

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный технический университет  
имени К.И. Сатпаева

Е.В. Плотникова

**ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ**  
(Определения азимута направления, широты и долготы  
по наблюдением светил)

Учебное пособие для студентов специальности  
050711 – Геодезия и картография

Рекомендовано Научно-методическим советом  
Университета в качестве учебного пособия

Алматы 2013

УДК 528(075.8)

ББК 26.12я73

П 39

**П 39** Плотникова Е.В. Геодезическая астрономия (определение азимута направления, широты и долготы по наблюдением за светилами): Учеб. пособие для студентов специальности 5В071100 – «Геодезия и картография». – Алматы: КазНТУ, 2013. – 118 с.

Ил. 30, Табл. 7, Библиогр.– 21 назв.

ISBN 978-601-228-513-0

*В настоящем учебном пособии раскрываются сущность и принципы приближенного определения широты, долготы и азимута по наблюдениям Солнца и Полярной звезды. Приводятся данные по приборному обеспечению измерений, результаты выполнения вычислений.*

*Пособие может быть использовано специалистами в области геодезии и картографии, земле- и лесоустройства, дистанционных методов зондирования, экологии и природопользования, преподавателями вузов, научными работниками, аспирантами и студентами картографических, геодезических, географических, политехнических вузов.*

УДК 528(075.8)

ББК 26.12я73

Рецензенты:

*Дедова Т.В.*, канд. техн. наук, начальник отдела Геодезии и картографии АО «Казгеокосмос»

*Передёро В.С.*, канд. техн. наук, директор ТОО «GEO-Soft»

*Цеховой А.Ф.*, д-р техн. наук, проф., зав. каф. КТПиП

КазНТУ им. К.И. Сатпаева

Печатается по плану издания Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2013 год.

ISBN 978-601-228-513-0

© Плотникова Е.В., 2013

© КазНТУ, 2013

## **Введение**

Геодезической астрономией называется раздел астрономии, в котором изучают способы определения географических координат точек земной поверхности и азимутов направлений из наблюдений светил.

В предмет геодезической астрономии входит также изучение соответствующих приборов, с помощью которых производят астрономические определения для указанных целей.

Геодезические азимуты сторон триангуляции, полученные из астрономических наблюдений, называемые азимутами Лапласа, служат для ориентирования триангуляции и отдельных ее звеньев в единой системе геодезических координат. В то же время они являются средством действенного контроля угловых измерений в астрономо-геодезической сети. Азимуты Лапласа ограничивают, локализуют действие систематических и случайных погрешностей в угловых измерениях, тем самым значительно ослабляя их влияние в обширных геодезических сетях. Поэтому азимуты Лапласа по праву можно назвать угловыми базами геодезической сети.

Методы геодезической астрономии успешно применяются в космических исследованиях: при построении базисов космической триангуляции, при определениях астрономических координат пунктов космической триангуляции. Принципиально эти методы можно применить для определения координат искусственных спутников Земли и других космических аппаратов.

Астрономические определения географических координат и азимута находят широкое применение в прикладной геодезии, при геодезическом обеспечении различных инженерных работ:

- развитию и ориентировании геодезических сетей специального назначения;
- автономном определении геодезических азимутов и дирекционных углов специальных направлений;

- контроле угловых измерений в точных полигонометрических ходах и других угловых построениях;
- эталонировании точных гироскопических приборов, применяемых в маркшейдерском деле и других инженерных работах и т. д.

Во всех указанных случаях точность астрономических наблюдений определяется специальными инструкциями.

## 1. СИСТЕМЫ НЕБЕСНЫХ КООРДИНАТ

Положение светил на небесной сфере определяются сферическими координатами. Наиболее употребляемыми являются четыре системы координат. В каждой из них положение точки определяется двумя координатами, одна из которых дает угловое расстояние этой точки от плоскости некоторого основного круга, а другая отсчитывается вдоль этого основного круга.

## Основные точки и линии небесной сферы

Если через центр небесной сферы, построенной в произвольной точке пространства, провести прямую, параллельную отвесной линии в некоторой точке земной поверхности, то эта прямая также будет называться отвесной линией (рис. 1).

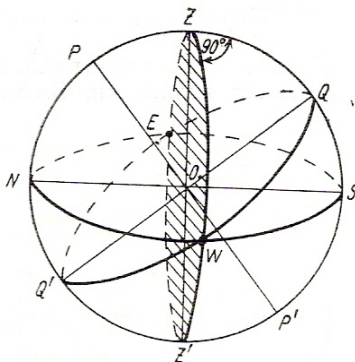


Рис. 1. Основные точки и линии небесной сферы

Отвесная линия пересекает небесную сферу в двух диаметрально противоположных точках. Зенит расположен над точкой наблюдения и обозначается буквой  $Z$ . Другая, диаметрально противоположная ей точка называется надиром и обозначается буквой  $Z'$ . Большой круг  $NESW$ , перпендикулярный отвесной линии называется небесным или астрономическим горизонтом. Через центр небесной сферы проходит прямая  $PP'$ , параллельная оси вращения Земли. Эта прямая называется осью мира. Точки  $P$  и  $P'$  называются полюсами мира: точка  $P$  – северным полюсом мира,  $P'$  – южным.

Большой круг  $QWQ'E$ , плоскость которого перпендикулярна оси мира  $PP'$ , называется небесным экватором. Плоскость небесного экватора параллельна плоскости земного экватора. Небесным меридианом называется большой круг  $PZP'Z'$ , проходящий через полюсы мира и точки зенита и надира. Вертикал, плоскость которого перпендикулярна к плоскости небесного меридиана, называется первым вертикалом. Первый вертикал проходит через точки востока  $E$  и запада  $W$ . Прямая  $NS$ , по которой плоскость горизонта пересекается с плоскостью меридиана, называется полуденной линией. Точки востока, юга, запада и севера расположены друг от друга на расстоянии  $90^\circ$  и являются главными точками горизонта [1].

### 1.1. Горизонтные координаты ( $h$ и $A$ )

В горизонтной системе координат за основной круг принимается астрономический горизонт (рис. 2). Геометрическими полюсами горизонта являются зенит и надир. Начальным кругом является небесный меридиан  $PZP'Z'$ . Для определения положения светила  $\sigma$  относительно горизонта проводят вертикал светила  $Z\sigma Z'$ . Первой координатой будет дуга вертикала от горизонта до светила. Высота  $h$  отсчитывается от горизонта до данной точки по большому полуокругу, проведенному через точку из зенита (по кругу высот).

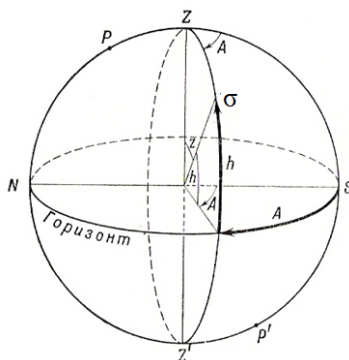


Рис. 2. Горизонтная система координат ( $h$  и  $A$ )

Второй координатой является двухгранный угол  $SZZ\sigma$  между плоскостью небесного меридиана и плоскостью вертикала светила. Этот угол называется азимутом светила и обозначается буквой  $A$ . Азимут  $A$  отсчитывается от точки юга  $S$  по часовой стрелке вдоль горизонта до его пересечения с кругом высоты, проходящим через данную точку. Вместо высоты  $h$  часто употребляют зенитное расстояние  $z$ , равное  $90^\circ - h$ , т. е. угловое расстояние точки от зенита. Высота  $h$  (или  $z$ ) и азимут  $A$  зависят от широты места и от момента наблюдения.

**Задание:** Определить на небесной сфере положение светил, соответствующих следующим координатам:

|                 |                   |                 |                   |
|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| $h = 30^\circ$  | $A = 20^\circ$ ;  | $h = 0^\circ$   | $A = 77^\circ$ ;  |
| $h = -25^\circ$ | $A = 195^\circ$ ; | $h = 90^\circ$  | $A = 137^\circ$ ; |
| $h = 73^\circ$  | $A = 267^\circ$ ; | $h = 14^\circ$  | $A = 0^\circ$ ;   |
| $h = -49^\circ$ | $A = 315^\circ$ ; | $h = -90^\circ$ | $A = 270^\circ$ ; |

## 1.2. Первая экваториальная система координаты ( $\delta$ и $t$ )

В первой экваториальной системе координат основной круг – небесный экватор (рис. 3). Для определения положения светила  $\sigma$  относительно небесного экватора проводят большой круг  $P\sigma P'$ . Склонение  $\delta$  отсчитывается от экватора до данной точки по большому полуокружности, проведенному через нее из полюса мира (по кругу склонения). Склонение  $\delta$  связано только с небесной сферой, и от географического положения наблюдателя оно не зависит.

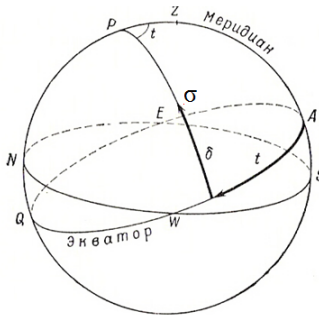


Рис. 2. Первая экваториальная система координат

Второй координатой является сферический угол между небесным меридианом и кругом склонения.  $t$  – часовой угол, отсчитываемый от верхней точки экватора  $A$  по часовой стрелке (к западу) до пересечения с кругом склонения, проходящим через данную точку.  $t$  – выражается в часовой мере и зависит от времени наблюдения [5].

**Задание:** Определить на небесной сфере положение светил, соответствующих следующим координатам:

|                      |            |                      |            |
|----------------------|------------|----------------------|------------|
| $\delta = -14^\circ$ | $t = 18^h$ | $\delta = 0^\circ$   | $t = 0^h$  |
| $\delta = +49^\circ$ | $t = 4^h$  | $\delta = +90^\circ$ | $t = 12^h$ |
| $\delta = -53^\circ$ | $t = 6^h$  | $\delta = 0^\circ$   | $t = 18^h$ |
| $\delta = +88^\circ$ | $t = 12^h$ | $\delta = -90^\circ$ | $t = 24^h$ |

### 1.3. Вторая экваториальная система координаты ( $\delta$ и $\alpha$ )

Склонение  $\delta$  отсчитывается от экватора до данной точки по большому полуокругу, проведенному через нее из полюса мира (по кругу склонения) (рис. 4). В северном полушарии неба склонение положительно, в южном – отрицательно.

Второй координатой будет дуга экватора  $YF$  от точки весеннего равноденствия до круга склонения. Начальной точкой является точка весеннего равноденствия  $Y$  – точка пересечения плоскости эклиптик с плоскостью экватора.  $\alpha$  – прямое восхождение – отсчитывается от точки весеннего равноденствия против часовой стрелки вдоль экватора до его пересечения с кругом склонения, проходящим через данную точку. Оно выражается в часовой мере, исходя из того, что  $360^\circ = 24^h$ ;  $1^\circ = 15'$ ;  $1'' = 15''$ .

В экваториальной системе координат ( $\delta$  и  $\alpha$ ) положение светил не зависит ни от суточного вращения небесной сферы, ни от места наблюдения.

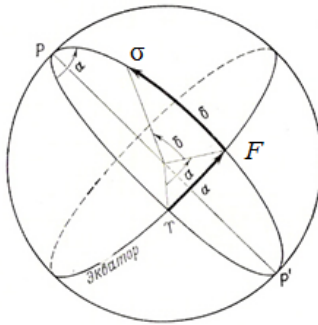


Рис. 4. Вторая экваториальная система координат

Экваториальные координаты  $\alpha$  и  $\delta$  определяются из специальных наблюдений на обсерваториях и публикуются в астрономических ежегодниках и звездных каталогах.

**Задание:** Определить на небесной сфере положение светил, соответствующих следующим координатам:

|                      |                 |                      |                 |
|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| $\delta = +45^\circ$ | $\alpha = 3^h$  | $\delta = 0^\circ$   | $\alpha = 18^h$ |
| $\delta = -27^\circ$ | $\alpha = 18^h$ | $\delta = +90^\circ$ | $\alpha = 6^h$  |
| $\delta = +87^\circ$ | $\alpha = 6^h$  | $\delta = 0^\circ$   | $\alpha = 0^h$  |
| $\delta = -10^\circ$ | $\alpha = 12^h$ | $\delta = -90^\circ$ | $\alpha = 18^h$ |

#### 1.4. Эклиптические координаты ( $\beta$ и $\lambda$ )

В эклиптической системе координат основной круг — эклиптика, геометрическими полюсами которой являются северный и южный полюс эклиптики, т. е. точки  $\Pi$  и  $\Pi'$  (рис.5). Через ось эклиптики  $\Pi\Pi'$  и светило  $\sigma$  проводят большой круг  $\Pi\sigma\Pi'$ , перпендикулярный эклиптике. *Астрономическая широта*  $\beta$  отсчитывается от эклиптики до данной точки по большому полуокружности, проведенному через данную точку из полюса эклиптики (круг широты). К северу от эклиптики  $\beta$  положительна, к югу отрицательна.

*Астрономическая долгота*  $\lambda$  отсчитывается от точки весеннего равноденствия  $\Upsilon$  против часовой стрелки вдоль эклиптики до ее

пересечения с кругом широты, проведенным через данную точку.  $\lambda$  и  $\beta$ , подобно  $\alpha$  и  $\delta$  не зависят ни от времени, ни от места наблюдения.

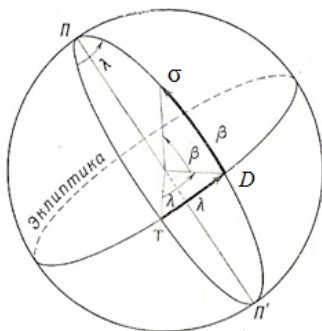


Рис. 5. Эклиптическая система координат

**Задание:** Определить на небесной сфере положение светил, соответствующих следующим координатам:

|                       |                     |                       |                     |
|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
| $\lambda = -19^\circ$ | $\beta = -80^\circ$ | $\lambda = 0^\circ$   | $\beta = +90^\circ$ |
| $\lambda = +57^\circ$ | $\beta = -45^\circ$ | $\lambda = 90^\circ$  | $\beta = 0^\circ$   |
| $\lambda = +43^\circ$ | $\beta = +45^\circ$ | $\lambda = 180^\circ$ | $\beta = -90^\circ$ |
| $\lambda = -67^\circ$ | $\beta = +2^\circ$  | $\lambda = 270^\circ$ | $\beta = 0^\circ$   |

Три первые системы координат сопоставлены одновременно на рис. 6.

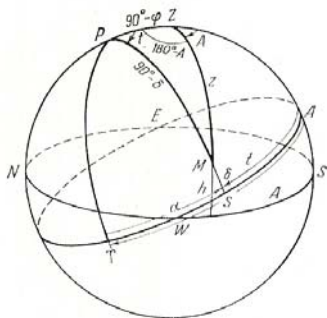


Рис. 6. Сопоставление трех систем координат

На звездных картах и глобусах всегда изображается сетка экваториальных координат  $\alpha$  и  $\delta$  и проводится линия эклиптики.

### 1.5. Переход от экваториальной системы координат к горизонтной

В звездных каталогах и астрономических ежегодниках публикуются экваториальные координаты светил. Для определения местоположения точек земной поверхности из астрономических наблюдений необходимо знать горизонтные координаты наблюдаемых для этой цели светил.

В первой и второй экваториальных системах координат первой координатой является склонение  $\delta$ . Устанавливают связь между вторыми координатами – часовым углом и прямым восхождением.

Рассмотрим сферический треугольник  $PZ\sigma$  (рис. 7). Вершинами этого треугольника являются зенит места наблюдения, полюс и светило. Сторонами параллактического треугольника являются дуга небесного меридиана между полюсом и зенитом, дуга круга склонений и дуга вертикала, равная зенитному расстоянию  $z$  светила  $\sigma$ .

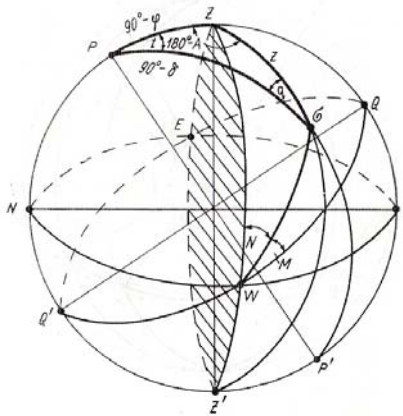


Рис. 7. Положение светила на небесной сфере

Для решения многих астрономических задач применяют формулы сферической тригонометрии. По формуле косинуса стороны имеем:

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t \quad (1.1)$$

$$\sin \delta = \sin \varphi \cos z - \cos \varphi \sin z \cos A \quad (1.2)$$

Угол при вершине  $\sigma$  вычисляется редко. Он называется параллактическим углом.

Чтобы определить часовой угол  $t$  пользуются теоремой синусов

$$\frac{\sin(180 - A)}{\sin(90 - \delta)} = \frac{\sin t}{\sin z},$$

$$\sin z \sin A = \cos \delta \sin t. \quad (1.3)$$

Для удобства вычисления  $z$  и  $A$  вводят обозначение

$$m \sin M = \sin \delta, \quad (1.4)$$

$$m \cos M = \cos \delta \cos t \quad (1.5)$$

где  $M$  – вспомогательный угол при точке запада между экватором  $QQ'$  и дугой большого круга  $W\sigma$ ,  $0 < m < 1$ .

Формула (1.1) примет вид

$$\begin{aligned} \cos z &= \sin \varphi m \sin M + \cos \varphi m \cos M, \\ \cos z &= m(\sin \varphi \sin M + \cos \varphi \cos M). \end{aligned} \quad (1.6)$$

Величина в правой части в скобках представляет собой косинус разности двух углов

$$\cos z = m \cos(\varphi - M). \quad (1.7)$$

По формуле пяти элементов

$$\sin z \cos A = \cos \delta \sin \varphi \cos t - \sin \delta \cos \varphi. \quad (1.8)$$

С учетом обозначений (1.4) и (1.5) формула (1.8) примет вид

$$\sin z \cos A = m \sin(\varphi - M). \quad (1.9)$$

Так как функция точнее определяется по тангенсу, чем по синусу, то деля формулы (1.4) и (1.5) друг на друга, получают

$$\operatorname{tg} M = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\cos t}. \quad (1.10)$$

Затем находят  $m$  по формуле (1.4)

$$m = \frac{\sin \delta}{\sin M}. \quad (1.11)$$

Разделив формулу (1.3) на (1.9) определяют азимут  $A$ .

$$\operatorname{tg} A = \frac{\cos \delta \sin t}{m \sin(\varphi - M)}. \quad (1.12)$$

## 2. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ

### 2.1. Звездное время

Звездное время  $s$  определяется часовым углом точки весеннего равноденствия (рис. 6). В момент звездного времени  $s$  часовой угол  $t$  любого светила, и имеющего прямое восхождение  $\alpha$ , определяется формулой

$$t = s - \alpha,$$

откуда получают

$$s = t + \alpha, \quad (2.1)$$

т. е. звездное время в данный момент численно равно часовому углу любого светила плюс его прямое восхождение

Истинное звездное время в  $\theta^h$  всемирного времени определяется формулой:

$$S_o = 12^h + \text{прямое восхождение среднего Солнца (включая аберрацию) + нутация в прямом восхождении} \quad (2.2)$$

Зависимость между гринвичским звездным временем и всемирным дается формулой:

$$S = 12^h + M + \alpha M + \text{нутация} \quad (2.3)$$

С учетом формулы (1) гринвичское звездное время выразится следующим уравнением:

$$S = S_o + M + \mu M, \quad (2.4)$$

где  $\mu = 0,0027304336$ .

Всемирное время определяется формулой:

$$M = \nu_\alpha m + \ell. \quad (2.5)$$

Местное звездное время вычисляется по формуле:

$$s = S_o + m + \mu m + \mu \ell. \quad (2.6)$$

Примеры для определения звездного времени даны в Приложении А.

## 2.2. Истинное солнечное время

При измерении времени по Солнцу за точку, относительно которой отсчитываются обороты Земли вокруг своей оси, принимается центр солнечного диска, который обычно называют истинным Солнцем.

Промежуток времени между двумя последовательными прохождением через небесный меридиан данного пункта истинного Солнца называется *истинными сутками*.

Момент верхней кульминации истинного Солнца на меридиане данного пункта называется *истинным полднем*. В этот момент часовой угол

$t_{\odot}$  истинного Солнца равен нулю, а истинное солнечное время равно  $12^h$ .

Таким образом, истинными сутками называется промежуток времени между истинными полуночами. Время, прошедшее от истинной полуночи до любого другого момента называется местным истинным солнечным временем и обозначается буквой  $m$ .

$$m_{\odot} = t_{\odot} + 12^h \quad (2.7)$$

Таким образом, для определения истинного солнечного времени в любой момент достаточно получить из наблюдений в этот момент часовой угол истинного Солнца. Однако часовой угол истинного Солнца изменяется непропорционально времени, т. е. истинное солнечное время течет неравномерно по следующим причинам.

Согласно первому закону Кеплера годичное движение Земли происходит по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце. Согласно второму закону Кеплера о постоянстве секториальной скорости движения Земли вокруг Солнца неравномерно. Скорость движения Земли достигает наибольшей величины при прохождении ею наиболее близкой к Солнцу точки ее орбиты (перигелия); с наименьшей скоростью Земля движется в наиболее удаленной точке орбиты (в афелии).

Второй причиной неравномерного течения истинного солнечного времени является наклон небесного экватора к эклиптике. Склонение Солнца в течение года меняется в пределах

$$-23^{\circ}27' \leq \delta_{\odot} \leq +23^{\circ}27'.$$

В результате действия рассмотренных выше причин продолжительность истинных суток в течении года меняется до 50".

### 2.3. Среднее солнечное время

Для создания более совершенной системы измерения времени по Солнцу была введена система измерения времени по среднему экваториальному Солнцу.

Представим себе фиктивную точку, которая равномерно движется по эклиптике со скоростью, равной средней скорости движения истинного Солнца, соответствующей средней скорости движения Земли. Эта фиктивная точка называется средним эклиптическим Солнцем.

Среднее эклиптическое Солнце одновременно с истинным Солнцем проходит через и перигей и апогей. Так как в перигее скорость движения истинного Солнца максимальна, то после прохождения через перигей оно опередит среднее эклиптическое Солнце. По мере приближения к апогею движение истинного Солнца замедляется, и среднее эклиптическое Солнце постепенно догоняет его. Через апогей они проходят одновременно. После апогея среднее эклиптическое Солнце опередит истинное Солнце, но т. к. скорость движения последнего по мере приближения к перигею возрастает, то через перигей они пройдут одновременно.

Для некоторого интервала времени долгота среднего эклиптического Солнца равняется долготе истинного Солнца, т. е.

$$\ell_{\text{ср.экл.}\odot} = (\ell)_{\text{ср.}\odot} \quad (2.8)$$

Введение среднего эклиптического Солнца снимает только один из факторов, вызывающих изменяемость единиц времени.

Второй фактор – наклон экватора к эклиптике вызывает неравномерное возрастание прямого восхождения среднего эклиптического Солнца и, следовательно, неравномерность изменения его часового угла (рис. 8).

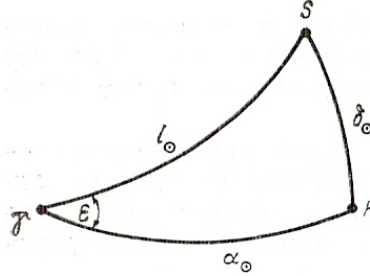


Рис. 8. Наклон экватора к эклиптике

Из прямоугольного сферического треугольника  $\gamma SF$  по правилу Непера - Модюи находят:

$$\cos \varepsilon = \operatorname{ctg} \ell_{\text{ср.экл.}\odot} \operatorname{tg} \alpha_{\text{ср.экл.}\odot} \quad (2.9)$$

$$\cos \ell_{\text{ср.экл.}\odot} = \cos \alpha_{\text{ср.экл.}\odot} \cos \delta_{\text{ср.экл.}} \quad (2.10)$$

где  $\ell_{\text{ср.экл.}\odot}$ ,  $\alpha_{\text{ср.экл.}\odot}$ ,  $\delta_{\text{ср.экл.}\odot}$  – соответственно долгота, прямое восхождение и склонение эклиптического Солнца.

Из выражения (2.9) имеют:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{ср.экл.}\odot} = \operatorname{tg} \ell_{\text{ср.экл.}\odot} \cos \varepsilon \quad (2.11)$$

Дифференцируя (2.11) по переменным  $\ell_{\text{ср.экл.}\odot}$ ,  $\alpha_{\text{ср.экл.}\odot}$ , считая  $\varepsilon$  постоянной величиной, получают

$$\frac{d\alpha_{\text{ср.экл.}\odot}}{dt \cos^2 \alpha_{\text{ср.экл.}\odot}} = \frac{d\ell_{\text{ср.экл.}}}{dt \cos^2 \ell_{\text{ср.экл.}\odot}} \cos \varepsilon \quad (2.12)$$

Подставляя в (2.12) выражение  $\cos \ell_{\text{ср.экл.}\odot}$  из (2.10) имеем:

$$\frac{d\alpha_{\text{ср.экл.}\odot}}{dt} = \frac{d\ell_{\text{ср.экл.}\odot}}{dt} \sec^2 \delta_{\text{ср.экл.}\odot} \cos \varepsilon \quad (2.13)$$

Так как среднее эклиптическое Солнце движется по эклиптике равномерно, со скоростью, равной средней скорости

движения истинного Солнца, то производная  $\frac{d\ell_{\text{ср.экл.}\odot}}{dt}$  величина постоянная.

В правую часть формулы (2.13) входит  $\sec^2 \delta_{\text{ср.экл.}\odot}$ , Так как склонение среднего эклиптического Солнца – величина переменная, то и скорость изменения его прямого восхождения, т. е. производная  $\frac{d\alpha_{\text{ср.экл.}\odot}}{dt}$  величина переменная.

Для того чтобы исключить влияние фактора  $\sec^2 \delta_{\text{ср.экл.}\odot}$ , представим себе точку, которая равномерно движется по экватору. Эта фиктивная точка называется средним экваториальным Солнцем. Среднее экваториальное Солнце связано со средним эклиптическим определенными условиями: двигаясь по экватору с той же скоростью, с которой среднее эклиптическое Солнце движется по эклиптике, оно одновременно с ним проходит через точки весеннего и осеннего равноденствия.

Следовательно, прямое восхождение среднего экваториального Солнца всегда равно долготе среднего эклиптического Солнца или средней долготе истинного Солнца, т. е.

$$-23^\circ 27' \leq \delta_{\odot} \leq +23^\circ 27'. \quad (2.14)$$

Из наблюдений Солнца и планет по законам небесной механики можно вычислить среднее увеличение долготы Солнца  $\Delta \ell_{\odot}$  за единицу времени. Кроме этого можно определить долготу среднего эклиптического Солнца для момента времени  $t_0$ . Зная  $\Delta \ell_{\odot}$  и  $\ell_{\text{ср.экл.}\odot}$  для момента  $t_0$  можно найти долготу среднего эклиптического Солнца для любого момента времени  $t$ . Таким образом, для любого момента времени взаимное расположение истинного Солнца и среднего экваториального Солнца может быть определено.

Момент верхней кульминации среднего экваториального Солнца на меридиане данного пункта называется средним полднем, момент нижней – средней полночью.

Промежуток времени между двумя последовательными нижними кульминациями среднего экваториального Солнца на меридиане данного пункта называется средними солнечными сутками.

В момент нижней кульминации среднего экваториального Солнца, т. е. в среднюю полночь, среднее солнечное время равно  $0^{\text{h}}00^{\text{m}}00^{\text{s}}$ , а часовой угол среднего экваториального Солнца равен  $12^{\text{h}}$ .

Время, прошедшее от начала средних солнечных суток до любого момента называется средним солнечным временем и обозначается буквой  $m$ .

Среднее солнечное время численно равно часовому углу среднего экваториального на данном меридиане и увеличенному на  $12^{\text{h}}$ .

$$m = t_{\text{ср. экв. } \Theta} + 12^{\text{h}}. \quad (2.15)$$

На меридиане Гринвича формула (2.15) имеет вид

$$M = T_{\text{ср. экв. } \Theta} + 12^{\text{h}}. \quad (2.16)$$

#### 2.4. Измерение времени на разных меридианах

Звездное время  $s$ , истинное солнечное время  $m_{\odot}$  и среднее солнечное время  $m$  в какой-либо точке земной поверхности называются соответственно местным звездным, местным истинным и местным средним солнечным временем.

Для определения разности местных времен используют формулу, устанавливающую связь между разностью долгот пунктов земной поверхности и разностью часовых углов светила

$$t_A - t_B = \lambda_A - \lambda_B. \quad (2.17)$$

Применим эту формулу к часовым углам точек, используемых для измерения времени, т. е. к точке весеннего равноденствия, к истинному Солнцу, к среднему экваториальному Солнцу. Относительно этих точек отсчитываются обороты Земли вокруг оси и их часовые углы являются мерой времени

$$\left. \begin{aligned} t_{\gamma_A} - t_{\gamma_B} &= \lambda_A - \lambda_B \\ t_{\Theta_A} - t_{\Theta_B} &= \lambda_A - \lambda_B \\ t_{ср.экв.\Theta_A} - t_{ср.экв.\Theta_B} &= \lambda_A - \lambda_B \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

Принимая во внимание, что  $t_{\gamma} = s$ ,  $t_{\Theta} + 12^h = m_{\Theta}$ ,  $t_{ср.экв.\Theta} + 12^h = m$  и подставляя эти разности в выражение (17) получим следующие формулы:

$$\left. \begin{aligned} s_A - s_B &= \lambda_A - \lambda_B \\ m_{\Theta_A} - m_{\Theta_B} &= \lambda_A - \lambda_B \\ m_A - m_B &= \lambda_A - \lambda_B \end{aligned} \right\}. \quad (2.19)$$

Следовательно, разность одноименных местных времен (звездных, истинных солнечных или средних солнечных), определенных в один и тот же физический момент в двух разных пунктах земной поверхности, расположенных на разных меридианах, численно равна разности географических долгот этих пунктов, выраженных в часовой мере.

Предположим, что точка  $B$  – Гринвич ( $\lambda = 0$ ), а точка  $A$  – пункт земной поверхности, расположенный на любом другом меридиане. Тогда формулы определения времени будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} s &= S \pm \lambda \\ m_{\Theta} &= M_{\Theta} \pm \lambda \\ m &= M \pm \lambda \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

Формулы (2.20) могут быть использованы для нахождения гринвичского времени, если известны местное время и долгота пункта от Гринвича.

$$\left. \begin{aligned} S &= s \pm \lambda \\ M_{\Theta} &= m_{\Theta} \pm \lambda \\ M &= m \pm \lambda \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

## 2.5. Переход от звездного времени к среднему и обратно

Для измерения коротких промежутков времени в астрономии применяются две единицы: звездные сутки и средние солнечные сутки.

Звездные сутки – это промежуток времени между двумя последовательными верхними кульминациями точки весеннего равноденствия на меридиане данного пункта. Средние солнечные сутки – это промежуток времени между двумя последовательными верхними кульминациями среднего экваториального Солнца на меридиане данного пункта.

Так как Солнце вследствие своего видимого годового движения перемещается относительно звезд и относительно точки весеннего равноденствия навстречу суточному вращению небесной сферы, звездные сутки примерно на  $4^m$  короче средних солнечных суток.

21 марта среднее экваториальное Солнце проходит через точку весеннего равноденствия  $\gamma$ . Следовательно, в этот день в точке земной поверхности  $A$  с зенитом  $Z_A$  согласно рис. 30 среднее экваториальное Солнце и точка весеннего равноденствия одновременно проходят через небесный меридиан  $PZ_AP'$  в верхней кульминации, т. е. для этого меридиана начало звездных суток совпадает со средним полднем

После полного оборота Земля относительно точки весеннего равноденствия (22 марта) эта точка снова придет на меридиан  $PZ_AP'$ , в результате чего закончатся одни звездные сутки.

Вследствие видимого годового движения, направление которого на рис. 9 указано стрелкой в противоположном направлении суточного вращения небесной сферы, Солнце за эти сутки отойдет от точки весеннего равноденствия на дугу  $\gamma F$ ,

равную примерно  $1^\circ \left( \frac{360^\circ}{365,2422} \right)$ .

Поэтому в момент окончания звездных суток Солнце будет находиться от меридиана  $PZ_AP'$  на расстоянии дуги  $\gamma F$ . Чтобы наступил новый средний полдень, небесная сфера должна повернуться на угол  $\gamma OF$ , соответствующей дуге, пройденной средним экваториальным Солнцем за сутки. Следовательно,

средние солнечные сутки длиннее звездных на промежуток времени, который потребуется небесной сфере, чтобы повернуться на угол дуги  $\gamma OF$ , измеряющий отход Солнца от точки весеннего равноденствия за одни сутки.

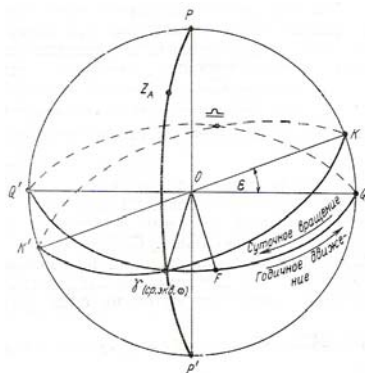


Рис. 9. Связь между солнечным временем и звездным

Так как среднее экваториальное Солнце движется по экватору равномерно, то очевидно, что через четверть года оно пройдет дугу  $\gamma Q$ , равную  $90^\circ$ , и средние солнечные сутки закончатся позже соответствующих звездных суток на 6 звездных часов. Через полгода Солнце придет в точку осеннего равноденствия, и средние солнечные сутки закончатся позже соответствующих звездных суток на 12 звездных часов.

По истечению полного года опоздание среднего экваториального Солнца будет равно 24 звездным часам, т. е. одним звездным суткам. Таким образом в течение одного тропического года среднее экваториальное Солнце будет кульминировать на меридиане данной точки на один раз меньше, чем точка весеннего равноденствия. Другими словами, в тропическом году содержится средних солнечных суток на одни сутки меньше, чем звездных.

364,2422 ср. солнечных суток = 366,2422 звездных суток,  
откуда (2.22)

$$1 \text{ ср. солнечные сутки} = \left( \frac{365,2422 + 1}{365,2422} \right) \text{ звездных суток, или}$$

$$1 \text{ ср. солнечные сутки} = (1 + \mu) \text{ звездных суток,} \quad (2.23)$$

где  $\mu = \frac{1}{365,2422} = 0,00274$ .

Следовательно, средние солнечные сутки длиннее звездных на 0,00274 звездных суток или на  $3^m 56^s,555$  (звездных единиц), т. е.

$$1 \text{ ср. солнечные сутки} = 24^h + 3^m 56^s,555 = \\ = 24^h 3^m 56^s,555 \text{ звездных единиц времени.}$$

Аналогично на основании равенства (22) имеем

$$1 \text{ ср. солнечный час} = 1^h 00^m 09^s,856 \text{ звездных единиц времени}$$

$$1 \text{ ср. солнечная минута} = 1^m 00^s,164 \text{ звездных единиц времени} \quad (2.24)$$

$$1 \text{ ср. солнечная секунда} = 1^s,003 \text{ звездных единиц времени}$$

Звездное время равно

$$s = m (1 + \mu) = m + m \mu. \quad (2.25)$$

Произведение  $m \mu$  называется редукцией за переход от средних единиц к звездным.

Для обратного перехода, т. е. для перевода промежутка времени, выраженного в звездных единицах, в средние солнечные единицы, напомним равенство (2.22), поменяв местами его правую и левую части:

$$366,2422 \text{ звездных суток} = 365,2422 \text{ ср. солнечных суток,} \\ \text{откуда} \quad (2.26)$$

$$1 \text{ звездные сутки} = \left( \frac{366,2422 - 1}{366,2422} \right) \text{ ср. солнечных суток}$$

$$1 \text{ звездные сутки} = (1 - \nu) \text{ ср. солнечных суток,} \quad (2.27)$$

где  $-\nu = \frac{1}{366,2422} = 0,00273$ .

Из равенства (46) следует, что одни звездные сутки короче средних солнечных суток, т. е. на  $3^m 55^s,909$  средних солнечных единиц времени

$$1 \text{ звездные сутки} = 24^h - 3^m 55^s .909 = \\ = 23^h 56^m 04^s .091 \text{ ср. солнечных единиц времени.}$$

Аналогично на основании равенства (2.27) имеем

$$\begin{aligned} 1 \text{ звездный час} &= (1^h - 9^s .830) = \\ &= 59^m 50^s .836 \text{ ср. солнечных единиц времени} \\ 1 \text{ звездная минута} &= (1^m - 0^s .164) = \\ &= 59^s .836 \text{ ср. солнечных единиц времени} \\ 1 \text{ звездная секунда} &= (1^s - 0^s .003) = \\ &= 0^s .997 \text{ ср. солнечных единиц времени.} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Формула для перевода промежутков времени, выраженных в звездных единицах, в средние солнечные будет иметь вид

$$m = s (1 - V) = s - s V. \quad (2.29)$$

Произведение  $sV$  называется редукцией за переход от звездных единиц времени к средним.

Если бы звездные и солнечные сутки начинались в один и тот же момент, т. е. в  $0^h$  среднего солнечного времени было бы  $0^h$  звездного времени, то для перехода от среднего солнечного времени к звездному и обратно можно было бы пользоваться формулами (2.25) и (2.29). Однако  $0^h$  среднего солнечного времени звездное время не равно  $0^h$ . С другой стороны, и  $0^h$  звездного времени среднее солнечное время также не равно  $0^h$ .

Имея в виду это обстоятельство, напомним формулу для перехода от среднего солнечного времени  $m$  к звездному  $s$ :

$$s = s_0 + m + m\mu, \quad (2.30)$$

где  $s_0$  – звездное время в  $0^h$  среднего солнечного времени, т. е. в местную среднюю полночь;

$m$  – промежуток времени прошедший от полуночи до момента  $m$ ;

$m\mu$  – редукция этого промежутка в звездные единицы.

Применительно к Гринвичу формула (2.30) примет вид

$$S = S_0 + M + M\mu. \quad (2.31)$$

Здесь  $S$  – звездное Гринвичское время, соответствующее данному моменту всемирного времени  $M$ ;  $S_0$  – звездное время в среднюю гринвичскую полночь, т. е. в  $0^h$  всемирного времени;  $M\mu$  – редукция всемирного времени в звездные единицы.

Величина  $S_0$  вычисляется по формуле

$$S_0 = S_0 = \alpha_{\text{ср. экв. } \odot} + 12^h \quad (2.32)$$

и для каждого года публикуется АЕ. Так как полночь наступает не одновременно на всех меридианах, то звездное время  $s_0$  в полночь в разных точках земной поверхности неодинаково, и, следовательно, отличается от  $S_0$ .

Выбрав для соответствующей даты и АЕ звездное время  $S_0$  в среднюю гринвичскую полночь, звездное время  $s_0$  в местную полночь найдем по формуле

$$s_0 = S_0 \pm \lambda\mu \quad (2.33)$$

Если точка земной поверхности с долготой  $\lambda$  находится к западу от Гринвича, поправка  $\lambda\mu$  войдет со знаком плюс. Если точка земной поверхности с долготой  $\lambda$  находится к востоку от Гринвича, поправка  $\lambda\mu$  войдет со знаком минус.

Формула перехода от звездного времени к среднему солнечному будет иметь вид

$$m = m_0 + s - s\nu. \quad (2.34)$$

Для Гринвича эта формула примет вид

$$M = M_0 + S - S\nu, \quad (2.35)$$

где  $M_0$  – всемирное время в  $0^h$  звездного Гринвичского времени.

Величина  $M_0$  для каждого звездных суток до 1960 г. публиковалась в АЕ и до сих пор публикуется в некоторых иностранных ежегодниках. Так как величина  $M_0$  не публикуется, то перевод местного звездного времени в средние солнечные осуществляется по формуле

$$m = (s - s_0) - (s - s_0)\nu \quad (2.36)$$

С переходом на Гринвич эта задача решается по формулам:

$$\begin{aligned} S &= s - \lambda_E \\ M &= (S - S_0) - (S - S_0)\nu. \end{aligned} \quad (2.37)$$

## 2.6. Поясное и декретное время

Из астрономических наблюдений получают местное время того меридиана, на котором произведены наблюдения.

При международных сношениях для публикации большинства астрономических явлений в астрономических ежегодниках, а также во многих научных исследованиях широко используется всемирное время. Однако введение всемирного времени на всем земном шаре для целей повседневной жизни вызвало бы противоречие с самой природой.

Для устранения этого неудобства в конце XIX в. во многих государствах было введено так называемое поясное время.

При поясном счете времени за начало суток принимается полночь осевого меридиана данного пояса. Поясное время обозначают через  $T_n$ .

$$T_n = M + n. \quad (2.38)$$

Разность поясных времен двух пунктов земной поверхности, находящихся в часовых поясах с номерами  $n$  и  $m$ , равна разности их часовых поясов и представляет собой всегда целое число часов,

$$T_n - T_m = n - m$$

откуда

$$T_m = T_n - (n - m). \quad (2.39)$$

В 1956 г. в связи с существенно изменившимися экономическими связями в нашей стране установлены границы часовых поясов.

В 1930 г. Советским правительством был издан декрет, согласно которому стрелки часов были переведены на 1<sup>h</sup> вперед

по сравнению с поясным временем. Такое время, получившее название декретного времени, сохраняется до сих пор.

Декретное время  $D_n$  связано с поясным и всемирным временем соотношениями:

$$D_n = T_n + 1^h, \quad (2.40)$$

$$D_n = M + (n + 1^h). \quad (2.41)$$

Формулы для перехода к поясному и декретному времени от среднего солнечного и обратно получаются на основании следующих соображений. Всемирное равняется:

$$\left. \begin{aligned} M &= m \pm \lambda \\ M &= T_n - n \\ M &= D_n - (n + 1) \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

Отсюда следует, что

$$\left. \begin{aligned} T_n &= m + (n \pm \lambda) \\ m &= T_n - (n \pm \lambda) \\ D_n &= m + [(m + 1) - \lambda_E] \\ m &= D_n - [(m + 1) - \lambda_E] \end{aligned} \right\} \quad (2.43)$$

## 2.7. Неравномерность вращения Земли

В настоящее время установлено, что Земля вращается вокруг своей оси неравномерно. Скорость вращения Земли подвержена замедлению векового характера, вызываемому приливным трением. Следствием этого замедления является непрерывное увеличение суток в среднем на  $0^s.0016$  в столетие. Причиной отклонения равномерного вращения является сезонное перераспределение масс на поверхности Земли и в атмосфере. В августе Земля вращается быстрее, и продолжительность суток уменьшается, в марте медленнее, и продолжительность суток увеличивается. Разность между продолжительностью самых длинных и самых коротких суток доходит до  $0,0025^s$ . Кроме этого скорость вращения Земли подвержена изменениям нерегулярного характера, причиной

которых является перераспределение масс внутри Земли. Нерегулярные изменения скорости вращения Земли вызывают изменения продолжительности суток до  $0,0034^s$ .

В тридцатых годах XX в. были созданы кварцевые часы, устройство которых основано на использовании электромагнитных колебаний в ламповом генераторе, стабилизированном кварцем. Применением кварцевых часов, обладающих высоким постоянством частоты, позволило обнаружить сезонные изменения скорости вращения Земли.

Наибольшим постоянством частоты обладают колебания в атомных и молекулярных генераторах. *Атомным временем* называется время, в основу измерения которого положены электромагнитные колебания, излучаемые или поглощаемые атомами или молекулами некоторых веществ при переходе из одного определенного энергетического состояния в другое. За единицу атомного времени принята атомная секунда, определяемая как интервал времени, за который совершается 91 926 317 776 электромагнитных колебаний.

Для измерения атомного времени созданы атомные или молекулярные часы, которые с высокой степенью точности фиксируют частоту колебаний цезиевого резонатора.

Среднее солнечное время на гринвичском меридиане (всемирное время) обозначается  $TUO$ . Вследствие изменения долгот точек земной поверхности, вызванного движением земных полюсов всемирное время  $TUO$ , определяемое в разных точках Земли, будет неодинаково. В него необходимо ввести поправку  $\Delta\lambda$  за движение полюсов.

$$TUI = TUO + \Delta\lambda \quad (2.44)$$

Вследствие неравномерности вращения Земли всемирное время будет неравномерным. Если всемирное время  $TUI$  исправить поправкой за сезонные колебания скорости вращения Земли, то время, полученное таким образом, называется предварительным равномерным (квазиравномерным) всемирным временем

$$TU2 = TUI + \Delta T_s = TUO + \Delta\lambda + \Delta T_s. \quad (2.45)$$

Поправки  $\Delta\lambda$  и  $\Delta T$  вычисляются Международным бюро времени (МБВ) и публикуются в его бюллетенях.

## 2.8. Эфемеридное время

Теория движения дают нам положение Солнца, Луны и планет в виде функций равномерного времени, тогда как полученные из наблюдений координаты, вследствие неравномерности вращения Земли, являются функциями неравномерного времени.

В астрономии в настоящее время существуют два понятия времени.

*Во-первых*, время, измерение которого основано на вращении Земли, определяемое при помощи астрономических наблюдений. Это время называется *средним солнечным*, если оно выражено в средних солнечных единицах и *звездным*, если оно выражено в звездных единицах.

*Во-вторых*, равномерное время, положенное в основу гравитационной теории движения тел солнечной системы. Согласно рекомендации Парижской международной конференции по фундаментальным постоянным 1950 г., это время, т. е. аргумент, являющийся независимой переменной дифференциальных уравнений движения небесных тел, было названо *эфемеридным временем*.

Пользуясь методами небесной механики можно предвычислить положения Солнца, Луны и планет на несколько десятилетий вперед. Такая работа была проделана Ньюкомбом, составившим таблицы координат Солнца и планет. Броун составил таблицы движения Луны. Однако при сравнении наблюденных координат Солнца, Луны и планет с координатами, взятыми из таблиц и приведенными к моменту наблюдений, между ними были обнаружены систематические расхождения.

Согласно строгой современной теории средняя долгота Луны определяется выражением:

$$\begin{aligned} \ell_{\text{луны}} = \ell_{\text{Броун}} - 10,71'' \sin(240,7^\circ + 140,07^\circ) + \\ + 4,65'' + 12,96'' T + 5,22'' T^2 \end{aligned} \quad (2.46)$$

где  $T$  – число юлианских столетий, протекающих от среднего гринвичского полдня 1900, январь 0.

Однако долгота Луны, вычисленная по формуле (2,46), не совпадает с наблюдаемой долготой  $\ell_{набл.}$  Луны.

Разность  $B = \ell_{набл.} - \ell_{луны}$  называется флуктуацией Луны по долготе.

Поправка, которую надо прибавить в средние долготы Луны, даваемой таблицами Броуна для согласования ее с наблюдениями равна:

$$\Delta \ell_{луны} = \ell_{набл.} - \ell_{луны} = \\ = +4,65'' + 12,96'' T + 5,22'' T^2 - 10,71'' \sin(240,7^\circ + 140,0^\circ T) + B \quad (2.47)$$

Средние долготы Меркурия, Венеры и Солнца, полученные по таблицам координат Солнца и планет, составленным Ньюкомбом, согласно исследованиям Спенсера Джонса, должны быть исправлены следующими поправками:

$$\Delta \ell_{мерк.} = 4,96'' + 13,08'' T + 5,10'' T^2 + 0,310 B \\ \Delta \ell_{вен.} = 2,26'' + 5,39'' T + 2,00'' T^2 + 0,122 B \quad (2.48) \\ \Delta \ell_{\odot} = 1,00'' + 2,97'' T + 1,23'' T^2 + 0,0748 B$$

Все эти расхождения объясняются одной общей причиной – неравномерностью вращения Земли.

Обозначим через  $\Delta T$  разность между эфемеридным  $TE$  и всемирным  $TU2$  временем. Тогда эфемеридное время выразится формулой

$$TE = TU2 + \Delta T. \quad (2.49)$$

Разность  $\Delta T$  может быть получена на основании следующих соображений. Солнце за тропический год, т. е. за 365,2422 средних солнечных суток проходит по эклиптике дугу, равную  $359^\circ 59' 10''$ . Дугу в  $1''$  Солнце проходит за 24,349 средних солнечных секунды. Следовательно, если поправка средней долготы Солнца  $\Delta \ell_{\odot}$  изменится на  $1''$ , то поправка  $\Delta T$  к всемирному времени изменится на 24,349 средних солнечных секунды.

Таким образом

$$\Delta T = \frac{24^s,349}{1''} \Delta \ell_{\odot} = 24,349 \Delta \ell_{\odot} \quad (2.50)$$

Подставляя в (2.50) значение  $\Delta \ell_{\odot}$ , полученное Спенсером Джонсом,  $\Delta T$  вычисляется по формуле

$$\Delta T = +24,349^s + 72,318^s T + 29,950^s T^2 + 1,821B. \quad (2.51)$$

Искомая поправка  $\Delta T$  к всемирному времени с наибольшей точностью определится из наблюдений светил. Таким светилом является Луна.

Точное значение величины  $\Delta T$  может быть получено только после того, как будет найдена величина  $B$  – флуктуация Луны. Следовательно, точные значения  $\Delta T$  могут быть получены лишь для прошедших моментов времени.

Для многих целей достаточно знать приближенное значение  $\Delta T$ . Такие экстраполированные значения  $\Delta T$  на каждый год публикуются в астрономических ежегодниках.

Введение эфемеридного времени позволило согласовать наблюдаемые положения Солнца, Луны и планет с их эфемеридами, вычисленными по гравитационной теории.

Предположим, что в эпоху 1900,0 начали обращаться две точки, совпадающие с гринвичским меридианом. Одна из них двигалась все время равномерно, а другая неравномерно, причем в любой момент скорость ее движения была равна скорости вращения Земли. Поскольку вторая точка вращается вместе с Землей, то в силу приливного трения она будет все более и более отставать от первой и, следовательно, гринвичский меридиан будет отставать от меридиана первой точки.

Этот меридиан, вращающийся равномерно с угловой скоростью, равной одному обороту за эфемеридные звездные сутки и в начальный момент, совпадающий с меридианом Гринвича, называется *эфемеридным меридианом*.

Так как Земля вращается с запада на восток, то эфемеридный меридиан располагается к востоку от Гринвича.

Долгота точек земной поверхности, считаемые от эфемеридного меридиана, определяются по формуле

$$\ell = \lambda + (1 + \mu)\Delta T. \quad (2.52)$$

В формуле (2.52) через  $\ell$  обозначена долгота точек, считаемая от эфемеридного меридиана, а через  $\lambda$  – от гринвичского.

## 2.9. Связь истинного солнечного времени со средним

Истинное солнечное время определяется формулой  $m_{\odot} = t_{\odot} + 12^h$ , а среднее солнечное время формулой  $m = t_{\text{ср. экв. } \odot} + 12^h$ .

Вычитая из первой формулы вторую, мы видим, что разность между истинным солнечным и средним солнечным временем равняется разности часовых углов истинного и среднего экваториального Солнца, т. е.

$$m = t_{\text{ср. экв. } \odot} + 12^h \quad (2.53)$$

Согласно формуле звездного времени, часовые углы истинного и среднего экваториального Солнца равны:

$$t_{\odot} = s - \alpha_{\odot}, \quad t_{\text{ср. экв. } \odot} = s - \alpha_{\text{ср. экв. } \odot}. \quad (2.54)$$

Подставляя выражение (2.54) в (2.53), получим

$$m_{\odot} - m = t_{\odot} - t_{\text{ср. экв. } \odot} \quad (2.55)$$

Разность между истинным солнечным и средним солнечным временем называется *уравнением времени*.

Обозначая уравнение времени, увеличенное на  $12^h$  буквой  $E$ , имеем

$$E = \alpha_{\text{ср. экв. } \odot} - \alpha_{\odot} + 12^h \quad (2.56)$$

Согласно равенству (2.14) имеем

$$\alpha_{\text{ср. экв. } \Theta} = (\ell_{\Theta})_{\text{ср.}},$$

откуда

$$E = (\ell_{\Theta})_{\text{ср.}} + \alpha_{\Theta} + 12^{\text{h}}. \quad (2.57)$$

Зная среднюю суточную скорость движения Солнца по эклиптике,  $(\ell_{\Theta})_{\text{ср.}}$  можно вычислить для любого момента времени.

Прямое восхождение истинного Солнца  $\alpha_{\Theta}$  вычисляется по формуле теоретической астрономии. Таким образом, уравнение времени может быть получено для каждого дня года.

Уравнение времени изменяется в течение года от 0 до  $\pm 16^{\text{m}}$ . Оно имеет два максимума, два минимума и четыре раза в год обращается в нуль (15 марта, 14 июня, 1 сентября и 25 декабря).

График уравнения представляет сложную кривую, получающуюся от сложения двух синусоид: с годовым и полугодовым периодами.

Синусоидой с годовым периодом и амплитудой около  $8^{\text{m}}$  представлено влияние неравномерности движения Солнца по эклиптике. Синусоидой с полугодовым периодом и амплитудой около  $10^{\text{m}}$  представлено влияние изменения склонения Солнца.

Начиная с 1960 г. в таблицах "Солнце" АЕ для  $0^{\text{h}}$  эфемеридного времени каждого дня года дается уравнение времени, увеличенное на  $12^{\text{h}}$ , т. е. величину  $E$ . Величина  $E$  широко используется при решении различных задач.

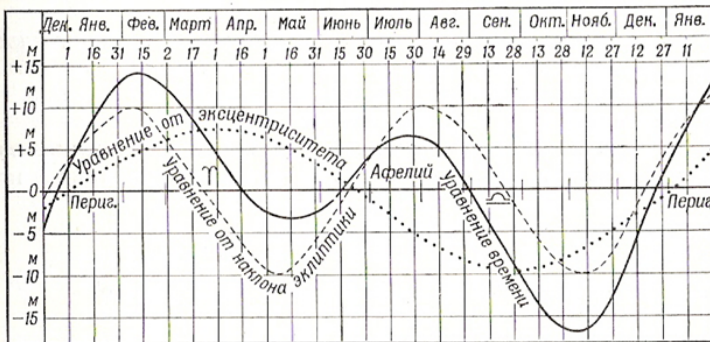


Рис. 10. График уравнения времени

Искомая связь истинного солнечного со средним солнечным временем устанавливается формулами

$$\left. \begin{aligned} m_{\odot} &= m + E - 12^h \\ m &= m_{\odot} - E + 12^h \end{aligned} \right\} \quad (2.58)$$

## 2.10. Скоординированное время

С 1884 г. за международный стандарт времени было принято GMT с поправкой на целое число часов, отвечающее «часовому поясу», или меридиану ближайшего к наблюдателю административного центра. Этот стандарт был назван UT (Universal Time), или  $UT_0$ , т. к. позже были приняты «уточняющие» его стандарты  $UT_1$  и  $UT_2$ , всё ещё опирающиеся на астрономические наблюдения.

С 1 января 1958 г. за эталон международного времени также было принято атомное время; международное время в нулевом часовом поясе совпадало с TAI.

С 1967 г. международная система единиц СИ определяет одну секунду как 9 192 631 770 (девять миллиардов сто девяносто два миллиона шестьсот тридцать одна тысяча семьсот семьдесят) периодов электромагнитного излучения, возникающего при переходе между двумя уровнями основного состояния атома изотопа Цезий-133.

Согласно этому определению атом цезия является стандартом для измерений времени и частоты. Точность определения секунды определяет точность определения других основных единиц, таких как, например, вольт или метр, содержащих секунду в своём определении.

К 1972 г. было замечено, что GMT и TAI расходятся на 10 с из-за неточной пропорциональности суточного и годового периода вращения Земли, а также неравномерности её суточного вращения. В результате, для согласования международного времени с солнечным были введены «високосные секунды» (leap seconds), добавляемые или вычитаемые из UTC по решению международной службы вращения земли (IERS, International Earth Rotation Service, <http://www.iers.org/iers/>) для

поддержания разницы между UT и GMT менее 0,9 с. Новый стандарт был назван UT<sub>с</sub> (Coordinated Universal Time, Temps Universel Coordonné) для обозначения его *скоординированности* с солнечным временем. Название UTC не является аббревиатурой ни на английском, ни на французском языках, вопреки расхожему заблуждению.

*Високосные секунды*

По решению IERS «високосные секунды» могут добавляться (или вычитаться) в ночь на 1 июля или 1 января; 1 июля 1972 г. было добавлено сразу 10 секунд, с тех пор изредка добавлялось по секунде (вычитание не производилось ни разу).

На октябрь 2004 г. было добавлено 32 «високосные секунды», т. е. TAI–UTC=32 с. Последняя «високосная секунда» добавлялась 1 января 1999 г. В таких случаях после 23:59:59 31 декабря следует дополнительная секунда – 23:59:60, и только затем – 0:00:00 1 января.

### **3. АСТРОНОМИЧЕСКАЯ РЕФРАКЦИЯ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ГОРИЗОНТНЫЕ КООРДИНАТЫ СВЕТИЛ**

Свет распространяется прямолинейно только в вакууме и в однородной среде. При переходе из вакуума в материальную среду с плотностью  $\delta$  или из одной материальной среды в другую разной плотности, луч света отклоняется от своего прямолинейного направления на некоторый угол, величина которого пропорциональна плотности материальной среды. Явление преломления лучей света материальной средой, а также числовая величина угла отклонения называются рефракцией.

Атмосферной рефракцией, подразделяющейся на земную и астрономическую, называется преломление лучей света земной атмосферой. Земная рефракция, под которой понимают преломление атмосферой лучей света, идущих от земных предметов, изучается в курсе высшей геодезии. Нас интересует астрономическая рефракция, т. е. преломление земной атмосферой лучей света, идущих от небесных светил, и ее влияние на координаты светил.

Окружающая Землю атмосфера является причиной того, что наблюдатель видит светило не там, где оно в действительности находится. Так как земная атмосфера является оптически неоднородной средой, причем плотность ее увеличивается от верхней границы атмосферы к поверхности Земли, то прямолинейный луч света, идущий от светила, будет распространяться в атмосфере не прямолинейно, а по некоторой кривой, обращенной выпуклостью к отвесной линии.

Вследствие этого наблюдатель, находящийся на земной поверхности в точке М (рис. 11), увидит светило не в направлении прямой  $M\sigma_0$ , соединяющей его глаз со светилом, а в направлении касательной  $M\sigma'$  к кривой, по которой световой луч распространяется в атмосфере. Так как размеры земной атмосферы пренебрегаемо малы по сравнению с расстояниями до небесных светил, направление  $M\sigma_0$  проведено параллельно направлению луча  $k\sigma$ .

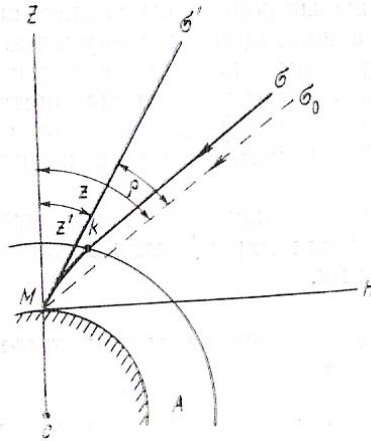


Рис. 11. Направление на светило

В теории астрономической рефракции обычно полагают, что земля имеет форму шара, поэтому  $MZ$  есть направление на зенит, а угол  $ZM\sigma'$  — искаженное рефракцией зенитное расстояние светила  $\sigma$ , полученное из наблюдений. Обозначим его через  $z'$ . Угол  $ZM\sigma_0$  есть зенитное расстояние светила  $\sigma$ , освобожденное от влияния рефракции. Разность между зенитным расстоянием  $z$  и измеренным зенитным расстоянием  $z'$ , равная углу  $z'M\sigma_0$ , также называется рефракцией и обозначается буквой  $\rho$ .

Из физики известно, что луч падающий и луч преломленный лежат в одной плоскости с нормалью, проведенной в точке падения луча к преломляющей поверхности. Следовательно, лучи  $\sigma k$ ,  $\sigma'M$  и  $\sigma_0M$  лежат в одной плоскости с отвесной линией  $MZ$ . Таким образом, явление преломления луча света, идущего от светила, происходит в вертикальной плоскости, проходящей через светило и точку наблюдения. Вследствие этого на азимут светила рефракция не влияет.

Из рис. 11 видно, что касательная  $M\sigma'$  проходит ближе к зениту, чем истинное направление на светило  $M\sigma_0$ . Поэтому под влиянием рефракции все светила оказываются выше своего действительного положения на небесной сфере. Астрономическая

рефракция поднимает светило над горизонтом, т. е. увеличивает высоту светила и уменьшает его зенитное расстояние.

Таким образом, на основании изложенных выше соображений имеем:

$$\rho = z - z'. \quad (3.1)$$

Очевидно, что вследствие влияния рефракции зенитное расстояние светила в моменты восхода и захода будет не  $90^\circ$ , а больше на величину рефракции в горизонте, которая по экспериментальным данным при температуре  $+10^\circ \text{ C}$  и атмосферном давлении 760 мм рт. ст. равна  $35'24''$ . Зенитное расстояние светил не имеющих диска, например звезд, в моменты восхода и захода будет равно  $90^\circ 35'24''$ , а для светила, имеющего диск,  $\Gamma$  пм|1||мр Солнца или Луны, определяется по формуле

$$z = 90^\circ 35'24'' + R_\odot \text{ C},$$

где  $R_\odot \text{ C}$  – радиус Солнца или Луны.

Существование астрономической рефракции было известно уже древнегреческому астроному Птолемею, жившему во II в. и. э. Первую теорию рефракции создал Кассини во второй половине XVII в.

Теорией астрономической рефракции занимались Ньютон, ИМ Симпсон, Бадлей, Эйлер, Лагранж, Лаплас, Бессель, Гюльдеи, М.А. Ковальский, С.Н. Блажко и др.

### 3.1. Приближенная формула рефракции

Величина рефракции зависит от показателя преломления  $\mu$  земной атмосферы, а последний, в свою очередь, зависит от ее плотности  $\delta$  и связан с нею соотношением

$$\mu = \sqrt{1 + 2k\delta},$$

где  $k$  – коэффициент преломления воздуха.

Однако закон изменения плотности с высотой точно неизвестен и кроме того зависит от ряда переменных факторов,

учет которых весьма сложен. Земная атмосфера не находится в покое, слои ее непрерывно перемещаются и, следовательно, направление луча света, проходящего через атмосферу, непрерывно меняется. Потому учет влияния рефракции на координаты светил является одним из самых сложных вопросов астрономии.

При наблюдении светил на зенитных расстояниях, не превышающих  $45^\circ$ , для учета влияния рефракции на координаты светил, с точностью до  $0,1''$ , можно пользоваться приближенной формулой рефракции. В этом случае теория рефракции довольно проста и строится в предположении, что на небольшом участке около точки наблюдения слои атмосферы имеют плоскую форму.

Предположим, что земная атмосфера над точкой наблюдения  $M$  состоит из  $n$  слоев, плотность которых уменьшается с высотой (рис. 12). Слои атмосферы разделены параллельными горизонтальными плоскостями. На границе каждого слоя луч света, идущий от светила  $\sigma$ , будет претерпевать преломление и дальше распространяться прямолинейно до границы следующего слоя.

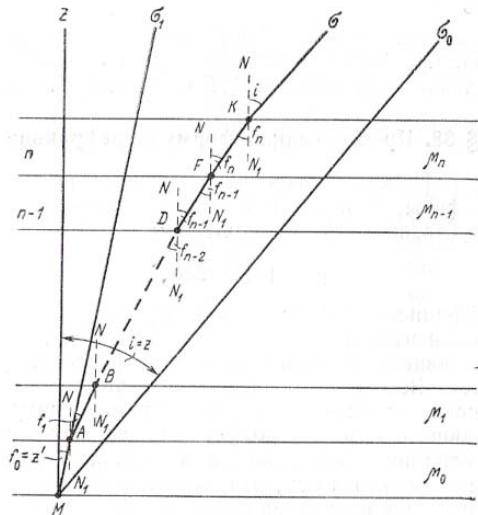


Рис. 12. Преломление луча в слоях атмосферы

Обозначим показатели преломления атмосферных слоев, начиная от поверхности Земли, через  $\mu_0, \mu_1, \dots, \mu_{n-1}, \mu_n$ . Угол падения луча при переходе из пустоты к верхней границе земной атмосферы, т. е. угол НК $\sigma$ , обозначим через  $i'$ , а угол преломления  $FKN_1$  – через  $f_n$ . Тогда угол падения луча при переходе из  $n$ -го в  $(n-1)$ -й слой будет тоже равен  $f_n$ , а угол преломления обозначим через  $f_{n-1}$  и т. д. Угол падения луча на последний слой, т. е. угол  $NAB$ , обозначим через  $f_1$ , а угол преломления  $MAN$  – через  $f_0$ .

Из рис. 12 видно, что угол преломления  $f_0$  равен зенитному расстоянию  $z'$ , полученному из наблюдений. В то же время угол падения при переходе из пустоты к верхнему слою атмосферы, т. е. угол  $i'$  равен зенитному расстоянию  $z$ , не искаженному рефракцией.

Применяя основной закон преломления, согласно которому отношение синусов угла падения и угла преломления равно отношению показателя преломления слоя, в который луч переходит, к показателю преломления слоя, из которого луч выходит, и, принимая показатель преломления пустоты равным единице, получим ряд соотношений:

$$\begin{aligned} \frac{\sin i}{\sin f_n} &= \frac{\mu_n}{1}; & \frac{\sin f_n}{\sin f_{n-1}} &= \frac{\mu_{n-1}}{\mu_n}; \\ \frac{\sin f_{n-1}}{\sin f_{n-2}} &= \frac{\mu_{n-2}}{\mu_{n-1}}; & \frac{\sin f_1}{\sin f_0} &= \frac{\mu_0}{\mu_1}. \end{aligned}$$

Перемножив почленно эти равенства, получим

$$\frac{\sin i}{\sin f_0} = \frac{\mu_0}{1}.$$

Считая, что  $\mu_0$  – показатель преломления воздуха у поверхности Земли и подставляя значения углов  $i$  и  $f_0$ , получим

$$\frac{\sin z}{\sin z'} = \mu_0. \quad (3.3)$$

Но  $z = z' + \rho$  и, следовательно

$$\frac{\sin(z' + \rho)}{\sin z'} = \mu_0.$$

Откуда по формуле синуса двух углов, получим

$$\sin z' \cos \rho + \cos z' \sin \rho = \mu_0 \sin z'.$$

Так как рефракция  $\rho$  – величина малая, то, ограничиваясь первыми членами разложения в ряд функций  $\sin \rho$  и  $\cos \rho$ , поручим

$$\rho'' \sin l'' = (\mu_0 - 1) \operatorname{tg} z'$$

или

$$\rho'' = \frac{\mu_0 - 1}{\sin l''} \operatorname{tg} z'. \quad (3.4)$$

Исследования показали, что при нормальных атмосферных условиях, за которые во многих теориях рефракции принимают температуру воздуха  $t = +10,0^\circ \text{C}$  и атмосферное давление  $B = 760$  мм рт. ст., показатель преломления воздуха у поверхности земли  $\mu_0 = 1.0002825$ . Подставляя значение  $\mu_0$  в формулу (3.4), получим приближенную формулу рефракции

$$\rho'' = 58'', 27 \operatorname{tg} z'. \quad (3.5)$$

Из формулы (3.5) следует, что в зените  $\rho = 0$  и, следовательно,  $z' = z$ . С увеличением зенитного расстояния рефракция возрастает и в горизонте при нормальных атмосферных условиях равняется  $35'24''$ . Однако согласно формуле (3.5) при  $z = 90^\circ$  значение рефракции становится бесконечно большим. Поэтому применять формулу (3.5) для вычисления рефракции при наблюдении светил на зенитных расстояниях больше  $45^\circ$  не рекомендуется, так как уже при  $z = 45^\circ$  формула (3.5) дает погрешность, равную  $0,15''$ . При увеличении зенитного расстояния получаются значительные расхождения теоретических и наблюдаемых значений рефракции [1].

#### 4. КУЛЬМИНАЦИЯ СВЕТИЛ

Наблюдения звезд в меридиане, в моменты верхней и нижней кульминаций, часто используются в геодезической астрономии для определения географических координат пунктов земной поверхности, а также для определения постоянных инструмента. Инструменты, используемые для полевых астрономических наблюдений, как правило, имеют разделенные вертикальный и горизонтальный круги, позволяющие установить по заданному азимуту и зенитному расстоянию. Поэтому необходимо заранее обычно с точностью до  $1^m$  предвычислить моменты кульминации светила и его горизонтные координаты ( $z$  и  $A$ ) для этих моментов с точностью до  $1''$ .

Звездное время в моменты кульминаций определяется на основании формул  $s = \alpha$  и  $s = \alpha + 12^h$ , считая прямое восхождение звезды известным.

При определении горизонтных координат светила в кульминациях рассмотрим три случая для наблюдателя, находящегося в северном полушарии.

1. Светило имеет верхнюю кульминацию к югу от зенита, между зенитом и южным полюсом мира  $P'$ , в точке  $A$  ( $\varphi > \delta > 0^\circ$ ).

Из рис. 13 видно, что меридиональное зенитное расстояние  $z_m$  светила измеряется дугой  $ZA$ , склонение – дугой  $QA$ .

Следовательно,

$$z_m = \varphi - \delta. \quad (4.1)$$

К югу от зенита кульминируют также светила, у которых  $\delta < 0$ . Если светило с отрицательным склонением кульминирует в точке  $B$ , то зенитное расстояние его измеряется дугой  $ZB$ , склонение – дугой  $QB$  и, следовательно, для определения  $z_m$  получим ту же самую формулу

$$z_m = \varphi + (-\delta) = \varphi - \delta. \quad (4.2)$$

Для указанного интервала склонений ( $\varphi > \delta > -90^\circ$ ) азимут светил в верхней кульминации равен нулю.

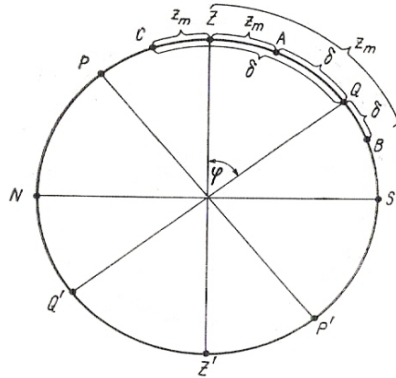


Рис. 13. Зенитное расстояние точек A, B, C

2. Светило имеет верхнюю кульминацию к северу от зенита, между зенитом и северным полюсом мира P, в точке C склонений ( $\varphi > \delta$ ).

В этом случае меридиональное зенитное расстояние светила измеряется дугой ZC, склонение – дугой QC.

Следовательно,

$$z_m = \delta - \varphi. \quad (4.3)$$

Азимут таких светил в момент верхней кульминации равен  $180^\circ$ .

3. Светило находится в нижней кульминации к северу от зенита, в точке D ( $90^\circ > -\delta > -\varphi$ ).

На рис. 14 видно, что меридиональное зенитное расстояние светила в этом случае измеряется дугой ZD, а склонение дугой Q'D

Отсюда следует, что

$$z_m = 180^\circ - (\varphi + \delta) = \varphi - \delta. \quad (4.4)$$

Азимут светила равен  $180^\circ$ . Если светило имеет нижнюю кульминацию к югу от надира, между надиром Z' и южным полюсом мира P' в точке F, то его меридиональное зенитное расстояние измеряется дугой ZF, а склонение – дугой Q'F. Таким образом

$$z_m = 180^\circ + (\varphi + \delta). \quad (4.5)$$

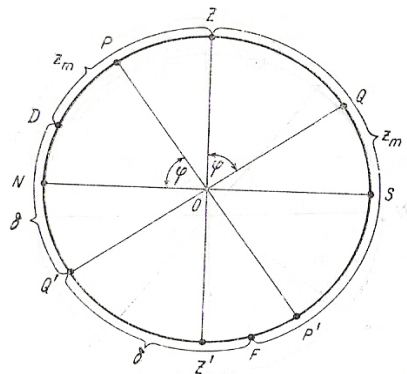


Рис. 14. Зенитное расстояние точек  $D$  и  $F$

Азимут такого светила в нижней кульминации равен нулю.

## 5. ВЫЧИСЛЕНИЕ ВОСХОДА И ЗАХОДА СВЕТИЛА

Для нахождения моментов восхода и захода, а также азимутов точек восхода и захода звезды  $\sigma$  построим параллактический треугольник  $PZ\sigma$ . В момент восхода и захода светило находится на горизонте (рис. 15). Следовательно,  $h=0^\circ$ ,  $z=90^\circ$ .

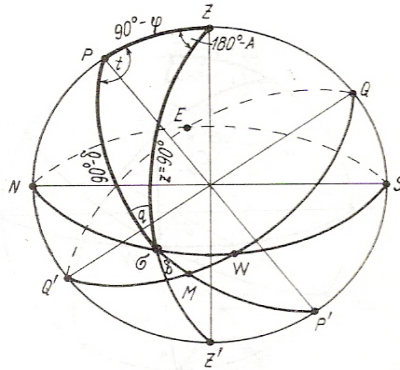


Рис. 15. Положение светила во время захода

Из треугольника  $PZ\sigma$  по теореме косинуса стороны для сторон  $z$ ,  $(90^\circ - \sigma)$  и  $(90^\circ - \varphi)$  напомним выражения

$$\left. \begin{aligned} \cos z &= \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t \\ \sin \delta &= \cos \sin \varphi - \sin z \cos \varphi \cos A \\ \sin \varphi &= \cos z \sin \delta + \sin z \cos \delta \cos q \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

Так как во время захода и восхода светила зенитное расстояние равно  $z=90^\circ$ , то

$$\cos z = 0 \quad \sin z = 1.$$

Первое выражение из формулы (1) примет вид

$$\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t = 0$$

$$\text{Отсюда} \quad \cos t = -\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta. \quad (5.2)$$

Так как косинус функция четная, то по формуле для  $\cos t$  находят два значения часового угла  $t$ , лежащего в пределах от 0 до  $+12^h$  и 0 до  $-12^h$ .

0 до  $+12^h$  – заход солнца  
 0 до  $-12^h$  – восход солнца

Находят азимут в момент восхода и захода по второму выражению формулы (5.1)

$$\cos A = -\frac{\sin \delta}{\cos \varphi}. \quad (5.3)$$

Восходу соответствует азимут в пределах

$$180^\circ < A < 360^\circ.$$

Заходу соответствует азимут в пределах

$$0^\circ < A < 180^\circ.$$

Таким образом  $A_W = A$   $A_E = 360^\circ - A$ .

Параллактический угол  $q$  вычисляется по формуле

$$\cos q = \frac{\sin \varphi}{\cos \delta}.$$

**Задание:** Определить восход и заход светила на разных широтах

|                          |                   |
|--------------------------|-------------------|
| $\varphi = 12^\circ 41'$ | 2 октября 2011 г. |
| $\varphi = 43^\circ 35'$ | "                 |
| $\varphi = 57^\circ 02'$ | "                 |
| $\varphi = 70^\circ 25'$ | "                 |

## 6. АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЕЖЕГОДНИК

Астрономический ежегодник дает координаты Солнца, Луны, планет и звезд, а также другие величины для определенных моментов времени, выбранных таким образом, чтобы все эти величины могли быть легко найдены для любого момента времени в течение рассматриваемого года.

Согласно рекомендации VIII съезда Международного астрономического союза (Рим, 1952), начиная с 1960 г. в Астрономическом ежегоднике в качестве основного аргумента эфемерид взамен ранее употреблявшегося аргумента *«всемирное время»* введено *«эфемеридное время»* – равномерное время Ньютоновой механики, фигурирующее через посредство дифференциальных уравнений во всех гравитационных теориях движения тел солнечной системы.

В решении МАС (Рим, 1952; Дублин, 1955; Москва, 1958) сказано:

Рекомендуется во всех случаях, когда средняя солнечная секунда неудовлетворительна как единица времени вследствие ее изменяемости, принимать за единицу времени секунду, определяемую как  $\frac{1}{31556925.9747}$  часть тропического года на

момент фундаментальной эпохи таблиц движения Солнца Ньюкома; время, выраженное в этих единицах, рекомендуется обозначать, как *«эфемеридное время»*; оно считается от того момента вблизи начала календарного года 1900, когда геометрическая средняя долгота Солнца, отнесенная к среднему равноденствию даты, была  $279^{\circ}41'48''.04$ , т. е. момента, когда по эфемеридному времени было точно 1900, янв. 0,  $12^h$  (фундаментальная эпоха таблиц движения Солнца). Замену среднего солнечного времени на эфемеридное время рекомендуется производить с помощью поправки

$$\Delta T = +24,349^s + 72,318^s T + 29,950^s T^2 + 1,824144B,$$

где  $T$  считается в юлианских столетиях от среднего гриничского полдня янв. 0, 1900 г., а  $B$ , выраженное в секундах дуги, имеет значение, указанное в статье Спенсера Джонса (Mop. Not. R. astr. Soc., 99/ 541, 1939).

Не предполагается и не рекомендуется вносить какие-либо изменения ни в измерение, ни в определение всемирного времени (Trans. of the Intern. Astr. Union, vol. VIII, 1952; vol. IX, 1955; vol. X, 1958).

Как общее правило, величины, содержащиеся в Ежегоднике, даются для  $0^h$  эфемеридного времени каждого дня года, т. е. с табличным интервалом, равным одним эфемеридным суткам. Долготы, широты и геоцентрические расстояния Луны по причине их быстрого изменения даются с полусуточным интервалом – для  $0^h$  и  $12^h$  эфемеридного времени каждого дня; прямые восхождения, склонения и горизонтальные параллаксы даются на каждый час. Напротив, для некоторых медленно или достаточно равномерно изменяющихся величин табличный интервал увеличивается до нескольких суток.

Редукционные величины (алгебраическая и тригонометрическая системы) даются на  $0^h$  эфемеридного времени для каждого дня; наряду с этим алгебраическая система редукционных величин приводится и для  $0^h$  звездного времени с табличным интервалом, равным звездным суткам, так как это во многих случаях облегчает обработку наблюдений. По той же причине видимые положения звезд даны для моментов их верхних кульминаций на гринвичском меридиане.

Эфемериды, которые не требуют высокой степени точности (как, например, величины для физических наблюдений Солнца, Луны и планет), для удобства пользования даны по аргументу всемирного времени.

Всемирным временем называется среднее солнечное гринвичское время, считаемое от гринвичской полуночи.

Всемирное время было введено в употребление с 1 января 1925 года вместо ранее применявшегося в астрономии *среднего гринвичского (астрономического) времени* (G.M.T)[13].

### **6.1. Эфемерида Солнца: видимые экваториальные координаты**

Даваемая в Ежегоднике эфемерида Солнца основана на разложениях Ньюкома (S. Newcomb. Tables of the Motion of the Earth on its Axis and around the Sun. Astronomical Papers, Vol. VI,

Part I, 1895) и на значениях основных постоянных прецессии, нутации, аберрации и параллакса, принятых на Парижской конференции 1896 г. (Conference internationale des etoiles fondamentales) и подтвержденных VIII съездом Международного астрономического союза (Trans, of the Intern. Astr. Union, Vol. VIII, p. 66, 1952). Элементы движения Солнца по Ньюкому следующие: Эпоха: 1900, янв. 0, 12<sup>h</sup> E. T. = JD 2415020.0.

*Видимое прямое восхождение и склонение* включают влияние аберрации и отсчитываются относительно истинного экватора и равноденствия рассматриваемого момента с учетом нутационных членов долгого и короткого периодов.

Обе величины можно интерполировать при помощи часовых изменений. Часовое изменение прямого восхождения  $\nu(\alpha)$  в эфемериду не включено – его вычисляют по формуле

$$\nu_{\alpha} = 9,856^s - \nu_E,$$

где  $\nu_E$  – есть даваемое далее часовое изменение уравнения времени.

*Уравнение времени +12<sup>h</sup>.* Уравнение времени в смысле «истинное время минус среднее время» есть разность видимых прямых восхождений среднего и истинного Солнца в некоторый момент М по эфемеридному времени.

Для облегчения интерполирования эфемерида содержит часовое изменение величины Е.

Уравнение времени +12<sup>h</sup> широко используется при решении различных задач, связанных с обработкой наблюдений Солнца[13].

## 7. ПРИБЛИЖЕННЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТА ШИРОТЫ И ДОЛГОТЫ

### 7.1. Теоретические основы способа

Приближенные определения широты, долготы и азимута днем с помощью небольших переносных приборов обычно производят по наблюдениям Солнца. Принципиально указанные определения по Солнцу не отличаются от соответствующих определений по наблюдениям отдельных звезд.

В соответствии с выгоднейшими условиями для определения широты по измеренным зенитным расстояниям светил Солнце необходимо наблюдать в меридиане или в непосредственной близости от него. Если произвести измерение зенитного расстояния Солнца точно в момент его кульминации ( $t_0=0$ ), то широта пункта определится по известной формуле

$$\varphi = Z_{\odot} + \delta_{\odot},$$

где склонение Солнца  $\delta_{\odot}$  интерполируется на момент местного истинного полдня.

С целью ослабления влияния случайных погрешностей наблюдение Солнца в каждом приеме производится многократно, при двух положениях вертикального круга теодолита.

Завод секундомера и его включение производят за 40–60 мин до приема радиосигналов времени, с тем чтобы не работать при максимальном напряжении пружины, где возможны большие изменения хода секундомера.

Показания минутной стрелки секундомера при наблюдениях звезд целесообразно согласовать с минутами местного звездного времени. Для этой цели предварительно по местному звездному времени устанавливаются ручные или карманные часы с точностью  $1^m$ .

Если часы были поставлены по декретному времени, то расчет их установки по местному звездному времени для некоторого момента  $T_{N+1}$  декретного времени производят по известным формулам:

$$UT = T_{N+1} - (N + 1),$$

$$s = S_0 + UT + \mu UT + \lambda_0$$

где  $UT$  – всемирное время, соответствующее моменту  $T_{N+1}$  декретного времени;

$N$  – номер часового пояса, в котором находится наблюдатель;

$\mu UT$  – поправка за перевод единиц среднего времени в звездные единицы;

$S_0$  – звездное время в среднюю гринвичскую полночь для даты наблюдения,  $\lambda_0$  – предварительная долгота пункта, выраженная в часовой мере.

Согласование показаний минутных стрелок секундомера и часов производится в момент включения секундомера. При этом показания часов, поставленных по местному звездному времени должны быть кратны целому часу или  $30^m$ .

В дальнейшем при приеме радиосигналов времени или наблюдениях звезд целые часы и получасы снимаются с ручных часов, а минуты, секунды и их доли – с секундомера.

Методика приема сигналов точного времени с помощью секундомера состоит в следующем:

1) наблюдатель, слушая передачу радиосигналов, ведет счет сигналов (секунд) от начала каждой минуты и под любой сигнал производит нажатие стопорной кнопки вспомогательной стрелки; не теряя счета сигналов, записывает в журнал минуты и секунды всемирного времени, а также показание секундомера с точностью до десятых долей секунды;

2) нажатием стопорной кнопки совмещает вспомогательную и основную секундные стрелки;

3) продолжая счет сигналов, вновь нажимает под любой сигнал стопорную кнопку и записывает номер сигнала и показание секундомера.

При таком порядке приема сигналов времени в каждой минутной серии можно записать два-три показания секундомера.

Обработка приема секундных радиосигналов времени, вывод поправки и хода секундомера выполняются в следующем порядке:

1) выводится всемирное время в средний момент подачи принятых сигналов времени

$$UTC = \frac{\sum UTC_i}{n}; \quad UTI = UTC + (DUTI + dUTI) \text{ и}$$

показание секундомера в этот момент  $X = \frac{\sum X_i}{n}$ ;

2) поправка секундомера в момент  $X$  в системе местного звездного времени вычисляется по формуле

$$u = s - X,$$

где  $s = S_0 + UTI + \mu UTI + \lambda_0$ .

Для учета влияния рефракции измеряют температуру и атмосферное давление.

Для астрономических определений широты, долготы и азимута на пунктах специального назначения, а также для приближенных определений пунктов в экспедиционных условиях обычно применяют легкие, портативные и удобные в работе оптические теодолиты.

## 7.2. Теодолиты средней точности

Теодолит Theo-010 предназначен для измерения горизонтальных углов (со средней квадратической погрешностью 1,5"), вертикальных углов и астрономических определений широты, долготы и азимута [2].

Для астрономических определений к теодолиту Theo-010 прилагается комплект приспособлений, включающий: накладной на горизонтальную ось уровень, талькоттовский уровень, астрономическую сетку нитей, зенитные окуляры для визирования на малых зенитных расстояниях (вплоть до 0°), электрооборудование для работы ночью, центрировочную плиту для установки на астрономическом столбе или на столике сигнала.

Общий вид оптического теодолита Theo-010 показан на рис. 16. Теодолит Theo-010 можно применять для измерения углов по трехштативной системе. Поэтому верхнюю часть

прибора (измерительную) можно вынимать из подставки (нижней части) и переносить независимо от нее. В цилиндрической втулке верхней части могут вращаться независимо друг от друга/вертикальная ось алидады и втулка с горизонтальным кругом. Горизонтальный круг можно переставлять с помощью включающей зубчатой трубки. Головка защищена от случайного включения.

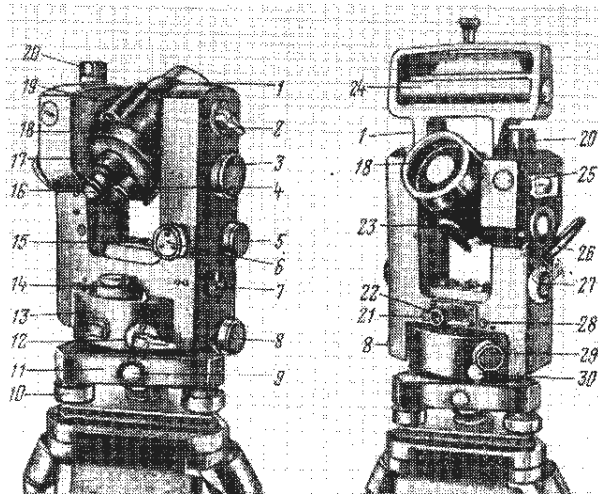


Рис. 16. Оптический теодолит Theo-010:

1 – предохранительная стойка накладного уровня, 2 – закрепительный рычаг трубы, 3 – головка оптического микрометра, 4 – окуляр оптического микрометра, 5 – наводящий винт трубы, 6 – переключатель кругов оптического микрометра, 7, 21, 28 – защитные пробки котировочных винтов оптического микрометра, 8 – наводящий винт алидады, 9 – закрепительный винт подставки, 10 – подъемные винты подставки, 11 – подставка, 12 – закрепительный рычаг алидады, 13 – верхняя измерительная часть теодолита, 14 – круглый уровень, 15 – цилиндрический уровень, 16 – фокусирующее кольцо сетки нитей, 17 – фокусирующее кольцо зрительной трубы, 18 – зрительная труба, 19 – оптический визир, 20 – поворотная призма контактного уровня, 22 – окуляр оптического центрира, 23 – головка для регулирования освещения поля зрения трубы, 24 – накладной уровень, 25 – окно освещения контактного уровня, 26 – зеркало подсветки оптического микрометра, 27 – наводящий винт алидады вертикального круга, 29 – головка перестановки вертикального круга, 30 – стопорный сектор головки

Отличительной особенностью теодолита Theo-010 является зеркально-линзовая зрительная труба типа Кассегрена, с передней афокальной линзовой системой. Благодаря этой оптической системе труба имеет весьма малую длину, а сам теодолит приобретает компактный вид. Диаметр свободного отверстия объектива 53 мм. Увеличение трубы  $31\times$ , угол поля зрения  $1,2^\circ$ , фокусировка – внутренняя. Труба закреплена на горизонтальной оси, установленной во втулках колонок алидады, и может переводиться через зенит со стороны как окуляра, так и объектива. Сверху и снизу на зрительной трубе имеются оптические визиры, с помощью которых производится грубое наведение трубы на визирную цель. Яркость освещения поля зрения трубы может быть установлена в соответствии с яркостью объекта наблюдения с помощью головки, расположенной на трубе вблизи объектива, регулирующей положение зеркала в корпусе зрительной трубы.

Для наблюдений светил на малых зенитных расстояниях используются очень удобные специальные зенитные окуляры, которыми заменяются обычные окуляры зрительной трубы и микроскопа оптического микрометра.

Горизонтальный и вертикальный круги – стеклянные, разделены через  $20'$ . Деление обоих лимбов выполнено двойными штрихами. Диаметр горизонтального лимба 84 мм, вертикального 60 мм.

Оптический м и к р о м е т р, общий для обоих лимбов, расположен в полости колонки алидады, а окуляр отсчетного микроскопа – рядом с окуляром зрительной трубы. На предметную плоскость отсчетного микроскопа по двум оптическим каналам изображения диаметрально противоположных штрихов горизонтального или вертикального лимба. Переключение этих каналов осуществляется с помощью специальной рукоятки. Отсчет по кругу производится путем совмещения диаметрально противоположных штрихов лимба вращением головки оптического микрометра. Вместе с головкой оптического микрометра движется оцифрованная шкала микрометра, которая видна в правой стороне поля зрения отсчетного микроскопа. Шкала имеет 600 делений, цена одного деления  $1''$ . Минуты и десятки секунд подписаны.

Накладной уровень на горизонтальную ось устанавливается на узкие латунные кольца, расположенные между трубой и колонками алидады.

По отсчетам накладного уровня определяется средняя величина наклона горизонтальной оси для двух положений инструмента (КЛ и КП).

Талькоттовский уровень применяется для астрономических определений широты и времени способами равных высот. Талькоттовский уровень укрепляется на выступе в виде ласточкиного хвоста, расположенном в середине трубы теодолита Theo-010. С помощью этого уровня фиксируются малые изменения положения трубы по высоте, закрепленной/зажимным винтом на данном зенитном расстоянии.

Опытные и производственные астрономические определения широты, долготы и азимута, выполненные оптическим теодолитом Theo-010, характеризуются сравнительно высокой точностью определяемых величин. Теодолит Theo-010 может быть рекомендован для приближенных астрономических определений.

### **7.3. Определение широты по зенитному расстоянию Солнца**

Для астрономических определений широты, долготы и азимута на пунктах специального назначения, а также для приближенных определений пунктов в экспедиционных условиях обычно применяют легкие, портативные и удобные в работе оптические теодолиты [3].

Вместо хронометров используют для наблюдений двухстрелочные секундомеры или палубные часы.

Теодолит Theo – 010 предназначен для измерения горизонтальных углов (со средней квадратической погрешностью 1,5"), вертикальных углов и астрономических определений широты, долготы и азимута.

Для астрономических определений к теодолиту Theo-010 прилагается комплект приспособлений, включающий: накладной на горизонтальную ось уровень, талькоттовский уровень, астрономическую сетку нитей, зенитные окуляры для визирования на

малых зенитных расстояниях (вплоть до  $0^\circ$ ), электрооборудование для работы ночью, центрировочную плиту для установки на астрономическом столбе или на столике сигнала.

При определении широты по зенитному расстоянию Солнца наиболее выгодно выполнять измерения в моменты кульминации Солнца. Практически допустимы отступления от меридиана по азимуту до  $20^\circ$ .

Перед наблюдениями Солнца хронометр или часы поверяют обычно по широкопередаточным сигналам точного времени. Эти сигналы по программе шести звуковых точек радиостанция «Маяк» передает каждый час. Начало шестого звукового сигнала соответствует началу часа.

Измерения производят при положениях теодолита круг лево (КЛ) и круг право (КП) и при двух положениях изображения Солнца относительно сетки нитей зрительной трубы теодолита.

1) Устанавливают пузырек уровня при алидаде вертикального круга теодолита на середину.

2) Наводят горизонтальную нить на нижний или верхний край изображения Солнца так, чтобы вертикальная нить проходила через центр этого изображения. В момент наведения подают сигнал помощнику для отсчитывания показаний часов  $T_{n1}$  и по лимбу вертикального круга теодолита  $K/L_1$ .

3) Наводят горизонтальную нить на противоположный край изображения Солнца и получают отсчет по часам  $T_{n2}$  и по лимбу вертикального круга теодолита  $K/L_2$ .

4) Переводят трубу через зенит.

5) Производят действия, изложенные в пунктах 1–3. Получают показания часов  $T_{n1}, T_{n2}$  в момент визирования на Солнце и отсчеты по лимбу вертикального круга  $K/L_1$  и  $K/L_2$ .

6) Результаты измерений записывают в журнал.

### **Журнал наблюдений**

Теодолит Theo - 010

Дата: 22. 04. 2003г Часы (ручные) Поправка часов  $u = 10^s$

Теодолит Theo - 010 Долгота  $\lambda = 5^h 07^m 43^s$

Температура  $t = 15^0$  Атмосферное давление  $B = 676$  мм рт.ст.

| Положение<br>теодолита | Наблюдаемый<br>край Солнца                                                        | Показания<br>часов Т                               | Отсчеты по<br>вертикальному<br>кругу | Зенитные<br>расстояния<br>Солнца |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| КЛ                     |  | 11 <sup>h</sup> 09 <sup>m</sup> 55 <sup>s</sup>    | 45° 07' 25"                          |                                  |
|                        |                                                                                   | 11 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup> 30 <sup>s</sup> .0 | 45° 02' 03"                          |                                  |
|                        |                                                                                   | 11 <sup>h</sup> 11 <sup>m</sup> 12 <sup>s</sup> .5 | 45° 04' 44"                          |                                  |
| КП                     |  | 11 <sup>h</sup> 18 <sup>m</sup> 50 <sup>s</sup> .0 | 314° 17' 27".2                       |                                  |
|                        |                                                                                   | 11 <sup>h</sup> 20 <sup>m</sup> 40 <sup>s</sup> .0 | 315° 26' 40.5"                       |                                  |
|                        |                                                                                   | 11 <sup>h</sup> 20 <sup>m</sup> 45 <sup>s</sup> .0 | 314° 52' 03".9                       |                                  |

Определяют место зенита

$$MZ = \frac{1}{2}(KL + KP) \pm 180^0. \quad (7.1)$$

1. Вычисляют показания  $T_{\text{л}}$  и  $T_{\text{п}}$  в средний момент визирования на Солнце в полуприемах

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{л}} &= \frac{T_{\text{л}1} + T_{\text{л}2}}{2} \\ T_{\text{п}} &= \frac{T_{\text{п}1} + T_{\text{п}2}}{2} \end{aligned} \right\} . \quad (7.2)$$

2. Вычисляют среднее в полуприемах отсчетов КЛ и КП по вертикальному кругу

$$\left. \begin{aligned} \text{КЛ} &= \frac{KL_1 + KL_2}{2} \\ \text{КП} &= \frac{KP_1 + KP_2}{2} \end{aligned} \right\} . \quad (7.3)$$

По формулам, соответствующим применяемому теодолиту с известным  $MZ$  вычисляют зенитное расстояние Солнца  $Z'_{\text{л}}$ ,  $Z'_{\text{п}}$  в моменты  $T_{\text{л}}$   $T_{\text{п}}$ .

$$\left. \begin{aligned} Z &= MZ - \text{КЛ}, \\ Z &= \text{КП} - MZ. \end{aligned} \right\} \quad (7.4)$$

Для теодолита Theo-010 зенитное расстояние вычисляется по формуле

$$\frac{KI - KII}{2} . \quad (7.5)$$

3. Вычисляют всемирное время  $UT_{л}$ ,  $UT_{пр}$  в средние моменты визирования на Солнце

$$\frac{UT_{л} + UT_{пр}}{2} - (n + d) + u, \quad (7.6)$$

$$n + d = 5 + 2 \text{ (номер пояса и летние)} \quad (7.7)$$

4. Вычисляют эфемеридное время  $(ET)^h$  в средний момент измерений по формулам

$$(ET)^h = UT + \Delta T, \quad (7.8)$$

где  $\Delta T$  – поправка за переход к эфемеридному времени, выбирается из Астрономического ежегодника (АЕ).

5. Вычисляют экваториальные координаты  $\delta_{\odot}$  и  $\alpha_{\odot}$  Солнца на средний момент наблюдений в приеме

$$\delta_{\odot} = \delta_0 + \nu_{\delta} (ET)^h \quad (7.9)$$

$$\alpha_{\odot} = \alpha_0 + \nu_{\alpha} (ET)^h \quad (7.10)$$

где  $\delta_0$ ,  $\alpha_0$  – значение видимого склонения и видимого прямого восхождения на  $0^h$  эфемеридного времени,

$\nu_{\delta}$ ,  $\nu_{\alpha}$  – часовое изменение видимого склонения и прямого восхождения.

$$\nu_{\alpha} = 9,856^s - \nu_E \quad (7.11)$$

где  $\nu_E$  – часовое изменение уравнения времени.

Величины  $\delta_0$ ,  $\alpha_0$ ,  $\nu_{\delta}$ ,  $\nu_E$  находят из таблиц "Солнце" по аргументу всемирная дата.

6. Вычисляют зенитное расстояние  $z_{л}$  и  $z_{пр}$  Солнца в полуприемах по формулам:

$$Z_{л, пр} = Z'_{л, пр} + \rho_{л, пр} - \Delta Z, \quad (7.12)$$

где  $\rho$  – истинная рефракция, определяется из выражения

$$\rho = 58''.27 \frac{B}{760} \frac{273^o}{273^o + t^o} \operatorname{tg} Z', \quad (7.13)$$

$$\Delta Z = 9'' \sin Z', \quad (7.14)$$

$\Delta Z$  – поправка за параллакс Солнца, в которой  $9''$  – приближенное значение параллакса Солнца;

$Z'$  – среднее зенитное расстояние Солнца в приеме, вычисляемое по формуле:

$$Z' = \frac{Z'_{л} + Z'_{пр}}{2}. \quad (7.15)$$

7. Вычисляют часовой угол Солнца  $t_{Ил}$  и  $t_{\ominus пр}$  в средние моменты измерений в приемах.

$$t_{\ominus л, пр} = UTI_{л, пр} + UTI_{л, пр} \mu + S_0 + \lambda - \alpha_{\ominus}, \quad (7.16)$$

где  $\mu = 0,002738$  – коэффициент пропорциональности;

$UTI_{л, пр} \mu$  – поправка за переход от среднего времени к звездному;

$S_0$  – гринвичское звездное время в  $0^h$  всемирного времени выбирается из таблиц АЕ "Звездное время" по аргументу всемирная дата.

7. Широту пункта вычисляют по формулам:

$$\operatorname{tg} m_{л, пр} = \frac{\operatorname{tg} \delta_{\ominus}}{\cos t_{\ominus л, пр}}, \quad (7.17)$$

$$\cos n = \frac{\cos Z_{л, пр} \sin m_{л, пр}}{\sin \delta_{\ominus}}, \quad (7.18)$$

$$\varphi_{л, пр} = m_{л, пр} + n_{л, пр}, \quad (7.19)$$

$$\varphi = \frac{\varphi_{\text{л}} + \varphi_{\text{пр}}}{2}. \quad (7.20)$$

Пример вычисления широты дан в приложении В.

#### 7.4. Определение долготы по зенитному расстоянию Солнца

Подготовка к измерениям производится аналогично измерениям широты. Производят действия по пунктам 1–6 и получают показания часов  $T_{\text{л1}}$ ,  $T_{\text{л2}}$ ,  $T_{\text{пр1}}$ ,  $T_{\text{пр2}}$  в момент визирования на Солнце и отсчет по лимбу вертикального круга  $\text{КЛ}_1$ ,  $\text{КЛ}_2$ ,  $\text{КП}_1$ ,  $\text{КП}_2$ . Отсчеты записывают в журнал.

##### Журнал измерений

Дата: 10.04.2002г. Часы (ручные) Поправка  $u = 0$   
 Теодолит Theo-010 Широта  $\varphi = 43^\circ 14'$   
 Температура воздуха  $t^0 = +18^\circ$  Атмосферное давление  $B=676$  мм

| Положение теодолита | Наблюдаемый край Солнца                                                             | Показания часов                                | Отсчеты по вертикальному кругу | Зенитное расстояние |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| КЛ                  |    | 9 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 08 <sup>s</sup> | 63° 18' 58"                    |                     |
|                     |    | 9 <sup>h</sup> 17 12 <sup>s</sup>              | 63° 21' 16"                    |                     |
|                     | Ср.                                                                                 | 9 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup> 10 <sup>s</sup> | 63° 20' 07"                    |                     |
| КП                  |  | 9 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup> 50 <sup>s</sup> | 296° 13' 55"                   |                     |
|                     |  | 9 <sup>h</sup> 18 <sup>m</sup> 50 <sup>s</sup> | 296° 16' 09"                   |                     |
|                     | Ср.                                                                                 | 9 <sup>h</sup> 17 <sup>m</sup> 20 <sup>s</sup> | 296° 15' 02"                   |                     |

В журнале измерений вычисляют величины  $T_{\text{л}}$ ,  $T_{\text{пр}}$ ,  $\text{КЛ}$ ,  $\text{КП}$ ,  $Z_{\text{л}}$ ,  $Z'_{\text{пр}}$  по формулам (7.2)–(7.5).

Вычисление долготы выполняют в ведомости.

2. Вычисляют величины  $UT_{\text{л, пр}}$ ,  $UT_{\text{л, пр}} \mu$ ,  $\delta_{\odot}$  и  $\alpha_{\odot}$ , по формулам (7.6), (7.9) и (7.10).

3. Вычисляют среднее зенитное расстояние Солнца  $Z_{\text{л}}$ ,  $Z_{\text{пр}}$  в полуприемах по формуле (7.12).

4. Определяют часовой угол Солнца  $t_{\odot \text{ л, пр}}$  в средний момент измерений в полуприемах по формуле:

$$\cos t'_{\odot \text{ л, пр}} = \frac{\cos Z_{\text{л, пр}} - \sin \varphi \sin \delta_{\odot}}{\cos \varphi \cos \alpha_{\odot}}, \quad (7.21)$$

$t_{\odot \text{ л, пр}} = 24^{\text{ч}} - t'_{\odot \text{ л, пр}}$  – для утренних измерений;

$t_{\odot \text{ л, пр}} = t''_{\odot \text{ л, пр}}$  – для вечерних измерений.

5. Вычисляют долготу пункта  $\lambda$  по формуле:

$$\lambda_{\text{ л, пр}} = t_{\odot \text{ л, пр}} + \alpha_{\odot} - \text{UT}_{\text{ л, пр}} - \mu \text{UT}_{\text{ л, пр}} - S_0, \quad (7.22)$$

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{л}} + \lambda_{\text{пр}}}{2}. \quad (7.23)$$

### 7.5. Определение азимута по зенитному расстоянию Солнца

Для приближенного определения азимута направления по зенитному расстоянию Солнца используют те же приборы, что и для приближенного определения широты и долготы.

Широта пункта должна быть известна с погрешностью 1'.

Перед тем как приступить к наблюдениям, следует попрактиковаться в наведении трубы на Солнце. Видимый диаметр имеет угловую величину  $0,5^\circ$ , а поле зрения трубы 1–1,5°, т. е. видимый диаметр Солнца относительно велик. Поэтому наведение рекомендуют производить не на центр Солнца, а на его края: как вертикальная, так и горизонтальная нити сетки должны касаться Солнца (рис. 17, положение 3). Чтобы не вводить поправок в отсчеты за радиус Солнца (примерно 16') в полуприемах наведения делают на противоположные края, утром Солнце располагают соответственно в 1 и 3 квадранте сетки, а вечером – во 2 и 4.

Техника наведения на Солнце (рис. 17): 1 – Солнце «ловится» в показанное место поля трубы; 2 – выжидается момент касания

краем Солнца вертикальной нити и вращением наводящего винта алидады горизонтального круга, это положение неизменно сохраняется; 3 – вращение и наводящего винта прекращается, как только Солнце своим краем коснется горизонтальной нити сетки трубы. Далее производятся все отсчеты.

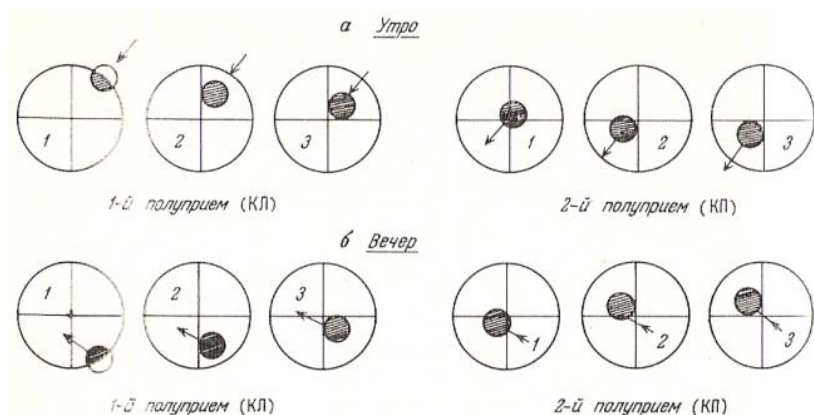


Рис. 17. Техника наведения Солнце

Устанавливают теодолит. Горизонтируют по уровню. Устанавливают подвижную нить окулярного микрометра в нульпункт.

При определении азимута выгодно выполнять измерения утром или вечером.

Измерения производят при двух положениях теодолита КЛ и КП и при двух положениях изображения Солнца.

1. Визируют вертикальной нитью сетки нитей на земной предмет и отсчитывают по лимбу горизонтального круга КЛ.

2. Устанавливают пузырек уровня при алидаде вертикального круга на середину.

3. Визируют левым верхним квадрантом сетки нитей на изображение Солнца и в момент касания нитей сетки изображения Солнца подают сигнал помощнику для отсчитывания часов  $T_{л1}$ .

4. Отсчитывают по лимбам  $КЛ_1^B$  и горизонтального круга  $КЛ_1$

5. Визируют правым нижним квадрантом сетки нитей на изображение Солнца и получают отсчет по часам  $T_{л2}$ , по лимбам вертикального круга  $КЛ_2^B$  и горизонтального круга  $КЛ_2$

6. Переводят трубу через зенит.

7. Производят действия, описанные в пунктах 2–5, и получают показания часов  $T_{пр1}$ ,  $T_{пр2}$  в моменты визирования на Солнце и отсчеты по лимбам вертикального круга  $КП_1^B$ ,  $КП_2^B$ .

8. Производят действия, приведенные в пункте 1, получают отсчет КП по лимбу горизонтального круга. Результаты измерений записывают в журнал измерений.

### Журнал измерений

Дата 18.10.2008 г. Часы (ручные)  $u = 3^s$   
 Теодолит Theo-010 Широта  $\varphi = 43^\circ 14'$   
 Температура воздуха  $t = +13^\circ$  Атмосферное давление  $B = 676$  мм

| Схема измерений                                                                    | Объект   | Показания часов | Отсчет по лимбу<br>Верт. круга | Гориз. круга          | Зенитное<br>расстояние<br>Солнца |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
|                                                                                    |          |                 | КЛ                             |                       |                                  |
|                                                                                    | ЗП       |                 |                                | $91^{\circ} 27' 16''$ |                                  |
|   | Солнце 1 | $9^h 47^m 13^s$ | $65^\circ 46' 34''$            | $186^\circ 30' 42''$  |                                  |
|                                                                                    | Солнце 2 | $9^h 48^m 52^s$ | $65^\circ 44' 22''$            | $186^\circ 38' 02''$  |                                  |
|                                                                                    | среднее  | $9^h 47^m 33^s$ | $65^\circ 45' 28''$            | $186^\circ 34' 29''$  |                                  |
|                                                                                    |          |                 | КП                             |                       |                                  |
|  | Солнце 3 | $9^h 52^m 12^s$ | $294^\circ 26' 53''$           | $7^\circ 22' 28''$    |                                  |
|                                                                                    | Солнце 4 | $9^h 53^m 46^s$ | $294^\circ 28' 03''$           | $7^\circ 24' 10''$    |                                  |
|                                                                                    | среднее  | $9^h 52^m 29^s$ | $294^\circ 27' 28''$           | $7^\circ 23' 19''$    |                                  |
|                                                                                    | ЗП       |                 |                                | $271^\circ 27' 02''$  |                                  |

1. Вычисляют показания часов  $T_\Theta$  в средний момент в средний момент визирования на Солнце в приеме

$$T_\Theta = \frac{1}{4} (T_{л1} + T_{л2} + T_{пр1} + T_{пр2}) . \quad (7.24)$$

2. Вычисляют средние в полуприемах отсчеты по вертикальному кругу  $КЛ^B$ ,  $КП^B$ .

$$\begin{aligned} \text{КЛ}^B &= \frac{\text{КЛ}_1^B + \text{КП}_2^B}{2}, \\ \text{КП}^B &= \frac{\text{КП}_1^B + \text{КП}_2^B}{2}. \end{aligned} \quad (7.25)$$

По формуле (4) вычисляют зенитное расстояние Солнца  $Z'_л$ ,  $Z'_{np}$  в средние моменты измерений в полуприемах.

Вычисление по пунктам 1 и 2 выполняют в журнале измерений.

3. Вычисляют эфемеридное время ЕТ в средний момент измерений по формулам (6.6) и (6.8)

$$\text{UTI} = T_{\odot} + u \qquad \text{ET} = \text{UTI} + \Delta T$$

4. Вычисляют видимое склонение Солнца  $\delta_{\odot}$  на средний момент измерений по формуле (9).

5. Вычисляют среднее зенитное расстояние Солнца  $Z$  в средний момент измерений в приеме

$$\begin{aligned} Z' &= \frac{Z'_л + Z'_{np}}{2}, \\ Z &= Z' + \rho - \Delta Z, \end{aligned}$$

где  $\rho$  – истинная рефракция, вычисляемая по формуле (6.13);

$\Delta Z$  – поправка за параллакс Солнца, вычисляемая по формуле (6.14).

6. Вычисляют азимут Солнца  $A_{\odot}$  на средний момент измерений в приеме по формуле:

$$\cos A' = \frac{\sin \varphi \cos Z - \sin \delta_{\odot}}{\cos \varphi \sin Z}. \quad (7.26)$$

Используют таблицу

| Знак $\cos A'$ | Утро                           | Вечер                          |
|----------------|--------------------------------|--------------------------------|
| +              | $A_{\odot} = 360^{\circ} - A'$ | $A_{\odot} = A'$               |
| -              | $A_{\odot} = 180^{\circ} + A'$ | $A_{\odot} = 180^{\circ} - A'$ |

7. Вычисляют угол  $Q$  между направлением на земной предмет и направлением на Солнце в средний момент измерений в приеме.

$$Q = \frac{KL + KP \pm 180^\circ}{2} - \frac{KL_1 + KL_2 + KP_1 + KP_2 \pm 360^\circ}{4} . \quad (7.27)$$

Вычисляют азимут на земной предмет

$$A = A_\odot + Q . \quad (7.28)$$

## 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ПО НАБЛЮДЕНИЕМ ПОЛЯРНОЙ

### 8.1. Определение широты по измеренным зенитным расстояниям Полярной звезды

Для приближенного определения широты с точностью нескольких секунд целесообразно производить измерения зенитных расстояний Полярной звезды.

Теодолит устанавливают на столбе и горизонтируют. Определяют место зенита  $MZ$  вертикального круга по земному предмету. По абсолютной величине  $MZ$  не должно превышать  $15'$ .

Наблюдения производят при двух положениях вертикального круга, двумя приемами. Порядок действий в приеме:

1) КЛ. Наводят перекрестие горизонтальной и вертикальной нитей сетки на Полярную, фиксируя при этом показания часов  $T_{\text{л}}$ ;

2) отсчитывают по вертикальному кругу  $MJ$ ;

3) – 4) переводят трубу через зенит и выполняют действия 1 и 2 ( $T_{\text{п}}$  и  $MP$ );

5) отсчитывают температуру воздуха  $t^{\circ}$  и атмосферное давление  $B$ .

На этом заканчивается первый прием, затем переходят ко второму приему.

На рисунке изображен параллактический треугольник  $PZ\sigma$ . Опустим сферический перпендикуляр  $\sigma K$  из т.  $\sigma$ .

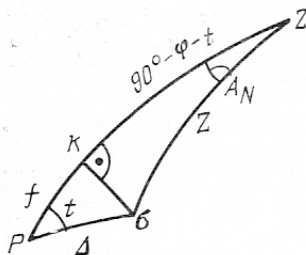


Рис. 18. Параллактический треугольник для Полярной звезды

Для приближенных определений решают этот треугольник как плоский

$$f = \Delta \cos t, \quad (8.1)$$

где  $t$  – часовой угол Полярной звезды в момент наблюдения.

Из прямоугольного сферического треугольника  $ZK\sigma$  имеем:

$$\cos A_N = \operatorname{ctg}(\varphi + f) \operatorname{ctg} Z = \frac{\operatorname{tg}(90^\circ - (\varphi - f))}{\operatorname{tg} Z}. \quad (8.2)$$

После преобразований получают формулу для определения широты по измеренным зенитным расстояниям Полярной звезды.

Широта  $\varphi$  вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} \varphi &= 90^\circ - Z - \Delta_o \cos t_o + \frac{\Delta_d}{2c'} \sin^2 t_o \\ \operatorname{ctg} Z - 15 \frac{\Delta_o}{2c'} \sin t_o \Delta_b + \Delta_d \cos t_o \end{aligned} \quad (8.3)$$

Обозначают:

$$\begin{aligned} I &= - \Delta_o \cos t_o; \\ II &= \frac{\Delta_d}{2c'} \sin^2 t_o \operatorname{ctg} Z; \\ III &= - 15 \frac{\Delta_o}{2c'} \sin t_o \Delta_b + \Delta_d \cos t_o. \end{aligned}$$

С этими обозначениями широта вычисляется по формуле:

$$\varphi = 90^\circ - Z + I + II + III. \quad (8.4)$$

Величину  $I$  выбирают по аргументу местного звездного времени  $s$ .

Величину  $II$  – по аргументу  $s$  и высоте Полярной  $h=90^\circ-Z$ .

Величину  $III$  – по аргументу  $s$  и дате наблюдения.

### Журнал наблюдений

Дата: 2 июля 2002 г. Теодолит: Theo-010 Поправка часов:  $u=-02^s$   
 $t^o=21^\circ$  Атмосферное давление  $B=710,0$  мм;  $\lambda=5^h 08^m 42^s$

|                                                             |    |                             |
|-------------------------------------------------------------|----|-----------------------------|
| $T_{\text{д}} - 23^{\text{h}} 35^{\text{m}} 37^{\text{s}}$  | КЛ | $Z' = 46^{\circ} 43' 19''$  |
| $T_{\text{пр}} - 23^{\text{h}} 36^{\text{m}} 55^{\text{s}}$ | КП | $Z' = 313^{\circ} 15' 26''$ |

Порядок вычислений.

1. От декретного времени переходят к всемирному

$$T_o = T_d - (n+d),$$

где  $n$  – номер пояса;

$d$  –  $1^{\text{h}}$  зимой,  $2^{\text{h}}$  летом.

2. По значению  $T_o$  вычисляют звездное Гринвичское время:

$$S = S_o + T + \mu(T)^d,$$

где  $S_o$  – звездное время в Гринвичскую полночь.

$\mu = 0,002738$  – коэффициент редукции за переход от средних солнечных единиц к звездным.

3. От звездного Гринвичского времени  $S$  переходят к местному звездному времени  $s$ .

$$S = S_o + m + \mu m \mu \lambda$$

Таблица 1

Определение широты по наблюдениям за Полярной звездой

| Обозначения                | Вычисления                                    | Обозначения                    | Вычисления               |
|----------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| $T_{\text{д}}$             | $00^{\text{h}} 25^{\text{m}} 00^{\text{s}}$   | КЛ                             | $46^{\circ} 35' 48''$    |
| $T_{\text{пр}}$            | $00^{\text{h}} 28^{\text{m}} 31^{\text{s}}$   | КП                             | $313^{\circ} 23' 18''$   |
| Ср.Т                       | $00^{\text{h}} 26^{\text{m}} 55^{\text{s}}.5$ | $Z' = (\text{КЛ}-\text{КП})/2$ | $46^{\circ} 36' 15''$    |
| $u$                        | $02^{\text{s}}$                               | $c$                            | $53''.83$                |
| $T_{\text{д}} = T + u$     | $00^{\text{h}} 26^{\text{m}} 57^{\text{s}}.5$ | $\Delta Z = 9'' \sin Z'$       | $6''.54$                 |
| $n+d$                      | $7^{\text{h}}$                                | $Z = Z' + \rho - \Delta Z$     | $47^{\circ} 37' 02''.29$ |
| $M = T_{\text{д}} - (n+d)$ | $17^{\text{h}} 26^{\text{m}} 57^{\text{s}}.5$ | $h = 90^{\circ} - Z$           | $43^{\circ} 22' 57''.71$ |
| $\lambda_E$                | $5^{\text{h}} 08^{\text{m}} 42^{\text{s}}$    | I                              | $31' 00''$               |
| $m = M + \lambda_E$        | $22^{\text{h}} 35^{\text{m}} 39^{\text{s}}.5$ | II                             | $09''$                   |
| $\mu m$                    | $3^{\text{m}} 41^{\text{s}}.9$                | III                            | $-08''$                  |

Продолжение таблицы

| Обозначения                         | Вычисления                                         | Обозначения                  | Вычисления     |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------|----------------|
| $\mu \lambda$                       | 49. <sup>s</sup> 9                                 | $\varphi = h + I + II + III$ | 43° 53' 58".71 |
| $S_0$                               | 18 <sup>h</sup> 36 <sup>m</sup> 48. <sup>s</sup> 5 |                              |                |
| $s = S_0 + m + \mu m + \mu \lambda$ | 41 16 59.8                                         |                              |                |
| $s - 24^h$                          | 17 16 59.8                                         |                              |                |

## 8.2. Определение азимута по наблюдениям зенитного расстояния Полярной звезды

Формулы для вычисления азимута Полярной звезды получаются из решения параллактического треугольника  $PZ\sigma$  (рис. 16).

Опускают сферический перпендикуляр из вершины  $\sigma$  (в котором располагается Полярная звезда) на сторону  $PZ$ . Прямоугольный треугольник  $Pk\sigma$  мал, т. к. его гипотенуза в настоящее время меньше 1°. Решают этот треугольник как плоский.

$$x = D \cos t; \quad y = D \sin t.$$

Из сферического треугольника  $Zk\sigma$  по первому правилу Модюи-Непера имеем

$$\cos(\varphi + x) = -\operatorname{tg} y \operatorname{tg} A_N$$

или

$$\operatorname{tg} A_N = \operatorname{tg} y \sec(\varphi + x).$$

Раскладывая  $\operatorname{tg} A_N$  и  $\operatorname{tg} y$  в ряд, ограничиваясь по малости  $A_N$  и  $y$  первыми членами разложения, получим

$$A_N = -y \sec(\varphi + x).$$

Азимут направления на местный предмет будет

$$a = A_N + Q.$$

Для определения астрономического азимута с погрешностью  $3''$  необходимо выполнить шесть приемов измерения горизонтального угла  $Q$  между Полярной звездой и местным предметом, а с погрешностью  $5''$  – четыре приема.

Наблюдения азимута замыкаются приемом радиосигналов времени.

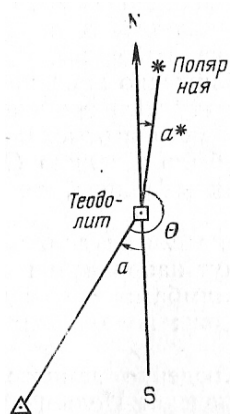


Рис. 19. Азимут направления

### Производство измерений

При круге лево: наведение трубы на земной предмет, запись отсчетов по горизонтальному лимбу; наведение трубы на Полярную звезду, запись отсчетов по часам (секундомеру), по уровню и по горизонтальному лимбу.

При круге право: наведение трубы на Полярную звезду, запись отсчетов по часам (секундомеру), по уровню и по горизонтальному лимбу; наведение трубы на земной предмет, запись отсчетов по горизонтальному лимбу.

При определении азимута с погрешностью  $15''$  и грубее упрощают формулы для вычислений. При тщательном горизонтировании теодолита можно не производить отсчетов по уровню.

### Журнал определения азимута по часовому углу Полярной звезды

Теодолит ТБ-1

Дата: 11. 08. 2003 г Часы (ручные) Поправка часов  $i = -1^m 07^s$

$\varphi = 43^\circ 10' 00''$  Долгота  $\lambda = 2^h 40^m 50^s$

| Объект наблюдения | Время Т | Горизонтальный лимб | Примечание             |
|-------------------|---------|---------------------|------------------------|
| КЛ                |         |                     |                        |
| Мира              |         | $0^\circ 03' 10''$  |                        |
|                   |         | $0^\circ 03' 10''$  | $M = 0^\circ 03' 12''$ |

|          |                 |                      |                                           |
|----------|-----------------|----------------------|-------------------------------------------|
| Полярная | $2^h 30^m 10^s$ | $301^\circ 15' 10''$ | $N = 301^\circ 17' 16''$                  |
|          |                 | $301^\circ 15' 15''$ | $Q = 58^\circ 45' 56''$                   |
| КП       |                 |                      |                                           |
| Полярная | $2^h 30^m 30^s$ | $121^\circ 19' 20''$ | $T'_M = 2^h 33^m 20^s$<br>$u = -1^m 07^s$ |
|          |                 | $121^\circ 19' 19''$ |                                           |
| Мира     |                 | $180^\circ 03' 14''$ | $T_M = 2^h 32^m 13^s$                     |
|          |                 | $180^\circ 03' 14''$ |                                           |

Для определения азимута можно пользоваться обычными часами. В этом случае звездное время наблюдения и часовой угол вычисляются по формулам

$$s = (T_M - 3^h) + \mu(T_M - 3^h) + S_0 + \lambda$$

$$t = s - \alpha$$

Таблица 2

Вычисление азимута по часовому углу Полярной звезды

$$\alpha = 1^h 57^m 02^s, \quad \delta = 89^\circ 04' 27'', \quad \Delta = 55' 33''$$

| Схема            | Вычисления           | Схема               | Вычисления          |
|------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| $T_M$            | $2^h 32^m 13^s$      | $\Delta$            | $3333''$            |
| $-(N + 1)$       | $-3^h$               | $\sin t$            | $-0,58153$          |
| $T_M - 3^h$      | $23^h 32^m 13^s$     | $y$                 | $-1938''$           |
| $S_0$            | $21^h 17^m 53^s$     | $\cos t$            | $0,81352$           |
| $\mu(T_M - 3^h)$ | $+ 3^m 52^s$         | $x$                 | $2712'' = 45' 12''$ |
| $\lambda$        | $2^h 40^m 50^s$      | $\varphi$           | $43^\circ 10' 00''$ |
| $s$              | $23^h 34^m 48^s$     | $\sec(\varphi + x)$ | $1,38829$           |
| $\alpha$         | $1^h 57^m 02^s$      | $A'_N$              | $+2691''$           |
| $t^h$            | $21^h 37^m 46^s$     | $A_N$               | $0^\circ 44' 51''$  |
| $t^\circ$        | $324^\circ 26' 30''$ | $Q$                 | $58^\circ 45' 56''$ |
|                  |                      | $\alpha$            | $59^\circ 30' 47''$ |

## 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДИМЫХ КООРДИНАТ ЗВЕЗД

Видимые места звезд даны в Ежегоднике для момента их верхних кульминаций на меридиане Гринвича. Они приходятся на юлианские звездные дни, кратные десяти, т.е. через каждые 10 звездных суток с непрерывным счетом аргумента.

В 1970 г. первый юлианский звездный день, кратный десяти, равен 2 447 270,0 и соответствует дате янв. 0.7.

Начальная дата эфемерид звезд для 1970 г. должна соответствовать JSD 2 447 290.0, т. е. янв. – 9.2.

В 1980 г. первый юлианский звездный день, кратный десяти, равен 2 450 940.0 и соответствует дате янв. 8.7.

Начальная дата эфемерид звезд для 1980 г. должна соответствовать JSD 2 450 940.0, т. е. янв. – 1.3.

$JD - 2\,451\,545,0$  – начало стандартной эпохи 2000 январь 1,5 TDB.

Аргумент «ДАТА» указывает среднее время кульминации звезды на меридиане Гринвича в счете по всемирному времени.

Так как в момент кульминации звезды звездное время  $S$  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.

Из АЕ выписывают видимые координаты  $\alpha_0$  и  $\delta_0$  звезды 95)  $\nu$  Per, предшествующей табличной дате и 10-и суточное изменение этих координат  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\delta$ .

95)  $\nu$  Per 1 декабря 1980 г.

|             | $\alpha_0$                                     | $\delta_0$               |
|-------------|------------------------------------------------|--------------------------|
| 22.9 ноября | $3^{\text{h}} 43^{\text{m}} 54,344^{\text{s}}$ | $42^{\circ} 30' 65.37''$ |
|             | 90                                             | 157                      |
|             | $\Delta\alpha = +0.09$                         | $\Delta\delta = +0.157$  |

Для определения промежутка интерполирования данный момент местного звездного времени  $s = 8^{\text{h}} 45^{\text{m}}$ , для которого нужно найти координаты, переводят на время Гринвичского меридиана.

$$S = s - \lambda_E = 8^h 45^m - 5^h 08^m = 3^h 37^m.$$

В АЕ находят  $S_0$  в  $0^h$  эфемеридного времени, т. е. в полночь 1 декабря.

$$1 \text{ декабря } 1980 \text{ г. } S_0 = 4^h 40^m 00^s .447$$

Так как  $S_0 = 4^h 40^m$  и, следовательно, больше  $S$ , то Гринвичской датой D будет 1 декабря.

Для даты D находят приближенное всемирное время, соответствующее заданному моменту

$$M = S - S_0 = 3^h 37^m - 4^h 40^m = (24^h + 3^h 37^m) - 4^h 40^m = 22^h 57^m.$$

Таким образом, заданный момент будет равен

$$D, M = 1^d 22^h 57^m.$$

Далее находят всемирное время  $M_0$ , соответствующее табличному моменту

$$M_0 = \alpha_0 - S_0^o = 3^h 44^m - 4^h 36^m = 23^h 08^m,$$

где  $\alpha_0$  – звездное время в полночь, предшествующее табличной дате, т. е. 30 ноября.

Таким образом, табличный момент будет равен

$$D_0, M_0 = 30^d 23^h 08^m.$$

Промежуток интерполирования находят как разность заданного и табличного моментов.

$$D, M - D_0, M_0 = 1^d 22^h 57^m - 30^d 23^h 08^m = 0^d 23^h 49^m = 0^d .99.$$

Интерполяционный множитель  $n$ , выраженный в средних единицах времени равен

$$n_0 = \frac{0.99}{10} = 0.099.$$

Интерполяционный множитель  $n$ , выраженный в звездных единицах времени равен

$$n = 0.099 + 0.099 \cdot 0.00274 = 0.099 + 0.0003 = 0.0993$$

Умножая 10-суточные изменения координат  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\delta$  на  $n=0,0993$ , получают величины изменения координат. Прибавляют их к значениям  $\alpha_0$  и  $\delta_0$

|                                                                       |                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| $\alpha_0 = 3^{\text{h}} 43^{\text{m}} 54,344^{\text{s}}$             | $\delta_0 = 42^{\circ} 30' 65,37''$                    |
| $\Delta\alpha \cdot n = \frac{0.009}{\phantom{0.009}}$                | $\Delta\delta \cdot n = \frac{0.016}{\phantom{0.016}}$ |
| $\alpha_{\text{вид.}} = 3^{\text{h}} 43^{\text{m}} 54,353^{\text{s}}$ | $\delta_{\text{вид.}} = 42^{\circ} 30' 65,386''$       |

## 10. ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРОТЫ, ДОЛГОТЫ И АЗИМУТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ МОМЕНТОВ

### 10.1 Общие положения

Способы астрономического определения широты, долготы и азимута, рассматриваемые в настоящем разделе, основаны на фотоэлектрической регистрации моментов прохождений звезд с помощью астрономических теодолитов, снабженных специальной фотоэлектрической установкой. Преимуществами фотоэлектрического метода регистрации являются:

- полное исключение из конечного результата личных ошибок наблюдателя;
- ослабление общего влияния наблюдателя на теодолит; лучшее закрепление визирной линии теодолита в период наблюдений за счет неподвижности визирного приспособления (зеркальной решетки) во время регистрации звезды;
- повышение производительности труда, так как нет необходимости определять долготную и азимутальную лично-инструментальные разности до и после полевых наблюдений;
- возможность (в перспективе) автоматизации процессов астрономических наблюдений и обработки полученных результатов.

Использование фотоэлектрического метода регистрации решает полностью задачу повышения точности полевых астрономических определений, поскольку остаются еще такие источники погрешностей, как инструментальные и внешней среды. Однако этот метод представляет собой существенный шаг вперед по пути повышения точности. На основании многолетних исследований, выполненных в ЦНИИГАиК по изучению точностных возможностей фотоэлектрических способов астрономических определений, получены следующие значения средних квадратических, погрешностей единицы веса для широтных, долготных (по одной паре звезд) и азимутальных (из одного приема) определении

$$\mu_0 = \pm 0,4'', \quad \mu_\lambda = \pm 0,020^s \sec \varphi, \quad \mu_\alpha = \pm 0,5'' \sec \varphi.$$

Если учесть, что результаты фотоэлектрических определений полностью свободны от личной разности наблюдателя и ее колебаний, оцениваемых величиной  $\pm 0,3''$ , то следует констатировать, что в общем случае внедрение фотоэлектрических методов позволит повысить точность определения широты, долготы и азимута примерно в два раза по сравнению с достигнутой в настоящее время.

Основным недостатком фотоэлектрического метода является невозможность его применения в светлое время суток. Учитывая последнее обстоятельство, способы фотоэлектрических определений широты, долготы и азимута рекомендуются как основные в зоне широт  $-55 - +50^0$  в любое время года, а в остальных районах земного шара в периоды, когда Солнце опускается под горизонт на  $8^0$  и ниже.

Основными способами фотоэлектрических астрономических определений являются:

- способ Певцова при определении широты;
- способ Цингера при определении долготы;
- многократные наблюдения ярких звезд вблизи меридиана при определении азимута.

В последнем случае измерение направлений по наземные световые цели выполняют в одном из режимов. Обработка результатов фотоэлектрических измерений ведется по традиционным формулам и в том же порядке, что и для визуальных измерений. Разница состоит лишь в том, что измеренный фотоэлектрический момент наблюдений каждой звезды должен быть уменьшен на величину задержки сигнала в цепях фотоэлектрической установки.

## **10.2. Подготовка теодолита к определениям широты с применением фотоэлектрической регистрации моментов**

По прибытии на полевой пункт астрономический теодолит устанавливают по астрономический столб, а аппаратуру, входящую в комплект теодолита вблизи столба, на инструментальный столик. Производят коммутацию электрических цепей теодолита,

цифropечатающей машины, хронометра, радиоприемника, фотоэлектрической установки. Как сама аппаратура, так и провода, идущие от нее к астрономическому теодолиту и источникам питания, должны быть заземлены, в нерабочее время надежно закреплены и укрыты брезентом для защиты от ветра, пыли, тумана и дождя. Использовать в качестве чехлов полиэтиленовую пленку не рекомендуется, так как она препятствует испарению влаги, сконденсировавшейся в ночное время на поверхности приборов. Для защиты от прямого воздействия ветра вокруг столба должен быть построен помост со стойками. К стойкам крепится брезентовое ограждение, высота которого должна на 15–20 см превышать теодолит с трубой, направленной в зенит, и надетой на трубу блендой. Настил помоста не должен соприкасаться со столбом, а точки опоры помоста о грунт должны быть удалены от обводов столба не менее чем на 1 м.

До начала наблюдений необходимо убедиться в том, что в секторах с азимутами  $0 \pm 0,25$ ,  $180 \pm 25$ ,  $90 \pm 25$ ,  $270 \pm 25^\circ$  возможно наблюдение звезд в интервале зенитных расстояний  $0-60^\circ$ .

Теодолит и аппаратура, входящая в его комплект, должны быть проверены на работоспособность сразу же после установки на рабочих местах. Убедившись в исправности приборов, приступают к подготовке их к фотоэлектрическим определениям.

Теодолит горизонтируют с погрешностью 5–10" и, открепив стопорный винт, заменяют визуальный микрометр фотоэлектрическим: в поле зрения окуляра будет видна зеркальная решетка.

Наводят трубу теодолита на мир и, разворачивая коробку микрометра, приводят зеркальную решетку в вертикальное положение с доступной для глаза степенью точности. Контроль вертикальности решетки осуществляют в следующем порядке. Вращая винт микрометра, отводят каретку с решеткой от нуля и устанавливают на отсчет 4,00 оборота. Действуя наводящими винтами трубы и алидады горизонтального круга, приводят изображение мира на осевую линию зеркальной решетки, обращенную к краю поля зрения трубы. Медленно вращая винт микрометра, переводят каретку с зеркальной решетки на отсчет 16,00 оборотов. Наводящим винтом трубы изменяют положение трубы теодолита до тех пор, пока

изображение миры не переместится через центр поля зрения и через щели зеркальной решетки. Если решетка вертикальна, изображение миры, выйдя за ее пределы, вновь окажется на осевой линии решетки. Если же вертикальности добиться не удалось, изображение сойдет с осевой линии. В этом случае оценивают на глаз расстояние между осевой линией решетки и изображением миры и осторожно доворачивают коробку микрометра до тех пор, пока изображение миры не приблизится к осевой линии на половину замеченного расстояния. Производят контроль вертикальности и в случае необходимости выполняют повторно юстировку в том же порядке.

Выполняют согласование визирных осей главной трубы и трубы-искателя: осевая линия зеркальной решетки должна совпадать с осью вертикального биссектора, а центральное окно решетки, установленное в нуль-пункте, должно совпадать с квадратом, образованным горизонтальным и вертикальным биссекторами сетки нитей трубы-искателя. Для проверки этого условия устанавливают зеркальную решетку в нуль-пункте, измеряют и исправляют место зенита ее центрального окна. Приводят изображение миры в центральное окно. Вращая исправительные винты сетки нитей трубы-искателя, перемещают сетку и добиваются, чтобы изображение миры разместилось в центре квадрата, образованного вертикальным и горизонтальным биссекторами. Проверяют и в случае необходимости исправляют наклон вертикального биссектора. Для контроля проверяют совпадение осевых линий решетки главной трубы и вертикального биссектора трубы-искателя.

Проверяют и готовят к работе кварцевый хронометр «Альтаир», радиоприемник «Астра», цифрорпечатающее устройство МПУ8-3. В соответствии с инструкцией по эксплуатации, проверяют работоспособность и фотоэлектрической установки (ФУ) и производят регулировку режимов ее работы. Подготовку ФУ заканчивают определением времени задержки сигнала по каналу каждого из фотоумножителей. При этом необходимо убедиться в том, что величина задержки и напряжение, при котором она определяется, не отличаются от зафиксированных в лабораторных условиях более чем на  $\pm 10\%$ , что свидетельствует о стабильности рабочих параметров фотоэлектрической

установки. Готовность теодолита и ФУ к наблюдениям заканчивают пробной регистрацией звезды. Блеск звезды должен составлять  $m = 3 \div 4$  звездной величины, а зенитное расстояние  $35\text{--}45^\circ$ . В ходе наблюдений определяют оптимальное напряжение питания фотоумножителей для метеорологических условий данного пункта.

### **10.3. Определение широты из наблюдений пар звезд на равных высотах (способ Певцова) с применением фотоэлектрической регистрации моментов**

Программа определений широты с применением фотоэлектрической регистрации моментов по способу Певцова включает и себя наблюдения десяти пар звезд, на зенитных расстояниях  $15\text{--}60^\circ$ , а азимутальных секторах  $10\text{--}45^\circ$  от меридиана, по обе стороны от него. Так как интервал времени между смежными парами Певцова может достигать  $15\text{--}20$  мин, то для повышения производительности труда на пункте широтные пары рекомендуется наблюдать между долготными парами (способ Цингера). Предпочтение отдается парам, содержащим более яркие звезды на меньших зенитных расстояниях. Наблюдения как широтных, так и долготных пар всегда выполняют при положении верхней части теодолита позволяющей устанавливать по вертикальному кругу непосредственно зенитное расстояние звезд, а не его дополнение до  $360^\circ$ . Программа наблюдений должна быть составлена таким образом, чтобы примерно половина пар наблюдалась в восточной, а вторая половина в западных частях неба. Желательно также чередовать порядок наблюдений звезд в парах, например N–S, S–N и т. д., а если этого сделать не удастся, то нужно следить за тем, чтобы примерно половина пар в программе наблюдалась в порядке N–S, а остальные в порядке S–N.

Перед началом вечерних наблюдений теодолит и приборы астрономического комплекса готовят в порядке, указанном п. 10.2.

За  $30\text{--}40$  мин до начала измерений производится тщательное горизонтирование теодолита. Непосредственно перед началом наблюдений в соответствии с расписанием передач сигналов

точного времени производят прием радиосигналов и вычисляют поправку хронометра с приближенной долготой  $\lambda_0$  пункта наблюдений, известной с погрешностью 1–2 с. Вычислив поправку хронометра, определяют время задержки сигнала в цепях обоих фотоумножителей. Приступают к наблюдениям.

Подбор пар звезд осуществляют в процессе наблюдении по «Эфемеридам для определения широты по соответственным высотам пар звезд (по способу Певцова)». В эфемеридах, изданных для 5-градусных широтных зон, указаны: номер и пределы годности пары, сторона неба (W или E), в которой наблюдается данная звезда пары, номера звезд по АЕ и их величины, местное звездное время наблюдений, зенитные расстояния пар и азимуты звезд. Кроме того, в эфемеридах приводятся величины измерений времени  $s$ , зенитного расстояния  $Z$  и азимута  $\alpha$  при измерении широты на одну минуту дуги с целью интерполирования этих величин на широту пункта наблюдений  $\varphi_0$ , которая должна быть известна с погрешностью 1–2'.

Для вычисления рабочих эфемерид отыскивают нужную широтную зону, ближайшую к широте пункта наблюдений. Составляют список пар, задавшись временем начала и конца наблюдений. При этом руководствуются пределами годности каждым из пар.

Табличные значения  $s_T$ ,  $Z_T$ ,  $\alpha_m$ , вычисленные для широты  $\varphi$  исправляют поправками за приведение к широте  $\varphi_0$  пункта наблюдений, так что

$$s = s_T + \frac{\Delta s}{\Delta \varphi}(\varphi_0 - \varphi), \quad Z = Z_T + \frac{\Delta Z}{\Delta \varphi}(\varphi_0 - \varphi),$$

$$\alpha = \alpha_T + \frac{\Delta \alpha}{\Delta \varphi}(\varphi_0 - \varphi),$$

где разность  $\varphi_0 - \varphi$  выражают в минутах дуги.

Проинтерполированные, таким образом, значения азимутов звезд, вычисленные по последней формуле, обеспечивают появление звезд в поле зрения трубы теодолита в удалении 10' от центрального окна зеркальной решетки или 5' от первой рабочей щели. Если эти расстояния являются неудобными для

наблюдений на данной широте, к вычисленному значению азимута добавляют поправку  $\delta\alpha' = \delta\alpha(1 - 0,1f')$ , где  $f'$  – новое расстояние до средней нити,  $\delta\alpha$  – изменение азимута за промежуток времени  $\delta s$ , в течение которого звезда проходит по высоте угловое расстояние  $f' = 10'$ . Величины  $\delta\alpha$  и  $\delta s$  приведены в эфемеридах для каждой звезды. Для нового углового расстояния  $f'$  изменится и величина  $\delta s$ :  $\delta s' = \delta s(1 - 0,1f')$ . Промежуток времени между наблюдениями звезд пары должен быть на 1,0–1,5 мин больше удвоенного значения величины  $\delta s$ . Пример рабочих эфемерид приведен в табл. 10.1

Таблица 10.1  
Рабочие эфемериды для определения широты по способу  
Певцова широта пункта  $\varphi_0 = 43^\circ 45'$

| Номер пары | Номер звезды | Звездная величина | s                                 | Z      | $\alpha$ |
|------------|--------------|-------------------|-----------------------------------|--------|----------|
| 166        | 460          | 4,9               | 15 <sup>h</sup> 47,0 <sup>m</sup> | 35°36' | 24°00    |
|            | 409          | 4,3               | 56,1                              |        | 155 13   |
| 167        | 375          | 4,5               | 16 15,4                           | 25 04  | 198 30   |
|            | 361          | 4,9               | 21,8                              |        | 340 23   |
| 184        | 531          | 4,8               | 16 42,0                           | 44 16  | 26 34    |
|            | 438          | 4,1               | 51,0                              |        | 152 46   |

Наблюдения звезд пары выполняют в следующем порядке. 4–5 мин до эфемеридного момента наблюдений первой звезды пары зрительную трубу закрепляют на эфемеридном зенитном расстоянии Z, а верхнюю часть теодолита разворачивают и устанавливают по азимуту первой звезды пары. Скрепив талькоттовский уровень с горизонтальной осью, приводят пузырек на середину шкалы. Отыскивают звезду в поле зрения трубы-искателя и вращением наводящего винта алидады горизонтального круга приводят изображение звезды на осевую линии вертикального биссектора. При подходе звезды к началу зеркальной решетки наблюдатель отсчитывает уровень и дает команду помощнику на включение регистрирующего

устройства и, вращая наводящий винт алидады горизонтального круга, удерживает изображение звезды на осевой линии вертикального биссектора до тех пор, пока она в своем движении не выйдет за пределы зеркальной решетки. В процессе регистрации моментов прохождения звезды по щелям решетки помощник следит за правильностью работы установки, а наблюдатель, закончив регистрацию, вторично берет отсчет по уровню. На этом наблюдения первой звезды пары заканчивают. Открепив стопорный винт алидады горизонтального круга, поворачивают и устанавливают последнюю по азимуту второй звезды пары, наблюдения которой выполняют в том же порядке, что и наблюдения первой. Эксплуатация ФУ в процессе наблюдений осуществляется помощником в соответствии с указаниями инструкции по эксплуатации.

Закончив наблюдения вечера, вторично измеряют время задержки сигнала по каналам каждого из фотоумножителей. В соответствии с расписанием передач радиосигналов точного времени производят прием радиосигналов и вновь вычисляют поправку хронометра, контролируя тем самым правильность его работы и величину хода.

Результаты измерений записывают в журнал, форма которого приведена в табл. 10.2.

Таблица 10.2

Журнал определений широты по способу Певцова ФУ

Дата 20/21 июля 1970 г.      теодолит АУ 2/10  $\tau = 1,510$   
 Пара № 190                       $Z = 35^\circ 35'$   
                                             463 S 3,0                      522 N 2,6  
                                              $\alpha_S = 219^\circ 38'$                        $\alpha_N = 319^\circ 55'$

| Звезда S<br>№ 463<br>величина 3,0<br>$T'_S$ | Отсчет<br>уровня | Звезда N<br>№ 522<br>величина 2,6<br>$T'_N$ | Отсчет<br>уровня |
|---------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------|------------------|
| $17^h 34^m 28,79^s$                         | 34,8–16,2        | $17^h 45^m 29,54^s$                         | 35,5–17,0        |
| 33,09                                       |                  | 33,89                                       |                  |

Продолжение таблицы 10.2

| Звезда S<br>№ 463<br>величина 3,0<br>$T'_S$              | Отсчет<br>уровня | Звезда N<br>№ 522<br>величина 2,6<br>$T'_N$        | Отсчет<br>уровня |
|----------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------------|------------------|
| 37,05                                                    |                  | 37,82                                              |                  |
| 41,08                                                    |                  | 41,95                                              |                  |
| 44,81                                                    |                  | 45,79                                              |                  |
| 52,78                                                    |                  | 53,70                                              |                  |
| 56,54                                                    |                  | 57,50                                              |                  |
| 35 <sup>m</sup> 00,69                                    |                  | 45 <sup>m</sup> 01,69                              |                  |
| 04,54                                                    |                  | 05,61                                              |                  |
| 08,64                                                    | 34,8–16,2        | 09,59                                              | 35,5–17,0        |
| 17 <sup>h</sup> 34 <sup>m</sup> 48,81 <sup>s</sup>       | 51,0             | 17 <sup>h</sup> 45 <sup>m</sup> 49,71 <sup>s</sup> | 52,50            |
| $\Delta T\phi$ -0,20                                     |                  | $\Delta T\tau$ -0,20                               |                  |
| $T_S$ 17 <sup>h</sup> 34 <sup>m</sup> 48,61 <sup>s</sup> |                  | $T_N$ 17 <sup>h</sup> 45 <sup>m</sup> 49,51        |                  |

$$b = -1,50 \quad \Delta\varphi_b = -1.48'' \quad K = 0,277$$

$$\left( \frac{T_{10} - T_1}{100} \right)^2 = \left( \frac{40}{100} \right)^2 = 0.16$$

$$\Delta\varphi_{wz} = -0,05''$$

Для обработки результатов наблюдений с хронографической ленты цифropечатающего устройства МПУ8-3 переносят в журнал по 10 моментов прохождений звезд, симметричных относительно центрального окна зеркальной решетки и одноименных для обеих звезд пары. Запись моментов прохождений обеих звезд в журнале производят сверху вниз.

Вычисляют средние моменты наблюдений первой и второй звезд  $T'_1$  и  $T'_2$  и исправляют их поправкой  $\Delta T$  за задержку сигнала в цепях ФУ, так что

$$T_1 = T'_1 + \Delta T, \quad T_2 = T'_2 + \Delta T.$$

Вычисляют поправку за изменение наклона трубы при переходе от наблюдений одной звезды пары к другой

$$\Delta\varphi_b = b \frac{\tau''}{2} \sec \alpha_N,$$

где  $b = (J + II)_S - (J - II)_N$ .

Используя астрономическую долготу пункта, известную с погрешностью  $\pm 0,2$  с, находят поправку хронометра  $u_0$  в средние моменты наблюдений  $T_1$  и  $T_2$  каждой из звезд [3].

Из АЕ или FK4 выбирают на эпоху наблюдений видимые координаты  $\alpha$  и  $\delta$  отнаблюдаемых звезд (табл. 10.3).

Таблица 10.3

## Вычисление широты пункта

| Дата<br>Номер пары<br>Номер звезды | 20/21 июля 1970 г.     |                        |
|------------------------------------|------------------------|------------------------|
|                                    | 190                    |                        |
|                                    | 522 N                  | 463 S                  |
| $T$                                | $17^h 45^m 49,51^s$    | $17^h 34^m 48,61^s$    |
| $u$                                | -29,52                 | -31,33                 |
| $\alpha$                           | 21 18 07,66            | 19 04 26,84            |
| $t_0$                              | 22 29 50,39            | 20 27 12,33            |
| $\delta$                           | $62^\circ 29' 50,39''$ | $21^\circ 18' 07,66''$ |
| $Z'_0$                             | 35 35 29,90            | 35 35 27,14            |
| $Z'_{ON} - Z'_{OS}$                | +2,76                  |                        |
| $\cos \alpha_S - \cos \alpha_N$    | 1,528                  |                        |

$$\varphi = 43^\circ 44' 55,00'' + 1,81'' - 1,48'' - 0,05 + 0,08''$$

$$\varphi = 43^\circ 44' 55,36''$$

По формуле

$$t_0 = T + u_0 - \alpha$$

вычисляют часовые углы звезд, а затем по формуле

$$Z'_0 = \arccos(\sin \varphi_0 \sin \delta + \cos \varphi_0 \cos \delta \cos t_0).$$

находят их зенитные расстояния в момент наблюдений.

Вычисляют поправку за ускорение движения звезд пары по высоте

$$\Delta\varphi_{Wz} = -K \left( \frac{T_{10} - T_1}{100} \right)^2,$$

где разность  $(T_{10} - T_1)_S$  между последним и первым моментами регистрации южной звезды выражают в секундах времени;

коэффициент  $K = 0.227 \frac{n+1}{n-1} \sin 2\varphi_0 = \text{const}$  для данного

пункта и теодолита;  $n$  – число контактов для каждой из звезд, принятых в обработку.

При  $n = 10$  величина  $K$  находится по формуле

$$K = 0.277 \sin 2\varphi_0$$

Широту пункта вычисляют по формуле

$$\varphi_i = \varphi_0 + \frac{Z_{ON} - Z'_{OS}}{\cos \alpha_S - \cos \alpha_N} + \Delta\varphi_b + \Delta\varphi_{Wz}.$$

Счет азимутов звезд в этой формуле ведется от точки юга.

Поправку в широту за короткопериодические члены нутации вычисляют один раз для каждого вечера наблюдений

$$\Delta\varphi_{nut} = g' \cos(G' + s_{cp}),$$

где  $s_{cp}$  – местное звездное время середины интервала наблюдений в данный вечер. Значения  $g'$  и  $G'$  выбирают из АЕ (таблица «Редукционные величины»).

Окончательное значение широты пункта получают как простое среднее из всех отнаблюдаемых пар (табл. 10.4), исправленное поправками за приведение к центру пункта, полюсу ОСИ и при необходимости к уровню моря.

Оценку точности выполняют по стандартным формулам теории ошибок.

Таблица 10.4

Вычисление среднего значения широты и оценка точности

| Дата              | Номер пары | Широта       | $\nu$  |
|-------------------|------------|--------------|--------|
| 20/21 июля 1970 г | 176        | 43°44'55,00" | +0,34" |
|                   | 190        | 55,26        | +0,13  |
|                   | 194        | 55,07        | +0,32  |
|                   | 199        | 56,13        | -0,74  |
|                   | 205        | 56,61        | -0,22  |
|                   | 209        | 55,86        | -0,47  |
|                   | 213        | 55,48        | -0,09  |
|                   | 224        | 55,09        | +0,30  |
|                   | 229        | 54,99        | +0,40  |
|                   | 232        | 55,53        | -0,14  |
|                   | 246        | 55,48        | -0,09  |
|                   | 249        | 55,09        | +0,30  |

#### 10.4. Малогабаритное печатающее устройство МПУ8-3

Малогабаритное печатающее устройство МПУ8-3 предназначено для регистрации на бумажной ленте в цифровой форме моментов наблюдений звезд в системе шкалы времени кварцевого хронометра «Альтаир», а также для записи на эту ленту служебной информации, сопутствующей наблюдениям. Показания хронометра на ленте МПУ8-3 печатаются в моменты замыкания (размыкания) входной цепи устройства в единицах часов, минутах, секундах и их тысячных долях.

Техническая характеристика МПУ8-3

Число разрядов в строке, шт .....8

Скорость печати, строк/с ..... 20

Время готовности устройства к печати

после включения питания, с ..... не более 3

Напряжение питания.....24  $\pm$  2,4 В постоянного тока

Потребляемая мощность при непрерывной работе

и при скорости печати 20 строк/с ..... не более 30 Вт

Масса устройства, кг .....не более 14

Печать производится на бумажную ленту шириной 25 мм

Стандартный рулон этой ленты диаметром 55 мм рассчитан на 10 тыс. строк и его хватает для регистрации результатов измерений на 4–5 полевых пунктах.

МПУ8-3 может эксплуатироваться при температуре окружающего воздуха от -10 до +50 °С. Относительная влажность допускается до 98 % при температуре не более +35 °С.

Конструктивно печатающее устройство состоит из двух блоков: собственно печатающего устройства и дистанционного пульта управления, который может быть удален от устройства на расстояние до 15 м и соединяется с ним кабелем.

На передней панели печатающего устройства (рис. 17) расположены: ручка потенциометра для регулировки скорости вращения электродвигателя «М»; сигнальная лампочка «бумага» красного цвета, загорающаяся при обрыве или окончании бумажной ленты; сигнальная лампочка «готов» зеленого цвета, загорающаяся при включении устройства и его исправности; сигнальная лампочка «ГТИ» зеленого цвета, загорающаяся при готовности устройства к выдаче информации; кнопка «прогон» для холостого прогона бумажной ленты; кнопка «сброс», предназначенная для снятия сигнала «неисправность», после устранения последней или заправки бумажной ленты, когда продолжает гореть лампочка «бумага»; кнопка «ВКЛ» для включения устройства; кнопка «ВЫКЛ» для выключения устройства.

Последние две кнопки продублированы на дистанционном пульте.

С правой стороны передней панели размещены, закрытые крышкой, органы контроля работы устройства, используемые при проверке и наладке печатающего устройства МПУ8-3. При эксплуатации исправного устройства в полевых условиях используется, как правило, лишь сигнальная лампочка «М», загорающаяся в том случае, когда частота вращения электродвигателя недостаточна (например, из-за сгущения смазки на морозе).

С левой стороны передней панели расположены предохранители, а также ручка потенциометра «регулировка 5В», используемая только при наладке и регулировке устройства.

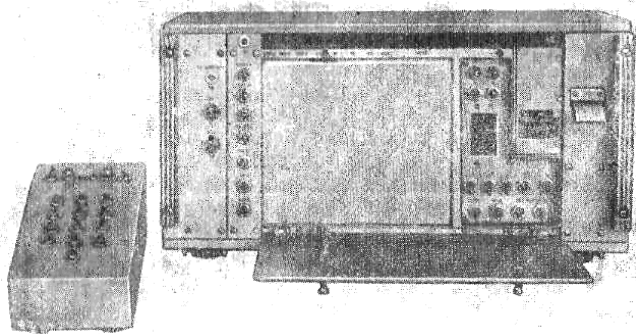


Рис. 20. Малогабаритное печатающее устройство МПУ8-3

На задней стенке МПУ8-3 имеются: разъем «Ш1» для подключения кабеля, соединяющего устройство с кварцевым хронометром «Альтаир»; разъем «Ш2» для подключения кабеля, соединяющего устройство с дистанционным пультом; разъем «Ш19» для подключения кабеля питания МПУ8-3.

Расположенная на правой боковой стенке корпуса откидная крышка закрывает печатающий механизм. Правила эксплуатации последнего изложены в технической документации МПУ8-3.

На верхней панели дистанционного пульта управления расположены:

- тумблеры выбора фазы регистрации: «РЗ» – замыканий, «РР» – размыканий цепи; если оба тумблера включены, то будут регистрироваться как замыкания, так и размыкания цепи;
- сигнальная лампочка зеленого цвета «готов», загорающаяся при включении устройства и готовности его к работе;
- гнезда для подключения высокочастотного кабеля от хронометра «Альтаир» на время проверки устройства (гнездо зеленого цвета – плюс, черного цвета – земля);
- сигнальная лампочка белого цвета «печать», загорающаяся на время печати устройством регистрируемой информации;
- тумблеры включения «ВКЛ» и выключения «ВЫКЛ» устройства;
- кнопки для набора цифр от 0 до 9; после набора любых девяти цифр они автоматически отпечатаются на ленте;

– кнопка конец ввода информации «КВИ», применяемая в тех случаях, когда объем набранной информации содержит менее девяти знаков, в этом случае для впечатывания информации следует нажать кнопку «КВИ».

На передней стенке корпуса пульта размещены:

– разъем «Ш1» для подключения кабеля, соединяющего дистанционный пульт с печатающим устройством;

– разъем «Ш2» для подключения кабеля от контактного микрометра;

– тумблер для переключения рода работы: при положении тумблера «вниз» будут регистрироваться сигналы от контактного микрометра, а при положении «вверх» от кварцевого хронометра «Альтаир». Так как МПУ8-3 не имеет входа для подключения кабеля от контактного микрометра и тумблеров выбора фазы регистрации (замыкание, размыкание), то использовать его можно только с подключенным пультом, даже если устройство расположено вблизи астрономического теодолита.

Подготовку малогабаритного печатающего устройства МПУ8-3 к работе производят в такой последовательности. Соединяют кабелем печатающее устройство и кварцевый хронометр «Альтаир». В МПУ кабель подключают к разъему «Ш1». Соединяют кабелем печатающее устройство и дистанционный пульт управления. Соединительный кабель длиной 15 м, служащий для этой цели, имеет на концах одинаковые разъемы. В МПУ кабель присоединяется к разъему «Ш2», а на дистанционном пульте к разъему «Ш1». Подключают кабель от контактного микрометра к разъему «Ш2» на дистанционном пульте. Заземляют корпус МПУ8-3. Питание хронометра «Альтаир» и печатающего устройства осуществляется от общего аккумулятора. Кабель питания МПУ подключают к разъему «Ш19» на корпусе МПУ8-3. Второй конец кабеля подключают к аккумулятору, соблюдая полярности. Заправляют устройство бумажной лентой. Нажимают на кнопку «ВКЛ» на передней панели устройства или на дистанционном пульте. При этом должна загореться лампочка «готов» устройства и пульта, включиться электродвигатель, осуществиться прогон бумаги, после чего двигатель должен остановиться, если на дистанционном пульте выключены тумблеры «РЗ» и «РР В

зависимости от выбранной фазы регистрации включают один или оба названных тумблера. Выключают устройство кнопкой «ВЫКЛ». МПУ8-3 подготовлено к приему и выдаче информации.

Регистрация моментов прохождений звезд с помощью МПУ8-3 сводится к нажатию кнопки «ВКЛ» на передней панели устройства или па дистанционном пульте управления. После того как моменты зарегистрированы, нажимают кнопку «ВЫКЛ». При необходимости наблюдатель может наносить на ленту различную информацию: номера регистрируемых звезд, их зенитное расстояние, отсчеты по уровню и т. д. Для этого, используя оцифрованные кнопки дистанционного пульта, набирают нужную информацию, после чего нажимают кнопку «КВИ». Отсчет запечатывается на ленту МПУ8-3.

В связи с тем что время готовности МПУ8-3 к работе составляет всего 3 с, устройство включают только на период регистрации моментов прохождений звезд, что позволяет довести часовой расход электроэнергии аккумулятора до величины, не превышающей 0,4–0,5 А/ч.

### 10.5. Приборы для расшифровки хронограмм

Под расшифровкой хронограммы понимают линейное интерполирование показаний хронометра на момент наблюдаемого явления между моментами начала двух смежных секунд, т. е. оценка положения рабочей отметки от контактного микрометра или радиосигналов времени относительно секундных меток.

Простейшим прибором для измерения хронограмм является клиновидная палетка (рис. 21), представляющая собой прозрачную пластину из целлулоида, плексигласа или стекла, на которую нанесены одиннадцать расходящихся прямых.

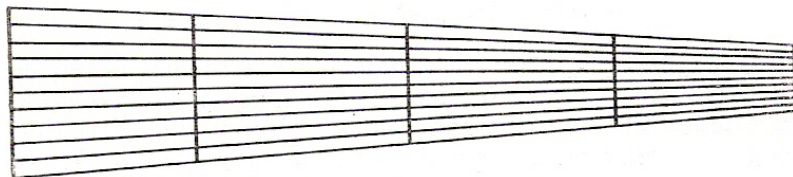


Рис. 21. Клиновидная палетка

Палетку накладывают на ленту так, чтобы ее основание было параллельно линии, соединяющей секундные метки на ленте. Перемещая палетку вверх – вниз, добиваются совмещения крайних штрихов с отметками двух смежных секундных меток. Пользуясь промежуточными штрихами, интерполируют на глаз положение измеряемого контакта (рабочей отметки от контактного микрометра или радиосигналов времени) в сотых долях секунды относительно младшей секундной метки.

Для измерения хронограмм используют также специальный прибор (рис. 22).

На основании прибора 1 укреплена ось 2, на которой вращаются с помощью рукоятки 8 радиальный сектор 3 с застекленным окном и шкалой 7. Шкала сектора соприкасается с неподвижным индексом 9. Сектор с помощью пружины прижат вправо до упора 5, имеющего регулировочный винт 6.

При положении сектора на упоре отсчет по шкале должен быть 10,0, что достигается с помощью регулировочного винта 6. Шкала сектора имеет 10 оцифрованных делений, соответствующих десятым долям секунды. Каждое из оцифрованных делений поделено пополам. Сотые доли секунды отсчитываются на глаз по индексу. На стекле сектора нанесены два прямых визирных штриха, исходящих из центра вращения сектора под углом  $15^\circ$ .

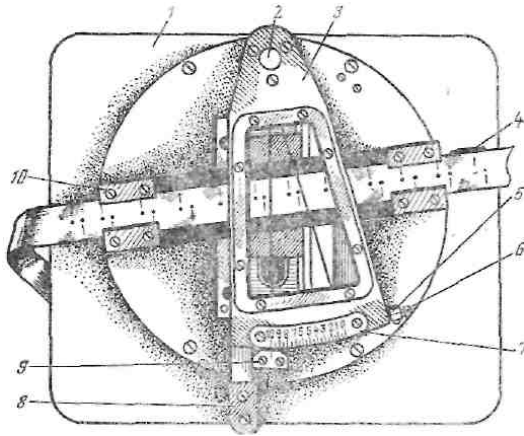


Рис. 22. Прибор для расшифровки хронограмм

Хронографическая лента для измерений пропускается в пазы станины ползуна 10, который с помощью рукоятки 4 может перемещаться под сектором по направляющим. При отсчете 10,0 по шкале сектора ползун перемещается параллельно левому визирному штриху.

### 10.6. Радиоприемник «Астра»

Радиоприемник (рис. 23) предназначен для приема радиосигналов точного времени в стационарных и полевых условиях в диапазонах радиоволн, указанных в табл. 10.5.

Таблица 10.5

Диапазоны радиоволн

| Номер диапазона | Частота, кГц | Номер диапазона | Частота, кГц |
|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| 1               | 12-150       | 7               | 5 000±40     |
| 2               | 1580-270     | 8               | 10 000±40    |
| 3               | 270-480      | 9               | 15 000±40    |
| 4               | 480-860      | 10              | 20 000±40    |
| 5               | 860-1500     | 11              | 25 000±40    |
| 6               | 2500±40      |                 |              |

Перестройка частоты в диапазонах 1-5 плавная, цена деления шкалы на 2-м и 3-м диапазонах 1 кГц, на остальных 2 кГц.

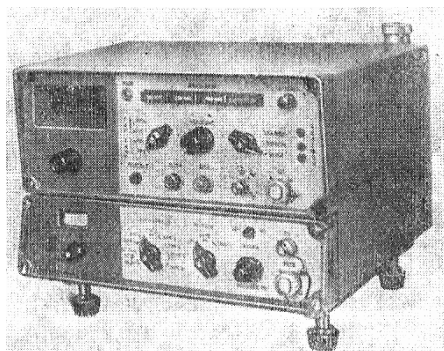


Рис. 23. Радиоприемник «Астра»

Радиоприемник имеет три выхода:

- от усилителя промежуточной частоты 128 кГц с регулировкой напряжения от 0 до 1,5 В, на нагрузке  $3000 \pm 300$  Ом (выход ПЧ); этот выход используется при приеме радиосигналов точного времени на осциллограф и для автоматической привязки шкалы времени хронометра «Альтаир» к сигналам точного времени;

- от усилителя низкой частоты (выход «телефон») напряжением не менее 1,5 В на головные телефоны или кварцевый хронометр «Альтаир»;

- от усилителя низкой частоты через специальное развязывающее устройство, для регистрации сигналов точного времени на ленте маркопечатающего хронографа ХПМ-3.

Питание радиоприемника осуществляется от внутреннего источника питания постоянного тока (восемь элементов типа 373) напряжением 12 В, от внешнего источника (аккумулятор) постоянного тока с тем же напряжением, от сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц, от сети переменного тока напряжением 115 В, частотой 400 Гц.

Мощность, потребляемая приемником от источников постоянного тока, не превышает 6 Вт. Изменение любого напряжения названных выше источников питания на величину  $\pm 10\%$  не отражается на качестве работы радиоприемника. Задержка радиосигналов в электрических цепях приемника не превышает 0,6 мс. Радиоприемник «Астра» может эксплуатироваться непрерывно в течение 8 ч при температуре окружающего воздуха от  $-25$  до  $+50$  °С и относительной влажности до 98 %.

Конструктивно радиоприемник выполнен в виде двух блоков – верхнего и нижнего, жестко связанных между собой. Прием радиопередач производится на одну из двух антенн: штыревую и антенну «наклонный луч». Последняя состоит из двух проводов, один из которых (вертикальный) подключается к клемме «антенна», а второй (горизонтальный) к клемме (корпус приемника). Для переноски приемник укладывают в металлический футляр, снабженный заплочными ремнями. В футляре имеются отсеки для коммутационных кабелей и головных телефонов. При транспортировке железнодорожным, водным, авиационным или автомобильным транспортом приемник, уложенный в металлический футляр, размещается в

транспортировочном ящике. В этом же ящике находятся эксплуатационная документация, комплект запасных частей и принадлежностей.

При подготовке к работе радиоприемник вынимают из транспортировочного ящика, а затем и из металлического футляра и устанавливают на рабочее место; подключают к клемме, а одну из антенн – в предназначенное для нее гнездо; в гнезда «телефон» вставляют вилку головных телефонов.

Открывают люк в верхней части корпуса и вставляют в гнезда люка батареи; если радиоприемник предполагается питать от внешнего источника, переключатель вида питания в этом люке переводят в положение, соответствующее избранному источнику питания, после чего отвинчивают колпачок разъема «Ш1» и подсоединяют к разъему штатный кабель; подключают кабель к источнику питания.

Переключатель рода работ переводят в положение «калибр», а переключатель «контроль» в положение «+12В», после чего стрелка контрольного прибора должна отклониться на 35–65 делений шкалы.

Утапливают клавишу «конвертор», переключатель «контроль» переводят в положение «гетер»; вращая переключатель диапазонов нижнего блока радиоприемника, последовательно переключают все диапазоны, при этом стрелка контрольного прибора должна отклоняться на 35–65 делений при всех положениях переключателя, за исключением положений «выкл» и «1,15».

Затем устанавливают переключатель вида регулировки усиления в положение «тлф – ару», нажимают кнопку «подсвет» – шкала частот должна осветиться.

Нажимают одну из клавиш переключателя диапазонов верхнего блока радиоприемника; вращая ручку настройки, убеждаются, что вблизи калибровочных точек шкалы (калибровочные точки обозначены на шкале специальными рисками, с точкой под ними) в телефонах слышен звук низкого тона (нулевые биения); если нулевые биения слышны не вблизи калибровочных точек, то необходимо произвести калибровку шкалы в выбранном рабочем диапазоне, для чего ручкой настройки совмещают калибровочную точку в самом начале

шкалы рабочего диапазона с неподвижным индексом шкалы и, вращая ось корректора «корр», добиваются нулевых биений.

Выполняют эту же операцию для калибровочной точки, ближайшей к рабочей частоте выбранного диапазона; ось ручки «корр» необходимо вращать плавно и на небольшой угол во избежание настройки на соседнюю гармонику калибруемой частоты.

Настройка радиоприемника на передающую станцию. Одной из особенностей радиоприемника «Астра» является наличие в нем двух переключателей диапазонов, расположенных в нижнем (галетный переключатель) и верхнем (клавишный переключатель) блоках.

Для приема радиосигналов времени в 1 и 6–11 диапазонах (см. таблицу па приемнике) клавишу «конвертор» верхнего блока приемника утапливают, после чего переключатель нижнего блока устанавливают на один из перечисленных выше диапазонов (например, 5 МГц). Тумблер «полоса» переводят в положение «УП» (узкая полоса). Нажав кнопку «подсвет» и вращая ручку настройки, расположенную под шкалой, совмещают отсчет «О» по шкале с неподвижным индексом. В головных телефонах должны быть слышны сигналы, передаваемые избранной станцией (5 МГц). Регулировку усиления принимаемых сигналов производят раздельно по промежуточной частоте ручкой «усиление ПЧ» и по низкой частоте ручкой «усиление». Уровень выходного сигнала контролируют по индикатору, для чего переключатель «контроль» переводят в положение «настройка».

При приеме радиосигналов на частотах, отличающихся от основной частоты (в нашем случае 5 МГц) диапазона на  $\pm 4$  кГц (5004 и 4996 кГц), ручкой настройки устанавливают отсчеты по шкале соответственно +4 и –4.

Для настройки на радиостанции, работающие во 2–5 диапазонах, переключатель диапазонов нижнего блока переводят в положение «1,15 МГц», после чего нажимают клавишу нужного диапазона в верхнем блоке приемника. При этом отсчет «0» по шкале настройки будет соответствовать частоте 1150 кГц, а отсчет «М» по шкале, соответствующий частоте  $f$  выбранной радиостанции, найдется из соотношения:  $M = f - 1150$ . Например, для настройки приемника на радиостанцию, работающую на

частоте 1500 кГц (5-й диапазон), по шкале настройки следует установить отсчет:  $M=1500-1150=+350$ .

Запись радиосигналов времени на ленту хронографа ХПМ-3. К разъему «Реле» нижнего блока приемника подключают кабель, на вилке которого нанесена надпись: «ХПМ». Переводят переключатель «выходы» в положение «реле». Штепсельную вилку кабеля вставляют в гнездо «микрометр» на задней стенке хронографа ХПМ-3, соблюдая при этом полярность. Настраивают радиоприемник на выбранную радиостанцию. Переключатель вида регулировки усиления переводят в положение «тлф – рру». Поворачивают по часовой стрелке до отказа ручку «усиление». Вращая ручку «усиление ПЧ», добиваются уверенной работы хронографа ХПМ-3. При этом стрелка индикатора радиоприемника должна отклоняться в такт с секундными сигналами от 0 до 50–70 делений.

Выход промежуточной частоты. Выход используют для приема радиосигналов точного времени с помощью осциллографа и для автоматической привязки шкалы кварцевого хронометра «Альтаир» к секундным радиосигналам точного времени. Для использования выхода промежуточной частоты переключатель «выходы» устанавливают в положение «ПЧ». Один конец штатного высокочастотного кабеля подсоединяют к разъему «ПЧ» радиоприемника, а второй конец – к осциллографу или кварцевому хронометру «Альтаир».

Замена лампочки подсветки шкалы. Для замены лампочки подсветки шкалы радиоприемника отвертывают два невыпадающих винта люка и снимают закрывающую его крышку. Вывинчивают винт, крепящий кронштейн с лампочкой и конденсором. Вынимают этот узел из окошка. Ослабив хомуты, крепящие цоколь лампочки, вращают лампочку против хода часовой стрелки и вывинчивают ее. Вворачивают исправную лампочку до упора и фиксируют ее положение винтом хомута, обнимающего цоколь. Ослабляют гайку, крепящую направляющие ламподержателя и, перемещая ламподержатель по направляющим добиваются, чтобы нить накала лампочки расположилась на оси, проходящей через центр конденсора и была перпендикулярна к этой оси. Закрепляют направляющие гайкой. Устанавливают весь узел на штатное место, обеспечив на глаз параллельность установочной плоскости конденсора плоскости шкалы.

## 10.7. Теодолит Вильд Т4

Теодолит Вильд Т4, выпускаемый фирмой «Вильд», Швейцария, является в настоящее время наиболее распространенным прибором, применяемым для выполнения полевых астрономических определений в большинстве стран мира.

Конструктивно теодолит (рис. 24, 25) состоит из двух частей – основания с подъемными винтами и алидадой горизонтального круга; горизонтальной оси с главной зрительной трубой, микрометром и вертикальным кругом.

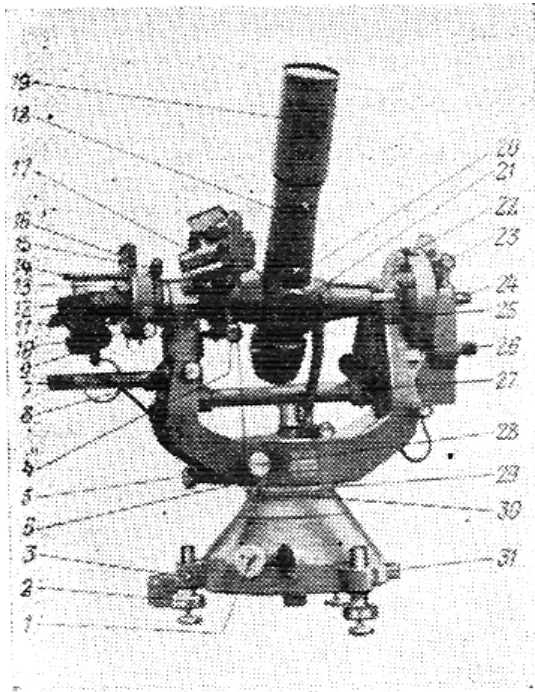


Рис. 24. Теодолит Вильд Т4. Вид со стороны наводящего винта горизонтального круга:

1 – винт для перестановки горизонтального круга; 2 – подъемные винты; 3 – закрепительные винты подъемных винтов; 4 – винт для закрепления кронштейна талькоттовских уровней с горизонтальной осью; 5 – закрепительный винт алидады горизонтального круга;

6 – винт для крепления рамы талькоттовских уровней к кронштейну;  
7 – окулярное колено оптического микрометра горизонтального круга;  
8 – головка винта оптического микрометра горизонтального круга;  
9 – приводная ручка винта контактного микрометра; 10 – установочный винт алидады круга-искателя; 11 – токопередающая шина горизонтальной оси; 12 – контактный микрометр; 13 – коти́ровочный винт сетки нитей контактного микрометра; 14 – микроскоп вертикального круга-искателя; 15 – патрон с лампой для подсветки вертикального круга-искателя; 16 – уровень при алидаде вертикального круга-искателя; 17 – ампулы талькоттовского уровня; 18 – зрительная труба; 19 – бленда; 20 – головка оси зеркала освещения поля зрения трубы; 21 – винты крышки люка коти́ровочных винтов для исправления вертикальной коллимации; 22 – защитная крышка винта перестановки вертикального круга; 23 – контактный уровень при алидаде вертикального круга; 24 – патрон с лампой для подсветки вертикального круга; 25 – разгрузочное устройство горизонтальной оси; 26 – окуляр оптического микрометра вертикального круга; 27 – подвесной уровень; 28 – наводящий винт алидады горизонтального круга; 29 – арретирующее кольцо для разгрузки вертикальной оси во время транспортировки; 30 – токопередающие шины вертикальной оси; 31 – круглый уровень для приближенного горизонтирования теодолита

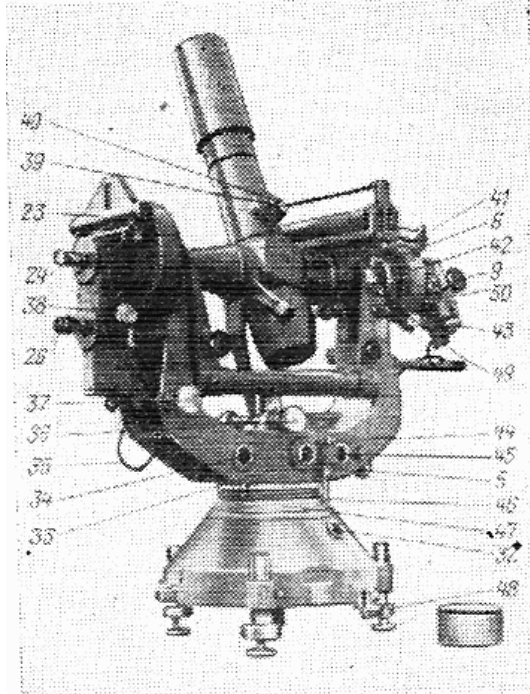


Рис. 25. Теодолит Вильд Т4. Вид со стороны наводящего винта трубы:

- 32 – выключатель подсветки горизонтального круга;
- 33 – выключатель подсветки поля зрения трубы; 34 – выключатель подсветки вертикального круга; 35 – соединительный провод;
- 36 – наводящий винт зрительной трубы; 37 – элевационный винт алидады вертикального круга; 38 – головка винта оптического микрометра вертикального круга; 39 – патрон с лампой для подсветки поля зрения трубы; 40 – головка винта с диафрагмами для изменения освещенности поля зрения трубы; 41 – элевационный винт уровней Талькотта; 42 – закрепительный винт зрительной трубы;
- 43 – головка винта микрометра со шкалой; 44 – сигнальная лампа для установки алидады горизонтального круга на заданный отсчет;
- 45 – выключатель подсветки вертикального круга-искателя;
- 46 – индекс горизонтального круга-искателя; 47 – горизонтальный круг-искатель; 48 – патрон с лампой для подсветки горизонтального круга; 49 – котировочный винт подставки трубы; 50 – крышка люка с котировочными винтами сетки нитей микрометра

Главная труба теодолита – центральная, ломаная. Ее оптическая система включает в себя объектив с просветленной оптикой, поворотное плоское зеркало и окуляр. Изображение предмета в поле зрения окуляра прямое в направлении право - лево и обратное в направлении верх – низ.

Контактный микрометр (рис. 26) вставляется в полость горизонтальной оси, имеющей продольный паз для направляющей планки тубуса. Фокусировка трубы осуществляется продольным перемещением тубуса в оси, а переход от азимутальных к зенитальным способам астрономических определений – разворотом тубуса с микрометром в полости оси. К корпусу микрометра внутри коробки жестко крепится цилиндрическая стойка с неподвижной (рис. 27) сеткой нитей. Стеклопластиковая пластинка с подвижной нитью и окуляром микрометра укреплены на каретке.

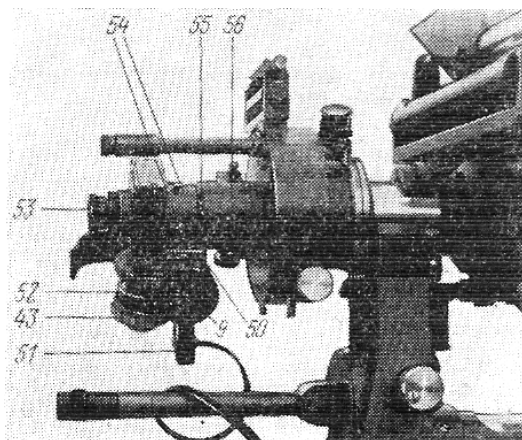


Рис. 26. Окулярный конец горизонтальной оси теодолита Т4:  
41 – вилка с проводом для подключения контактного микрометра;  
42 – контактный цилиндр; 43 – окуляр; 44 – юстировочные винты  
сетки нитей; 45 – юстировочный винт для фокусировки трубы;  
46 – юстировочные винты тубуса

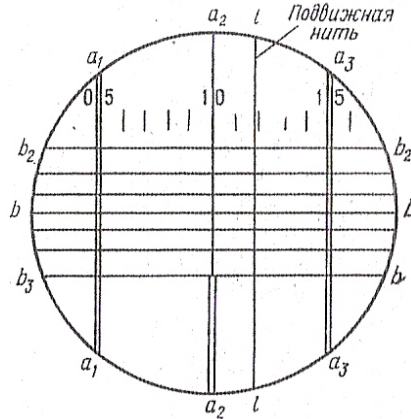


Рис. 27. Сетка нитей контактного микрометра теодолита Т4

Благодаря совместному движению подвижной нити и окуляра наблюдатель всегда видит объект визирования в центре поля зрения. Контактный цилиндр микрометра содержит 10 основных и один опознавательный контакты. Шкала головки винта разделена на 100 делений, с оцифровкой через каждые 10 делений. Цена оборота винта микрометра около  $150''$ . Измерительный расход каретки составляет  $\pm 15'$  от нуль-пункта. Перемещение каретки по направляющим осуществляется ручками привода, вращение оси которого через систему конических и цилиндрических шестерен передается на микрометрический винт.

Стеклянные горизонтальный и вертикальный круги теодолита имеют автономные оптические системы отсчета. Откидной окулярный конец тубуса оптического микрометра горизонтального круга расположен под коробкой контактного микрометра, на подставке горизонтальной оси. Основание вертикального круга теодолита скреплено с горизонтальной осью, а алидада с оптическим микрометром и уровнем свободно вращается вокруг нее. Вертикальный круг, так же как и горизонтальный, снабжен устройством для перестановки. Вид поля зрения оптических микрометров, а также вертикального круга-искателя показан на рисунке 28.

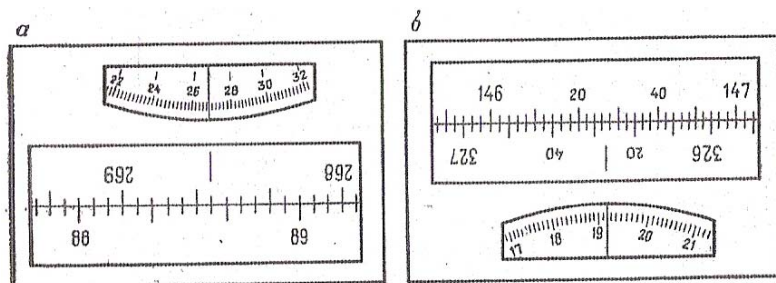


Рис. 28. Поле зрения оптических микрометров:  
*а – горизонтального круга; б – вертикального круга*

Вертикальная ось теодолита цилиндрическая, с трением качения в верхней ее части. На время транспортировки разгрузка оси производится арретирующим устройством. Горизонтальная ось теодолита имеет симметричную форму. Расстояние между рабочими сечениями цапф 330 мм. Неправильности фигур цапф и внешней поверхности вращающихся лагер, как правило, не превышают  $\pm 0,8$  мкм. Для обеспечения легкости вращения в теодолите применена разгрузка горизонтальной оси. Наводящие винты алидады горизонтального круга по азимуту и трубы по высоте расположены на подставках горизонтальной оси и отделены от закрепительных винтов.

## 10. 8. Фотоэлектрическая регистрация прохождения звезд

Прием сигналов точного времени может производиться в принципе любым радиоприемником в диапазоне от 12 кГц до 15–25 мГц. Основные условия: возможность работы в телеграфном режиме и наличие дополнительного усилителя выходного сигнала с фильтрами, такого, чтобы ток в импульсе был не менее 3 мА, необходимых для срабатывания реле хронографа. При использовании приемников, не имеющих такого устройства, между выходом приемника и входом хронографа включается так называемая импульсная приставка, играющая роль упомянутого усилителя. В настоящее время применяется: специализированный приемник «Астра», приемник

P-311 с импульсной приставкой, приемник *Brawn Station T-1000-CD* (в комплекте с «Вильд Т4»); в стационарных условиях применяется радиоприемник Волна-К с импульсной приставкой. Функциональная схема астрономической аппаратуры дана на рис. 29.

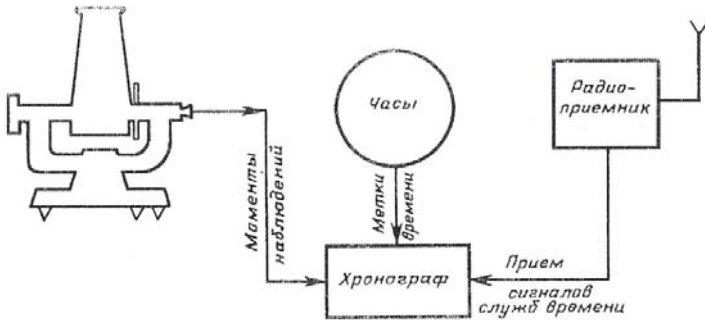


Рис. 29. Схема фотоэлектрического комплекса

Система фотоэлектрической (ФЭ) регистрации звездных прохождений после ее значительного усовершенствования В.Э. Брандтом (ЦНИИГАиК) в 50-х годах систематически применяется на службах времени для определения поправок часов пассажными инструментами. В последние годы такая система постепенно внедряется применительно к переносным инструментам для полевых астроопределений. Преимущественно ФЭ-регистрации – полное исключение личных ошибок; это позволяет увеличить точность наблюдений по сравнению с контактным микрометром примерно на порядок, в худшем случае – не менее чем в 2 раза. В качестве приемников излучения применяются многокаскадные фотоумножители (ФЭУ). Функциональная схема ФЭ-системы указана на рис. 30.

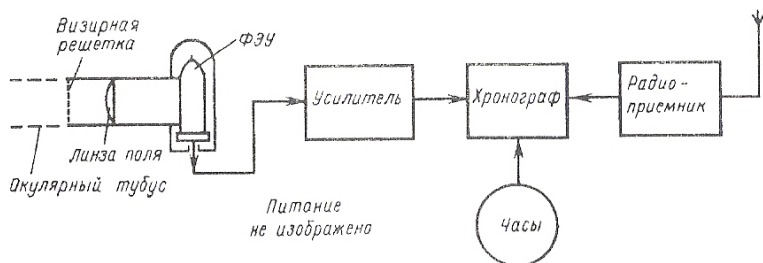


Рис. 30. Схема фотоэлектрической регистрации прохождения звезд

Визирная решетка представляет собой систему щелей толщиной около 0,1 мм (конструкция может быть различной); обычно – две системы щелей, симметричных относительно бесколлимационной плоскости, в центре и по краям решетки – прямоугольные окна для удобства отыскания звезд при юстировках инструмента.

Линза поля проектирует отверстие объектива на катод ФЭУ.

Чувствительность ФЭ-системы зависит от величины светового потока  $\Phi$  звезды заданной яркости, проходящего через данный объектив (см. табл. 10.5) и от параметров ФЭУ, определяющих величину возникающего фототока. Поток  $\Phi$  в люменах рассчитывается по формуле

$$\lg \Phi = -9,8 + \lg k + 2 \lg D - 0,4m,$$

где  $k$  – коэффициент прозрачности оптической системы трубы,

$D$  – диаметр объектива в сантиметрах;  $m$  – яркость звезды в звездных величинах.

Величина вторичного фототока, возникающего в анодной цепи ФЭУ:

$$i_{\Phi} = k\sigma^n \Phi,$$

где  $k$  – чувствительность катода в амперах на люмен, обычно в среднем около  $5 \cdot 10^{-5} \text{ А/лм}$ ;  $\sigma$  – коэффициент вторичной эмиссии, меняющийся в зависимости от напряжения, подаваемого на ФЭУ, от 2 до 4,5;  $n$  – число эмиттеров (у ФЭУ-17,  $n = 13$ ).

Если  $I$  – ток, необходимый для срабатывания регистрирующих устройств хронографа, то при  $i$  2–3  $mA$  для регистрации потока от звезды 6-ой величины общий коэффициент усиления  $I/i_{\Phi}$   $10^7$ – $10^8$ .

Для этих целей В.Э. Брандтом с сотрудниками был разработан усилитель постоянного тока с несущей частотой, основанный на принципе усиления несущей частоты, модулированной постоянным током с подавлением шумов, в основном, теплового происхождения. С тех пор эти усилители непрерывно совершенствуются. Наибольшие трудности возникают при разработке переносных ФЭ систем. В итоге внедряемая ФЭ-установка для полевых наблюдений уверенно регистрирует прохождения звезд до 3–4 величины [4].

Основная систематическая погрешность ФЭ-установки – запаздывание сигнала в цепях системы от момента возбуждения фототока в катод ФЭУ до момента его регистрации хронографом. Для определения величины запаздывания используются специальные приборы, основанные на регистрации ФЭ-установкой модулированного светового потока от искусственного точечного источника света.

Необходимо также иметь в виду, что при наблюдениях звезд разных спектральных классов отношение сигнал/шум, а отсюда – точность регистрации в небольших пределах меняется, поскольку спектральные характеристики разных звезд обычно не совпадают со спектральной характеристикой конкретного ФЭУ.

Обычно худшие результаты получаются при наблюдениях звезд поздних спектральных классов, лучшие – для ранних спектральных классов. Кроме того, следует учитывать, что до сих пор применяются визуальные объективы, специально не рассчитанные для ФЭ-регистрации под конкретный ФЭУ.

ФЭ-регистрация, видимо, представляет собой предел точности для инструментов классической схемы О. Рёмера; дальнейшее повышение точности регистрации любым способом может быть подавлено ошибками самого инструмента.

В настоящее время наиболее распространена регистрация звездных прохождений, особенно в полевых условиях, все же с помощью контактного микрометра. Причины: недостаточное распространение ФЭ-установок; возможность ФЭ-регистрации только в темное время суток, что исключает их применение, в частности, в высоких широтах.

## ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

*Аберрация* – кажущееся смещение светила, вызываемое годичным движением наблюдателя.

*Астрономическая широта* – угол между отвесной линией в данной точке и плоскостью экватора Земли.

*Астрономическая долгота* – двухгранный угол между плоскостью начального меридиана и плоскостью астрономического меридиана данной точки.

*Астрономическим азимутом* направления называется угол между плоскостью астрономического меридиана в данной точке и вертикальной плоскостью, проходящей через точку.

*Астрономический горизонт* – большой круг, плоскость которого перпендикулярна отвесной линии.

*Атомное время* – время, в основу измерения которого положены электромагнитные колебания, излучаемые или поглощаемые атомами или молекулами некоторых веществ при переходе из одного определенного энергетического состояния в другое.

*Атомная секунда* – продолжительность 9 192 631 770 периодов, соответствующих резонансной частоте квантового перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия Cs – 133.

*Восходящий угол лунной орбиты* – точка  $\Omega$ , в которой Луна пересекает эклиптику при переходе из южного полушария в северное.

*Звездные сутки* – это промежуток времени между двумя последовательными верхними кульминациями точки весеннего равноденствия на меридиане данного пункта.

*Средние солнечные сутки* – это промежуток времени между двумя последовательными верхними кульминациями среднего экваториального Солнца на меридиане данного пункта.

*Небесный меридиан* – вертикал, проходящий через полюсы мира и точки зенита и надира.

*Нутация* – периодические колебательные движения полюса мира, вызванные возмущающими действиями Луны.

*Круг склонения* – большой круг, проведенный через полюсы мира, перпендикулярно экватору.

*Линия узлов* – линия пересечения плоскости эклиптики и плоскости лунной орбиты.

*Первый вертикал* – вертикал, плоскость которого перпендикулярна плоскости небесного меридиана.

*Полуденная линия* – прямая NS, по которой плоскость горизонта пересекается с плоскостью меридиана.

*Прецессия* – вековые движения полюса мира.

*Прямое восхождение* – двугранный угол между плоскостью колюра равноденствий и плоскостью круга склонений.

*Тропический год* – промежуток времени между последовательными прохождениями центра Солнца через точку весеннего равноденствия, равен 365,2422 ср. солнечных суток.

*Сидерический* (звездный) год – промежуток времени, в течении которого центр Солнца делает полный оборот вокруг Земли и возвращается в прежнее положение среди звезд, равен 365,2564 ср. солнечных суток.

*Секунда* – секунда есть  $\frac{1}{31556925,9747}$  доля тропического года для 1900 г. январь 0, в 12 часов эфемеридного времени.

*Световой год* – расстояние, проходимое светом за один год и равное  $9,46 \cdot 10^{12}$  км.

*Склонение* – дуга круга склонения от экватора до светила.

*Часовой угол светила* – угол, отсчитываемый по дуге небесного экватора в направлении суточного вращения небесной сферы от верхней точки экватора к западу.

*Эфемеридный меридиан* – вспомогательный меридиан, вращающийся равномерно с угловой скоростью, равной одному обороту за эфемеридные звездные сутки и в начальный момент, совпадающий с меридианом Гринвича.

*Юлианский период* – начался по юлианскому календарю в средний гринический полдень 1 января 4713 г., по астрономическому счислению (4712 г. январь 1,5)

*Юлианские дни* – при точном определении численного значения промежутка времени между многими годами, столетиями, тысячелетиями пользуются юлианскими днями.

Время, прошедшее от начала средних солнечных суток до любого момента называется *средним солнечным временем* и обозначается буквой *t*.

Момент верхней кульминации среднего экваториального Солнца на меридиане данного пункта называется *средними полднем*, момент нижней – *средней полночью*.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белова Н.А. Курс сферической астрономии. – М.: Недра, 1971.
2. Уралов С.С. Курс геодезической астрономии. – М.: Недра, 1980.
3. Руководство по астрономическим определениям ГУГиК. – М.: Недра, 1984.
4. Абалакин В.К., Краснорылов И.И., Плахов Ю.В. Геодезическая астрономия и астрометрия. – М.: Геодезиздат, 1996.
5. Воронцов-Вельяминов. Сборник задач и практических упражнений по астрономии. – М.: Недра, 1977.
6. Дорожкин Н.Я. Космос. – М.: Астрель, 2004.
7. Подобед В.В., Нестеров В.В. Общая астрономия. – М.: Наука, 1975.
8. Григорьянц В.В., Жаботинский М.Е., Золин В.Ф. Квантовые стандарты частоты. – М.: 1968.
9. Басов Н.Г., Беленов Э.М. Сверхузкие спектральные линии и квантовые стандарты частоты «Природа». 1972. № 12.
10. Глушков В.В. О новом методе создания космической геодезической сети. Геодезия и картография. 1996. –7.
11. Нефедьева А.И., Нефедьев Ю.А. Служба вращения Земли «Природа». 1972, № 10.
13. Астрономические ежегодники.
14. Пандул И.С. Астрономические определения по Солнцу для географов, геологов и топографов. – М.: Недра, 1983.
15. Пандул И.С. Астрономические определения по Солнцу. –С-П-б.: 2007.
16. Кузнецов А.Н. Геодезическая астрономия. – М.: Недра, 1966.
17. Дополнения и изменения по астрономическим определениям к «Инструкции о построении государственной геодезической сети СССР». – М.: Недра, 1970.
18. Исследования по геодезической астрономии и астрономо-геодезическим приборам. – Тр. ЦНИИГАиК, 1980. Вып. 223.
19. Эталонные сигналы частоты и времени. – Бюллетень В. Характеристики и программы передач через радиостанции. ГК ВЭЧ СССР. Ежегодный выпуск.
20. Технические указания по переводу астрономических определений к ОСУ. – М.: ОНТИ ЦНИИГАиК, 1974.

## СОДЕРЖАНИЕ

|       |                                                                                 |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------|----|
|       | Введение.....                                                                   | 3  |
| 1.    | СИСТЕМА НЕБЕСНЫХ КООРДИНАТ.....                                                 | 5  |
|       | Основные точки и линии небесной сферы.....                                      | 5  |
| 1.1.  | Горизонтные координаты ( $h$ и $A$ ).....                                       | 6  |
| 1.2.  | Первая экваториальная система координаты ( $\delta$ и $t$ ).....                | 7  |
| 1.3.  | Вторая экваториальная система координаты ( $\delta$ и $\alpha$ ).....           | 8  |
| 1.4.  | Эклиптические координаты ( $\beta$ и $\lambda$ ).....                           | 9  |
| 1.5.  | Переход от экваториальной системы координат<br>к горизонтной.....               | 11 |
| 2.    | ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ.....                                                          | 14 |
| 2.1.  | Звездное время.....                                                             | 14 |
| 2.2.  | Истинное солнечное время.....                                                   | 15 |
| 2.3.  | Среднее солнечное время .....                                                   | 16 |
| 2.4.  | Измерение времени на разных меридианах.....                                     | 19 |
| 2.5.  | Переход от звездного времени к среднему<br>и обратно.....                       | 21 |
| 2.6.  | Поясное и декретное время.....                                                  | 26 |
| 2.7.  | Неравномерность вращения Земли.....                                             | 27 |
| 2.8.  | Эфемеридное время.....                                                          | 29 |
| 2.9.  | Связь истинного солнечного времени со средним....                               | 32 |
| 2.10. | Скоординированное время .....                                                   | 34 |
| 3.    | Астрономическая рефракция и ее влияние на<br>горизонтные координаты светил..... | 36 |
| 3.1.  | Приближенная формула рефракции.....                                             | 38 |
| 4.    | Кульминация светил.....                                                         | 42 |
| 5.    | Вычисление восхода и захода .....                                               | 45 |
| 6.    | Астрономический ежегодник.....                                                  | 47 |
| 6.1.  | Эфемерида Солнца: видимые экваториальные<br>координаты .....                    | 48 |
| 7.    | ПРИБЛИЖЕННЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ<br>ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТА ШИРОТЫ И<br>ДОЛГОТЫ.....    | 50 |
| 7.1.  | Теоретические основы способа.....                                               | 50 |
| 7.2.  | Теодолиты средней точности.....                                                 | 52 |

|       |                                                                                                                                               |     |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.3.  | Определение широты по зенитному<br>расстоянию Солнца.....                                                                                     | 55  |
| 7.4.  | Определение долготы по наблюдением<br>зенитного расстояния Солнца .....                                                                       | 60  |
| 7.5.  | Определение азимута по наблюдением<br>зенитного расстояния Солнца.....                                                                        | 61  |
| 8.    | ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ПО<br>НАБЛЮДЕНИЕМ ПОЛЯРНОЙ.....                                                                                         | 66  |
| 8.1.  | Определение широты по измеренным зенитным<br>расстояниям Полярной звезды.....                                                                 | 66  |
| 8.2.  | Определение азимута по наблюдениям зенитного<br>расстояния Полярной звезды .....                                                              | 69  |
| 9.    | ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДИМЫХ КООРДИНАТ<br>ЗВЕЗД.....                                                                                                   | 72  |
| 10.   | ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРОТЫ, ДОЛГОТЫ И<br>АЗИМУТА С ПРИМЕНЕНИЕМ<br>ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ<br>МОМЕНТОВ.....                                      | 75  |
| 10.1. | Общие положения.....                                                                                                                          | 75  |
| 10.2. | Подготовка теодолита к определениям<br>широты с применением фотоэлектрической<br>регистрации моментов.....                                    | 76  |
| 10.3. | Определение широты из наблюдений пар звезд на<br>равных высотах (способ Певцова) с применением<br>фотоэлектрической регистрации моментов..... | 79  |
| 10.4. | Малогабаритное печатающее устройство МПУ8-3...                                                                                                | 86  |
| 10.5. | Приборы для расшифровки хронограмм.....                                                                                                       | 90  |
| 10.6. | Радиоприемник «Астра».....                                                                                                                    | 92  |
| 10.7. | Теодолит Вильд Т4.....                                                                                                                        | 97  |
| 10.8. | Фотоэлектрическая регистрация прохождения<br>звезд .....                                                                                      | 102 |
|       | ТЕРМИЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ.....                                                                                                                  | 107 |
|       | БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....                                                                                                                 | 110 |
|       | Приложение А.....                                                                                                                             | 113 |
|       | Приложение Б .....                                                                                                                            | 115 |
|       | Приложение В.....                                                                                                                             | 116 |
|       | Приложение Г.....                                                                                                                             | 117 |

## Приложение А

**Задание 1:** Промежуток времени  $m$ , заданный в единицах среднего солнечного времени, выразить в единицах звездного времени

$$s = m + \mu t$$

$$m = 6^{\text{h}} 12^{\text{m}} 43^{\text{s}},21$$

$$m = 8^{\text{h}} 51^{\text{m}} 18^{\text{s}},03$$

$$m = 9^{\text{h}} 25^{\text{m}} 37^{\text{s}},12$$

$$m = 21^{\text{h}} 47^{\text{m}} 02^{\text{s}},24$$

$$m = 12^{\text{h}} 36^{\text{m}} 27^{\text{s}},01$$

$$m = 4^{\text{h}} 32^{\text{m}} 52^{\text{s}},13$$

$$m = 15^{\text{h}} 49^{\text{m}} 11^{\text{s}},47$$

$$m = 8^{\text{h}} 21^{\text{m}} 48^{\text{s}},09$$

**Задание 2:** Промежуток времени  $s$ , заданный в единицах звездного времени, выразить в единицах среднего солнечного времени

$$m = s - \nu s$$

$$s = 21^{\text{h}} 22^{\text{m}} 27^{\text{s}},15$$

$$s = 3^{\text{h}} 27^{\text{m}} 48^{\text{s}},28$$

$$s = 19^{\text{h}} 23^{\text{m}} 57^{\text{s}},72$$

$$s = 5^{\text{h}} 17^{\text{m}} 34^{\text{s}},44$$

$$s = 17^{\text{h}} 45^{\text{m}} 31^{\text{s}},47$$

$$s = 7^{\text{h}} 09^{\text{m}} 26^{\text{s}},81$$

$$s = 21^{\text{h}} 14^{\text{m}} 25^{\text{s}},19$$

$$s = 9^{\text{h}} 51^{\text{m}} 43^{\text{s}},09$$

**Задание 3:** Определить момент местного звездного времени  $s$ , соответствующий моменту местного среднего солнечного времени

$$s = S_0 + m + \mu t + \mu \lambda$$

$$m = 14^{\text{h}} 12^{\text{m}} 24^{\text{s}},19$$

$$14 \text{ августа } 1970 \text{ г. } \lambda_E = 2^{\text{h}} 57^{\text{m}} 14^{\text{s}},20$$

$$m = 18^{\text{h}} 41^{\text{m}} 02^{\text{s}},16$$

$$2 \text{ января } 1983 \text{ г. } \lambda_E = 3^{\text{h}} 12^{\text{m}} 42^{\text{s}},14$$

$$m = 19^{\text{h}} 24^{\text{m}} 07^{\text{s}},41$$

$$18 \text{ апреля } 1983 \text{ г. } \lambda_E = 5^{\text{h}} 27^{\text{m}} 56^{\text{s}},01$$

$$m = 15^{\text{h}} 31^{\text{m}} 28^{\text{s}},24$$

$$22 \text{ марта } 1970 \text{ г. } \lambda_E = 8^{\text{h}} 49^{\text{m}} 14^{\text{s}},72$$

**Задание 4:** Определить звездное время  $s_o$  в местную полночь

$$s_o = S_o - \lambda_E \mu$$

$$11 \text{ июня } 1983 \text{ г.} \quad \lambda_E = 3^{\text{h}} 21^{\text{m}}$$

$$11 \text{ июля } 1983 \text{ г.} \quad \lambda_E = 3^{\text{h}} 48^{\text{m}}$$

$$11 \text{ августа } 1983 \text{ г.} \quad \lambda_E = 4^{\text{h}} 41^{\text{m}}$$

$$11 \text{ сентября } 1983 \text{ г.} \quad \lambda_E = 5^{\text{h}} 31^{\text{m}}$$

# Приложение Б

21. 07. 2003г.

Вычисление долготы по наблюдению зенитного расстояния Солнца

| Порядок<br>действ. | Схема                                     | Вычисление             |                 | Порядок<br>действ. | Схема                                            | Вычисление            |                       |
|--------------------|-------------------------------------------|------------------------|-----------------|--------------------|--------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                    |                                           | КЛ                     | КП              |                    |                                                  | КЛ                    | КП                    |
| 1                  | $T_{л, np}$                               | $4^h 05^m 48s$         | $4^h 12^m 18^s$ | 2                  | $Z'_{л, np}$                                     | $77^{\circ} 02' 50''$ | $76^{\circ} 17' 50''$ |
| 6                  | $u$                                       | $+35^s$                | $+35^s$         | 19                 | $tg Z'$                                          |                       |                       |
| 7                  | $UT_{л, np}$                              | $4^h 06^m 28^s$        | $4^h 12^m 53^s$ | 20                 | $\rho_{л, np}$                                   | $04' 02''$            | $03' 49''$            |
| 8                  | UTI                                       | $4^h 10^m 06^s$        |                 | 21                 | $\sin Z'$                                        |                       |                       |
| 9                  | (ET)                                      | $+50^s$                |                 | 22                 | $\Delta Z' = 9'' \sin Z'$                        | $09''$                | $09''$                |
| 10                 | (ET) <sup>h</sup>                         | 4.18                   |                 | 23                 | $Z$                                              | $77^{\circ} 07' 01''$ | $76^{\circ} 21' 48''$ |
| 3                  | $\alpha_o$                                | $8^h 01^m 58^s$        |                 | 24                 | $\cos Z'_{л, np}$                                |                       |                       |
| 11                 | пост.                                     | $9,856^s$              |                 | 25                 | $\sin \varphi$                                   | $0,827620$            |                       |
| 12                 | $\nu_E$                                   | $-0,12$                |                 | 26                 | $\sin \delta_{\odot}$                            | $0,349558$            |                       |
| 13                 | $\nu_{\alpha} = \text{пост.} \cdot \nu_E$ | $9,976$                |                 | 27                 | $\cos \varphi$                                   | $0,561289$            |                       |
| 14                 | $\nu_{\alpha} (ET)^h$                     | 41,69                  |                 | 28                 | $\cos \alpha_{\odot}$                            | $0,936915$            |                       |
| 15                 | $\alpha_{\odot}$                          | $8^h 02^m 39,69^s$     |                 | 29                 | $\cos t_{\odot, л, np}$                          | $-0,125987$           | $-0,101643$           |
| 4                  | $\delta_o$                                | $+20^{\circ} 29' 09''$ |                 | 30                 | $t_{\odot, л, np}$                               | $17^h 31^m 03s$       | $17^h 36^m 40s$       |
| 16                 | $\nu_{\delta}$                            | $-28,9$                |                 | 31                 | $\alpha_{\odot}$                                 | $8^h 02^m 30^s$       | $8^h 02^m 30^s$       |
| 17                 | $\nu_{\delta} (ET)^h$                     | $-01,32$               |                 | 32                 | $UT_{л, np}$                                     | $4^h 07^m 18^s$       | $4^h 12^m 53^s$       |
| 18                 | $\delta_{\odot}$                          | $+20^{\circ} 27' 37''$ |                 | 33                 | $\mu UT_{л, np}$                                 | 31                    | 32                    |
|                    |                                           |                        |                 | 5                  | $S_o$                                            | $19^h 55' 39''$       | $19^h 55' 39''$       |
|                    |                                           |                        |                 | 34                 | $\lambda_{л, np}$                                | $2^h 30^m 05^s$       | $2^h 30^m 06^s$       |
|                    |                                           |                        |                 | 35                 | $\lambda_{л} + \lambda_{np}$                     | $2^h 30^m 05,5$       |                       |
|                    |                                           |                        |                 |                    | $\lambda = \frac{\lambda_{л} + \lambda_{np}}{2}$ |                       |                       |

## Приложение В

Вычисление широты по наблюдению зенитного расстояния Солнца 21. 04. 2003г.

| Порядок<br>дейст. | Схема                                  | Вычисления              |                   | Порядок<br>дейст. | Схема                    | Вычисления               |                          |
|-------------------|----------------------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                   |                                        | КП                      | КП                |                   |                          | КП                       | КП                       |
| 1                 | $T_{л. np}$                            | $11^h 16^m 12,5^s$      | $11^h 20^m 45^s$  | 2                 | $Z'_{л. np}$             | $44^{\circ} 09' 42,0''$  | $314^{\circ} 52' 03,9''$ |
| 7                 | $u$                                    | + 10                    | +10               | 20                | $\rho_{л. np}$           | $49,0''$                 | - 49,3''                 |
| 8                 | $UT_{л. np}$                           | $11 16 22,5$            | $11^h 20^m 55^s$  | 21                | $\Delta Z = 9'' \sin Z'$ | 6,3''                    | -6,3''                   |
| 9                 | $UT_{л. np} - 2^h$                     | 9 08 39,5               | 9 13 12           | 22                | $Z_{л. np}$              | $44^{\circ} 10' 23,5''$  | $314^{\circ} 51' 20,9''$ |
| 10                | $\Delta T$                             | 1 14,7                  | 1 14,7            | 23                | $Z = (KП - III)/2$       | $56^{\circ} 32' 22,99''$ |                          |
| 11                | $ET = UT_{л. np} - \lambda + \Delta T$ | $4^h 09^m 54,2^s$       | $4^h 14^m 26,7^s$ | 24                | $UT_{л. np}$             | $9^h 16^m 22,5^s$        | $9^h 20^m 55^s$          |
| 12                | $(ET)^h$                               | 4,167                   |                   | 25                | $UT_{л. np} \mu$         | 1 31,11                  | 1 32,0                   |
| 3                 | $\delta_o$                             | $11^{\circ} 50' 59,3''$ |                   | 6                 | $S_o$                    | $13^h 57^m 56,48^s$      | $13 57 56,48$            |
| 13                | $\nu_{\delta}$                         | 55,8''                  |                   | 26                | $\lambda$                | 5 07 43                  | 5 07 43,0                |
| 14                | $\nu_{\delta} (ET)^h$                  | 3' 42,5''               |                   | 27                | $\alpha_{\Theta}$        | $3^h 06^m 34,78^s$       |                          |
| 15                | $\delta_{\Theta}$                      | $11^{\circ} 54' 41,9''$ |                   | 28                | $t_{\Theta}$             | $36^{\circ} 46' 56,38''$ | $37^{\circ} 42' 48,9''$  |
| 4                 | $\alpha_o$                             | $1^h 55^m 47^s 38$      |                   | 29                | $tg \delta_{\Theta}$     | 0,21094514               |                          |
| 5                 | пост.                                  | 9,856 <sup>s</sup>      |                   | 30                | $\cos t_{\Theta}$        | 0,80091612               | 0,79107859               |
| 16                | $\nu_E$                                | 0,681 <sup>s</sup>      |                   | 31                | $tg m$                   | 0,25007323               | 0,2663958                |
| 17                | $\nu_{\alpha} = \text{пост.} - \nu_E$  | 9,175 <sup>s</sup>      |                   | 32                | $\cos z$                 | 0,71723677               | 0,770532457              |
| 18                | $\nu_{\alpha} (ET)^h$                  | 38,23                   |                   | 33                | $\sin m$                 | 0,25373315               | 0,25765215               |
| 19                | $\alpha_{\Theta}$                      | $1^h 56^m 26,01^s$      |                   | 34                | $\sin \delta_{\Theta}$   | 0,20640289               |                          |
|                   |                                        |                         |                   | 35                | $\cos z \sin m$          |                          |                          |
|                   |                                        |                         |                   | 36                | $\cos n$                 | 0,88170649               | 0,88045495               |
|                   |                                        |                         |                   | 37                | $m$                      | $14^{\circ} 41' 54'',7$  | $14^{\circ} 55' 50,9''$  |
|                   |                                        |                         |                   | 38                | $n$                      | $28^{\circ} 32' 16'',3$  | $28 18 09,7$             |
|                   |                                        |                         |                   | 39                | $\varphi$                | $43^{\circ} 14' 14''$    | $43^{\circ} 14' 00,5''$  |
|                   |                                        |                         |                   | 40                | $\varphi_{cp}$           | $43^{\circ} 14' 07'',25$ |                          |

с. 4

## Приложение Г

Вычисление азимута направления 18.10.2008 г.

| Поря-<br>док<br>действ. | Схема                                                                                                   | Вычисления                                 | Поря-<br>док<br>действ | Схема                                          |                          |                          |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------|------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1                       | $T_{\text{л}}$                                                                                          | $9^{\text{h}} 47^{\text{m}} 33^{\text{s}}$ | 2                      | $Z'_{\text{л, np}}$                            | $65^{\circ} 45' 28''$    | $294^{\circ} 27' 28''$   |
| 1                       | $T_{\text{np}}$                                                                                         | $9^{\text{h}} 52^{\text{m}} 29^{\text{s}}$ | 20                     | $\text{tg} Z'$                                 | 2,2207226                | -2,1985918               |
| 3                       | $u$                                                                                                     | $02^{\text{s}}$                            | 21                     | $\rho_{\text{л, np}}$                          | $1' 48,0''$              | $-1' 46,9''$             |
| 10                      | $T = \frac{T'_{\text{л}} + T'_{\text{np}}}{2}$                                                          | $9^{\text{h}} 50^{\text{m}} 01^{\text{s}}$ | 22                     | $\sin Z'$                                      | 0,9118178                | -0,9102666               |
| 11                      | $UT_{\text{л, np}} = T - (n+d) + u$                                                                     | $3^{\text{h}} 50^{\text{m}} 03^{\text{s}}$ | 23                     | $\Delta Z' = 9'' \sin Z'$                      | $+8,2''$                 | $-8,2''$                 |
| 12                      | $\Delta T$                                                                                              | $1^{\text{m}} 10^{\text{s}}$               | 24                     | $Z'$                                           | $65^{\circ} 47' 07,8''$  | $294^{\circ} 25' 49,3''$ |
| 13                      | $(ET) = UT_{\text{л, np}} + \Delta T$                                                                   | $3^{\text{h}} 51^{\text{m}} 13^{\text{s}}$ | 25                     | $Z = \frac{Z'_{\text{л}} - Z'_{\text{np}}}{2}$ | $65^{\circ} 40' 39,3''$  |                          |
| 4                       | $(ET)^{\text{h}}$                                                                                       | 3,8536                                     | 26                     | $\sin \varphi$                                 | 0,6849711                |                          |
| 14                      | $\delta_o$                                                                                              | $-9^{\circ} 12' 50''$                      | 27                     | $\cos Z$                                       | 0,41187108               |                          |
| 15                      | $\nu_{\delta}$                                                                                          | $-54,72''$                                 | 28                     | $\sin \delta_{\odot}$                          | -0,1609298               |                          |
| 16                      | $\nu_{\delta}(ET)^{\text{h}}$                                                                           | $-3' 30,87''$                              | 29                     | $\cos \varphi$                                 | 0,4285703                |                          |
| 5                       | $\delta_{\odot} = \delta_o + \nu_{\delta}(ET)^{\text{h}}$                                               | $-9^{\circ} 16' 20,87''$                   | 30                     | $\sin Z$                                       | 0,9112421                |                          |
| 6                       | $K_{\text{лМ}}$                                                                                         | $91^{\circ} 06' 27,16''$                   | 31                     | $\cos A'$                                      | 0,6673391                |                          |
| 7                       | $K_{\text{ПМ}} - 180$                                                                                   | $91^{\circ} 27' 02''$                      | 32                     | $A'$                                           | $48^{\circ} 08' 16,5''$  |                          |
| 8                       | $K_{\text{л}\odot}$                                                                                     | $186^{\circ} 34' 29''$                     | 33                     | $A_{\odot} = 360^{\circ} - A'$                 | $321^{\circ} 51' 43,5''$ |                          |
| 9                       | $K_{\text{П}\odot} + 180$                                                                               | $186^{\circ} 23' 19''$                     |                        | $Q$                                            | $264^{\circ} 57' 14,5''$ |                          |
| 17                      | $\frac{1}{2} (K_{\text{лМ}} + K_{\text{ПМ}})$                                                           | $91^{\circ} 27' 09''$                      | 34                     | $\alpha = A_{\odot} + Q$                       | $226^{\circ} 48' 58,0''$ |                          |
| 18                      | $\frac{1}{2} (K_{\text{л}\odot} + K_{\text{П}\odot})$                                                   | $186^{\circ} 29' 54,5''$                   |                        |                                                |                          |                          |
| 19                      | $Q = \frac{1}{2} (K_{\text{лМ}} + K_{\text{ПМ}}) - \frac{1}{2} (K_{\text{л}\odot} + K_{\text{П}\odot})$ | $264^{\circ} 57' 14,5''$                   |                        |                                                |                          |                          |

Учебное издание

Плотникова Ева Васильевна

ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ  
(Определение азимута направления, широты и долготы  
по наблюдению светил)

Учебное пособие для выполнения лабораторных работ  
для студентов специальности 050711 – Геодезия и картография

Нач. РО ИИЦ

*З.А. Губайдулина*

Редактор

*Г.М. Дюсенбаева*

Компьютерная верстка

*Л.П. Умирбекова*

Подписано в печать 16.05.2013 г.

Тираж 300 экз. Формат 60х84 1/16. Бумага типогр. №1.  
Уч. изд. л. 7,4. Усл. п. л. 6,9. Заказ № 92. Цена договорная

Издание Казахского национального технического  
университета им. К.И. Сатпаева  
Информационно-издательский центр КазНТУ  
г. Алматы, Сатпаева, 22.

ISBN 978-601-228-513-0



9