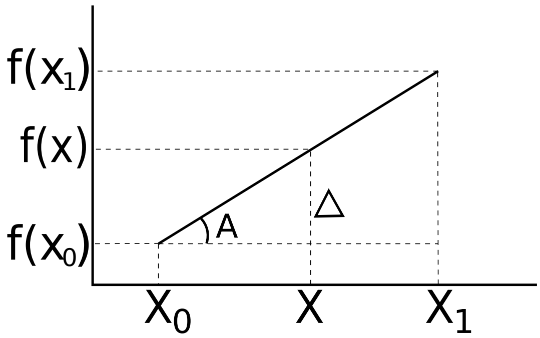


Рисунок 3.1 – Линейная интерполяция

На рисунке 3.1 представлен отрезок линейной функции f. Известны границы интервала $[x_0, x_1]$, и значения функции для этих границ $f(x_0)$ и $f(x_1)$. Требуется найти значение функции $f(x)$, где x лежит внутри интервала $[x_0, x_1]$ и известно. Из рисунка видно, что:

$$f(x) = f(x_0) + \Delta$$

Δ — это катет прямоугольного треугольника, второй катет которого равен $x - x_0$. Тогда значение катета Δ равно, согласно определению тангенса угла прямоугольного треугольника:

$$\Delta = (x - x_0) * \mathrm{tg}(A)$$

Этот же угол — угол большого прямоугольного треугольника, для которого катет, прилежащий к углу, равен $(x_1 - x_0)$, а противолежащий углу катет равен $(f(x_1) - f(x_0))$. Снова по определению тангенса угла:

$$\mathrm{tg}(A) = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}$$

Следовательно:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} * (x - x_0)$$

Далее рассматриваются две практические задачи, решение которых подразумевает использование линейного интерполирования.

1.1 Определение местного среднего времени восхода и захода Солнца

Условие задачи: Определить местное среднее время восхода и захода Солнца, а также продолжительность дня для пункта с широтой $\varphi = 57°$ и долготой $\lambda = 4^h02^m32^s$ на 15 июня 2011 года. В котором часу по летнему декретному времени в эту дату здесь будет наблюдаться восход и заход Солнца?

Решение: Для решения данной задачи используются данные таблицы "Восходы и заходы Солнца" Астрономического ежегодника. В Приложении B приведен фрагмент данной таблицы. В этих таблицах для соответствующих дат и интервала широт от $\varphi = 30°$ до $\varphi = 70°$ с шагом по широте $\Delta\varphi = 2°$ приведены значения *местного среднего* времени в моменты восхода и захода Солнца. Для интерполирования по времени в этой таблице используется четырехсуточный интервал. Эта таблица обеспечивает решение задачи с точностью порядка 1^s.

Для удобства решения выпишем из Астрономического ежегодника нужные нам (ближайшие к исходным данным) значения и представим их в виде таблицы.

	Восход			Заход		
дата	$\varphi = 56°$	$\varphi = 57°$	$\varphi = 58°$	$\varphi = 56°$	$\varphi = 57°$	$\varphi = 58°$
12.06	3^h14^m		2^h58^m	20^h46^m		21^h02^m
15.06						
16.06	3^h13^m		2^h56^m	20^h48^m		21^h05^m

В данном случае необходимо использовать линейное двухпараметрическое интерполирование: интерполяция проводиться сначала по времени на нужную дату, а затем по широтам на нужную широту, или же в обратном порядке. Итак, при интерполяции сначала по дате на нужное нам число в качестве значений аргумента x используются даты из таблиц, а в качестве значений функции $f(x)$ — среднее местное время восхода или захода. Найдем сначала местное среднее время восхода на 15 июня на широте $\varphi = 56°$:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} * (x - x_0) = 3^h14^m + \frac{3^h13^m - 3^h14^m}{16.06 - 12.06}(15.06 - 12.06) =$$
$$= 3^h14^m - \frac{1^m}{4} * 3 = 3^h14^m - 0^m.75 = 3^h14^m - 45^s = \underline{3^h13^m15^s}$$

Совершенно аналогично рассчитывается местное среднее время восхода на широте $\varphi = 58°$ на 15 июня:

$$f(x) = 2^h58^m + \frac{2^h56^m - 2^h58^m}{16.06 - 12.06}(15.06 - 12.06) = 2^h58^m - \frac{2^m}{4} * 3 =$$
$$= 2^h58^m - 1^m.5 = 2^h58^m - 1^m30^s = \underline{2^h56^m30^s}$$

И время захода на заданных широтах 15 июня:

$$f(x) = 20^h46^m + \frac{20^h48^m - 20^h46^m}{16.06 - 12.06}(15.06 - 12.06) = 20^h46^m + \frac{2^m}{4} * 3 =$$
$$= 20^h46^m + 1^m.5 = 20^h46^m + 1^m30^s = \underline{20^h47^m30^s}$$

— на широте $\varphi = 56^\circ$ и

$$f(x) = 21^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}} + \frac{21^{\mathrm{h}}05^{\mathrm{m}} - 21^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}}}{16.06 - 12.06}(15.06 - 12.06) = 21^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}} + \frac{3^{\mathrm{m}}}{4} * 3 =$$
$$= 21^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}} + 2^{\mathrm{m}}.25 = 21^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}} + 2^{\mathrm{m}}15^{\mathrm{s}} = \underline{21^{\mathrm{h}}04^{\mathrm{m}}15^{\mathrm{s}}}$$

— на широте $\varphi = 58^\circ$.

Теперь для расчета значения среднего времени восхода и захода на нужной нам широте $\varphi = 57^\circ$ будем использовать в качестве значения аргумента x заданные нам широты, а в качестве значений функции $f(x)$ найденные выше значения местных средних времен восхода и захода 15 июня. Восход по местному среднему времени 15 июня на широте $\varphi = 57^\circ$:

$$f(x) = 3^{\mathrm{h}}13^{\mathrm{m}}15^{\mathrm{s}} + \frac{2^{\mathrm{h}}56^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}} - 3^{\mathrm{h}}13^{\mathrm{m}}15^{\mathrm{s}}}{58^\circ - 56^\circ}(57^\circ - 56^\circ) = 3^{\mathrm{h}}13^{\mathrm{m}}15^{\mathrm{s}} - \frac{16^{\mathrm{m}}.75}{2^\circ} * 1^\circ =$$
$$= 3^{\mathrm{h}}13^{\mathrm{m}}15^{\mathrm{s}} - 8^{\mathrm{m}}.375 = 3^{\mathrm{h}}13^{\mathrm{m}}15^{\mathrm{s}} - 8^{\mathrm{m}}22^{\mathrm{s}}.5 = \underline{3^{\mathrm{h}}04^{\mathrm{m}}52^{\mathrm{s}}.5}$$

Заход по местному среднему времени 15 июня на широте $\varphi = 57^\circ$:

$$f(x) = 20^{\mathrm{h}}47^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}} + \frac{21^{\mathrm{h}}04^{\mathrm{m}}15^{\mathrm{s}} - 20^{\mathrm{h}}47^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}}}{58^\circ - 56^\circ}(57^\circ - 56^\circ) = 20^{\mathrm{h}}47^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}} + \frac{16^{\mathrm{m}}.75}{2^\circ} * 1^\circ =$$
$$= 20^{\mathrm{h}}47^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}} + 8^{\mathrm{m}}.375 = 20^{\mathrm{h}}47^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}} + 8^{\mathrm{m}}22^{\mathrm{s}}.5 = \underline{20^{\mathrm{h}}55^{\mathrm{m}}52^{\mathrm{s}}.5}$$

Теперь можно добавить найденные данные в таблицу:

	Восход			Заход		
дата	$\varphi = 56^\circ$	$\varphi = 57^\circ$	$\varphi = 58^\circ$	$\varphi = 56^\circ$	$\varphi = 57^\circ$	$\varphi = 58^\circ$
12.06	$3^{\mathrm{h}}14^{\mathrm{m}}$	—	$2^{\mathrm{h}}58^{\mathrm{m}}$	$20^{\mathrm{h}}46^{\mathrm{m}}$	—	$21^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}}$
15.06	*$3^{\mathrm{h}}13^{\mathrm{m}}15^{\mathrm{s}}$*	**$3^{\mathrm{h}}04^{\mathrm{m}}52^{\mathrm{s}}.5$**	*$2^{\mathrm{h}}56^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}}$*	*$20^{\mathrm{h}}47^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}}$*	**$20^{\mathrm{h}}55^{\mathrm{m}}52^{\mathrm{s}}.5$**	*$21^{\mathrm{h}}04^{\mathrm{m}}15^{\mathrm{s}}$*
16.06	$3^{\mathrm{h}}13^{\mathrm{m}}$	—	$2^{\mathrm{h}}56^{\mathrm{m}}$	$20^{\mathrm{h}}48^{\mathrm{m}}$	—	$21^{\mathrm{h}}05^{\mathrm{m}}$

Курсивом в таблице показаны промежуточные значения, а жирным шрифтом — окончательный результат.

В задаче также поставлен вопрос о декретном летнем времени в эти моменты и продолжительности дня. Для расчета декретного летнего времени воспользуемся заданной широтой $\lambda = 4^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}}$, которая позволяет предположить, что данный меридиан лежит в 4 часовом поясе. Тогда для момента восхода:

$$T_{\text{ДЛ}} = 3^{\mathrm{h}}04^{\mathrm{m}}52^{\mathrm{s}}.5 - 02^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}} + 2^{\mathrm{h}} = 5^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}}20^{\mathrm{s}}.5,$$

а для момента захода:

$$T_{\text{ДЛ}} = 20^{\mathrm{h}}55^{\mathrm{m}}52^{\mathrm{s}}.5 - 02^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}} + 2^{\mathrm{h}} = 22^{\mathrm{h}}53^{\mathrm{m}}20^{\mathrm{s}}.5.$$

Продолжительность дня в этот день на данной широте составит: $22^{\mathrm{h}}53^{\mathrm{m}}20^{\mathrm{s}}.5 - 5^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}}20^{\mathrm{s}}.5 = 17^{\mathrm{h}}51^{\mathrm{m}}$.

1.2 Работа с эфемеридой Полярной

В нашу эпоху Полярная звезда (α UMi) является наиболее близкой к полюсу мира звездой и самой яркой в этой области неба. Вследствие близости к полюсу ее наблюдения имеют важное значение при определении широты места наблюдения, а также при ориентировании угломерных инструментов по азимуту.

Инструмент считается ориентированным, если будет известен отсчет горизонтального круга на точку севера либо точку юга. Операцию ориентирования инструмента в пункте наблюдения обычно проводят в начале любых астрономо-геодезических работ, фиксируя положение Полярной в центре сетки нитей инструмента в определенные моменты времени, для которых известна высота и азимут Полярной звезды.

Видимое суточное движение Полярной звезды самое медленное. Тем не менее ее горизонтальные координаты: высота и азимут будет изменяться в течении суток. На рисунке 3.2 показано суточное движение Полярной относительно полюса мира.

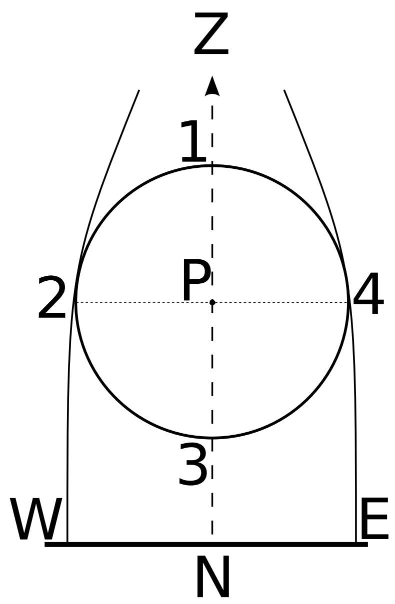


Рисунок 3.2 – Суточное движение Полярной звезды

Изменения горизонтальных координат Полярной звезды представлены в эфемериде "Высоты и азимуты Полярной" Астрономического ежегодника. В Приложении Г приведен фрагмент этой таблицы.

Высота Полярной изменяется в зависимости от звездного времени. Значения *геодезических* азимутов зависят не только от времени, но также и от широты места наблюдения: чем больше широта, тем сильнее вертикалы Полярной отклоняются от северной стороны меридиана, что создает определенные трудности при ориентировании инструмента по Полярной звезде. Использование эфемериды ежегодника дает возможность определить азимут и высоту звезды в момент наблюдения (т.е. в известный момент времени) и учесть их при определении отсчета на точку севера.

На рисунке 3.2 показаны характерные положения Полярной при ее суточном вращении. Здесь линией NPZ на небесной сфере показана северная сторона меридиана, а также положения двух вертикалов, соответствующих моментам западной (2) и восточной (4) элонгаций этой звезды. Дуги горизонта WN и EN являются геодезическими азимутами для этих моментов.

Определим, в какие моменты звездного времени Полярная будет находиться на небесной сфере в указанных точках своей суточной параллели:

— точки (1) и (3), как хорошо видно из рисунка 3.2, соответствуют верхней и нижней кульминациям звезды. Для определения звездного времени в эти моменты достаточно знать лишь прямое восхождение звезды. Согласно Астрономическому ежегоднику на 2011 года прямое восхождение $\alpha = 2^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}37^{\mathrm{s}}$. Тогда в верхней кульминации Полярная наблюдается в момент звездного времени $S = 2^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}37^{\mathrm{s}}$, когда ее азимут равен 0 и часовой угол также равен 0. В нижней кульминации Полярная наблюдается в момент звездного времени $S = 14^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}37^{\mathrm{s}}$, когда ее часовой угол равен 12^{h}, а азимут равен 0.

— точки (2) и (4), как указано выше, это элонгации Полярной, когда ее вертикалы максимально удалены от меридиана. Часовые углы в эти моменты равны 6^{h} для западной элонгации и 18^{h} — для восточной. Тогда звездное время в эти моменты будет равно $S = 8^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}37^{\mathrm{s}}$ и $S = 20^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}37^{\mathrm{s}}$ соответственно.

Чаще всего решается обратная задача: по известному моменту звездного времени определить положение звезды на ее суточной параллели, а также определить ее горизонтальные координаты. Для этого и используется эфемерида Полярной из Астрономического ежегодника.

В эфемериде "Высоты и азимуты Полярной" приведен параметр f, который равен разности высот Полярной звезды и полюса мира в момент наблюдения:$f = h_* - h_{\mathrm{p}} = h_* - \varphi$. Как видно, значение параметра f может быть как отрицательным, так и положительным. Это соотношение также позволяет использовать наблюдения Полярной звезды для определения точного значения широты места наблюдения. Непосредственно из наблюдений можно получить высоту Полярной над горизонтом, а затем для времени момента наблюдения из эфемериды найти значение параметра f. Тогда широта места наблюдения: $\varphi = f + h_*$.

В моменты элонгаций значение параметра f равно нулю (см. рисунок 3.2), поскольку высота Полярной в эти моменты равна высоте полюса мира над горизонтом.

В моменты кульминаций этот параметр равен полярному расстоянию звезды: $p = 90° - \delta$.

В другие моменты времени значение параметра f зависит от часового угла звезды, а следовательно и от звездного времени:

$$f = (90° - \delta)\cos(S - \alpha)$$

Эфемерида Полярной дана с интервалом $\Delta S = 20^{\mathrm{m}}$ по звездному времени, поэтому получение значения параметра f требует использования линейного интерполирования по времени между табличными значениями.

Азимут же Полярной зависит не только от времени, но и широты места наблюдения: чем больше широта, тем сильнее вертикалы Полярной отклоняются от меридиана. По этой причине вычисление геодезического азимута Полярной звезды для определенных моментов времени требует двойного линейного интерполирования: по времени и по широте.

1.3 Вычисление горизонтальных координат Полярной

Условие задачи: Определить значение азимута и высоты Полярной в пункте с широтой $\varphi = 58°$ в момент звездного времени $S = 18^{\mathrm{h}}$ и описать положение звезды относительно горизонта и меридиана в заданный момент времени S. Вычислить отсчет горизонтального круга на точку севера, если в момент наблюдения отсчет горизонтального круга за звезду был равен $B_p = 200°50'30''$.

Решение: При решении этой задачи следует обратить внимание на знак геодезического азимута: как видно из рисунка 3.2, в моменты звездного времени $S = 2^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}37^{\mathrm{s}} \div 14^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}37^{\mathrm{s}}$ вертикалы звезды расположены к западу от северной стороны меридиана (геодезический азимут при этом отрицателен), а в моменты времени $S = 14^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}37^{\mathrm{s}} \div 2^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}37^{\mathrm{s}}$ (после нижней кульминации)— к востоку (геодезический азимут положителен). Таким образом, в момент времени $S = 18^{\mathrm{h}}$ Полярная находится между нижней кульминацией и восточной элонгацией, которая происходит в момент времени $S = 20^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}37^{\mathrm{s}}$. Из рисунка 3.2 также ясно, что параметр f будет отрицательным в заданный момент времени.

Выпишем из таблицы "Высоты и азимуты Полярной" данные, близкие к заданным значениям звездного времени и широты:

f	S	φ		
		55°	58°	60°
$-0°26'$	$18^{\mathrm{h}}06^{\mathrm{m}}$	$0°54'$		$1°02'$
	$18^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{m}}$			
$-0°29'$	$17^{\mathrm{h}}46^{\mathrm{m}}$	$0°50'$		$0°57'$

Сначала найдем при помощи линейной интерполяции значение параметра f:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} * (x - x_0) = -0°26' + \frac{-0°29' + 0°26'}{17^{\mathrm{h}}46^{\mathrm{m}} - 18^{\mathrm{h}}06^{\mathrm{m}}}(18^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{m}} - 18^{\mathrm{h}}06^{\mathrm{m}}) =$$
$$= -0°26' - \frac{0°03'}{20^{\mathrm{m}}} * 6^{\mathrm{m}} = -0°26' - 0°00'.9 = \underline{-0°26'.9}$$

Для вычисления значения геодезического азимута проведем сначала интерполирование по широтам на нужный момент времени. Геодезический азимут в момент времени $S = 18^{\mathrm{h}}$ на широте

$\varphi = 55°$:

$$f(x) = 0°54' + \frac{0°50' - 0°54'}{17^{\mathrm{h}}46^{\mathrm{m}} - 18^{\mathrm{h}}06^{\mathrm{m}}}(18^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{m}} - 18^{\mathrm{h}}06^{\mathrm{m}}) = 0°54' - \frac{0°04'}{20^{\mathrm{m}}} * 6^{\mathrm{m}} =$$
$$= 0°54' - 0°01'.2 = \underline{0°52'.8}$$

Геодезический азимут в момент времени $S = 18^{\mathrm{h}}$ на широте $\varphi = 60°$:

$$f(x) = 1°02' + \frac{0°57' - 1°02'}{17^{\mathrm{h}}46^{\mathrm{m}} - 18^{\mathrm{h}}06^{\mathrm{m}}}(18^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{m}} - 18^{\mathrm{h}}06^{\mathrm{m}}) = 1°02' - \frac{0°05'}{20^{\mathrm{m}}} * 6^{\mathrm{m}} =$$
$$= 1°02' - 0°01'.5 = \underline{1°00'.5}$$

Тогда геодезический азимут в пункте с широтой $\varphi = 58°$:

$$f(x) = 0°52'.8 + \frac{1°00'.5 - 0°52'.8}{60° - 55°}(58° - 55°) = 0°52'.8 + \frac{0°07'.7}{5°}(3°) =$$
$$= 0°52'.8 + 0°04'.62 = \underline{0°57'.42}$$

Можно внести полученные данные в таблицу:

f	S	φ		
		55°	58°	60°
−0°26′	$18^{\mathrm{h}}06^{\mathrm{m}}$	0°54′	—	1°02′
−0°26′.9	$18^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{m}}$	*0°52′.8*	**0°57′.42**	*1°00′.5*
−0°29′	$17^{\mathrm{h}}46^{\mathrm{m}}$	0°50′	—	0°57′

Курсивом в таблице показаны промежуточные результаты, а жирным шрифтом — окончательные значения.

Поскольку Полярная находится к востоку от меридиана, ее геодезический азимут положителен (а астрономический $A > 180°$). Чтобы найти отсчет на точку севера, рассмотрим рисунок 3.3:

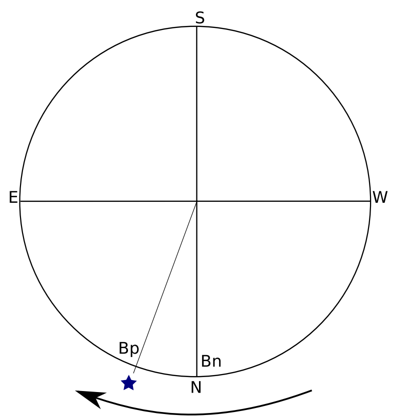


Рисунок 3.3 – Определение отсчета горизонтального круга на точку севера

На рисунке показан горизонтальный круг теодолита, направления на точки севера (N), юга (S), востока (E) и запада (W), а также направление на Полярную в момент звездного времени

$S = 18^{\mathrm{h}}$ и отсчет на нее B_p. Также стрелкой показано направление возрастания отсчетов на горизонтальном круге: отсчеты возрастают по часовой стрелке в направлении видимого суточного движения светил. Из рисунка 3.3 совершенно очевидно, что отсчет на Полярную B_p будет больше отсчета на точку севера B_n на значение геодезического азимута Полярной в этот момент времени, т.е. $B_p = B_n + a$. Тогда отсчет на точку севера равен:

$$B_n = B_p - a = 200°50'.5 - 0°57'.42 = 199°53'.08$$

2 Нелинейное интерполирование

В случае, когда интерполирование должно быть более точным, используют разложение искомой функции ряд Тейлора:

$$f(t) = f(t_0) + \sum_{k=1}^{n} \frac{(t-t_0)^k f^{(k)}}{k!}.$$

При решении задач практики достаточно использовать разложение функции в ряд Тейлора до второго порядка:

$$f(t) = f(t_0) + (t-t_0)f'(t_0) + \frac{(t-t_0)^2 f''(t_0)}{2!} \tag{3.1}$$

Как известно, первая производная функции характеризует изменение функции с течением времени, а вторая производная характеризует изменение скорости с течением времени. Производная функции, как известно, это:

$$f'(t_0) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{f(t_0+\Delta t) - f(t_0)}{\Delta t}, \tag{3.2}$$

что при малых Δt:

$$f'(t_0) \approx \frac{f(t_0+\Delta t) - f(t_0)}{\Delta t}, \tag{3.3}$$

Тогда вторая производная:

$$f''(t_0) \approx \frac{f'(t_0+\Delta t) - f'(t_0)}{\Delta t}. \tag{3.4}$$

Следовательно, подставив (3.3) и (3.4) в (3.1), получим:

$$f(t) = f(t_0) + (t-t_0)\frac{f(t_0+\Delta t) - f(t_0)}{\Delta t} + (t-t_0)^2\frac{f'(t_0+\Delta t) - f'(t_0)}{2!\Delta t} \tag{3.5}$$

Важно помнить, что это лишь некоторое приближение, поскольку заменять производную разностными отношениями можно только на очень малых интервалах Δt.

2.1 Определение склонения Солнца на дату и момент наблюдения

Рассмотрим конкретную задачу сферической астрономии: вычисление склонения Солнца на заданный момент времени на определенный день года. Экваториальные координаты Солнца, в отличие от экваториальных координат звезд, заметным образом изменяются непрерывно в течение года из-за обращения Земли по орбите вокруг Солнца. Поэтому, даже если нам известны экваториальные координаты Солнца на определенный момент времени, то в любой другой момент времени значения этих координат будут другими. Более того, из-за неравномерности движения Земли по орбите, изменения координат происходят нелинейным образом. По этой причине нельзя, например, использовать линейную интерполяцию при получении координат Солнца с использованием данных из таблиц координат Солнца на различные моменты времени. В Астрономическом ежегоднике на каждый день года в таблице "Солнце" приводятся экваториальные координаты Солнца на момент земного динамического времени TT=0^{h}. Обозначим этот момент t_0. Пусть момент времени, на который необходимо найти значение склонения Солнца, равен t. Само склонение Солнца в этот момент времени обозначим $\delta(t)$. Для нелинейной интерполяции будем пользоваться формулой (3.1), где в качестве значения функции $f(t_0)$ в момент t_0 будет выступать значение склонения на нужную дату года. Пусть склонение Солнца на дату n равно $\delta(t_0)$. Тогда по формуле (3.5):

$$\delta(t) = \delta(t_0) + (t - t_0)\frac{\delta(t_0 + \Delta t) - \delta(t_0)}{\Delta t} + (t - t_0)^2\frac{\delta'(t_0 + \Delta t) - \delta'(t_0)}{2!\Delta t}$$

Нам нужно знать скорость изменения склонения вблизи момента t_0 (это будет $f'(t_0)$), а также каким образом изменяется эта скорость на некотором промежутке времени (т.е. $f''(t_0)$). В таблице ежегодника на каждую дату года, кроме экваториальных координат, приводят также их часовые изменения. Эти часовые изменения отражают изменение значений координат за 1 час времени, т.е. являются скоростями изменения координат. Обозначим часовое изменение склонение Солнца на дату n как V_n. По своей сути это:

$$V_n = \frac{\delta(t_0 + 1^{\mathrm{h}}) - \delta(t_0)}{1^{\mathrm{h}}}$$

В таблице ежегодника на дату n дана величина разности склонений Солнца в момент $TDT = 0^{\mathrm{h}}$ и через час после него, т.е. $\delta(t_0 + 1^{\mathrm{h}}) - \delta(t_0)$, поделив эту величину на 1^{h}, мы и получим V_n. Как уже было сказано выше, производная функции характеризует скорость изменения функции на некотором интервале времени Δt, поэтому $\delta'(t_0) \equiv V_n$, а $\delta'(t_0 + \Delta t)$ — это $V(t_0 + \Delta t)$ на момент времени, отстоящий от t_0 на Δt. Часовые изменения, т.е. скорости изменения координат в ежегоднике приводятся на каждый день, т.е. временной интервал, который их разделяет, равен 24^{h}. Таким образом, из данных Ежегодника нам известна также скорость изменения склонения на дату $n + 1$, т.е. $V(t_0 + \Delta t) \equiv V_{n+1}$, а $\Delta t = 24^{\mathrm{h}}$. Тогда склонение Солнца будет равно:

$$\delta(t) = \delta(t_0) + (t - t_0)V_n + \frac{(t - t_0)^2}{2!}\frac{V_{n+1} - V_n}{24^{\mathrm{h}}} =$$

2.2 Пример вычисления склонения Солнца

Точное значение склонения Солнца определяют на основании эфемериды АЕ "Солнце", где на каждую дату и момент земного времени TT= $0^{\rm h}0^{\rm m}$ приводится значение склонения Солнца с его часовыми изменениями на этот момент времени. Момент TT определяют по всемирному времени с учетом небольшой поправки $\Delta T(A)$, которая получена в небесной механике на основе современной теории движения тел Солнечной системы: $TT = UT + \Delta T(A)$. На 2011 год эта поправка равна $67^{\rm s}$.

Условие задачи: Определить склонение Солнца на 22 июля 2011 года в момент летнего декретного времени $T_{\text{ДЛ}} = 10^{\rm h}25^{\rm m}34^{\rm s}$ в пункте с долготой $\lambda = 4^{\rm h}02^{\rm m}32^{\rm s}$ (Екатеринбург).

Решение:

а) Поскольку координаты Солнца в Ежегоднике приводятся для момента земного времени, то нам нужно знать, сколько земного времени было в момент $T_{\text{ДЛ}} = 10^{\rm h}25^{\rm m}34^{\rm s}$. Для этого сначала от декретного летнего времени перейдем к всемирному:

$$UT = T_{\text{ДЛ}} - N - 2^{\rm h} = 10^{\rm h}25^{\rm m}34^{\rm s} - 6^{\rm h} = 4^{\rm h}25^{\rm m}34^{\rm s},$$

а затем найдем земное время:

$$TT = UT + \Delta T(A) = 4^{\rm h}25^{\rm m}34^{\rm s} + 67^{\rm s} = 4^{\rm h}26^{\rm m}41^{\rm s}.$$

Итак, момент времени, для которого необходимо найти склонение Солнца:

$$TT = 4^{\rm h}26^{\rm m}41^{\rm s} = 4^{\rm h}.444722$$

.

б) Склонение Солнца на 22 июля 2011 из Ежегодника на момент времени $TT = 0^{\rm h}$ равно:

$$\delta = +20^\circ22'57''.64$$

Часовое изменение склонения за 1 час времени 22 июля: $V_0 = \dfrac{-29.''340}{1^{\rm h}}$, а 23 июля — $V_1 = \dfrac{-30.''192}{1^{\rm h}}$. Тогда:

$$\delta(4^{\rm h}.444722) = \delta(0^{\rm h}) + (4^{\rm h}.444722 - 0^{\rm h})\frac{-29.''340}{1^{\rm h}} + \frac{(4^{\rm h}.444722 - 0^{\rm h})^2}{2!}\frac{\dfrac{-30.''192}{1^{\rm h}} - \dfrac{-29.''340}{1^{\rm h}}}{24^{\rm h}} =$$
$$= +20^\circ22'57''.64 - \frac{4^{\rm h}.444722}{1^{\rm h}}29.''340 + \frac{(4^{\rm h}.444722)^2}{48^{\rm h}1^{\rm h}}(29.''340 - 30.''192) =$$
$$= +20^\circ22'57''.64 - 130''.408 - 0''.351 = +20^\circ20'46''.881$$

Таким образом, 22 июля 2011 года в момент летнего декретного времени $T_{\text{ДЛ}} = 10^{\rm h}25^{\rm m}34^{\rm s}$ в пункте с долготой $\lambda = 4^{\rm h}02^{\rm m}32^{\rm s}$ склонение Солнца было равно $\delta = +20^\circ20'46''.881$

Тема 4

Определение азимута направления на земной объект по наблюдениям Солнца

1 Постановка задачи

В летнее время на средних, а в особенности на северных широтах ($\varphi > 60°$) из-за светлых ночей практически не удается наблюдать звезды в небольшие угломерные инструменты. Также очень короток период таких наблюдений: он возможен только вблизи местной полуночи.

В эти периоды Солнце, а иногда и яркие планеты могут быть теми астрономическими объектами, с помощью которых удается решить одну из самых важных астрономо-геодезических задач, с которой обычно начинаются любые угломерные наблюдения: определение астрономического азимута направления на избранный земной объект. Если известен азимут направления на земной предмет, то можно считать, что горизонтальный круг теодолита ориентирован по азимуту. В конечном счете удается получить для данного инструмента отсчет горизонтального круга на точку юга (B_s) или точку севера (B_n), а затем выставить отчет на точку юга $B_s = 0°0'$. После такой операции отсчет горизонтального круга на земной предмет будет равен его астрономическому азимуту.

На рисунке 4.1 показан горизонтальный круг теодолита, приведенный в рабочее положение. В плоскости этого круга показаны проекции вертикалов Солнца для двух положений светила относительно меридиана (I,II), которые соответствуют положениям светила на небесной сфере до и после верхней кульминации. На горизонтальном круге указаны отсчеты круга при наведении на Солнце ($B_{\odot}$) и на земной объект до и после верхней кульминации (B_M и B_{M_1}). Выше уже было указано, что на всех угломерных инструментах отсчеты горизонтального круга возрастают по часовой стрелке в сторону видимого суточного движения светил. Из рисунка тогда видно, что при проведении наблюдений до полудня отсчет на Солнце будет больше отсчета на земной предмет (Солнце при этом западнее земного предмета), т.е. $B_{\odot} > B_M$, а отсчет на точку юга будет больше, чем отсчет на Солнце. При наблюдениях после полудня отсчет на земной предмет будет больше отсчета на Солнце, если земной предмет расположен западнее Солнца, т.е. $B_{\odot} < B_{M_1}$, а отсчет на Солнце будет больше отсчета на точку юга.

Обозначим угол между направлением на земной предмет и на Солнце до полудня Δ, а после полудня — Δ_1. Из рисунка 4.1 хорошо видно, что

$$\Delta = B_{\odot} - B_M$$

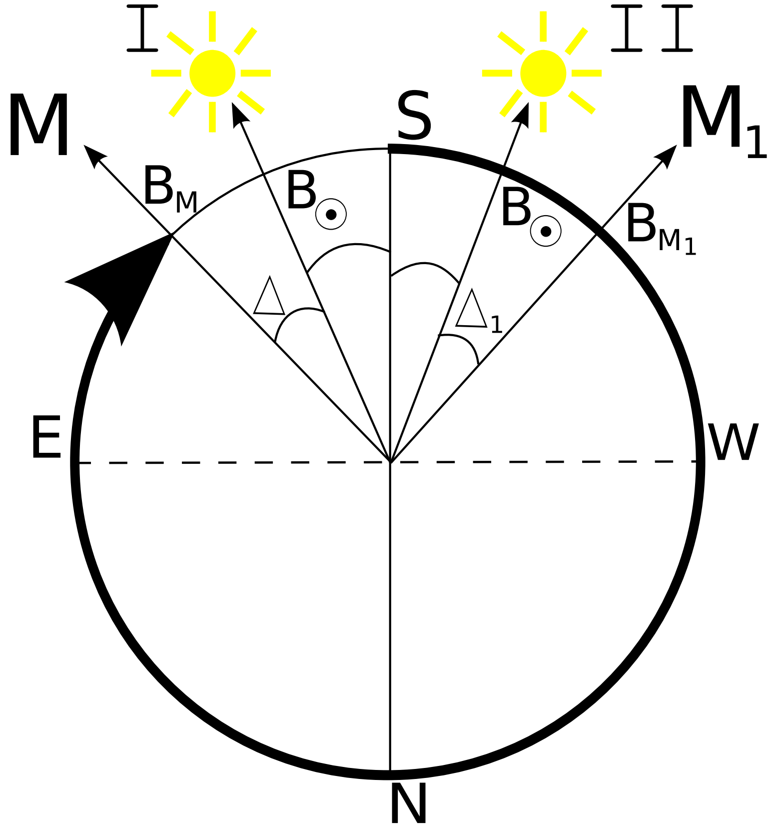


Рисунок 4.1 – Определение азимута избранного направления на земной объект

и

$$\Delta_1 = B_{M_1} - B_\odot.$$

Оба значения при этом получаются положительными. Значения этих углов будут изменяться вследствие движения Солнца: угол Δ будет возрастать, а угол Δ_1 — уменьшаться. В общем же значения этих углов и их изменения будут зависеть от взаимного расположения земного предмета и Солнца. Поэтому при проведении наблюдений необходимо в журнале наблюдений зарисовать схему расположения земного ориентира относительно Солнца.

Целью наблюдений является определение азимута избранного направления на земной предмет, который не изменяется с течением времени. Допустим, что в определенный момент времени до полудня нам известен азимут Солнца $A_\odot$, тогда азимут направления на земной объект (когда земной предмет восточнее Солнца, см. рисунок 4.1):

$$A_M = A_\odot - \Delta.$$

Если же нам известен азимут Солнца для определенного момента времени после полудня, то азимут направления на земной предмет (когда земной предмет западнее Солнца, см. рисунок 4.1):

$$A_{M_1} = A_\odot + \Delta_1.$$

Таким образом, для определения азимута направления на земной объект по наблюдениям Солнца необходимо измерить угол Δ (Δ_1) между направлениями на земной объект и на Солнце, а также знать азимуты Солнца в соответствующие моменты времени.

Азимут Солнца находят из серии измерений зенитных расстояний Солнца в пункте с известной широтой φ, определяя при этом точное значение склонения Солнца на основании данных из эфемериды Астрономического ежегодника. Тогда для определения азимута Солнца в зависимости от измеренных зенитных расстояний используется сферический треугольник "полюс–зенит–светило", для которого применяется формула косинуса стороны $(90° - \delta)$ и находят значение азимута:

$$\cos A_{\odot} = \frac{\sin\varphi\cos z - \sin\delta}{\cos\varphi\sin z}$$

Определение азимута по Солнцу относят к приближенным методам. Это связано в первую очередь с большими размерами солнечного диска, вследствие чего не удается выполнить уверенное наведение на его центр при наблюдениях. Во-вторых, дневные наблюдения всегда являются менее точными из-за особенностей земной атмосферы в этот период времени. Атмосферные помехи в это время велики: это и неспокойствие атмосферы, и нагрев инструмента и уровня, из-за чего трудно контролировать горизонтирование инструмента.

Наблюдения Солнца в данном случае имеет сугубо учебный характер, когда студенты знакомятся со спецификой угломерных измерений движущегося в поле зрения объекта и получают определенные навыки в ориентировании на местности. Тем не менее при аккуратном соблюдении методики измерений удается получить азимут избранного направления с точностью $3'$–$4'$.

2 Подготовка астрономического наблюдения. Расчет установочной эфемериды Солнца на дату наблюдения

Каждое астрономическое наблюдение, связанное с измерениями положений светил, требует тщательной подготовки. Основные требования, которые необходимо выполнить для успешного проведения наблюдений:

а) Ясно понимать поставленную задачу.

б) Хорошо знать угломерный инструмент и иметь навыки работы с ним. При наблюдениях Солнца в рамках данной практики используются теодолиты 4Т30П.

в) Владеть методикой самих измерений с учетом специфики объекта наблюдения.

г) Иметь заранее составленный план и строго продуманный журнал измерений, в который заносятся основные и вспомогательные данные.

д) *При наблюдениях Солнца* иметь установочную суточную эфемериду Солнца на дату наблюдения и уметь оперативно ее использовать при поиске изображения Солнца в поле зрения инструмента.

Установочная суточная эфемерида Солнца необходима для поиска изображения Солнца в поле зрения теодолита. Поиск изображения диска Солнца в поле зрения теодолита осложняется тем, что поле зрения теодолитов достаточно небольшое (в частности у теодолитов 4Т30П поле зрения равно 2°), а объект довольно быстро изменяет свое положение относительно сетки нитей как по азимуту, так и по высоте. Примерно через 2–3 минуты Солнце покидает поле зрения. Поэтому, пользуясь эфемеридой, нужно учитывать не только момент времени для поиска изображения с точностью хотя бы до 30 секунд, но и знать высоту Солнца в заданный момент с точностью $5'$–$10'$, согласно которой выставляют отсчет вертикального круга при наведении на Солнце.

Установочная эфемерида в данном случае — это таблица высот и азимутов Солнца в зависимости от часовых углов светила с шагом по часовому углу не больше $\Delta t = 20^{\mathrm{m}}$. Используя такую эфемериду и имея навыки работы с ней можно выполнить всю программу наблюдений за 20–30 минут.

Для расчета установочной суточной эфемериды необходимо:

а) знать широту места наблюдения и склонение Солнца на дату наблюдений. Эти параметры достаточно взять с точностью до $1'$.

б) задать значения часовых углов Солнца до полудня и после полудня с шагом $\Delta t = 20^{\mathrm{m}}$. При этом нужно помнить, что светило при одних и тех же часовых углах до и после верхней кульминации занимает симметричные положения относительно меридиана и горизонта.

в) вычислить момент истинного полудня для данной даты по среднему летнему декретному времени.

Тогда расчет высот и азимутов Солнца в зависимости от часовых углов Солнца проводится на основании известных формул сферического треугольника ”полюс–зенит–светило”:

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

и

$$\sin z \sin A = \cos\delta \sin t.$$

В Приложении Д приведен пример суточной установочной эфемериды Солнца на 28 июля 2011 в пункте с долготой $\lambda_1 = 4^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}}$ и широтой $\varphi = 56°50'$(Екатеринбург, Россия). Выше был проведен расчет летнего декретного времени в момент истинного полудня на долготе Екатеринбурга.

3 Специфика наблюдений Солнца как астрономического объекта. Порядок наблюдений

В период летней практики студенты 1 курса впервые знакомятся с типичным астрономическим наблюдением, которое связано с регистрацией характерных положений движущегося в поле зрения теодолита объекта, которым в данном случае является Солнце. Наблюдения носят учебный характер.

При наблюдениях используются теодолиты 4Т30П, для которых предварительно, в лабораторных условиях необходимо получить значения коллимационной погрешности, а также место нуля (обычно это делается за день до наблюдений). Кроме того, поскольку при наблюдениях Солнца будет необходимо фиксировать моменты времени, в которые Солнце занимает определенное положение относительно горизонта, необходимы также часы, имеющие *обязательно* секундную стрелку.

Перед наблюдениями необходимо внимательно изучить журнал наблюдений и разобраться с порядком его заполнения.

Последовательность действий при проведении наблюдений:

а) Установить инструмент и провести его горизонтирование.

б) Выбрать на местности характерный предмет, который должен обеспечивать уверенную привязку: легко отождествляется в малом поле зрения прибора и является, по возможности, уникальным на местности и неподвижным (по этой причине не подходят углы зданий и окон, телевизионные антенны, деревья, объекты, которые могут изменить свое положение за время наблюдений). Азимут направления на выбранный предмет будет определен в результате проведенных наблюдений.

в) Зафиксировать в журнале наблюдений расположение предмета относительно Солнца. Желательно также указать примерное направление на точку юга.

г) Получить отсчеты горизонтального и вертикального кругов *при круге право* на земной предмет и записать их в журнал наблюдений. Затем получить и записать в журнал наблюдений отсчеты горизонтального и вертикального кругов на земной предмет при *круге лево*.

д) После этого теодолит используют при *круге лево* для проведений наблюдения Солнца. *Необходимо установить на окулярном конце трубы темный солнечный фильтр*, в также насадку на окуляр микрометра, которая облегчает снятие отчетов микрометра при больших значениях высоты.

Далее представлена методика астрометрического наблюдения Солнца, позволяющая получить азимут направления на земной объект с удовлетворительной точностью.

Вследствие больших угловых размеров солнечного диска практически невозможно выполнить уверенное наведение на его центр. По этой причине при наблюдениях наведение выполняют на один из избранных краев диска Солнца, для которого и фиксируются все отсчеты и момент времени. На рисунке 4.2 показано положение светила на небесной сфере до (I) и после (II) кульминации. Также показана плоскость горизонта и небесного экватора, указаны основные направления.

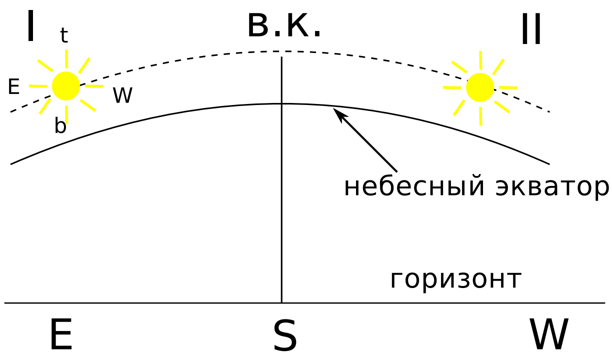


Рисунок 4.2 – Видимое движение Солнца и отождествление краев направления.

Видимое суточное движение Солнца происходит с востока за запад, поэтому, как видно из рисунка, западный край Солнца находится ближе к меридиану и раньше его проходит, чем восточный край. Отождествление краев Солнца в поле зрения теодолита будет зависеть от того, дает ли инструмент перевернутое изображение или прямое. Обычно такая информация указывается в технической документации к прибору, а также следует из его маркировки (буква "П" в названии теодолита явно указывает на то, что изображение "прямое"). Также это можно определить по картине движения солнечного диска в поле зрения: при прямом изображении оно будет таким же, как и видимое движение на небе. При прямом изображении также легко отождествить верхний и нижний края диска Солнца. Однако при сомнениях можно провести следующую проверку (до или после наблюдений): зафиксировать на центральной горизонтальной нити последовательно нижний видимый край диска, центр диска (примерно) и верхний видимый край диска и снять отсчеты *только* вертикального круга. На рисунке 4.3 показаны 3 положения диска Солнца в поле зрения прибора:

Проведено три измерения:

а) — *видимый верхний* край диска на горизонтальной нити, снят отсчет h_1;

б) — центр диска на горизонтальной нити, снят отсчет h_2;

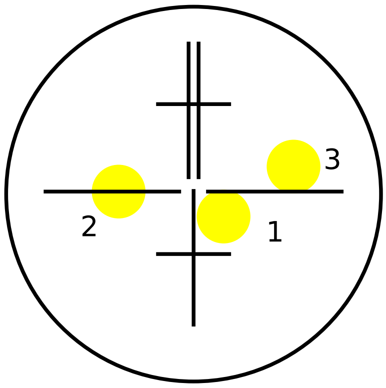


Рисунок 4.3 – Отождествление нижнего и верхнего краев диска Солнца

в) — *видимый нижний* край диска на горизонтальной нити, снят отсчет h_3.

Совершенно очевидно, что $h_1 > h_2 > h_3$ в том случае, когда *видимый в поле зрения верхний край* диска является *действительно* верхним краем Солнца. На теодолитах, которые используются на практике, изображение прямое, поэтому такую проверку можно не проводить: видимый верхний край диска на самом деле является верхним. После отождествления краев диска Солнца можно приступать к выполнению программы наблюдений. Наблюдения проводятся в паре: один наблюдатель и один помощник. Порядок здесь следующий:

а) Используя имеющуюся эфемериду, приведите Солнце в поле зрения теодолита. Нужно помнить, что изображение Солнца очень подвижно. При установленном солнечном фильтре сетку нитей видно только на диске Солнца. Необходимо провести просмотр поля зрения и установить, как солнечный диск расположен относительно бисектора и центра сетки нитей. Регистрацию избранного края диска проводят в квадрантах с одиночными нитями.

б) Подведите отождествленный край солнечного диска (верхний или нижний) к горизонтальной нити и старайтесь удерживать его на этой нити микрометренным винтом при вертикальном круге.

в) Как только избранный (восточный или западный) край диска коснется вертикальной нити, необходимо зафиксировать момент времени, а затем снять отсчеты горизонтального и вертикального кругов, которые были в момент касания. Для максимально точной фиксации времени наблюдатель должен предупредить своего помощника заранее, когда край Солнца будет близок к вертикальной нити. После этого помощник должен внимательно следить за показаниями часов. В момент касания наблюдатель подает голосовую команду, а помощник фиксирует момент времени в журнал наблюдений. Затем нужно снять отсчеты горизонтального и вертикального круга. Микрометренные винты после фиксации времени трогать *нельзя*! Отсчеты записываются в журнал наблюдений. Кроме этого в журнале *обязательно* зарисовывается положение диска Солнца относительно сетки нитей. Это будет необходимо в дальнейшем при проведении обработки результатов измерений.

г) Затем все 3 операции повторяются снова. Каждый студент должен снять не менее 4 измерений самостоятельно.

После завершения программы наблюдений Солнца (каждый из студентов в группе получил не менее 4 измерений), нужно снова навестись на земной предмет (тот же самый, который был выбран в начале наблюдений) и снять отсчеты горизонтального и вертикального кругов при *круге лево*, а *затем* при *круге право*.

В Приложении Е приведен пример правильно заполненного журнала наблюдений.

4 Обработка результатов измерений. Определение астрономического азимута направления на избранный земной объект

При проведении обработки результатов измерений все промежуточные расчеты удобно хранить в табличном виде. В Приложении Ж приведены таблицы, содержащие результаты обработки измерений из журнала наблюдений Приложения Е. Ниже представлен порядок обработки результатов наблюдения Солнца.

а) По отсчетам вертикального круга (ВК) и горизонтального круга (ГК) на земной предмет вычислить коллимацию (с), место нуля (М0) и место зенита (MZ) по следующим формулам:

$$M0 = \frac{1}{2}\left(\text{КЛ} + \text{КП}\right),$$

$$c = \frac{1}{4}\left[(\text{КЛ}_1 + \text{КП}_1 \pm 180) + (\text{КЛ}_2 + \text{КП}_2 \pm 180)\right],$$

$$MZ = 90 + M0.$$

Полученные значения записать в журнал наблюдений.

б) По отсчетам горизонтального круга (ГК) на земной предмет при круге лево (КЛ) вычислить средний отсчет на земной предмет $\overline{B}_M$.

в) Необходимо совершить переход от отсчетов по вертикальному кругу (ВК) при круге лево (КЛ) на Солнце к зенитным расстояниям соответствующего края солнечного диска:

$$z_{\text{изм}} = MZ - \text{КЛ}.$$

г) Поскольку для определения азимута Солнца требуется знать истинное геоцентрическое зенитное расстояние центра диска Солнца $z_{\odot}$, то полученные из наблюдений зенитные расстояния исправляются за радиус Солнца. Значение радиуса Солнца приводится в Астрономическом ежегоднике на каждый день года в таблице "Солнце" в столбце "Видимый радиус".

Переход к геоцентрическому зенитному расстоянию зависит от того, какой край Солнца — нижний или верхний — измерялся при наблюдениях. Из рисунка 4.4 следует, что

$$z_{\odot} = z_{\text{н.кр.}} - R_{\odot} \quad \text{при измерениях нижнего края Солнца}$$

$$z_{\odot} = z_{\text{в.кр.}} + R_{\odot} \quad \text{при измерениях верхнего края Солнца}$$

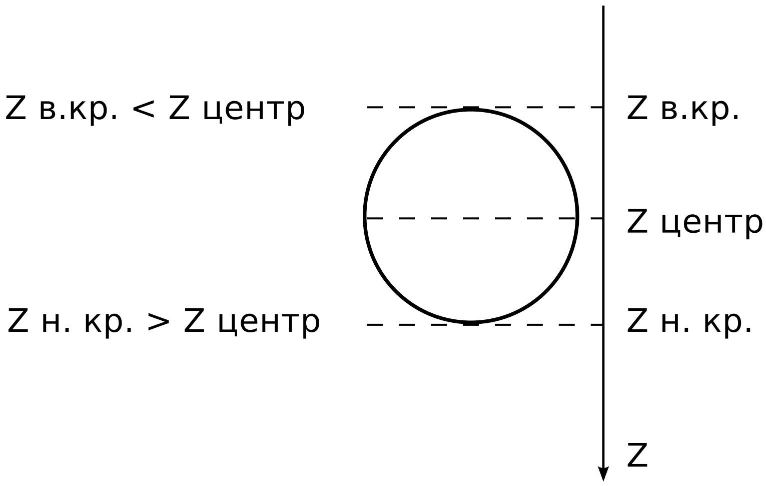


Рисунок 4.4 – Истинное геоцентрическое зенитное расстояние центра диска Солнца

д) Измеренное зенитное расстояние центра диска Солнца нужно исправить за влияние рефракции, которая, как известно, "приподнимает" видимое изображение объекта на небе. В результате видимое зенитное расстояние будет меньше истинного зенитного расстояния, которое имел бы центр диска Солнца, если бы явление рефракции отсутствовало, т.е. $z_{\odot}^{\text{вид}} < z_{\odot}^{\text{ист}}$. Следовательно,

$$z_{\odot}^{\text{ист}} = z_{\odot}^{\text{вид}} + \rho,$$

где $z_{\odot}^{\text{вид}}$ — значения зенитного расстояния центра диска Солнца, полученные на предыдущем шаге, а ρ — поправка за рефракцию.

Поправка за рефракцию зависит от зенитного расстояния, температуры и давления. Значение поправки вычисляется путем линейной интерполяции по таблице Астрономического ежегодника "Средняя рефракция, точность 1″". В Приложении М приводится пример такого вычисления.

е) Для вычисления азимута Солнца по формуле сферического треугольника необходимо знать видимое склонение Солнца на дату и момент наблюдения. В качестве момента наблюдения используется средний по времени момент измерений высоты Солнца по данным журнала наблюдений:

$$\overline{T}_{\text{д.л.}} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n} T_{\text{д.л.}}}{n}, \quad \text{где n=4}$$

Видимое склонение Солнца для момента времени $\overline{T}_{\text{д.л.}}$ вычисляется при помощи нелинейной интерполяции по формуле:

$$f(t) = f(t_0) + V_0(t - t_0) + \frac{(t - t_0)^2}{2!} \frac{(V_1 - V_0)}{24},$$

где $f(t_0)$ — значение склонения Солнца из "Астрономического ежегодника" (таблица "Солнце") на дату наблюдения для момента времени $t_0 = 0^{\text{h}}$ TT; t — момент времени, для которого необходимо получить значение склонения Солнца, приведенный к шкале TT; V_0 — часовое изменение склонения Солнца на дату наблюдений, V_1 — часовое изменение склонения Солнца на следующий день (оба значения берутся из таблицы "Солнце" Астрономического ежегодника). Чтобы представить средний момент времени наблюдений $\overline{T}_{\text{д.л.}}$ в шкале времени TT, нужно привести его к UT, а затем учесть разницу между шкалами UT и TT:

$$TDT = \overline{T}_{\text{д.л.}} - N - \Delta T(A),$$

где N — номер часового пояса (начиная с 2011 года N=6 для Екатеринбурга), $\Delta T(A) = 67^{\text{s}}$ на 2011 год (значение этой поправки на каждый год дается в ежегоднике). Задача вычисления видимого склонения Солнца рассмотрена выше.

ж) Азимут Солнца вычисляется по формуле:

$$\cos A_{\odot} = \frac{\sin\varphi \cos z_{\odot}^{\text{ист}} - \sin\delta_{\odot}}{\cos\varphi \sin z_{\odot}^{\text{ист}}},$$

где φ — широта места наблюдения. Для Екатеринбурга $\varphi = 56°49'$. При вычислении азимутов Солнца нужно помнить, что астрономический азимут отсчитывается от точки юга S, и при наблюдении Солнца в утренние часы до полудня астрономический азимут Солнца должен увеличиваться при возрастании высоты Солнца (зенитное расстояние при этом уменьшается) и быть приблизительно равным 280°–360°!

и) Следующий этап обработки результатов измерений — приведение отсчетов горизонтального круга края диска Солнца (восточного или западного) к центру диска Солнца. Проекция углового радиуса Солнца на горизонтальный круг теодолита зависит от зенитного расстояния, поэтому поправка за радиус Солнца вычисляется по формуле:

$$\Delta B_R = \frac{R_{\odot}}{\sin z_{\odot}^{\text{ист}}}$$

к) На рисунке 4.5 показаны отсчеты на края диска Солнца B_E (восточный) и B_W (западный) на шкале горизонтального круга теодолита, а также отсчет на центр диска Солнца B_c. Стрелкой показано направление возрастания отсчетов (отсчеты возрастают в направлении видимого суточного движения Солнца). Стрелка сверху показывает направление видимого движения Солнца на небесной сфере — с востока на запад. Если видимое в трубе теодолита движение Солнца совпадает по направлению с видимым движением на небесной сфере, то западный край первым касается вертикальной нити. Из рисунка видно, что отсчет на центр диска Солнца связан с отсчетами на его края следующим образом:

$$B_\odot = B_W - \Delta B_R \quad \text{при измерениях западного края Солнца}$$

$$B_\odot = B_E + \Delta B_R \quad \text{при измерениях восточного края Солнца}$$

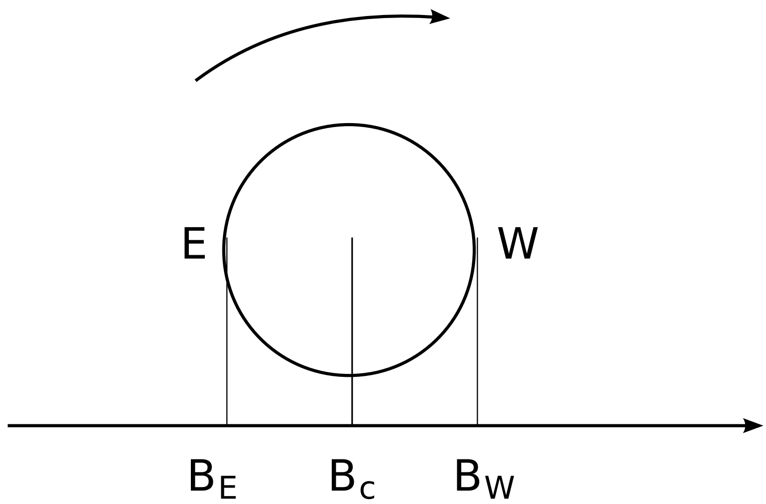


Рисунок 4.5 – Отсчет горизонтального круга на центр диска Солнца

л) Вычисление угла Δ между направлением на земной предмет и на Солнце по отсчетам горизонтального круга на центр диска Солнца $B_\odot$ и среднему отсчету горизонтального круга на земной предмет $\overline{B}_M$. При вычислении этого угла важно помнить, что на значение угла влияет расположение земного предмета относительно Солнца. Если предмет был расположен западнее Солнца (т.е. ближе к точке юга S), то значение угла будет уменьшаться при увеличении азимута Солнца. Если же предмет был расположен восточнее Солнца, то значение этого угла будет возрастать при увеличении азимутов Солнца. Для понимания данного заключения следует обратиться к рисунку 4.6.

На рисунке 4.6 случай **I)** соответствует ситуации, когда земной предмет расположен восточнее диска Солнца, поэтому при движении Солнца к точке юга S, его астрономический азимут будет возрастать, а следовательно угол Δ будет увеличиваться. Величину этого угла при

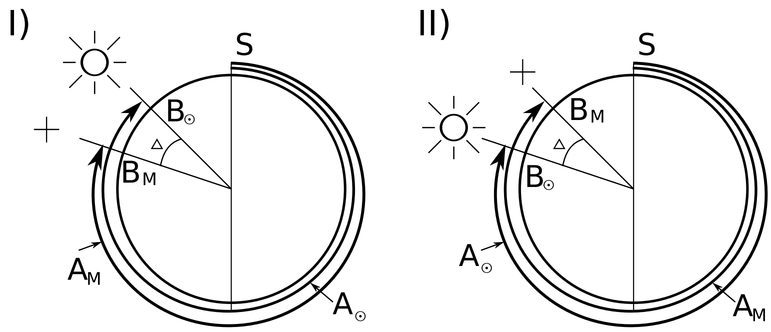


Рисунок 4.6 – Определение угла между направлением на земной предмет и на Солнце. Определение азимута направления на земной предмет

таком расположении Солнца и предмета можно вычислить по известным отсчетам горизонтального круга на Солнце и на предмет:

$$\Delta = B_\odot - \overline{B}_M$$

Случай **II)** на рисунке 4.6 соответствует ситуации, когда земной предмет лежит западнее Солнца. В этом случае очевидно, что величина угла Δ будет уменьшаться при увеличении азимута Солнца. Тогда угол можно вычислить по соотношению:

$$\Delta = \overline{B}_M - B_\odot$$

Важно помнить, что отсчеты горизонтального круга возрастают в направлении суточного видимого движения Солнца, поэтому в случае **I)** отсчет на Солнце должен быть больше отсчета на земной предмет, а в случае **II)** наоборот — отсчет на земной предмет всегда больше отсчета на Солнце. Поэтому если при вычислениях угол Δ меняет знак, то при наблюдениях произошло изменение положения Солнца относительно земного предмета.

м) Вычисление азимута направления на земной предмет — заключительный шаг обработки результатов измерений. Здесь, как и предыдущем случае, расчет будет зависеть от положения земного предмета относительно Солнца. На рисунке 4.6 показаны два варианта положения земного предмета относительно Солнца — восточнее и западнее — при утренних наблюдениях до верхней кульминации Солнца. В случае **I)** азимут направления на земной объект будет равен:

$$A_M = A_\odot - \Delta,$$

а для случая **II)**:

$$A_M = A_\odot + \Delta$$

следует помнить, что при наблюдениях до полудня азимуты Солнца будут примерно равны 280°–360°. Если при этом угол Δ невелик, азимут направления на земной предмет также будет иметь значение вблизи 280°–360°.

После вычисления всех значений азимута земного направления каждая группа, проводившая измерения, должна вычислить среднее для группы значение азимута $\overline{A}_M$ и среднеквадратичную ошибку отдельного измерения. Среднеквадратичная ошибка одного измерения вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = \pm\sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{n}(\overline{A}_M - A_M^i)^2}{n-1}},$$

где n — число измерений, сделанных группой.

При аккуратных измерениях высот и азимутов Солнца, а также аккуратных расчетах можно добиться точности определения азимута направления на земной предмет до $4'$–$5'$.

Тема 5

Звездные каталоги и астрономические ежегодники. Определение точных координат звезд на дату и момент наблюдения. Средние и видимые места звезд

1 Изменения координат звезд. Средние и видимые места

При рассмотрении соотношений сферической астрономии предполагают, что координаты звезд во второй экваториальной и эклиптической системах координат остаются неизменными во времени, меняясь в первой экваториальной и горизонтальной системах координат из-за суточного вращения Земли. Однако из наблюдений небесных объектов со всей очевидностью следует, что все небесные координаты подвержены изменениям, причинами которых являются механизмы различной природы. Эти изменения гораздо меньше по величине и медленнее, чем обусловленные суточным вращением Земли, и могут быть учтены с определенной степенью точности на основе определенных физических моделей, описывающих порождающие их явления. Изменения координат небесных светил происходят из-за следующих причин:

а) Смещения используемых систем отсчета относительно звезд как небесных реперов (прецессия и нутация) и относительно тела Земли (движение земных полюсов).

б) Кажущихся изменений в направлениях на звезды, обусловленных физическими явлениями (рефракция, аберрация, параллакс).

в) Относительных движений звезд в пространстве (собственные движения).

Каждая группа изменений объединена на основе общих факторов и способов учета в координатах. В лекционном курсе подробно рассматриваются теоретические основы учета изменений координат, поэтому в рамках практических занятий на этом нет нужды останавливаться.

Звездные каталоги и астрономические ежегодники, которые студенты неоднократно используют в рамках практического курса по сферической астрономии, содержат уникальную позиционную информацию о координатах звезд и их изменении. Как указано выше, прецессия земной оси (с периодом 25800 лет) вызывает изменения экваториальных и эклиптических координат светил. Такие изменения называют вековыми. *Положения* полюса мира, экватора и точки весеннего равноденствия, обусловленные прецессией, называют *средними.* Система отсчета координат, связанная с положением среднего полюса, экватора и точки весеннего равноденствия в избранную эпоху, используется в звездных каталогах. Поэтому и *координаты* звезд, публикуемые в звездных каталогах, называются *средними.* В этих координатах учтена прецессия на фиксированном интервале времени, определяемом разностью эпох, и конечно, в звездных каталогах указано собственное движение звезд по каждой координате как индивидуальном параметре звезд. Прецессия не влияет на взаимное расположение звезд в созвездиях, но при значительной разности эпох существенно сказывается на нуль-пункте отсчета экваториальных координат. Задание эпохи позволяет зафиксировать в пространстве положение основных направление и плоскостей, используемых при определении координат звезд соответствующей эпохи.

В XX столетии астрономы пользовались средними координатами, которые были отнесены к равноденствию 1950,0 года. Однако к началу XXI столетия на основе наблюдений, выполненных с помощью космического астрометрического телескопа, удалось создать новые каталоги положений для большого числа звезд, отнесенных к равноденствию 2000,0 года. При этом также были определены и уточнены собственные движения звезд путем использования результатов крупного международного проекта "Carte de Ciel" ("Карта неба"), осуществление которого было начато более 100 лет назад. На основе совокупности средних мест достаточно большого числа звезд создается опорная сеть астрономических координат соответствующей эпохи.

Средние координаты используются при составлении эфемерид для всевозможных наблюдательных программ, прогнозировании условий наблюдений светил в различных пунктах Земли, отождествлении звезд на ПЗС кадрах. Кроме того, средние места звезд необходимы для вычисления видимых мест звезд, в которых помимо прецессии должны быть учтены изменения координат из-за нутации (периодом 18,6 лет) и годичной аберрации.

В период учебной практики студенты неоднократно обращаются к списку звезд, для которого в Астрономическом ежегоднике даны средние места звезд. В Приложении А приведен для примера фрагмент такого списка. При сравнении средних координат звезд, полученных для разных эпох, можно легко увидеть, как сильно сказывается на значении координат прецессия земной оси. Например, в таблице приведен пример средних координат звезды α Boo для эпох 1950,0 и 2000,0 годов.

Эпоха	α	Годичное изменение	δ	Годичное изменение
1950,0	$14^h13^m22.74^s$	$+2.736^s$	$+19°26'31.0''$	$-18.746''$
2000,0	$14^h15^m39.672^s$	$+2.738^s$	$+19°10'56.67''$	$-18,694''$

Пользуясь годичными изменениями координат, определяют координаты звезд для других звезд, учитывая разность эпох (T-T_0) в годах, где T_0 — эпоха исходного каталога.

Эфемеридой звезды, обеспечивающей получение ее точных координат на дату и момент наблюдения в пункте с известной долготой, является таблица "Видимые места звезд" Астрономического ежегодника. В Приложении И приведен фрагмент этой таблицы. Такую эфемериду публикуют в ежегоднике каждый год для большого числа звезд. В этой эфемериде учтены изменения координат не только из-за прецессии и собственного движения, но из-за нутации и годичной аберрации. При помощи этой эфемериды можно получить "мгновенные" значения экваториальных координат светил на момент их наблюдения. Видимые координаты светил всегда используют при обработке результатов измерений в любых астрономо-геодезических наблюдениях.

Физическим моментом времени при фиксации точных видимых координат звезды в ежегоднике является момент ее верхней кульминации на меридиане Гринвича. Даты в эфемериде даны с дробной частью, которая позволяет примерно оценить среднее время в долях суток для времени кульминации (т.е. происходит она утром, днем, вечером или ночью).

2 Определение точных видимых координат звезд в момент верхней кульминации

Рассмотрим конкретную практическую задачу определения точных видимых координат звезд на момент наблюдения в пункте с известной долготой для момента верхней кульминации.

Условие задачи: Определить точные видимые координаты звезды κ Cep (№ 493) 18 апреля 2011 года в пункте с долготой $\lambda = 4^{\rm h}02^{\rm m}32^{\rm s}$ (Екатеринбург).

Решение: Из эфемериды "Видимые места звезд" нужно выписать для выбранной звезды ближайшие по дате моменты времени, а также видимые экваториальные координаты $\alpha_{\text{вид}}$ и $\delta_{\text{вид}}$. Удобно занести данные в таблицу

Дата, доли суток	$\alpha_{\text{вид}}$	$\delta_{\text{вид}}$
апрель, $15^{\rm d}.3$	$20^{\rm h}08^{\rm m}28^{\rm s}.094$	$+77°44'25''.24$
	$+1^{\rm s}.050$	$+0''.34$
апрель, $25^{\rm d}.2$	$20^{\rm h}08^{\rm m}29^{\rm s}.150$	$+77°44'25''.58$

В таблице приведены также изменения координат за протекший период времени: как видно, координаты возрастают.

Для решения задачи в первую очередь необходимо определить, в какое время суток произошла верхняя кульминация выбранной звезды на меридиане Гринвича 18 апреля. Для этого используется простая линейная интерполяция, где в качестве значений аргументов выступают календарные даты (в данном случае 15, 18 и 25 апреля), а в качестве значений функций — дата с долями суток (в данном случае это 15.3 и 25.2). Итак,

$$f(x) = 15.3 + \frac{25.2 - 15.3}{25 - 15}(18 - 15) = 15.3 + \frac{9.9}{10} * 3 = 18.27,$$

т.е. 18 апреля верхняя кульминация звезды на меридиане Гринвича произошла в момент времени $18^{\rm d}.27$. На меридиане с долготой $\lambda = 4^{\rm h}02^{\rm m}32^{\rm s}$ верхняя кульминация звезды происходит раньше на λ^{h}, поскольку данный меридиан лежит восточнее гринвичского. По этой причине 18 апреля верхняя кульминация звезды на меридиане с долготой λ^{h} происходит в момент времени:

$$18^{\mathrm{d}}.27 - 4^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}} = 18^{\mathrm{d}}.27 - 0^{\mathrm{d}}.168 = 18^{\mathrm{d}}.102$$

Теперь известны 3 момента времени в апреле, когда происходили верхние кульминации выбранной звезды: $15^{\mathrm{d}}.3$, $18^{\mathrm{d}}.102$ и $25^{\mathrm{d}}.2$. Для двух из этих моментов известны также точные видимые координаты. Используя простую линейную интерполяцию, можно теперь найти видимые координаты звезды, которые она имела в момент времени $18^{\mathrm{d}}.102$.

Прямое восхождение:

$$\begin{aligned} f(x) &= 20^{\mathrm{h}}08^{\mathrm{m}}28^{\mathrm{s}}.094 + \frac{20^{\mathrm{h}}08^{\mathrm{m}}29^{\mathrm{s}}.150 - 20^{\mathrm{h}}08^{\mathrm{m}}28^{\mathrm{s}}.094}{25^{\mathrm{d}}.2 - 15^{\mathrm{d}}.3}(18^{\mathrm{d}}.102 - 15^{\mathrm{d}}.3) = \\ &= 20^{\mathrm{h}}08^{\mathrm{m}}28^{\mathrm{s}}.094 + \frac{+1^{\mathrm{s}}.050}{9^{\mathrm{d}}.9} * 2^{\mathrm{d}}.802 = 20^{\mathrm{h}}08^{\mathrm{m}}28^{\mathrm{s}}.094 + 0^{\mathrm{s}}.297 = \underline{20^{\mathrm{h}}08^{\mathrm{m}}28^{\mathrm{s}}.391} \end{aligned}$$

Склонение:

$$\begin{aligned} f(x) &= +77^\circ44'25''.24 + \frac{77^\circ44'25''.58 - 77^\circ44'25''.24}{25^{\mathrm{d}}.2 - 15^{\mathrm{d}}.3}(18^{\mathrm{d}}.102 - 15^{\mathrm{d}}.3) = \\ &= +77^\circ44'25''.24 + \frac{0''.34}{9^{\mathrm{d}}.9} * 2^{\mathrm{d}}.802 = +77^\circ44'25''.24 + 0.''096 = \underline{+77^\circ44'25''.356} \end{aligned}$$

Таким образом, точные видимые координаты звезды κ Cep в момент ее верхней кульминации в пункте с долготой $\lambda = 4^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}}$ имели следующие значения: $\alpha_{\text{вид}} = 20^{\mathrm{h}}08^{\mathrm{m}}28^{\mathrm{s}}.391$ и $\delta_{\text{вид}} = +77^\circ44'25''.356$.

Тема 6

Определение звездного и среднего времени на момент наблюдения. Связь шкал звездного и среднего времени

1 Звездные и средние солнечные сутки

Звездное время, как известно, является чисто астрономическим временем. Оно играет важнейшую роль при планировании и проведении астрономических наблюдений. Зная звездное время, можно легко определить вид звездного неба и положение того или иного объекта относительно меридиана. Также известно, что *звездные сутки* — это промежуток времени между двумя одноименными кульминациями (верхними) избранного объекта (точки весеннего равноденствия) на избранном меридиане. Звездные сутки обеспечивают, таким образом, определение реального периода и скорости вращения Земли вокруг своей оси. Другими словами, только периодом обращения Земли вокруг своей оси и определяется продолжительность звездных суток.

В повседневной жизни, однако, звездные сутки не используются, поскольку они никак не связаны со сменой времени суток. В обычной жизни используется солнечное время, течение которого связано со сменой дня и ночи и с основным жизненным ритмом всего человечества — солнечными сутками. По аналогии со звездными сутками, *солнечные сутки* — это промежуток времени между двумя одноименными (нижними) кульминациями Солнца на избранном меридиане. Однако продолжительность солнечных суток определяется не только периодом вращения Земли вокруг своей оси, но также и с движением Земли по орбите вокруг Солнца. На сколько за солнечные сутки (за 24^{h}) смещается Земля на орбите? Это легко определить из следующей пропорции:

$$\text{за } 1^{\mathrm{d}} \text{ Земля смещается на } x^\circ$$

$$\text{за } 365^{\mathrm{d}}.2422 \text{ Земля смещается на } 360^\circ$$

т.е. $x = 0^\circ.985647 \approx 1^\circ$ Орбитальное движение Земли проявляется в том, что ежесуточно видимое положение Солнца изменяется: оно окажется восточнее своего положения в предыдущие сутки примерно на 1°. Это значит, что для наступления очередной кульминации Солнца на любом избранном меридиане Земле необходимо повернуться вокруг своей оси еще приблизительно на 1° по сравнению с повторной кульминацией звезд на этом же меридиане. По этой причине солнечные сутки продолжительнее звездных. Сколько времени требуется для этого поворота? Это также легко определить, если вспомнить, что 1^{h} соответствует 15°. Для поворота вокруг своей оси на $0^\circ.985647$ необходимо $3^{\mathrm{m}}56.5^{\mathrm{s}}$! Таким образом, солнечные сутки длиннее звездных на $3^{\mathrm{m}}56.5^{\mathrm{s}}$. За один тропический год[1] эта разница составит практически 24^{h}, т.е. в одном тропическом году

[1] период времени, за который Земля совершает полный оборот по своей орбите

средних солнечных суток $365^{d.2422}.2422$, а звездных — $366^{d.2422}.2422$.

Различие шкал звездного и солнечного времени приводит к изменению вида звездного неба в разные сезоны года. Эта разница качественно была рассмотрена в первой теме.

2 Перевод временных интервалов из одних единиц в другие

Важной практической задачей является связь шкал звездного и солнечного времени. Как указано выше, шкала звездного времени смещается относительно шкалы среднего времени примерно на 4^{m} за сутки, поэтому встает вопрос, как определить звездное время для известного момента солнечного времени и наоборот.

Получим сначала соотношение между звездными и солнечными единицами времени из простейших пропорций.

$$\text{за } 365^{\mathrm{d}}.2422 \text{ солнечных суток пройдет } 366^{\mathrm{d}}.2422 \text{ звездных суток}$$

тогда

$$\text{за } 1^{\mathrm{d}} \text{ солнечных суток пройдет } x^{\mathrm{d}} \text{ звездных суток}$$

т.е. за 1 сутки, выраженные в солнечных единицах, звездных единиц времени пройдет

$$\frac{366^{\mathrm{d}}.2422}{365^{\mathrm{d}}.2422} = 1.002737909 \equiv (1 + 0.002737909) = (1 + \mu).$$

Тогда интервал времени Δm, выраженный в солнечных единицах, будет соответствовать интервалу ΔS в звездных единицах времени, который равен

$$\Delta S = (1 + \mu)\Delta m.$$

Совершенно аналогично можно найти и обратное соотношение: за 1 сутки, выраженные в звездных единицах, солнечных единиц времени пройдет

$$\frac{365^{\mathrm{d}}.2422}{366^{\mathrm{d}}.2422} = 0.997269566 \equiv (1 - 0.002730434) = (1 - \nu).$$

Тогда интервал времени ΔS, выраженный в звездных единицах, будет соответствовать интервалу Δm в солнечных единицах времени, который равен:

$$\Delta m = (1 - \nu)\Delta S.$$

Для удобства в Астрономическом ежегоднике содержатся специальные таблицы по переводу звездных единиц в солнечные и обратно: это таблицы "Перевод среднего времени в звездное (с точностью до $0^{\mathrm{s}}.01$)" и "Перевод звездного времени в солнечное (с точностью до $0^{\mathrm{s}}.01$)". Эти таблицы не изменяются с течением времени, но публикуются в ежегоднике каждый год. В Приложении К приведен пример одной из этих таблиц. В главной части этих таблиц (первые 5 столбцов) даются поправки к тем интервалам времени, для которых значения этих поправок составляют целые минуты и секунды (значения минут указаны с верхней строке: 0^{m}, 1^{m}, 2^{m}, 3^{m}; значения секунд — в первом столбце: от 0^{s} до 59^{s}). в остальных столбцах (с 6 по 9) содержится аддитивная часть поправки для тех интервалов времени, для которых эта поправка не превышает 1 секунды.

2.1 Пример перевода интервалов среднего времени в интервалы звездного времени

Рассмотрим практическую задачу по переводу средних единиц времени в звездные при помощи соответствующей таблицы ежегодника.

Условие задачи: Дан интервал солнечного времени Δm, равный $18^{\mathrm{h}}24^{\mathrm{m}}35^{\mathrm{s}}$. Найти соответствующий ему интервал времени ΔS в звездных единицах.

Решение: Для решения этой задачи нужно использовать таблицу "Перевод среднего времени в звездное (точность до $0^{\mathrm{s}}.01$)".

Как известно, $\Delta S = (1+\mu)\Delta m$. Можно представить интервал Δm следующим образом:

$$\Delta m = \Delta m_t + \delta\Delta m,$$

где Δm_t — интервал среднего времени, присутствующий в таблице "Перевод среднего времени в звездное (точность до $0^{\mathrm{s}}.01$)", а $\delta\Delta m$ — фактически разница между данным нам интервалом Δm и табличным интервалом Δm_t. Тогда

$$\Delta S = \Delta m + \mu(\Delta m_t + \delta\Delta m) = \Delta m + \mu\Delta m_t + \mu\delta\Delta m,$$

где $\mu\Delta m_t$ — поправка для интервала Δm_t, ее значение непосредственно содержится в таблице, а $\mu\delta\Delta m$ — аддитивная поправка к разнице между интервалом Δm и табличным интервалом Δm_t, ее значение в общем случае получается по данным таблицы при помощи линейной интерполяции. Далее приведен порядок решения:

а) Сначала нужно найти в первой части таблицы (столбцы со 2 по 5) ближайший меньший к заданному значению интервал времени Δm_t. В данном случае этот интервал равен $18^{\mathrm{h}}21^{\mathrm{m}}49^{\mathrm{s}}$. Поправка для него $\mu\Delta m_t$ равна $3^{\mathrm{m}}01^{\mathrm{s}}$.

б) Разность между интервалом времени, данным по условию задачи, и табличным будет равна:

$$\delta\Delta m = 18^{\mathrm{h}}24^{\mathrm{m}}35^{\mathrm{s}} - 18^{\mathrm{h}}21^{\mathrm{m}}49^{\mathrm{s}} = 2^{\mathrm{m}}46^{\mathrm{s}}$$

в) Используя данные из столбцов с 6 по 9 нужно найти поправку $\mu\delta\Delta m$ к этому оставшемуся интервалу. В 6 столбце содержатся два близких интервала: $2^{\mathrm{m}}44^{\mathrm{s}}$ и $2^{\mathrm{m}}48^{\mathrm{s}}$, а в столбце 7 поправки к этим интервалам: $0^{\mathrm{s}}.44$ и $0^{\mathrm{s}}.45$ соответственно. При помощи линейной интерполяции легко определить, что поправка к интервалу $2^{\mathrm{m}}46^{\mathrm{s}}$ будет равна $0^{\mathrm{s}}.445$.

г) Следовательно суммарная поправка для интервала солнечного времени будет равна

$$3^{\mathrm{m}}01^{\mathrm{s}} + 0^{\mathrm{s}}.445 = 3^{\mathrm{m}}01^{\mathrm{s}}.445.$$

д) Значение этой поправки *прибавляется* к интервалу времени в средних единицах для того, чтобы получить интервал времени в звездных единицах:

$$18^{\mathrm{h}}24^{\mathrm{m}}35^{\mathrm{s}} + 3^{\mathrm{m}}01^{\mathrm{s}}.445 = 18^{\mathrm{h}}27^{\mathrm{m}}36^{\mathrm{s}}.445.$$

Таким образом, интервалу времени $18^{\mathrm{h}}24^{\mathrm{m}}35^{\mathrm{s}}$ в средних единицах соответствует интервал $18^{\mathrm{h}}27^{\mathrm{m}}36^{\mathrm{s}}.445$ в звездных единицах.

Совершенно аналогично решается обратная задача: перевод интервалов, выраженных в звездных единицах, в соответствующие интервалы в средних единицах времени.

3 Связь шкал среднего и звездного времени

Различие одноименных единиц времени в различных шкалах приводит в непрерывному смещению шкалы звездного времени относительно солнечного. Как уже было указано, за сутки это смещение составляет приблизительно $3^{\mathrm{m}}56^{\mathrm{s}}.55$, а за год — приблизительно 24^{h}. В результате звездное время в одни и те же моменты солнечного времени в разные дни года различно, что, например, приводит к изменению условий видимости звезд. Для того, чтобы в любой день года в заданный момент среднего времени определять момент звездного времени или же наоборот в заданный момент звездного времени определять момент среднего времени, необходимо связать две временные шкалы между собой. На рисунке 6.1 представлены две шкалы времени для некоторого меридиана.

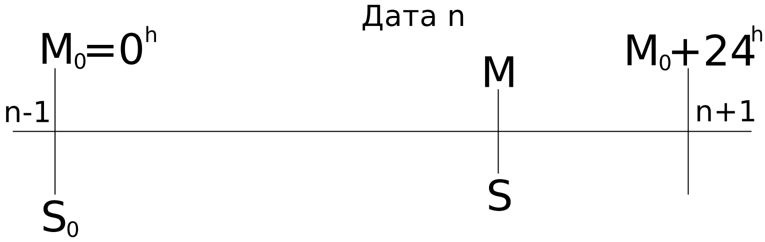


Рисунок 6.1 – Связь шкал среднего и звездного времени

Верхняя часть — шкала среднего времени, на которой показаны три даты: $(n-1)$, n и $(n+1)$. Как видно, смена даты происходит в момент $\mathrm{M}_0 = 0^{\mathrm{h}}$ по среднему времени (полночь на данном меридиане), а следующая — в момент $\mathrm{M}_0 + 24^{\mathrm{h}}$ по среднему времени. Внутри даты n показан также произвольно выбранный момент времени M. Нижняя часть шкалы — шкала звездного времени. За S_0 обозначен момент звездного времени, который был в момент среднего времени $\mathrm{M}_0^{\mathrm{h}}$, т.е. в полночь. Символом S обозначен момент звездного времени, когда среднее солнечное время было равно М. Было показано, что $\Delta S = 1.002737909\Delta m$. Тогда, пользуясь обозначениями рисунка 6.1, можно записать:

$$(S - S_0) = 1.002737909(M - M_0) \Rightarrow S = S_0 + 1.002737909(M - M_0).$$

Поскольку в качестве момента M_0 выбран момент смены суток, то $\mathrm{M}_0 = 0^{\mathrm{h}}$, следовательно

$$S = S_0 + 1.002737909M,$$

т.е. для заданного момента среднего времени можно определить момент звездного времени на избранном меридиане. Единственное неизвестное слагаемое в этом соотношении — S_0 — момент звездного времени в полночь на избранном меридиане. В Астрономическом ежегоднике в таблице "Звездное время" содержится значение S_0 в момент полуночи на гринвичском меридиане для каждого дня года. В этой таблице даны значения истинного и среднего звездного времени в момент полуночи на меридиане Гринвича. Средний момент звездного времени относится к среднему положению земного экватора, т.е. учитывает влияние вековой прецессии земной оси. Истинное значение звездного времени S_0 учитывает, кроме прецессии, еще и колебательные нутационные движения. В Приложении Л показан фрагмент таблицы "Звездное время".

Таким образом, в полученном соотношении, если применить его к меридиану Гринвича, не остается неизвестных слагаемых и для любого момента всемирного времени (среднее солнечное время меридиана Гринвича) можно определить значение звездного времени на гринвичском же меридиане. Полученное значение звездного времени может получиться больше 24^{h}. Это означает, что внутри рассматриваемой даты n произошла верхняя кульминация точки весеннего равноденствия, т.е. произошла смена звездных суток. В данном случае от полученного значения звездного времени S следует отнять 24^{h}. Переход к значению звездного времени достаточно прост. Ранее было введено понятие местного времени, которое может быть и звездным. В этом случае, по аналогии с солнечным временем, разность долгот равна разности времен, поэтому местное звездное время будет равно:

$$s_\lambda = S \pm \lambda.$$

Знак зависит от взаимного расположения меридиана с долготой λ и меридиана Гринвича.

Из рисунка 6.1 также можно получить соотношение для обратного перехода: по известному моменту звездного времени на Гринвиче определить момент среднего времени на Гринвиче (т.е. всемирное время). Действительно, $\Delta m = 0.997269566\Delta S$, тогда:

$$(M - M_0) = 0.997269566(S - S_0) \Rightarrow M = 0.997269566(S - S_0)$$

Здесь также нужно помнить, что внутри интервала $(S-S_0)$ могла произойти верхняя кульминация точки весеннего равноденствия. В этом случае значение $(S-S_0)$ будет отрицательно. Тогда среднее время определяется по соотношению:

$$(M - M_0) = 0.997269566(S - S_0 + 24^{\mathrm{h}}) \Rightarrow M = 0.997269566(S - S_0 + 24^{\mathrm{h}})$$

4 Типовые задачи

4.1 Определить местное звездное время в Екатеринбурге ($\lambda_1 = 4^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}}$) и во Владивостоке ($\lambda_2 = 8^{\mathrm{h}}47^{\mathrm{m}}36^{\mathrm{s}}$) на 3 августа 2011 года в момент, когда в Екатеринбурге $\mathrm{T}_{\text{ДЛ}} = 12^{\mathrm{h}}34^{\mathrm{m}}18^{\mathrm{s}}$. Какие звезды будут находится вблизи верхней кульминации в каждом из пунктов.

Решение: Для решения задачи необходимо воспользоваться соотношением, связывающем звездное и среднее время на гринвичском меридиане:

$$S = S_0 + 1.002737909M$$

Здесь в качестве среднего времени используется всемирное время, в то время как по условию задачи дан момент декретного летнего времени в Екатеринбурге. Нетрудно найти всемирное время:

$$M \equiv UT = T_{\text{ДЛ}} - N - 2^{\mathrm{h}} = 12^{\mathrm{h}}34^{\mathrm{m}}18^{\mathrm{s}} - 6^{\mathrm{h}} = 6^{\mathrm{h}}34^{\mathrm{m}}18^{\mathrm{s}}$$

Теперь нужно воспользоваться таблицей ”Звездное время” Астрономического ежегодника на 2011 год, чтобы узнать значение истинного звездного времени S_0 в гринвичскую полночь на нужную дату. Согласно данным ежегодника, 3 августа 2011 года $S_0 = 20^{\mathrm{h}}44^{\mathrm{m}}55^{\mathrm{s}}.7$. Именно таким был часовой угол истинной точки весеннего равноденствия в момент средней полуночи на начальном меридиане 3 августа 2011 года. Значение S_0, в частности, примерно характеризует время средних суток, когда происходит верхняя кульминация точки весеннего равноденствия на Гринвиче: если в полночь по среднему времени часовой угол точки Υ равен почти 21^{h}, то ее верхняя кульминация произойдет через 3 с небольшим часа по звездному времени, среднее солнечное время также будет примерно равно 3^{h}, т.е. точка Υ кульминирует в утренние часы.

Теперь можно вычислить звездное время. При расчете удобно перевести значение всемирного времени в доли часа: $UT = 6^{\mathrm{h}}.571666667$, тогда

$$S = S_0 + 1.002737909M = 20^{\mathrm{h}}44^{\mathrm{m}}55^{\mathrm{s}}.7 + 6^{\mathrm{h}}.571666667 * 1.002737909 =$$
$$= 20^{\mathrm{h}}44^{\mathrm{m}}55^{\mathrm{s}}.7 + 6^{\mathrm{h}}.589659292 = 20^{\mathrm{h}}44^{\mathrm{m}}55^{\mathrm{s}}.7 + 6^{\mathrm{h}}35^{\mathrm{m}}22^{\mathrm{s}}.8 = 27^{\mathrm{h}}20^{\mathrm{m}}18^{\mathrm{s}}.5$$

Поскольку выше было указано, что верхняя кульминация точки весеннего равноденствия (а следовательно происходит смена звездных суток) происходит по среднему времени примерно в 3 часа утра, то значение звездного времени получилось больше 24^{h}. Соответственно, чтобы учесть смену звездных суток, нужно вычесть из полученного значения 24^{h}. Таким образом, звездное время на меридиане Гринвича 3 августа 2011 года в момент среднего всемирного времени $6^{\mathrm{h}}34^{\mathrm{m}}18^{\mathrm{s}}$ было равно $3^{\mathrm{h}}20^{\mathrm{m}}18^{\mathrm{s}}.5$.

Местное звездное время связано со звездным временем начального меридиана следующим образом:

$$s_\lambda = S \pm \lambda$$

Поскольку оба меридиана лежат восточнее Гринвича, то местные звездные времена в заданных пунктах будут равны:

$$s_{\lambda_1} = 3^{\mathrm{h}}20^{\mathrm{m}}18^{\mathrm{s}}.5 + 4^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}} = 7^{\mathrm{h}}22^{\mathrm{m}}50^{\mathrm{s}}.5$$

и

$$s_{\lambda_2} = 3^{\mathrm{h}}20^{\mathrm{m}}18^{\mathrm{s}}.5 + 8^{\mathrm{h}}47^{\mathrm{m}}36^{\mathrm{s}} = 12^{\mathrm{h}}07^{\mathrm{m}}54^{\mathrm{s}}.5$$

Как известно, звездное время равно прямому восхождению звезды, когда та находится в верхней кульминации. По этой причине на меридиане Екатеринбурга вблизи верхней кульминации будут находится звезды с прямыми восхождениями $\alpha \approx 7^{\mathrm{h}}22^{\mathrm{m}}50^{\mathrm{s}}.5$ (звезды, входящие в созвездие Близнецов), а на меридиане Владивостока — звезды с прямыми восхождениями $\alpha \approx 12^{\mathrm{h}}07^{\mathrm{m}}54^{\mathrm{s}}.5$ (звезды созвездий Девы и Большой Медведицы).

4.2 Определить точное среднее время (местное, поясное) в момент верхней кульминации α Ori (№ 167) на меридиане $\lambda = 4^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}}$ (Екатеринбург) 1 августа и 16 января 2011 года. Можно ли наблюдать кульминацию этой звезды в каждую из дат?

Решение: Точное среднее время определяется с высокой точностью на основании определения точного звездного времени. Точное звездное время, в свою очередь, можно определить из наблюдений моментов верхних кульминаций звезд, для которых с высокой точностью известны прямые восхождения. Точное значение прямых восхождений — это, естественно, истинные прямые восхождения, содержащие в себе влияние прецессии, нутации и прочие эффекты, приводящие к изменению экваториальных координат звезд.

Таким образом, для определения точного звездного времени необходимо вычислить точное прямое восхождение звезды α Ori на заданную дату в момент ее верхней кульминации на меридиане Екатеринбурга. Задача определения точных видимых координат звезд была рассмотрена выше: необходимо воспользоваться таблицей "Видимые места звезд". Рассмотрим первую дату — 1 августа 2011 года. Согласно таблице видимых мест в момент верхней кульминации звезды на меридиане Гринвича ее прямое восхождение было равно:

Дата, доли суток	$\alpha_{\text{вид}}$
Июль, $23^{\mathrm{d}}.4$	$5^{\mathrm{h}}55^{\mathrm{m}}47^{\mathrm{s}}.884$
Август, $2^{\mathrm{d}}.4$	$5^{\mathrm{h}}55^{\mathrm{m}}48^{\mathrm{s}}.115$

Из данных понятно, что 1 августа верхняя кульминация звезды на меридиане Гринвича происходит в момент $1^{\mathrm{d}}.4$, а на меридиане Екатеринбурга — на λ^{h} раньше, т.е. в момент Август,

$1^{\mathrm{d}}.232$, а с учетом непрерывного счета времени без смены месяца — в момент Июль, $32^{\mathrm{d}}.232$. По формуле линейной интерполяции тогда видимое прямое восхождение звезды в момент ее верхней кульминации на меридиане Екатеринбурга:

$$\alpha_{\text{вид}} = 5^{\mathrm{h}}55^{\mathrm{m}}47^{\mathrm{s}}.884 + \frac{5^{\mathrm{h}}55^{\mathrm{m}}48^{\mathrm{s}}.115 - 5^{\mathrm{h}}55^{\mathrm{m}}47^{\mathrm{s}}.884}{10^{\mathrm{d}}}(32^{\mathrm{d}}.232 - 23^{\mathrm{d}}.4) =$$
$$= 5^{\mathrm{h}}55^{\mathrm{m}}47^{\mathrm{s}}.884 + \frac{0^{\mathrm{s}}.231}{10^{\mathrm{d}}} * 8^{\mathrm{d}}.832 = 5^{\mathrm{h}}55^{\mathrm{m}}47^{\mathrm{s}}.884 + 0^{\mathrm{s}}.204 = 5^{\mathrm{h}}55^{\mathrm{m}}48^{\mathrm{s}}.088$$

Таким образом, видимое прямое восхождение α Ori в момент ее верхней кульминации на меридиане Екатеринбурга было равно $\alpha_{\text{вид}} = 5^{\mathrm{h}}55^{\mathrm{m}}48^{\mathrm{s}}.088$. Тогда *местное* звездное время в этот момент было равно $s_\lambda = 5^{\mathrm{h}}55^{\mathrm{m}}48^{\mathrm{s}}.088$. Переход от местного звездного времени к звездному времени начального меридиана:

$$S = s_\lambda - \lambda = 5^{\mathrm{h}}55^{\mathrm{m}}48^{\mathrm{s}}.088 - 4^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}} = 1^{\mathrm{h}}53^{\mathrm{m}}16^{\mathrm{s}}.088$$

Истинное звездное время в гринвичскую среднюю полночь 1 августа, согласно ежегоднику, равно $S_0 = 20^{\mathrm{h}}37^{\mathrm{m}}02^{\mathrm{s}}.6041$. Поскольку разница $(S - S_0)$ отрицательна, то за время, прошедшее с момента средней полуночи до искомого момента среднего времени произошла верхняя кульминация точки Υ и смена звездных суток. Тогда всемирное время в момент верхней кульминации α Ori на меридиане Екатеринбурга будет равно:

$$M \equiv UT = 0.997269566 * (S - S_0 + 24^{\mathrm{h}}) = 0.997269566 * (1^{\mathrm{h}}53^{\mathrm{m}}16^{\mathrm{s}}.088 - 20^{\mathrm{h}}37^{\mathrm{m}}02^{\mathrm{s}}.6041 + 24^{\mathrm{h}}) =$$
$$= 0.997269566 * (5^{\mathrm{h}}16^{\mathrm{m}}13^{\mathrm{s}}.4839) = 5^{\mathrm{h}}15^{\mathrm{m}}21^{\mathrm{s}}.678$$

Располагая точным значением всемирного времени, можно легко получить местное среднее время на меридиане Екатеринбурга, а также поясное и декретное летнее, которое используется на территории России в летний период:

$$m_\lambda = UT + \lambda = 5^{\mathrm{h}}15^{\mathrm{m}}21^{\mathrm{s}}.678 + 4^{\mathrm{h}}02^{\mathrm{m}}32^{\mathrm{s}} = 9^{\mathrm{h}}17^{\mathrm{m}}53^{\mathrm{s}}.678,$$

$$T_N = UT + 4 = 5^{\mathrm{h}}15^{\mathrm{m}}21^{\mathrm{s}}.678 + 4 = 9^{\mathrm{h}}15^{\mathrm{m}}21^{\mathrm{s}}.678$$

и

$$T_{\text{ДЛ}} = T_N + 4 + 2^{\mathrm{h}} = 9^{\mathrm{h}}15^{\mathrm{m}}21^{\mathrm{s}}.678 + 2^{\mathrm{h}} = 11^{\mathrm{h}}15^{\mathrm{m}}21^{\mathrm{s}}.678$$

Итак, верхняя кульминация α Ori 1 августа 2011 года на меридиане Екатеринбурга происходит в момент декретного летнего времени $11^{\mathrm{h}}15^{\mathrm{m}}21^{\mathrm{s}}.678$. Совершенно очевидно, что наблюдать момент прохождения звездой меридиана Екатеринбурга нельзя, поскольку это происходит в светлое время суток.

Решение для второй даты — 16 января — совершенно аналогично. Сначала нужно вычислить видимое прямое восхождение α Ori в момент ее верхней кульминации на меридиане Екатеринбурга. Для этого из таблицы "Видимые места звезд" выбраны следующие данные:

Дата, доли суток	$\alpha_{\text{вид}}$
Январь, $14^{\text{d}}.9$	$5^{\text{h}}55^{\text{m}}48^{\text{s}}.626$
Январь, $24^{\text{d}}.9$	$5^{\text{h}}55^{\text{m}}48^{\text{s}}.610$

Данные позволяют определить видимое прямое восхождение:

$$\alpha_{\text{вид}} = 5^{\text{h}}55^{\text{m}}48^{\text{s}}.626 + \frac{5^{\text{h}}55^{\text{m}}48^{\text{s}}.610 - 5^{\text{h}}55^{\text{m}}48^{\text{s}}.626}{10^{\text{d}}}(16^{\text{d}}.732 - 14^{\text{d}}.9) = 5^{\text{h}}55^{\text{m}}48^{\text{s}}.623$$

Местное звездное время s_λ в момент верхней кульминации звезды будет равно ее прямому восхождению, тогда звездное время начального меридиана:

$$S = s_\lambda - \lambda = 1^{\text{h}}53^{\text{m}}16^{\text{s}}.623$$

Значение S_0 на 16 января равно $7^{\text{h}}40^{\text{m}}21^{\text{s}}.1732$, тогда всемирное время будет равно:

$$M \equiv UT = 0.997269566 * (S - S_0 + 24^{\text{h}}) = 0.997269566 * (1^{\text{h}}53^{\text{m}}16^{\text{s}}.623 - 7^{\text{h}}40^{\text{m}}21^{\text{s}}.1732 + 24^{\text{h}}) =$$
$$= 18^{\text{h}}09^{\text{m}}56^{\text{s}}.4012$$

Следовательно, местное среднее время:

$$m_\lambda = 18^{\text{h}}09^{\text{m}}56^{\text{s}}.4012 + 4^{\text{h}}02^{\text{m}}32^{\text{s}} = 22^{\text{h}}12^{\text{m}}28^{\text{s}}.4012,$$

поясное:

$$T_N = 18^{\text{h}}09^{\text{m}}56^{\text{s}}.4012 + 4 = 22^{\text{h}}09^{\text{m}}56^{\text{s}}.4012$$

и зимнее декретное (которое еще использовалось на территории России):

$$T_{\text{Д}} = 23^{\text{h}}09^{\text{m}}56^{\text{s}}.4012$$

Таким образом, α Ori 16 января 2011 года на меридиане Екатеринбурга произошла в момент декретного времени $23^{\text{h}}09^{\text{m}}56^{\text{s}}.4012$. Очевидно, что существует определенная вероятность того, что звезду можно было наблюдать, поскольку ее верхняя кульминация произошла примерно за 2 часа до средней полуночи. Для более точного ответа на вопрос необходимо проверить значение склонения этой звезды. В данном случае достаточно использовать средние экваториальные координаты. Склонение α Ori (из таблицы средних мест) $\delta = +7°24'30''$, тогда с учетом широты места наблюдения (примерно $\varphi = 56°49'$) высота звезды над горизонтом в момент верхней кульминации будет равна:

$$h_{\text{ВК}} = 40°35'30'',$$

т.е. в момент верхней кульминации вблизи средней полуночи звезда находится достаточно высоко над горизонтом места наблюдения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Абалакин В. К., Краснорылов И. И., Плахов Ю. В.** Геодезическая астрономия и астрометрия: Справочное пособие. — М.: Картгеоцентр—Геодезиздат, 1996. — 435 с.

2 **Астрономический ежегодник на 2011 год.** — СПб.: Наука, 2010. — 689 с.

3 **Жаров В. Е.** Сферическая астрономия. — Фрязино: Век 2, 2006. — 480 с.

4 **Ковалевский Ж.** Современная астрометрия. — Фрязино: Век 2, 2004. — 480 с.

5 **Шукстова З. Н.** Основы сферической астрономии (координатно-временные связи): Учебное пособие. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2005. — 244 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Фрагмент таблицы "Средние места звезд"

Таблица А.1 – Фрагмент таблицы "СРЕДНИЕ МЕСТА ЗВЕЗД 2011"

N	FK6	HIP	Название	Величина	Спектр. тип	RA (J2011.5)	Годовое изменение	dRA 0.00001s	DEC (J2011.5)	Годовое изменение	dDEC 0.0001"
35	48	6686	del Cas	2.66	A5	$1^h26^m34^s.6528$	$+3^s.9787$	+3990	$+60°17'40''.794$	$+18''.578$	−499
34	46*	6692	psi Cas	4.72	K0	$1^h26^m45^s.6438$	$+4^s.3224$	+1348	$+68°11'22''.645$	$+18''.649$	+267
709	1040*	6813	ome And	4.83	F5	$1^h28^m20^s.9784$	$+3^s.6195$	+3393	$+45°27'56''.489$	$+18''.461$	−1096
36	50*	7097	eta Psc	3.66	G8	$1^h32^m06^s.0394$	$+3^s.2208$	+178	$+15°24'17''.142$	$+18''.441$	−33
37	GC	7294	hi Cas	4.68	K0	$1^h34^m41^s.5097$	$+3^s.9725$	−562	$+59°17'26''.295$	$+18''.331$	−231
710	1045	7513	ips And	4.10	F8	$1^h37^m28^s.6068$	$+3^s.5467$	−1534	$+41°27'45''.326$	$+17''.874$	−43813

В первом столбце приводится номер звезды в "Астрономическом ежегоднике".

Второй столбец "FK6" содержит номер звезды по каталогу FK6, звездочкой отмечены номера звезд, которые не вошли в FK6, но были в каталогах FK5, FK4 и FK3; для остальных звезд оставлены ссылки на каталоги N30 (Catalog of 5268 Standart Stars, 1950.0 Based on the Normal System N30, H. R. Morgan) и GC (General Catalogue of 33342 Stars (Epoch 1950), B. Boss).

В графе "HIP" даны номера звезд по каталогу HIPPARCOS.

Названия звезд даны в соответствии с каталогами FK6, FK5 и FK3 с трехбуквенным обозначением созвездий, а для звезд, отсутствующих в этих каталогах, — по PGC (Preliminary General Catalogue of 6188 Stars (Epoch 1900), L. Boss).

Для двойных звезд с угловым разрешением компонент более $0.''5$ обозначение c.g. показывает, что среднее место дано для центра масс системы, pr — место двойной звезды относится к предшествующей компоненте, а sq — к последующей. В некоторых случаях для более надежного отождествления приводятся значения: N для северной и S для южной компоненты системы. Для двойных звезд с угловым разделением менее $0.''5$ дается положение геометрической середины системы с пометкой m.

Видимые звездные V-величины взяты из каталога HIPPARCOS. Спектры звезд из HIPPARCOS сокращены и указан только спектральный класс. Переменность звезд показана символом v, если амплитуда превышает 0.3 величины, либо граничными значениями величин, если амплитуда превышает 0.6. Для широко разделенных двойных звезд даны величины обеих компонент или более яркой. Для звезд с разделением менее $0.''5$ дана общая звездная величина.

В списке средних мест на середину года наряду с прямым восхождением и склонением звезд даны годовые изменения коррдинат. т.е. сумма прецессии и собственного движения, а также собственные движения по каждой координаты (графы "dRA" и "dDEC").

Порядок сортировки звезд в таблице — по прямому восхождению.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Фрагмент таблицы "Эфемерида Солнца"

Таблица Б.1 – Фрагмент таблицы "СОЛНЦЕ 2011"

Дата	0^{h} земного времени						Верхняя кульминация	Измен. на 1h зап. дол
	Видимое прямое восхождение	Видимое склонение	Часовое изменение	Видимый радиус	Уравнение времени+12^{h}	Часовое изменение		
Июль 1	$6^{h}38^{m}32^{s}.109$	$+23°08'29''.99$	$-9''.529$	$15'45''.39$	$11^{h}56^{m}17^{s}.224$	$-0^{s}.4935$	$12^{h}03^{m}48^{s}.70$	$+0^{s}.488$
2	$6^{h}42^{m}40^{s}.390$	$23°04'29''.18$	$10''.538$	$15'45''.38$	$11^{h}56^{m}05^{s}.507$	$0^{s}.4827$	$12^{h}04^{m}00^{s}.28$	$0^{s}.477$
3	$6^{h}46^{m}48^{s}.397$	$23°00'04''.19$	$11''.543$	$15'45''.37$	$11^{h}55^{m}54^{s}.060$	$0^{s}.4709$	$12^{h}04^{m}11^{s}.59$	$0^{s}.465$
4	$6^{h}50^{m}56^{s}.106$	$22°55'15''.14$	$12''.543$	$15'45''.36$	$11^{h}55^{m}42^{s}.911$	$0^{s}.4580$	$12^{h}04^{m}22^{s}.58$	$0^{s}.451$
5	$6^{h}55^{m}03^{s}.488$	$22°50'02''.16$	$13''.538$	$15'45''.36$	$11^{h}55^{m}32^{s}.083$	$0^{s}.4441$	$12^{h}04^{m}33^{s}.24$	$0^{s}.437$
6	$6^{h}59^{m}10^{s}.523$	$+22°44'25''.37$	$-14''.526$	$15''45'.36$	$11^{h}55^{m}21^{s}.601$	$-0^{s}.4292$	$12^{h}04^{m}43^{s}.54$	$+0^{s}.421$

Для 0^{h} земного времени в таблице на каждый день года приведены видимое прямое восхождение и видимое склонение Солнца, а также часовое изменение склонения, видимый радиус, уравнение времени η и его часовое изменение $v(\eta)$, момент верхней кульминации на меридиане Гринвича и его изменение на 1^{h} западной долготы.

Видимые прямое восхождение и склонение Солнца включают влияние аберрации и отсчитываются относительно истинного экватора и равноденствия рассматриваемого момента.

Уравнение времени$+12^{\mathrm{h}}$ задается как "истинное время минус среднее время" и отражает разность прямых восхождений динамического среднего и истинного Солнца в некоторый момент по земному времени. Для облегчения интерполирования эфемерида содержит часовое изменение уравнения времени.

Моменты верхней кульминации центра диска Солнца даются для эфемеридного меридиана по земному времени. В правой колонке таблицы приводятся изменения значений указанных моментов на 1^{h} западной долготы.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Фрагмент таблицы "Восходы и заходы Солнца"

Таблица В.1 – Фрагмент таблицы "ВОСХОД СОЛНЦА 2011"

Широта	50°	52°	54°	56°	58°	60°	62°	64°	66°	68°	70°
	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m
Июль 2	3 55	3 45	3 33	3 19	3 03	2 43	2 18	1 42	0 26	^^ ^^	^^ ^^
6	3 58	3 48	3 36	3 23	3 07	2 48	2 24	1 51	0 51	^^ ^^	^^ ^^
10	4 02	3 52	3 41	3 27	3 12	2 54	2 31	2 01	1 11	^^ ^^	^^ ^^
14	4 06	3 56	3 45	3 33	3 18	3 01	2 40	2 12	1 29	^^ ^^	^^ ^^
18	4 10	4 01	3 51	3 39	3 25	3 09	2 49	2 23	1 47	0 24	^^ ^^

В таблице приняты следующие обозначения:

– – –– — явление не происходит на данной широте;

^^ ^^ — Солнце постоянно находится над горизонтом в данном пункте;

** ** — Солнце постоянно находится под горизонтом в данном пункте;

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Фрагмент таблицы "Высоты и азимуты Полярной"

Таблица Г.1 – Фрагмент таблицы "ВЫСОТЫ И АЗИМУТЫ ПОЛЯРНОЙ 2011"

f	fi s	35°	40°	45°	50°	55°	60°	62°	64°	66°	68°	70°	fi s
+0°41′	02ʰ46ᵐ	0°00′	0°00′	0°00′	0°00′	0°00′	0°00′	0°00′	0°00′	0°00′	0°00′	0°00′	02ʰ46ᵐ
+0°41′	03ʰ06ᵐ	0°04′	0°05′	0°05′	0°06′	0°06′	0°07′	0°08′	0°08′	0°09′	0°10′	0°11′	02ʰ26ᵐ
+0°40′	03ʰ26ᵐ	0°09′	0°09′	0°10′	0°11′	0°13′	0°15′	0°16′	0°17′	0°18′	0°20′	0°22′	02ʰ06ᵐ
+0°40′	03ʰ46ᵐ	0°13′	0°14′	0°15′	0°17′	0°19′	0°22′	0°23′	0°25′	0°27′	0°29′	0°32′	01ʰ46ᵐ
+0°39′	04ʰ06ᵐ	0°17′	0°18′	0°20′	0°22′	0°25′	0°29′	0°31′	0°33′	0°35′	0°39′	0°42′	01ʰ26ᵐ
+0°37′	04ʰ26ᵐ	0°21′	0°23′	0°25′	0°27′	0°31′	0°35′	0°38′	0°40′	0°44′	0°48′	0°52′	01ʰ06ᵐ
+0°36′	04ʰ46ᵐ	0°25′	0°27′	0°29′	0°32′	0°36′	0°42′	0°45′	0°48′	0°52′	0°56′	1°02′	00ʰ46ᵐ

Первый столбец "f" содержит значение параметра f, который равен:

$$f = h - \varphi,$$

где h — высота Полярной, а φ — широта места наблюдения.

Во втором и последнем столбцах приведено звездное время S.

В остальных столбцах приводится значение геодезического азимута Полярной звезды на разных широтах в различные моменты звездного времени S. Азимут отсчитывается от точки севера, он будет западный, когда S лежит слева, и восточный, когда S — справа.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Установочная суточная эфемерида Солнца

Таблица Д.1 – Установочная (суточная) эфемерида Солнца на дату наблюдения, в пункте с широтой φ

Дата: 28.07.2011, $\varphi = 56°50'$, $\lambda = 4^h02^m32^s$, $\delta_\odot = +19°06'32''$, $T_{ДЛ} = 14^h03^m59^s$

№	$T_{ДЛ}$, до ВК	$t_\odot$	$T_{ДЛ}$, после ВК	h	Δh	Δh/мин	$A_\odot$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	$14^h03^m59^s$	0^h0^m	$14^h03^m59^s$	$52°16'$	$11'$	$0'33''$	$0°0'$
2	$13^h43^m59^s$	$\pm0^h20^m$	$14^h23^m59^s$	$52°05'$	$33'$	$1'39''$	$7°42'$
3	$13^h23^m59^s$	$\pm0^h40^m$	$14^h43^m59^s$	$51°32'$	$53'$	$2'39''$	$15°17'$
4	$13^h03^m59^s$	$\pm1^h00^m$	$15^h03^m59^s$	$50°39'$	$1°13'$	$3'39''$	$22°41'$
5	$12^h43^m59^s$	$\pm1^h20^m$	$15^h23^m59^s$	$49°26'$	$1°30'$	$4'30''$	$29°48'$
6	$12^h23^m59^s$	$\pm1^h40^m$	$15^h43^m59^s$	$47°56'$	$1°45'$	$5'15''$	$36°35'$
7	$12^h03^m59^s$	$\pm2^h00^m$	$16^h03^m59^s$	$46°11'$	$1°58'$	$5'54''$	$43°2'$
8	$11^h43^m59^s$	$\pm2^h20^m$	$16^h23^m59^s$	$44°13'$	$2°09'$	$6'27''$	$49°8'$
9	$11^h23^m59^s$	$\pm2^h40^m$	$16^h43^m59^s$	$42°04'$	$2°19'$	$6'57''$	$54°54'$
10	$11^h03^m59^s$	$\pm3^h00^m$	$17^h03^m59^s$	$39°45'$	$2°26'$	$7'18''$	$60°21'$
11	$10^h43^m59^s$	$\pm3^h20^m$	$17^h23^m59^s$	$37°19'$	$2°32'$	$7'36''$	$65°32'$
12	$10^h23^m59^s$	$\pm3^h40^m$	$17^h43^m59^s$	$34°47'$	$2°37'$	$7'51''$	$70°28'$
13	$10^h03^m59^s$	$\pm4^h00^m$	$18^h03^m59^s$	$32°10'$	$2°40'$	$8'00''$	$75°11'$
14	$9^h43^m59^s$	$\pm4^h20^m$	$18^h23^m59^s$	$29°30'$			$79°43'$

Столбец (3) содержит значения часового угла Солнца с шагом в $\Delta t = 20^m$ до полудня (часовые углы отрицательны) и после полудня (часовые углы положительны). Столбцы (2) и (4) содержат значение декретного летнего времени для часовых углов до полудня и после полудня соответственно. В столбце (5) приведена высота Солнца над горизонтом пункта наблюдения при соответствующих часовых углах. В столбце (6) даны изменения высоты Солнца за интервал времени $\Delta t = 20^m$, а в столбце (7) — за одну минуту. Эти два значения используются при поиске изображения диска Солнца в поле зрения теодолита в моменты времени между эфемеридными. Столбец (8) содержит значение астрономического азимута Солнца для соответствующих часовых углов. Эти значения могут быть использованы для контроля вычислений при проведении обработки результатов измерений.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Пример журнала наблюдений Солнца при определении азимута направления

В верхней графе таблицы обязательно указывается дата наблюдений, фамилии наблюдателей, номер и маркировка теодолита, а также температура и давление в указанную дату наблюдений.

Следующая графа "Земной предмет" содержит отсчеты вертикального и горизонтального кругов при круге право и при круге лево на земной предмет. В столбце примечаний при этом приведена схема расположения выбранного предмета относительно Солнца, а также указано направление на точку юга S.

Следующие строки (пронумерованы от 1 до 10) содержат результаты измерений Солнца: отсчеты горизонтального и вертикального кругов при круге лево, моменты времени с точностью до секунды, а также схему расположения диска Солнца относительно сетки нитей. На схеме подписаны зафиксированные края: западный (w) и верхний (t).

В последней строке записаны отсчеты вертикального и горизонтального круга при круге лево и при круге право на земной предмет, снятые в конце программы наблюдений.

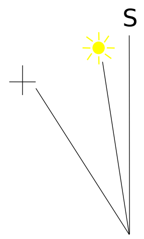
В поле примечаний также указаны значения коллимации, место нуля и место зенита. Эти значения вычисляются по отсчетам на земной предмет при проведении обработки результатов измерений.

Дата: 14.07.11 | **Теодолит №42007 (4Т30П)**

Наблюдатели: | t=20°, C

Петров П. | P=734 мм.рт.ст.

Сидоров С.

	Объект	$T_{ДЛ}$	ВК	ГК	Примечания
*	**Земной предмет**		**КП:** $-18°34'00''$	**КП:** $229°15'00''$	**МО**= $0°0'00''$
			КЛ: $+18°34'00''$	**КЛ:** $49°17'00''$	**MZ**= $90°0'00''$
	Солнце	**Отсчеты при КЛ**			**c**= $0°0'15''$
1	t w	$10^h37^m09^s$	$39°4'00''$	$61°27'00''$	
2	t w	$10^h39^m07^s$	$39°20'00''$	$61°55'00''$	
3	t w	$10^h40^m26^s$	$39°30'00''$	$62°15'00''$	
4	t w	$10^h41^m20^s$	$39°36'00''$	$62°28'00''$	
5	t w	$10^h42^m02^s$	$39°42'00''$	$62°40'00''$	
6	t w	$10^h45^m52^s$	$40°13'00''$	$63°42'00''$	
7	t w	$10^h50^m25^s$	$40°45'00''$	$64°57'00''$	
8	t w	$10^h51^m12^s$	$40°51'00''$	$65°7'00''$	
9	t w	$10^h52^m13^s$	$41°5'00''$	$65°21'00''$	
10	t w	$10^h53^m36^s$	$41°11'00''$	$65°43'00''$	
*	**Земной предмет**		**КП:** $+18°35'00''$	**КП:** $49°20'00''$	
			КЛ: $-18°34'00''$	**КЛ:** $229°23'00''$	

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Пример обработки результатов измерений азимута земного направления

— Вычислены коллимация, место нуля и место зенита по отсчетам горизонтального и вертикального кругов на земной предмет. Эти значения занесены в журнал наблюдений.

— По отсчетам горизонтального круга (при круге лево) вычислен средний отсчет на земной предмет $\overline{B}_M = 49°18'30''$.

— По отсчетам вертикального круга вычислены измеренные зенитные расстояния Солнца. Они занесены в столбец 2 таблицы Ж.1.

— Вычислены геоцентрические зенитные расстояния центра диска Солнца. Они занесены в столбец 3 таблицы Ж.1.

— Для каждого зенитного расстояния центра солнечного диска вычислена поправка за рефракцию (с учетом температуры и давления, указанных в журнале наблюдений). Исправленные за рефракцию зенитные расстояния занесены в столбец 4 таблицы Ж.1.

— Студенты на практике при ручной обработке результатов измерений вычисляют на следующем этапе средний момент времени наблюдений и для него находят видимое склонение Солнца для экономии времени и сил. При проведении обработки данных журнала наблюдений все расчеты проводились на компьютере, поэтому средний отсчет времени не вычислялся, а видимое склонение Солнца было вычислено для каждого момента времени. Это, однако, незначительно сказывается на точности вычислений.

— Зная видимое склонение Солнца на момент наблюдения и истинное зенитное расстояние центра диска Солнца можно вычислить азимут Солнца. Вычисленные значения приведены в столбце 5 таблицы Ж.1.

— Для каждого истинного зенитного расстояния центра солнечного диска вычислены поправки ΔB_R.

— Для каждого отсчета горизонтального круга на избранный край солнца (данные записаны в столбцах 2-3 таблицы Ж.2) с использованием значений поправок ΔB_R вычислены горизонтальные отсчеты на центр диска Солнца. Значения внесены в столбец 4 таблицы Ж.2.

— Найдено значение угла Δ между направлением на Солнце и земной предмет. Значения занесены в столбец 5 таблицы Ж.2.

— По известным азимутам Солнца и углам Δ найден азимут направления на земной предмет. Значения азимута направления содержатся в столбце 6 таблицы Ж.2.

— Вычислено среднее значение азимута направления и его ошибка: $279°19'05'' \pm 0°4'45''$.

Таблица Ж.1 – Приведение отсчетов ВК к центру солнечного диска, определение азимутов Солнца

1	2	3	4	5
№	$z_{\text{изм}}$	$z_{\odot}$	$z_{\odot\text{ист}}$	$\mathrm{A}_{\odot}$
1	$50°56'00''$	$51°11'46''$	$51°12'52''$	$291°05'49''$
2	$50°40'00''$	$50°55'46''$	$50°56'52''$	$291°37'10''$
3	$50°30'00''$	$50°45'46''$	$50°46'51''$	$291°56'55''$
4	$50°24'00''$	$50°39'46''$	$50°40'51''$	$292°08'48''$
5	$50°18'00''$	$50°33'46''$	$50°34'50''$	$292°20'45''$
6	$49°47'00''$	$50°02'46''$	$50°03'49''$	$293°23'05''$
7	$49°15'00''$	$49°30'46''$	$49°31'48''$	$293°23'05''$
8	$49°09'00''$	$49°24'46''$	$49°25'48''$	$294°41'06''$
9	$48°55'00''$	$49°10'46''$	$49°11'47''$	$295°10'20''$
10	$48°49'00''$	$49°04'46''$	$49°05'47''$	$295°22'57''$

Таблица Ж.2 – Приведение отсчетов ГК к центру солнечного диска и определение азимута избранного направления

1	2	3	4	5	6
№	ГК	Кр	$B_{\odot}$	Δ	A_M
1	$61°27'00''$	w	$61°06'47''$	$11°48'17''$	$279°17'32''$
2	$61°55'00''$	w	$61°34'42''$	$12°16'12''$	$279°20'58''$
3	$62°15'00''$	w	$61°54'40''$	$12°36'10''$	$279°20'45''$
4	$62°28'00''$	w	$62°07'38''$	$12°49'08''$	$279°19'41''$
5	$62°40'00''$	w	$62°19'36''$	$13°01'06''$	$279°19'39''$
6	$63°42'00''$	w	$63°21'27''$	$14°02'57''$	$279°20'08''$
7	$64°57'00''$	w	$64°36'17''$	$15°17'47''$	$279°10'52''$
8	$65°07'00''$	w	$64°46'15''$	$15°27'45''$	$279°13'20''$
9	$65°21'00''$	w	$65°00'11''$	$15°41'41''$	$279°28'39''$
10	$65°43'00''$	w	$65°22'09''$	$16°03'39''$	$279°19'18''$

ПРИЛОЖЕНИЕ И

Фрагмент таблицы ”Видимые места звезд”

Таблица И.1 – Фрагмент таблицы ” ВИДИМЫЕ МЕСТА ЗВЕЗД 2011”

Дата	1) 2 Cet 4.55 IX-22 B9				2) alp And 2.07 IX-23 B9			
	0^h04^m		$-17°15'$		0^h08^m		$+29°09'$	
Янв. -5.3	19.087	118	89.45	49	58.482	137	20.20	72
4.7	18.969	112	89.94	25	58.345	135	19.48	102
14.7	18.857	101	90.19	3	58.210	127	18.46	124
24.7	18.756	89	90.22	20	58.083	115	17.22	145
Февр. 3.6	18.667	70	90.02	45	57.968	93	15.77	158
13.6	18.597	46	89.57	68	57.875	67	14.19	163
23.6	18.551	20	88.89	92	57.808	35	12.56	163
Март 5.6	18.531	12	87.97	117	57.773	6	10.93	154

Видимые места звезд в ежегоднике даны для моментов их верхних кульминаций на меридиане Гринвича, приходящиеся на юлианские звездные дни, кратные десяти, т.е. через каждые 10 звездных суток с непрерывным счетом аргумента. Так как в 2011 году первый юлианский звездный день, кратный десяти, есть 2462290.00 и соответствует дате янв. 4.7, то начальная дата эфемерид звезд для 2011 года должна соответствовать 2462280.00, т.е. янв. -5.3.

Аргумент под заголовком ”Дата” указывает для ориентировки наблюдателя среднее время кульминации с точностью до 0.1 суток; очевидно, это будет приближенное значение момента кульминации звезды на меридиане Гринвича в счете по всемирному времени или же момента кульминации звезды на любом другом меридиане в счете по местному среднему времени. Так как в момент верхней кульминации звезды звездное время равно ее прямому восхождению, то помещенные в эфемериде десятые доли средних суток совпадают в пределах точности с интервалом $\alpha - S_0$, где S_0 — звездное время в полночь.

Для каждой звезды можно указать внутри года одни средние сутки, в течение которых происходят две ее верхние кульминации: первая в течение первых 4^m после полуночи, т.е. в самом начале суток, и вторая в течение последних 4^m тех же суток. Критическая дата для каждой звезды указывается под ее именем в виде ”месяц(римскими цифрами)-день”.

ПРИЛОЖЕНИЕ К

Фрагмент таблицы ”Перевод среднего времени в звездное (с точностью до $0^s.01$)”

Таблица К.1 – Фрагмент таблицы ”ПЕРЕВОД СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ В ЗВЕЗДНОЕ (точность до $0^s.01$)”

Поправка	0^m	1^m	2^m	3^m	Инт. ср. врем.	Поправка	Инт. ср. врем.	Поправка
00^s	$0^h00^m00^s$	$6^h05^m15^s$	$12^h10^m29^s$	$18^h15^m44^s$	0^m00^s	$0^s.00$	3^m03^s	$0^s.50$
01^s	06^m05^s	11^m20^s	16^m34^s	21^m49^s	04^s	$0^s.01$	06^s	$0^s.51$
02^s	12^m10^s	17^m25^s	22^m40^s	27^m54^s	07^s	$0^s.02$	10^s	$0^s.52$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20^s	$2^h01^m45^s$	$8^h06^m59^s$	$14^h12^m14^s$	$20^h17^m28^s$	1^m13^s	$0^s.20$	4^m16^s	$0^s.70$
21^s	07^m50^s	13^m05^s	18^m19^s	23^m34^s	17^s	$0^s.21$	19^s	$0^s.71$
22^s	13^m55^s	19^m10^s	24^m24^s	29^m39^s	20^s	$0^s.22$	23^s	$0^s.72$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
48^s	$4^h52^m12^s$	$10^h57^m26^s$	$17^h02^m41^s$	$23^h07^m55^s$	2^m55^s	$0^s.48$	5^m58^s	$0^s.98$
49^s	58^m17^s	$11^h03^m31^s$	08^m46^s	14^m00^s	59^s	$0^s.49$	6^m02^s	$0^s.99$
50^s	$5^h04^m22^s$	09^m37^s	14^m51^s	20^m06^s	3^m03^s	$0^s.50$	6^m05^s	$1^s.00$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮				
57^s	$5^h46^m59^s$	$11^h52^m13^s$	$17^h57^m28^s$	$24^h02^m42^s$	*Поправка прибавляется к среднему времени*			
58^s	53^m04^s	58^m19^s	$18^h03^m33^s$	08^m48^s				
59^s	$5^h59^m09^s$	$12^h04^m24^s$	$18^h09^m38^s$	$24^h14^m53^s$				

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

Фрагмент таблицы "Звездное время"

Таблица Л.1 – Фрагмент таблицы "ЗВЕЗДНОЕ ВРЕМЯ 2011"

Дата	0^{h} всемирного времени				Дата	0^{h} всемирного времени			
	Звездное время		Уравнение равноденствий			Звездное время		Уравнение равноденствий	
	истинное	среднее				истинное	среднее		
			$0^{s}.0001$					$0^{s}.0001$	
Июль 1	$18^{h}34^{m}49^{s}.3332$	$48^{s}.2607$	+10710	+15	Авг. 16	$21^{h}36^{m}10^{s}.9243$	$09^{s}.8076$	+11117	+49
2	18 38 45 .8965	44 .8160	10732	+73	17	21 40 07 .4723	06 .3630	11108	−14
3	18 42 42 .4579	41 .3714	10754	+111	18	21 44 04 .0206	02 .9183	11097	−74
4	18 46 39 .0163	37 .9268	10776	+119	19	21 47 60 .5701	59 .4737	11085	−121
5	18 50 35 .5714	34 .4821	10797	+95	20	21 51 57 .1214	56 .0291	11073	−149

ПРИЛОЖЕНИЕ М

Вычисление поправки за рефракцию

Пусть $z = 45°50'50''$, $T = 25°C$, $P = 733$ мм.рт.ст. Вычисление выполняется в три этапа:

— по данным первой таблицы необходимо вычислить поправку за нормальную рефракцию (при $T = 10°C$, $P = 760$ мм.рт.ст.):

z	ρ
$45°30'$	$0'59''$
$45°50'50''$	**$0'59''.69$**
$46°00'$	$1'00''$

$$\rho = 0'59'' + \frac{1'00'' - 0'59''}{46°00' - 45°30'}(45°50'50'' - 45°30') = 0'59''.69$$

— по данным второй таблицы рассчитывается поправка средней рефракции за температуру:

z	$T = 25°C$
$45°00'$	$-3''$
$45°50'50''$	**$-3''.17$**
$50°00'$	$-5''$

$$\rho_T = -3'' + \frac{-1''}{50°00' - 45°00'}(45°50'50'' - 45°00') = -3''.17$$

— по данным второй таблицы рассчитывается поправка средней рефракции за давление:

z	$P = 740$	**P = 733**	$P = 730$
$45°00'$	$-2''$		$-3''$
$45°50'50''$	**$-2''$**	**$-2''.7$**	**$-3''$**
$50°00'$	$-2''$		$-3''$

$$\rho_P = -2'' + \frac{-1''}{733 - 730}(740 - 730) = -2''.7$$

Таким образом, суммарная поправка за рефракцию составляет $0'59''.69 - 3''.17 - 2''.7 = 0'53''.82$