



Уральский  
федеральный  
университет

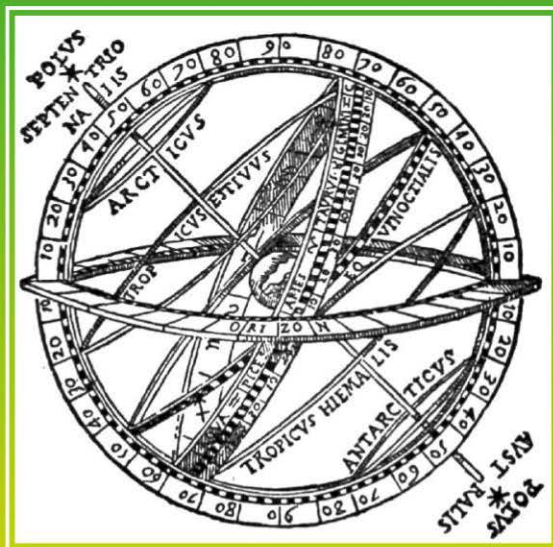
имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

Институт  
естественных наук

**А. Б. ОСТРОВСКИЙ**

# АСТРОМЕТРИЯ: УЧЕБНАЯ ПРАКТИКА

Учебно-методическое пособие



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б. Н. ЕЛЬЦИНА

А. Б. Островский

## **АСТРОМЕТРИЯ: УЧЕБНАЯ ПРАКТИКА**

Рекомендовано методическим советом УрФУ в качестве  
учебно-методического пособия для студентов, обучающихся  
по программе бакалавриата по направлению подготовки  
21.03.03 «Геодезия и дистанционное зондирование»,  
по программе специалитета по направлению подготовки  
03.05.01 «Астрономия»

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2016

УДК 521(07)  
О-777

Рецензенты:

кафедра астрономии и космической геодезии Национально-исследовательского Томского государственного университета (заведующий кафедрой доктор физико-математических наук В. А. Авдюшев);

Е. А. Акулова, кандидат технических наук, доцент кафедры геодезии и кадастров Уральского государственного горного университета

Научный редактор

Э. Д. Кузнецов, доктор физико-математических наук, доцент

**Островский, А. Б.**

О-777 Астрометрия: учебная практика : [учеб.-метод. пособие] / А. Б. Островский ; [науч. ред. Э. Д. Кузнецов] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 151 с.

ISBN 978-5-7996-1690-8

В учебно-методическом пособии рассмотрены способы и методы проведения астрономо-геодезических наблюдений, которые используются при решении задач определения астрономических координат пункта наблюдения. Даны подробные пошаговые инструкции по проведению наблюдений и их камеральной обработке.

Для студентов, обучающихся на астрономических и геодезических специальностях высших учебных заведений.

УДК 521(07)

*На обложке:*

*рисунок армиллярной сферы  
немецкого математика и астронома Христофора Клавиуса  
из его сочинения  
«In Sphaeram Ioannis de Sacro Bosco commentarius» (1585)*

ISBN 978-5-7996-1690-8

©Уральский федеральный университет, 2016

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов, проходящих учебную практику по астрометрии и геодезической астрономии.

Задачей учебной практики по астрометрии и геодезической астрономии является закрепление знаний и наработка навыков и умений по курсам общей и сферической астрономии и астрометрии. На практике студенты должны освоить классические методы определения астрономических координат пункта наблюдения и астрономического азимута направления. Важную часть практики составляет ознакомление с применением различных шкал времени и получение начальных навыков работы с системами глобального позиционирования на примере ГЛОНАСС (Россия) и NavStar (США).

Важнейшей задачей астрономо-геодезических определений является достижение максимально возможной в конкретных условиях точности определения искомых параметров и обеспечение стабильности получаемых результатов. Методики проведения астрономо-геодезических определений и их обработки нарабатывались и формировались на протяжении двухсот лет. Методы геодезической астрономии являются строго стандартизованными, способы проведения наблюдений и обработки их

данных жестко формализованы в официальных инструкциях и положениях [1–5], что позволяет обеспечить требуемую точность и надежность получаемых результатов. Одной из лучших монографий по теме считается книга А. Н. Кузнецова «Геодезическая астрономия» [6], однако в настоящее время она является библиографической редкостью. Пособия [7–9], изданные в свое время в Уральском государственном университете им. А. М. Горького, сейчас также практически недоступны студентам, несмотря на то, что некоторые из них (см., например, пособие З. Н. Шукстовой [7]) до сих пор сохранили свою актуальность и полезность.

С другой стороны, указанные выше инструкции, монографии и пособия ориентированы на использование при наблюдениях классических высокоточных астрометрических инструментов, которые в настоящее время почти полностью выведены из эксплуатации и недоступны для обучения студентов. Применение современных геодезических инструментов с электронными системами фиксации измерений и использование возможностей систем глобального спутникового позиционирования при реализации службы времени требуют адаптации классических алгоритмов наблюдения и обработки результатов. В данном учебно-методическом пособии сделана попытка максимально сохранить стандартные рекомендуемые методы проведения наблюдений и обработки их данных. При этом методики приведены в соответствие с доступной инструментальной базой и представлены предельно подробно для того, чтобы их было возможно использовать в целях обучения студентов младших курсов.

Автор благодарит сотрудников кафедры астрономии и геодезии Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина — Е. А. Аввакумову, Э. Д. Кузнецова, Т. И. Левитскую, П. В. Скрипниченко, Н. Б. Фролову, З. Н. Шукстову за плодотворные обсуждения и рекомендации.

# 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРОТЫ, ПОПРАВКИ ХРОНОМЕТРА, АСТРОНОМИЧЕСКОГО АЗИМУТА НАПРАВЛЕНИЯ

## 1.1. Зенитальные методы определения астрономической широты места. Выгоднейшие условия наблюдений

В зенитальных способах широта и время (долгота) определяются по измеренным зенитным расстояниям светил, или по разностям зенитных расстояний светил, или из наблюдений групп звезд на одинаковом зенитном расстоянии.

В геодезической астрономии горизонтальные координаты светил ( $A_\sigma$ ,  $z_\sigma$ ) считаются *измеряемыми*, экваториальные координаты светил ( $\alpha$ ,  $\delta$ ) — *известными*, а географические координаты пункта наблюдения и азимут направления ( $\varphi$ ,  $A$ ) — *определяемыми*. Связь между определяемыми, известными и измеряемыми величинами осуществляется через ре-

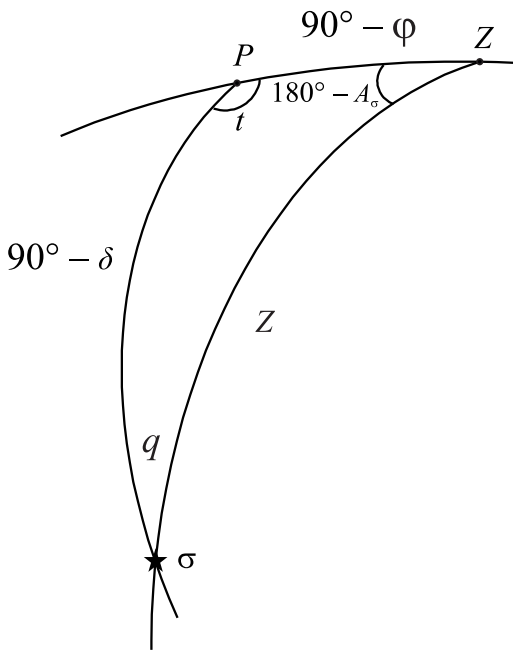


Рис. 1.1. Параллактический треугольник и его элементы для задач геодезической астрономии

шение параллактического треугольника (рис. 1.1). Выражение

$$\cos z_{\sigma} = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t \quad (1.1)$$

суть формула связи зенитальных способов астрономических определений. В формуле (1.1) часовой угол есть  $t = T + u - \alpha$ , где  $T$  — момент наблюдения,  $u$  — поправка часов.

Соотношение (1.1) используем для оценки ошибки измерения зенитного расстояния в различных условиях наблюдения. Пусть для величин  $T$ ,  $u$ ,  $\varphi$ ,  $\alpha$ ,  $\delta$  известны их погрешности  $\Delta T$ ,



$\Delta u, \Delta \varphi, \Delta \alpha, \Delta \delta$ . В силу этого зенитное расстояние  $z_\sigma$ , которое является функцией вышеперечисленных величин, будет содержать соответствующую ошибку  $\Delta z$ . Тогда

$$\begin{aligned} \cos(z_\sigma + \Delta z) = & \sin(\varphi + \Delta \varphi) \sin(\delta + \Delta \delta) + \\ & + \cos(\varphi + \Delta \varphi) \cos(\delta + \Delta \delta) \cos(t + \Delta t). \end{aligned} \quad (1.2)$$

Левую и правую части выражения (1.2) разложим в ряд Тейлора по малым параметрам  $\Delta \varphi, \Delta \delta, \Delta t = \Delta T + \Delta u - \Delta \alpha$  (разложение ведется до членов первого порядка малости). В результате получим

$$\begin{aligned} (-\sin z) \Delta z = & (-\cos \varphi \cos \delta \sin t) (\Delta T + \Delta u - \Delta \alpha) + \\ & + (\cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos t) \Delta \varphi + \\ & + (\sin \varphi \cos \delta - \cos \varphi \sin \delta \cos t) \Delta \delta. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Применяя к параллактическому треугольнику формулы синусов и пяти элементов, получим

$$\sin z_\sigma \sin A_\sigma = \cos \delta \sin t, \quad (1.4)$$

$$-\sin z_\sigma \cos A_\sigma = \cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos t, \quad (1.5)$$

$$\sin z_\sigma \cos q = \sin \varphi \cos \delta - \cos \varphi \sin \delta \cos t. \quad (1.6)$$

Подставляя полученные выражения в уравнение (1.3) и разделив обе его части на ненулевое значение  $\sin z_\sigma$  (наблюдения вблизи зенита в данных программах не предполагаются и не проводятся), получим выражение для определения ошиб-

ки измеренного зенитного расстояния светила  $\Delta z$ :

$$\begin{aligned}\Delta z = & \cos \varphi \sin A_{\sigma} (\Delta T + \Delta u - \Delta \alpha) + \\ & + \cos A_{\sigma} \Delta \varphi - \cos q \Delta \delta.\end{aligned}\quad (1.7)$$

Из выражения (1.7) получим формулу для определения ошибки широты места наблюдения:

$$\begin{aligned}\Delta \varphi = & -\cos \varphi \operatorname{tg} A_{\sigma} (\Delta T + \Delta u - \Delta \alpha) + \\ & + \frac{\Delta z}{\cos A_{\sigma}} + \frac{\cos q}{\cos A_{\sigma}} \Delta \delta.\end{aligned}\quad (1.8)$$

Наименьшее влияние погрешностей на определение широты места согласно (1.8) достигается в случае, когда  $A_{\sigma} = 0, 180^{\circ}$ , т. е. *при наблюдениях в меридиане*.

### Приближенное определение широты по Полярной звезде

Приближенное определение широты по зенитным расстояниям Полярной звезды выполняется перед проведением всех других программ наблюдений. Полученное приближенное значение широты далее используется в прочих программах наблюдений как начальное значение.

Для определения широты по наблюдениям Полярной звезды измеряются зенитное расстояние Полярной и соответствующий измерению зенитного расстояния момент времени. Для учета влияния рефракции во время наблюдений фиксируется температура и давление атмосферы.

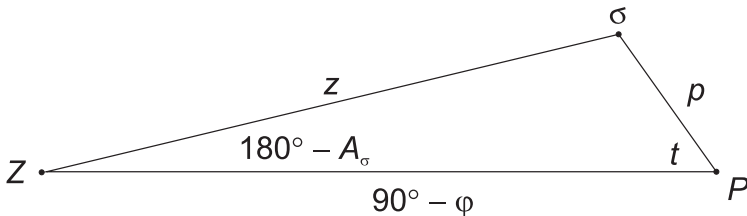


Рис. 1.2. Параллактический треугольник  $PZ\sigma$  для задачи приближенного определения широты по зенитному расстоянию Полярной:  $\varphi$  — искомая широта;  $z$  — измеренное зенитное расстояние светила;  $t$  — измеренный часовой угол светила;  $A_\sigma$  — астрономический азимут светила;  $p = 90^\circ - \delta$  — полярное расстояние светила

Как правило, наблюдения Полярной обрабатываются с помощью специализированных таблиц из «Астрономического ежегодника» («Таблицы для определения широты по наблюдениям Полярной»). Ниже приведено обоснование метода и описан способ формирования упомянутых таблиц [6].

Задача определения широты места решается с использованием параллактического треугольника  $PZ\sigma$  (рис. 1.2). Применяя к параллактическому треугольнику формулу пяти элементов, получим

$$\sin p \cos t = \sin(90^\circ - \varphi) \cos z - \cos(90^\circ - \varphi) \sin z \cdot \cos(180^\circ - A_\sigma), \quad (1.9)$$

$$\sin p \cos t = \sin(90^\circ - \varphi) \cos z - \cos(90^\circ - \varphi) \sin z \cdot \left(1 - 2 \sin^2 \frac{180^\circ - A_\sigma}{2}\right), \quad (1.10)$$

$$\begin{aligned}\sin p \cos t &= (\sin(90^\circ - \varphi) \cos z - \cos(90^\circ - \varphi) \sin z) + \\ &+ 2 \cos(90^\circ - \varphi) \sin z \sin^2 \frac{180^\circ - A_\sigma}{2},\end{aligned}\quad (1.11)$$

$$\begin{aligned}\sin p \cos t &= \sin(90^\circ - \varphi - z) + \\ &+ 2 \sin \varphi \sin z \sin^2 \frac{180^\circ - A_\sigma}{2}.\end{aligned}\quad (1.12)$$

Дуга  $90^\circ - \varphi$  соответствует зенитному расстоянию полюса мира. Если для наблюдений используется Полярная звезда, то угол  $90^\circ - \varphi - z$  является малым углом, поскольку зенитное расстояние Полярной мало отличается от зенитного расстояния Северного полюса мира. При наблюдениях в средних широтах Северного полушария малым углом является угол  $180^\circ - A_\sigma$ . Также малым углом является и полярное расстояние  $p$ .

Таким образом, в соотношении (1.11) можно разложить в степенной ряд с удержанием первых членов разложения следующие функции:  $\sin p$ ,  $\sin(90^\circ - \varphi - z)$ ,  $\sin \frac{180^\circ - A_\sigma}{2}$ . Тогда получим

$$p \cos t = 90^\circ - \varphi - z + \frac{(180^\circ - A_\sigma)^2}{2\varrho''} \sin \varphi \sin z, \quad (1.13)$$

где  $\varrho'' = 206264.8$  — число угловых секунд в радиане.

Применив к треугольнику  $PZ\sigma$  формулу синусов и далее разложив в ряд функции от малых углов, находим соотноше-

ние для азимута Полярной:

$$\begin{aligned}\frac{\sin p}{\sin 180^\circ - A_\sigma} &= \frac{\sin z}{\sin t}, \\ 180^\circ - A_\sigma &= p \frac{\sin t}{\sin z}.\end{aligned}\tag{1.14}$$

Полученное выражение (1.14) подставим в соотношение (1.13). Также при этом учтем, что  $90^\circ - z = h$ , где  $h$  — высота Полярной;  $\sin \varphi \simeq \sin h$ ;  $\sin z = \cos h$ . Тогда получим

$$p \cos t = h - \varphi + \frac{p^2}{2\rho''} \sin h \cos h \frac{\sin^2 t}{\cos^2 h},\tag{1.15}$$

что в итоге дает следующую формулу для определения широты по Полярной:

$$\varphi = h - p \cos t + \frac{p^2}{2\rho''} \sin^2 t \operatorname{tg} h.\tag{1.16}$$

Для работы с таблицами «Астрономического ежегодника», охватывающими период времени, равный году, наиболее удобным оказывается представление изменяющихся от времени величин  $t(\alpha)$ ,  $p(\delta)$  и самих  $\alpha$ ,  $\delta$  в виде некоторого начального постоянного значения, плюс зависящая от времени поправка:  $\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha$ ,  $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$  — и аналогично  $p(\delta)$ ,  $t(\alpha)$ . Тогда, разложив  $p \cos t$  в ряд до первых членов и заменив  $p^2$  на  $p_0^2$ , получим

$$t_0 = s - \alpha_0, \quad p_0 = 90^\circ - \delta_0,\tag{1.17}$$

$$p \cos t = p \cos(s - \alpha) = p_0 \cos(s - \alpha_0) + \frac{15}{\varrho''} p_0 \sin(s - \alpha_0) \Delta \alpha - \cos(s - \alpha_0) \Delta \delta, \quad (1.18)$$

$$\varphi = h - p_0 \cos t_0 + \frac{p_0^2}{2\varrho''} \sin^2 t_0 \operatorname{tg} h - \frac{15}{\varrho''} p_0 \sin t_0 \Delta \alpha + \cos t_0 \Delta \delta, \quad (1.19)$$

или

$$\varphi = h + \Delta \varphi_1 + \Delta \varphi_2 + \Delta \varphi_3, \quad (1.20)$$

где

$$\Delta \varphi_1 = -p_0 \cos t_0, \quad (1.21)$$

$$\Delta \varphi_2 = + \frac{p_0^2}{2\varrho''} \sin^2 t_0 \operatorname{tg} h, \quad (1.22)$$

$$\Delta \varphi_3 = - \frac{15}{\varrho''} p_0 \sin t_0 \Delta \alpha + \cos t_0 \Delta \delta. \quad (1.23)$$

«Таблицы для определения широты по наблюдениям Полярной» из «Астрономического ежегодника» содержат поправки к измеренному значению высоты Полярной в смысле (1.20). Для достижения заявленной точности метода поправка хронометра должна быть известна с точностью не хуже  $1^m$ .

### **Определение широты по зенитным расстояниям южных и северных звезд, измеренным при одном положении круга**

Способ определения широты по зенитным расстояниям южных и северных звезд, измеренным в меридиане при одном положении круга, применяется на астрономических пунктах 1-го класса. Определение широты этим способом может быть

выполнено из наблюдения ярких звезд, поэтому он находит применение в высоких широтах, где наблюдения часто приходится выполнять при светлом фоне неба и даже при незаходящем Солнце.

Для определения широты указанным способом используются астрономические инструменты с вертикальными кругами одно- или двухсекундной точности. Поправка хронометра *должна* быть известна с ошибкой не более  $0.1^s$ .

Если  $z_m^S$  — измеренное **в меридиане** и исправленное поправкой за рефракцию зенитное расстояние южной звезды со склонением  $\delta^S$ , то широта места наблюдения  $\varphi_S$  может быть определена по формуле

$$\varphi_S = \delta^S + z_m^S. \quad (1.24)$$

При наблюдении северной звезды между зенитом и полюсом

$$\varphi_N = \delta^N - z_m^N, \quad (1.25)$$

а при наблюдении ее в нижней кульминации

$$\varphi_N = 180^\circ - (\delta^N + z_m^N). \quad (1.26)$$

Для повышения точности результатов каждую звезду наблюдают многократно и измеряют ее зенитное расстояние как в самом меридиане, так и вблизи него. Измерения зенитного расстояния звезды ведутся *только вблизи центральной (средней) вертикальной нити* сетки нитей трубы инструмента. Наблюдения на боковых нитях *не производятся*.

Чтобы ослабить и даже полностью исключить влияние на широту ошибки поправки хронометра, нужно зенитные расстояния каждой звезды измерять до и после прохождения ее через меридиан при симметричном положении ее относительно меридиана.

Ошибка широты  $\Delta\varphi_z$ , вызванная ошибкой зенитного расстояния звезды  $\Delta z$ , выражается формулой

$$\Delta\varphi_z = \frac{\Delta z}{\cos A} \quad (1.27)$$

и минимальна при наблюдениях вблизи меридиана.

Наблюдая в меридиане пару звезд (южную и северную), можно ослабить влияние на результат определения широты одних и тех же систематических ошибок измеренных зенитных расстояний этих звезд. В этом случае

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_z^S &= \frac{\Delta z}{\cos A_S}, & \Delta\varphi_z^N &= \frac{\Delta z}{\cos A_N}, \\ \Delta\varphi_z &= \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta z}{\cos A_S} + \frac{\Delta z}{\cos A_N} \right) = 0, \end{aligned} \quad (1.28)$$

так как  $\cos A_S$  и  $\cos A_N$  имеют разные знаки.

Влияние на широту, определенную описываемым способом, некоторых систематических ошибок (вызванных, например, гнутием трубы) зависит от разности зенитных расстояний звезд. Поэтому, чтобы в наибольшей мере исключить влияние этих ошибок, разность зенитных расстояний звезд, входящих в каждую пару, не допускают больше  $6^\circ$ .

Рассматриваемый способ определения широты основан на измерении в меридиане зенитных расстояний подобранных



в пары южных и северных звезд при одном положении вертикального круга инструмента.

На основании выражений (1.24)—(1.26) широта по результатам наблюдения пары звезд (южной и северной) определяется по следующим формулам:

$$\begin{aligned}\varphi &= \frac{1}{2} (\varphi_N + \varphi_S) = \\ &= 90^\circ - \frac{1}{2} (\delta^N - \delta^S) + \\ &+ \frac{1}{2} (z_m^S - z_m^N), \quad \text{на севере — нижняя кульминация;} \quad (1.29)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varphi &= \frac{1}{2} (\varphi_N + \varphi_S) = \\ &= \frac{1}{2} (\delta^N + \delta^S) + \\ &+ \frac{1}{2} (z_m^S - z_m^N), \quad \text{на севере — верхняя кульминация.} \quad (1.30)\end{aligned}$$

## 1.2. Основы определения астрономического азимута направления

Астрономический азимут направления определяется как двугранный угол между плоскостью астрономического меридиана и плоскостью вертикала избранного направления. Астрономический азимут отсчитывается в плоскости истинного горизонта от точки юга S к западу в диапазоне от 0 до 360°.

Визуальные определения азимута выполняют по многократным наблюдениям ярких звезд вблизи меридиана; по наблюдению звезд в меридиане или по часовому углу Полярной. Пер-

вые два способа, которые применимы практически в любой точке земного шара, позволяют определять как геодезический, так и астрономический азимут направления. Кроме полевых азимутальных измерений, они включают в себя определение азимутальной лично-инструментальной разности на основных долготных пунктах.

Способ определения азимута по часовому углу Полярной пригоден к применению лишь в Северном полушарии, в интервале широт от  $+10$  до  $+60^\circ$ . Его использование в районах севернее  $60$ -й параллели приводит, как показала практика, к значительным искажениям азимутов систематическими инструментальными погрешностями, достигающими для высокоточных теодолитов и астрономических универсалов величин  $1''$  и более. Следует отметить, что этим способом можно определить лишь астрономический азимут направления, а для перехода к геодезическому азимуту необходимо выполнить еще долготные астрономические наблюдения на пункте.

Определение астрономического азимута в пункте с известной широтой  $\varphi$  основано на измерении в некоторый известный момент времени горизонтального угла между светилом с координатами  $\alpha$  и  $\delta$  и земным предметом.

При наблюдениях *измеряемыми величинами* являются отсчеты по горизонтальному кругу на светило  $M_\sigma$  и на земной предмет  $M$ , а также момент времени прохождения светила через вертикал с отсчетом  $M_\sigma$ . Астрономический азимут  $A_\sigma$  светила с известными экваториальными координатами может быть вычислен по результатам наблюдений. Тогда астрономический азимут направления на земной предмет определяется

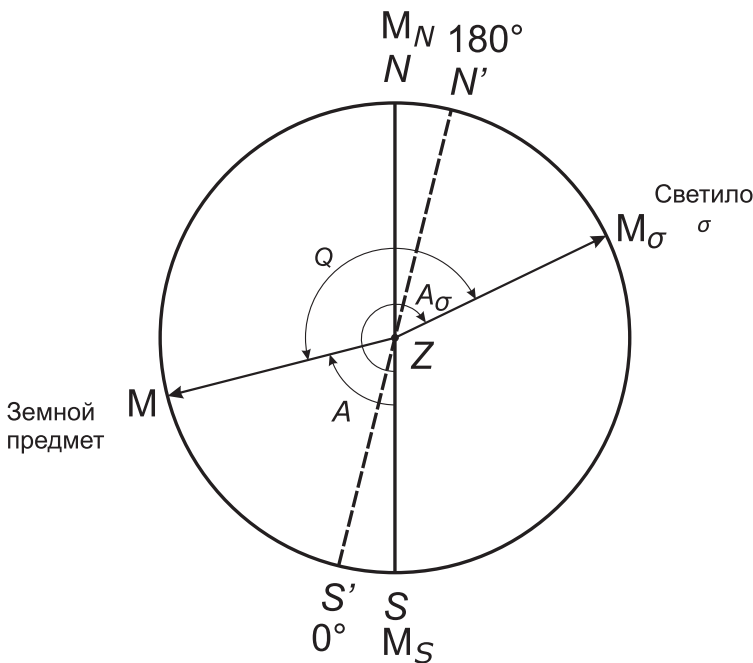


Рис. 1.3. Определение азимута земного предмета:  $N'S'$  — инструментальный меридиан, для которого отсчет по горизонтальному кругу на точку  $S'$  равен  $0^\circ$  (инструментальный юг);  $NS$  — истинный меридиан;  $M_S$  — отсчет по горизонтальному кругу на точку юга  $S$ ;  $M_N$  — отсчет по горизонтальному кругу на точку севера  $N$ ;  $M$  — отсчет по горизонтальному кругу на земной предмет;  $M_\sigma$  — отсчет по горизонтальному кругу на светило  $\sigma$ ;  $A$  — астрономический азимут земного предмета;  $A_\sigma$  — астрономический азимут светила;  $Q$  — проекция на горизонт угла между вертикалами светила и земного предмета

следующими формулами (рис. 1.3):

$$Q = M_\sigma - M,$$

$$A = A_\sigma - Q = A_\sigma - (M_\sigma - M) = M - (M_\sigma - A_\sigma), \quad (1.31)$$

в которых  $A$  — астрономический азимут направления на земной предмет;  $Q$  — горизонтальный угол между светилом и земным предметом.

Введем обозначение

$$M_S \equiv M_\sigma - A_\sigma, \quad (1.32)$$

тогда

$$A = M - M_S. \quad (1.33)$$

$M_S$  называется *местом юга* и является отсчетом по горизонтальному кругу, когда труба инструмента направлена в точку юга  $S$ . Величины  $M_\sigma$  и  $Q$  изменяются при наблюдении различных звезд и в разные моменты времени. В то же время место юга не изменяется при наблюдении различных звезд в разные моменты времени при заданной и неизменной установке инструмента.  $M_S$  отягощено лишь случайными и систематическими (например, неравенство цапф, на которые опирается горизонтальная ось инструмента) погрешностями наблюдений. Это делает определение азимута с использованием выражения (1.33) предпочтительным, поскольку позволяет контролировать точность наблюдений по значениям  $M_S$ , полученным в различных приемах наблюдений при одной установке инструмента.

Чтобы вычислить место юга  $M_S$ , нужно определить азимут светила  $A_\sigma$ . Применяя к параллактическому треугольнику  $PZ\sigma$  (рис. 1.1) теорему синусов и формулу пяти элементов,

получим

$$\begin{aligned}\sin z \sin A_\sigma &= \sin t \cos \delta, \\ -\sin z \cos A_\sigma &= \cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos t.\end{aligned}\quad (1.34)$$

Разделив первое равенство почленно на второе (полагая, что  $z \neq 0$ ), получим формулу для вычисления азимута светила (использовано обозначение  $A'_\sigma$ , поскольку вычисленное таким образом значение азимута не является окончательным):

$$\operatorname{tg} A'_\sigma = -\frac{\cos \delta \sin t}{\cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos t}, \quad (1.35)$$

где  $t = T + u - \alpha$ ;  $T$  — звездное время прохождения светилом вертикала с отсчетом ГК  $M_\sigma$  на момент наблюдения по часам;  $u$  — поправка часов (при использовании времени спутниковых навигационных систем принимается равной нулю). При непосредственном вычислении  $A'_\sigma$  по (1.35) необходимо контролировать квадрант, которому принадлежит азимут по известному значению часового угла и знакам  $\sin A_\sigma$  и  $\cos A_\sigma$ , полученным по формулам (1.34) (при наблюдениях знак  $\sin z$  заведомо положительный, а при наблюдении Полярной  $\sin z \simeq 1$ ).

Окончательное значение астрономического азимута светила  $A_\sigma$  вычисляется с учетом поправок за суточную аберрацию, за ускорение звезды по азимуту и за коллимационную ошибку (азимут  $A'_\sigma$ , полученный по формуле (1.35), не содержит упомянутых поправок и является, таким образом, промежуточным значением азимута звезды). Поправка за ускорение звезды по азимуту учитывается, если при вычислениях используется не наблюденный момент прохождения звездой заданного верти-

кала, а усредненный, например по наблюдениям звезды при «круге право» (КП) и «круге лево» (КЛ).

Зная  $T$ ,  $u$ ,  $\varphi$ ,  $\alpha$  и  $\delta$ , по формуле (1.35), с учетом указанных выше поправок, можно вычислить азимут светила  $A_\sigma$ . Найдя азимут светила  $A_\sigma$ , можно по формуле (1.32) вычислить место юга  $M_S$ , а затем по (1.33) — азимут направления на земной предмет  $a$ .

Точный пошаговый алгоритм вычисления астрономического азимута направления рассмотрен в разделе 5.2.

### Выгоднейшие условия определения азимута светила

Применяя к параллактическому треугольнику  $PZ\sigma$  (рис. 1.1) формулу котангенсов (см. прил. 3, формула (4)), получим

$$\operatorname{ctg} A_\sigma \sin t - \sin \varphi \cos t + \operatorname{tg} \delta \cos \varphi = 0. \quad (1.36)$$

Это выражение используем для рассмотрения выгоднейших условий определения азимута светила из азимутальных наблюдений. Азимут светила  $A_\sigma$  является функцией измеренных и данных величин:  $t = T + u - \alpha$ ,  $\varphi$  и  $\delta$ . Положим, что  $t$ ,  $\varphi$  и  $\delta$  содержат малые погрешности  $\Delta t = \Delta T + \Delta u - \Delta \alpha$ ,  $\Delta \varphi$  и  $\Delta \delta$ , вызывающие в азимуте светила  $A_\sigma$  некоторую малую погрешность  $\Delta A$ . Уравнение (1.36) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg}(A_\sigma + \Delta A) \sin(t + \Delta t) - \sin(\varphi + \Delta \varphi) \cos(t + \Delta t) + \\ + \operatorname{tg}(\delta + \Delta \delta) \cos(\varphi + \Delta \varphi) = 0. \end{aligned} \quad (1.37)$$

Разложим функции в ряд Тейлора. Ограничившись членами первого порядка малости, получим

$$\begin{aligned}
& \operatorname{ctg} A_{\sigma} \sin t - \sin \varphi \cos t + \operatorname{tg} \delta \cos \varphi - \\
& - \frac{\sin t}{\sin^2 A_{\sigma}} \Delta A_{\sigma} + (\operatorname{ctg} A_{\sigma} \cos t + \sin \varphi \sin t) \Delta t - \\
& - (\operatorname{tg} \delta \sin \varphi + \cos \varphi \cos t) \Delta \varphi + \\
& + \frac{\cos \varphi}{\cos^2 \delta} \Delta \delta = 0.
\end{aligned} \tag{1.38}$$

Вычитая из (1.38) выражение (1.36), найдем

$$\begin{aligned}
\Delta A_{\sigma} = & \frac{(\cot A_{\sigma} \cos t + \sin \varphi \sin t) \sin^2 A_{\sigma}}{\sin t} \Delta t - \\
& - \frac{(\tan \delta \sin \varphi + \cos \varphi \cos t) \sin^2 A_{\sigma}}{\sin t} \Delta \varphi + \\
& + \frac{\cos \varphi \sin^2 A_{\sigma}}{\cos^2 \delta \sin t} \Delta \delta.
\end{aligned} \tag{1.39}$$

Поскольку

$$\begin{aligned}
\frac{(\cot A_{\sigma} \cos t + \sin \varphi \sin t) \sin^2 A_{\sigma}}{\sin t} &= \frac{\cos \delta \cos q}{\sin z} = \frac{dA}{dt}, \\
\frac{(\sin \delta \sin \varphi + \cos \varphi \cos \delta \cos t) \sin^2 A_{\sigma}}{\cos \delta \sin t} &= -\frac{\sin A_{\sigma}}{\tan z}, \\
\frac{\cos \varphi \sin^2 A_{\sigma}}{\cos^2 \delta \sin t} &= \frac{\sin q}{\sin z},
\end{aligned} \tag{1.40}$$

где  $q$  — параллактический угол, то получим следующую зависимость ошибки  $\Delta A_{\sigma}$  азимута светила от ошибок измеренных

и данных величин:

$$\begin{aligned} \Delta A_\sigma = & \frac{\cos \delta \cos q}{\sin z} (\Delta T + \Delta u - \Delta \alpha) + \\ & + \frac{\sin A_\sigma}{\tan z} \Delta \varphi + \frac{\sin q}{\sin z} \Delta \delta, \end{aligned} \quad (1.41)$$

где  $\Delta T$  — ошибка момента  $T$  наблюдения светила;  $\Delta u$  — ошибка известной поправки хронометра  $u$  (при использовании времени спутниковых навигационных систем принимается равной нулю);  $\Delta \varphi$  — ошибка известного значения широты  $\varphi$ ;  $\Delta \alpha$  и  $\Delta \delta$  — ошибки прямого восхождения и склонения светила.

Влияние ошибки часового угла  $\Delta t = \Delta T + \Delta u - \Delta \alpha$  на результат определения азимута светила  $A_\sigma$  тем меньше, чем меньше коэффициент

$$\frac{dA_\sigma}{dt} = \frac{\cos \delta \cos q}{\sin z}, \quad (1.42)$$

т. е. чем меньше скорость движения светила по азимуту. Производная  $dA_\sigma/dt$  уменьшается по мере увеличения склонения светила и обращается в нуль, когда  $\delta = 90^\circ$ . Кроме того,  $dA_\sigma/dt$  уменьшается по мере приближения светила к элонгации и обращается в нуль, когда светило находится в элонгации ( $\cos q = 0$ ). Влияние ошибки часового угла  $\Delta t$  уменьшается с увеличением зенитного расстояния светила.

Ошибка  $\Delta \varphi$  широты места наблюдения и ошибка  $\Delta \delta$  склонения звезды будут тем меньше влиять на результат определения азимута светила, чем ближе светило находится к меридиану и чем больше его зенитное расстояние. В меридиане влияние этих ошибок будет равно нулю.



Самым выгодным явилось бы светило, расположенное в полюсе мира, т. е. имеющее склонение, равное  $90^\circ$ . Для определения астрономического азимута направления по результатам наблюдения такого светила не требовалось бы знать поправку хронометра и широту места наблюдения. Достаточно было бы в любой момент измерить горизонтальный угол между таким светилом и земным предметом; измеренный угол по величине представлял бы искомый астрономический азимут. Однако в настоящее время среди ярких звезд нет ни одной, которая бы занимала такое положение на небесной сфере. Из близполюсных звезд наиболее выгодной для определения азимута избранного направления является Полярная звезда, которая благодаря своей яркости удобна для наблюдений ночью и днем.

Для определения азимута светило выгодно также наблюдать в момент его элонгации. Если наблюдать светило в восточной и западной элонгациях, то в среднем из результатов наблюдения будут почти полностью исключены ошибки  $\Delta\varphi$ ,  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\delta$  и  $\Delta u$ .

Как видно из полученного выражения для  $\Delta A_\sigma$ , влияние всех ошибок измеренных и данных величин уменьшается с увеличением зенитного расстояния наблюдаемого светила. Поэтому с увеличением широты и уменьшением зенитных расстояний близполюсных звезд азимут этих светил будет определяться менее точно.

Для решения вопроса о выгоднейших условиях определения астрономического азимута направления на земной предмет необходимо выгоднейшие условия определения азимута светила согласовать с выгоднейшими условиями измерения горизонтального угла между земным предметом и светилом.

При определении астрономического азимута направления на земной предмет по часовому углу Полярной ошибка измерения горизонтального угла между Полярной и земным предметом является наибольшей из всех составляющих ошибок азимута направления вследствие значительного влияния инструментальных ошибок: неправильностей цапф горизонтальной оси, бокового гнуптия трубы, ошибок наклонности горизонтальной оси. Влияние указанных ошибок возрастает с увеличением разности зенитных расстояний Полярной звезды и земного предмета. Поэтому в *высоких широтах* определение астрономического азимута по часовому углу Полярной нельзя признать наиболее выгодным.

Таким образом, наиважнейшим условиям определения азимута в средних широтах Северного полушария соответствуют наблюдения Полярной звезды. С целью достижения максимальной точности измерений желательно наблюдать Полярную вблизи элонгаций.

### 1.3. Метод равных высот для определения поправки хронометра

В 1874 г. адъютант-астроном Пулковской обсерватории Николай Яковлевич Цингер опубликовал свою работу «Об определении времени по соответствующим высотам различных звезд» [10], в которой дал решение следующей задачи: «Зная широту места, *определить звездное время*, когда две звезды  $\sigma_1(\alpha_1, \delta_1)$  и  $\sigma_2(\alpha_2, \delta_2)$  достигают одинаковой высоты; найти также азимуты этих звезд и их высоту в этот момент».

Легко показать, что к решению задачи Н. Я. Цингера сводятся все задачи, связанные с определением времени по соответствующим высотам двух звезд, когда известны широта места  $\varphi$  и интервал времени  $\Delta s$  между моментами, в которые каждая из звезд достигает некоторой общей для них высоты.

В самом деле, пусть  $s_1$  и  $s_2$  — два момента, по звездному времени следующие один за другим через некоторый интервал  $\Delta s$ , в которые соответственно звезды  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  находятся на одной и той же высоте. Если  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — прямые восхождения этих звезд, то их часовые углы в моменты этих неодновременных явлений будут соответственно

$$t_1 = s_1 - \alpha_1, \quad t_2 = s_2 - \alpha_2. \quad (1.43)$$

Выражение для  $t_2$  можно написать так:

$$t_2 = s_1 - \alpha_2 + (s_2 - s_1) = s_1 - (\alpha_2 - \Delta s). \quad (1.44)$$

Последнее равенство показывает, что достаточно уменьшить прямое восхождение второй звезды на разность времен  $\Delta s$ , чтобы можно было говорить об одновременности наблюдений обеих звезд. Этот прием приведения разновременных наблюдений к одному моменту был указан еще Гауссом.

### Определение поправки хронометра способом равных высот

Метод равных высот основан на наблюдениях звезд на одном и том же альмукантарате, т. е. в те моменты, когда звезды программы наблюдений достигают последовательно некоторой

общей высоты над горизонтом. Наиболее целесообразны такие методы равных высот, при которых из наблюдений нужно получать лишь моменты прохождения звезд через этот альмукантарат, а само значение высоты или зенитного расстояния подлежит исключению или уточнению опять-таки по наблюдаемым моментам. Таким образом, отпадает необходимость в измерении вертикальных углов и тем самым наблюдения освобождаются от ошибок, связанных с отсчетами разделенного круга. Однако существенным для всех способов равных высот является контроль за постоянством высоты визирной линии трубы. Метод равных высот предполагает симметричность влияния рефракции относительно зенита. Наименьшей комбинацией наблюдаемых звезд являются две звезды.

Предположим сначала, что при помощи инструмента мы наблюдаем моменты прохождения какой-либо звезды до и после ее кульминации через один и тот же альмукантарат, не заботясь о точном измерении ее высоты. Пусть координаты звезды  $\alpha$  и  $\delta$ , а  $T_e$  и  $T_w$  — моменты по звездному хронометру, когда звезда находится на одинаковом зенитном расстоянии на восток и на запад от меридиана,  $u_e$  и  $u_w$  — поправки хронометра в эти моменты. Допуская, что рефракция при обоих наблюдениях одинакова и что изменениями  $\alpha$  и  $\delta$  за время между  $T_e$  и  $T_w$  можно пренебречь, заключаем, что не только наблюдаемые, но и истинные, т. е. свободные от влияния рефракции, зенитные расстояния в оба момента одинаковы, а следовательно, равны и часовые углы, считаемые от меридиана в обе стороны, т. е.

$$\alpha - (T_e + u_e) = (T_w + u_w) - \alpha, \quad (1.45)$$

откуда получаем

$$\frac{1}{2} (u_e + u_w) = \alpha - \frac{1}{2} (T_e + T_w) . \quad (1.46)$$

Поскольку ход хронометра можно считать равномерным, то полусумма

$$\frac{1}{2} (u_e + u_w) \quad (1.47)$$

равна поправке хронометра в момент

$$\frac{1}{2} (T_e + T_w) \quad (1.48)$$

и, следовательно, ее можно вычислить по полученной формуле.

Это, по идее, очень простой способ определения поправки часов, так как он не требует измерения высоты и, следовательно, отсчета круга, но он очень неэкономичен в смысле затраты времени. Звезду нужно наблюдать дальше от меридиана, когда скорость изменения ее высоты достаточно велика, лучше всего, как и при определении времени по абсолютным высотам, близ первого вертикала. Поэтому между двумя наблюдениями должно протекать несколько часов, и при неустойчивой ясности неба есть риск, что второе наблюдение не состоится.

Можно сделать способ определения поправки часов по наблюдениям равных высот двух звезд более практичным, если найти на небе такую пару звезд, у которой склонения были бы равны, а разность прямых восхождений была бы такова, чтобы эти звезды проходили через одно и то же зенитное расстояние, вблизи первого вертикала, одна на востоке, другая на западе, одна после другой.

Необходимость проводить наблюдения вблизи первого вертикала обосновывается следующим образом. Приравняв косинусы зенитных расстояний, определяемые по формулам косинусов для параллактических треугольников звезд, получим

$$\begin{aligned} \sin \varphi \sin \delta_1 + \cos \varphi \cos \delta_1 \cos(T_1 + u - \alpha_1) = \\ = \sin \varphi \sin \delta_2 + \cos \varphi \cos \delta_2 \cos(T_2 + u - \alpha_2), \end{aligned} \quad (1.49)$$

где  $\alpha_1$  и  $\delta_1$  — координаты первой звезды, а  $\alpha_2$  и  $\delta_2$  — координаты второй звезды;  $T_1$  и  $T_2$  — моменты, когда та и другая звезда достигают некоторой, в точности неизвестной, но одинаковой высоты;  $u$  — поправка хронометра в средний момент. Суточный ход хронометра всегда достаточно хорошо известен или так мал, что можно пренебречь им за несколько минут; за это время изменение рефракции тоже может быть лишь незначительным. Если источником времени служат спутниковые навигационные системы, то ходом таких часов можно пренебречь. Реальным источником систематической ошибки часов (поправки хронометра  $u$ ) в этом случае будет являться неточность знания долготы пункта наблюдения, используемой в вычислении местного времени.

Для определения наивыгоднейших условий наблюдений разложим выражение (1.49) в ряд по малым параметрам  $\Delta T$ ,  $\Delta u$ ,  $\Delta \varphi$ ,  $\Delta \alpha$ ,  $\Delta \delta$ , трактуя их как ошибки измерений либо неопределенности знания соответствующих величин. Испол-

зую выражения (1.3) и (1.4), получим

$$\begin{aligned}
& \cos A_1 \Delta\varphi + \cos \varphi \sin A_1 (\Delta T_1 + \Delta u - \Delta\alpha_1) - \cos q_1 \Delta\delta_1 = \\
& = \cos A_2 \Delta\varphi + \\
& + \cos \varphi \sin A_2 (\Delta T_2 + \Delta u - \Delta\alpha_2) - \cos q_2 \Delta\delta_2 . \quad (1.50)
\end{aligned}$$

После преобразования (1.50) получим выражение для погрешности определения поправки хронометра в зависимости от ошибок прочих измеряемых величин и исходных данных:

$$\begin{aligned}
\Delta u = & \frac{\sin A_2 \Delta T_2 - \sin A_1 \Delta T_1}{\sin A_1 - \sin A_2} + \frac{(\cos A_2 - \cos A_1) \Delta\varphi}{(\sin A_1 - \sin A_2) \cos \varphi} - \\
& - \frac{\sin A_2 \Delta\alpha_2 - \sin A_1 \Delta\alpha_1}{\sin A_1 - \sin A_2} - \\
& - \frac{\cos q_2 \Delta\delta_2 - \cos q_1 \Delta\delta_1}{(\sin A_1 - \sin A_2) \cos \varphi} . \quad (1.51)
\end{aligned}$$

Анализируя выражение (1.51), можно сделать вывод, что наилучшие условия для определения поправки хронометра достигаются при наблюдении в первом вертикале, когда одна из звезд наблюдается на востоке, а другая — на западе. Выражение (1.51) примет вид:

$$\begin{aligned}
\Delta u = & -\frac{1}{2} (\Delta T_w + \Delta T_e) + \frac{1}{2} (\Delta\alpha_w + \Delta\alpha_e) + \\
& + \frac{1}{2} (\cos q_w \Delta\delta_w - \cos q_e \Delta\delta_e) \sec \varphi . \quad (1.52)
\end{aligned}$$

Ошибки измерения моментов времени прохождения звезд через амукантарат в первом вертикале в таком случае минимизируются, а влияние ошибки широты полностью исключается. Ошибка широты также исключается при симметричном отно-

сительно первого вертикала наблюдении прохождения звезд через альмукантарат ( $A_w = 360^\circ - A_e$ ), но полная компенсация ошибки происходит только при равенстве склонений восточной и западной звезд. На практике найти пары звезд с равными склонениями невозможно; используются пары звезд с малой ( $|\delta_w - \delta_e| < 5^\circ$ ) разностью склонений. При этом дополнительная погрешность определения поправки часов не превышает тысячных долей временной секунды [6].

При равенстве склонений звезд их часовые углы, отсчитываемые от меридиана к востоку и к западу, должны быть равны в моменты наблюдений и, следовательно,

$$\alpha_e - (T_e + u) = (T_w + u) - \alpha_w, \quad (1.53)$$

откуда получаем

$$u = \frac{1}{2} (\alpha_w + \alpha_e) - \frac{1}{2} (T_w + T_e). \quad (1.54)$$

Однако пар звезд с совершенно одинаковыми склонениями на небе нет, но зато можно найти достаточно таких пар звезд, у которых разница склонений невелика и которые в то же время по положению на небе вполне удобны для наблюдения на востоке и западе, не очень далеко от первого вертикала при заданной широте места наблюдения. Ясно, что при малой разности склонений звезд в такой паре выражение поправки часов будет отличаться от последнего выражения лишь на небольшую величину  $r$ :

$$u = \frac{1}{2} (\alpha_w + \alpha_e) - \frac{1}{2} (T_w + T_e) + r, \quad (1.55)$$



причем  $r$  тем ближе к нулю, чем меньше разность склонений (1.52), потому что при  $\delta_e = \delta_w$  имеем  $r = 0$ .

Выражение (1.55) показывает, что вычисление поправки хронометра сводится к нахождению величины  $r$ , называемой *приведением*, или *редукцией*, как функции координат звезд и моментов прохождений звезд через некоторый альмукантарат. Практический способ определения редукции приведен в разделе 5.3.

## 2. ЭФЕМЕРИДНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Эфемериды — таблицы, содержащие сведения о положении небесных светил на небесной сфере как функцию момента наблюдения, скоростях их движения, звездных величинах и другие данные, необходимые для проведения астрономических наблюдений. Эфемериды составляются для будущих моментов времени по результатам выполненных ранее наблюдений и их теоретического анализа. При вычислении эфемерид используются теории движения небесных светил, законы изменения их блеска (например, у переменных звезд) и т. п.

Для эфемеридных вычислений используются приближенные значения координат объектов и приближенные значения географических координат пункта наблюдения. Необходимая точность вычисления эфемерид определяется, как правило, полем зрения инструмента и погрешностью его ориентирования. Инструменты, применяемые на учебной практике, имеют поле зрения порядка  $1^\circ$ ; точность ориентирования инструмента по Полярной звезде — несколько угловых минут. Исходными данными при вычислении эфемерид являются экваториальные координаты объектов и момент звездного времени. Учитывая ограничения, при вычислении эфемерид исходные данные берутся из «Астрономического ежегодника» со следующей точ-

ностью по прямому восхождению и склонению:

$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= \pm 0.1^m, \\ \Delta\delta &= \pm 1'.\end{aligned}\tag{2.1}$$

В частном случае наблюдений в учебной обсерватории кафедры астрономии и геодезии используются следующие приближенные географические координаты места наблюдения:

$$\begin{aligned}\varphi &\simeq +56^\circ 50', \\ \lambda &\simeq 04^h 02^m \text{ в. д.}\end{aligned}\tag{2.2}$$

Конечными результатами при эфемеридных вычислениях являются зенитное расстояние (высота) и азимут объекта на некоторый момент времени. Точность вычислений  $z$  и  $A$  должна составлять  $\pm 1'$ . Момент времени в эфемеридах указывается с точностью  $\pm 1^m$ .

Превышать указанную точность не нужно, поскольку это приведет к усложнению процедуры наблюдений, но не повысит их точность. Также очевидно, что промежуточные операции при вычислении эфемерид следует производить с точностью на порядок более высокой.

## 2.1. Расчет продолжительности времени наблюдений

### Специфика астрометрических наблюдений.

#### Сумерки

*Сумерки — это переход от дневного к ночному (или наоборот) периоду освещенности неба.* Сумеречное освещение объясняется рассеянием света Солнца компонентами атмосферы — газами, парами, и аэрозолями различного происхождения — земного и космического. Сильнее всего рассеивают свет наиболее плотные приземные слои. Из наблюдений следует, что при погружении Солнца под горизонт на  $5\text{--}6^\circ$  граница земной тени над пунктом проходит на высоте  $30\text{--}35$  км.

По степени яркости неба после захода (перед восходом) Солнца различают три типа сумерек: гражданские, навигационные и астрономические.

*Гражданские сумерки* длятся с момента захода Солнца до его погружения под горизонт на  $6\text{--}7^\circ$ . При ясном безоблачном небе во время таких сумерек не требуется уличное освещение.

*Навигационные сумерки* длятся при изменении угла погружения от  $7$  до  $12^\circ$ . В это время в портах включают маяки.

*Астрономические сумерки* являются продолжением навигационных сумерек и длятся до погружения Солнца на угол  $18^\circ$ . Только тогда наступает максимальная темнота, и в обсерваториях с помощью мощных телескопов проводятся наиболее точные астрофизические наблюдения слабых космических объектов. При дальнейшем увеличении зенитного расстояния Солнца освещенность ночного неба практически не изменяется.

Вычислим приближенную высоту Солнца на широте г. Екатеринбурга ( $\varphi \simeq 56^\circ 50'$ ) в момент нижней кульминации на одну из дат для летнего периода, например 1 июля. В это время склонение Солнца  $\delta_\odot \approx +23^\circ$ . Тогда получаем

$$h_\odot = \varphi + \delta_\odot - 90^\circ = -10^\circ. \quad (2.3)$$

Это значит, что даже в полночь на нашей широте не завершаются навигационные сумерки.

Важно учитывать и добавочное освещение земной атмосферы Луной. Правда, в летнее время помехи со стороны Луны, в особенности для высоких широт, невелики, поскольку ее суточный путь проходит низко над горизонтом. И все же перед началом астрометрических наблюдений полезно в «Астрономическом ежегоднике» (далее — АЕ) либо в «Астрономическом календаре» найти информацию о фазах Луны.

## Методика расчета времени наблюдений

Астрономические наблюдения ярких звезд даже с помощью небольших инструментов можно проводить и в сумеречный период времени. При расчете сумерек (их начала и конца) на данной широте необходимо вычислить часовые углы Солнца, используя формулу косинусов для параллактического треугольника:

$$\begin{aligned} \cos z_\odot &= \sin \varphi \sin \delta_\odot + \cos \varphi \cos \delta_\odot \cos t_\odot, \\ \cos t_\odot &= \frac{\cos z_\odot - \sin \varphi \sin \delta_\odot}{\cos \varphi \cos \delta_\odot}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Для Екатеринбурга широту места наблюдения  $\varphi$  при эфемеридных вычислениях следует принять равной  $56^{\circ}50'$ . Минимальную глубину погружения Солнца под горизонт, при которой возможно наблюдение звезд в трубу инструмента с умеренным увеличением и светосилой (звезды могут быть не видны невооруженным глазом), взять равной  $6^{\circ}$  ( $z_{\odot} \cong 96^{\circ}$ ).

Экваториальные координаты  $\alpha_{\odot}$ ,  $\delta_{\odot}$  приводятся в таблицах АЕ «Солнце». Непосредственно необходимо вычислить часовой угол только для захода Солнца ( $0 < t_{\odot} < 180^{\circ}$ ). При вычисленном часовом угле Солнца местное звездное время для начала (конца) наблюдений в заданную дату равно:

$$\begin{aligned} s_{\text{H}} &= \alpha_{\odot} + t_{\odot}, \\ s_{\text{K}} &= \alpha_{\odot} - t_{\odot}. \end{aligned} \tag{2.5}$$

Здесь  $s_{\text{H}}$  — вечернее время начала наблюдений,  $s_{\text{K}}$  — утреннее время их окончания по звездному времени. Этим и будут определены прямые восхождения звезд, которые в течение «ночного» времени будут кульминировать в южной (верхняя кульминация) либо в северной (нижняя кульминация) части неба.

## Задание

Используя рассмотренную методику, вычислите моменты начала и конца времени наблюдений по звездному времени и времени четвертой часовой зоны (согласно федеральным законам № 107-ФЗ «Об исчислении времени» [2] и № 248-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон “Об исчислении времени”» [3]) для Свердловской области ( $UTC + 5^h$ ) для всех дат наблюдений в течение практики. Процедура пересчета

звездного момента времени в средний момент описана в последующих разделах. Для расчетов используйте экваториальные координаты Солнца из таблицы АЕ «Эфемериды Солнца». Результаты расчетов поместите в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Моменты начала и конца наблюдений

Дата	$s_H$ , чч мм	$T_H$ , чч мм	$s_K$ , чч мм	$T_K$ , чч мм
28.06	16 26	00 02	20 25	04 00
...	...	...	...	...
07.07	16 54	23 54	21 12	04 11

## 2.2. Эфемериды для наблюдения Полярной звезды

Полярная звезда является удобным объектом для ориентации инструмента в меридиане и определения широты места наблюдения. Ориентация инструмента проводится минимум один раз при каждой установке инструмента на место наблюдения. Ее необходимо делать заново, если во время наблюдений происходит механическое смещение инструмента либо если вследствие неправильных действий с теодолитом сбивается выставленное значение азимута точки юга. Эфемериды Полярной звезды составляются с выбранным шагом по времени на весь диапазон звездного времени наблюдений и используются для ориентации инструмента и для проведения наблюдений по программе определения широты места по Полярной звезде.

## Методика расчета эфемерид наблюдений

Для составления эфемерид Полярной звезды необходимо взять максимальный промежуток звездного времени наблюдений из табл. 2.1 для всего периода учебной практики:

$$s_H^{\min} \leq s \leq s_K^{\max}. \quad (2.6)$$

Звездное время начала наблюдений округлить до ближайшего меньшего значения, кратного  $10^m$ . Начиная с этого момента времени с шагом в  $10^m$  определить зенитное расстояние и астрономический азимут Полярной звезды с точностью до одной угловой минуты и поместить результаты в табл. 2.2. Высоты и азимуты Полярной на выбранные моменты времени берутся из «Астрономического ежегодника» — «Таблица высот и азимутов Полярной». Краткое описание правил пользования таблицей приводится в ней самой. Обратите внимание, что табличные значения широты места и моментов времени не совпадают с требуемыми значениями, что делает необходимым интерполяцию табличных значений. Применяйте простую линейную интерполяцию. В таблицу эфемерид Полярной должны быть записаны азимуты и высоты Полярной как для положения инструмента «круг лево» (КЛ), так и «круг право» (КП). При этом используются обычные соотношения, связывающие отсчеты по вертикальному кругу (ВК) и горизонтальному кругу (ГК) при положениях КП и КЛ:

$$\text{ВК: КЛ} + \text{КП} = 360^\circ, \quad (2.7)$$

$$\text{ГК: КЛ} - \text{КП} \pm 180^\circ = 0^\circ. \quad (2.8)$$



Таблица 2.2

Эфемериды для наблюдений Полярной звезды

$s$	$z_{\alpha U Min}$ , КЛ	$A_{\alpha U Min}$ , КЛ	$z_{\alpha U Min}$ , КП	$A_{\alpha U Min}$ , КП

### Задание

Составить таблицу эфемерид Полярной звезды в соответствии с приведенными выше правилами.

## 2.3. Эфемеридные вычисления для задачи определения азимута земного предмета

Для определения азимута земного предмета используется наблюдение Полярной звезды. В силу этого отдельных вычислений эфемерид для азимутальных наблюдений не требуется. В программе определения азимута используются эфемериды Полярной звезды из раздела 2.2.

## 2.4. Эфемеридные вычисления для меридианных наблюдений

Каждый оборот Земли вокруг оси сопровождается *моментами верхней и нижней кульминаций* того или иного светила (далее в тексте — ВК и НК соответственно, см. выше), когда мы наблюдаем светило на небесном меридиане, т. е. в наиболее высоком или наиболее низком положении относительно горизон-

та. Особое значение имеют наблюдения верхних кульминаций. В этот момент плоскость данного географического меридиана оказывается обращенной к светилу. Регистрация моментов верхних кульминаций светил с известными экваториальными координатами  $(\alpha, \delta)$  используется при ориентировании угломерных инструментов по азимуту, определении широт и времени. Более того, наблюдения космических объектов в периоды времени, близкие к верхней кульминации, используются при проведении самых различных наблюдений и исследований, в том числе и астрофизических.

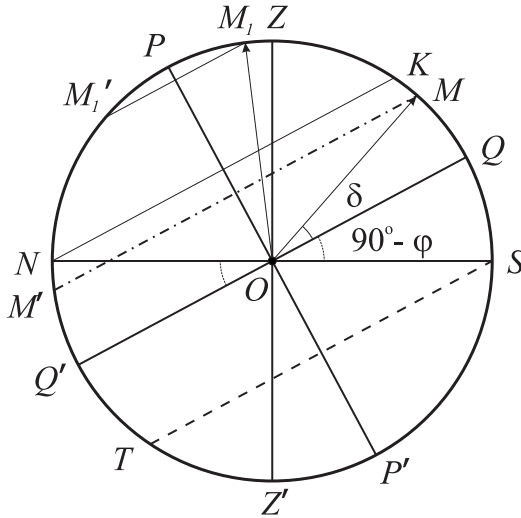
### Определение высот и азимутов объектов

На рисунке показана плоскость небесного меридиана, в которой расположены ось мира, отвесная линия места наблюдения, а также линии пересечения суточных параллелей светил, имеющих разные склонения с плоскостью меридиана:

$$\angle NOP = \angle QOZ = \varphi. \quad (2.9)$$

Здесь отмечены положения двух звезд в момент их верхней ( $M$  и  $M_1$ ) и нижней (соответственно  $M'$  и  $M'_1$ ) кульминаций. В момент верхней кульминации светил их часовой угол  $t = 0^h(0^\circ)$ , а местное звездное время  $s = \alpha_*$ . В нижней кульминации часовой угол  $t = 12^h(180^\circ)$ , а местное звездное время  $s = \alpha_* + 12^h$ . В зависимости от склонения светила его прохождение через меридиан по-разному наблюдается относительно зенита в пункте наблюдения — к югу или северу, что сказыва-

ется на значении астрономического азимута светила. В первом случае  $A = 0^\circ$ , а во втором —  $A = 180^\circ$ . Рассмотрим различные случаи наблюдения светил в меридиане.



Положение звезд в моменты верхней и нижней кульминаций

1. **Верхняя кульминация к югу от  $Z$**  (светило  $M$ ). Как видно, его склонение  $\delta < \varphi$ . Тогда зенитное расстояние светила  $z_{\text{ВК}} = \varphi - \delta$ , а высота в момент ВК:

$$\begin{aligned} h_{\text{ВК}} &= 90^\circ - \varphi + \delta, \\ A_{\text{ВК}} &= 0^\circ. \end{aligned} \tag{2.10}$$

2. **Верхняя кульминация светила ( $M_1$ ) к северу от  $Z$** . Склонение такого светила  $\delta > \varphi$ . В этом случае  $z_{\text{ВК}} = \delta - \varphi$ ,

а высота в момент верхней кульминации

$$\begin{aligned} h_{\text{ВК}} &= 90^\circ + \varphi - \delta, \\ A_{\text{ВК}} &= 180^\circ. \end{aligned} \quad (2.11)$$

3. **Верхняя кульминация в зените** происходит на данной широте у тех светил, склонение которых  $\delta = \varphi$ . Эти светила в данный момент времени ( $t = 0^h$ ,  $S = \alpha_*$ ) не являются указателями азимута.
4. **В нижней кульминации** ( $t_* = 12^h 00^m$  и  $A = 180^\circ$ ) светило занимает самое низкое положение над горизонтом или скрывается за горизонт:

$$\begin{aligned} z_{\text{НК}} &= \cap ZM' = \cap PZ + \cap PM' = (90^\circ - \varphi) + (90^\circ - \delta) = \\ &= 180^\circ - (\varphi + \delta), \\ h_{\text{НК}} &= \cap NP - \cap PM' = \varphi - (90^\circ - \delta) = (\varphi + \delta) - 90^\circ, \\ A_{\text{НК}} &= 180^\circ. \end{aligned} \quad (2.12)$$

По характеру суточного движения в пункте с известной широтой светила можно разделить на несколько типов:

1. **Незаходящими** считаются те светила, у которых обе кульминации происходят над горизонтом. Предельную (граничную) параллель таких светил  $NK$  описывают светила, у которых нижняя кульминация происходит в точке севера  $N$ . Высота таких светил в момент нижней кульминации  $h_{\text{НК}} = 0^\circ$ , а их склонение  $\delta = 90^\circ - \varphi$ . На Северном полюсе Земли все светила Северного полушария являются незаходящими, а их высоты над горизонтом определяются их склонением.

2. **Невосходящими** называются те светила, у которых даже верхние кульминации не удастся наблюдать на данной широте. Граничная параллель таких светил  $ST$  проходит через точку юга  $S$ .
3. **Восходящими (заходящими)** будут те светила, суточные пути которых пересекаются с горизонтом, а их время пребывания над горизонтом, определяемое посредством часовых углов в момент восходов и заходов, зависит от их склонения.

## Методика расчета эфемерид наблюдений

Наблюдения звезд в меридиане могут использоваться для выполнения программ наблюдений по определению широты места, астрономического азимута земного предмета и азимутальной лично-инструментальной разности (АЛИР). Эфемериды для определения широты места по наблюдениям пар звезд при одном положении вертикального круга инструмента рассчитываются на основе эфемерид для наблюдения звезд в меридиане.

Для составления эфемерид наблюдений используется таблица АЕ «Средние места звезд».

Выбор звезд по блеску ограничивается их видимостью в данных физико-географических условиях. При отборе кандидатов для наблюдения в меридиане прямое восхождение южных звезд должно находиться в максимальном для периода наблюдений диапазоне звездных времен начала и конца наблюдений (см. табл. 2.1); для северных звезд (нижняя кульминация) — со сдвигом  $\pm 12^h$ . Таким образом, звезды для наблюдения в меридиане и пары звезд должны удовлетворять следующие

щим условиям (обратите внимание, что одни и те же звезды могут входить в несколько пар):

1. Обязательные условия для *всех* звезд:

- 1.1. Прямые восхождения звезд должны удовлетворять условиям прохождения кульминации в промежуток времени наблюдений.

$$\begin{aligned} s_{\text{H}}^{\min} &\leq \alpha^S \leq s_{\text{K}}^{\max}, \\ s_{\text{H}}^{\min} \pm 12^h &\leq \alpha^N \leq s_{\text{K}}^{\max} \pm 12^h. \end{aligned} \quad (2.13)$$

- 1.2. Видимая звездная величина звезды  $m$  должна быть меньше  $5^m$ .

- 1.3. Зенитные расстояния звезд в верхней кульминации на юге и в нижней на севере должны быть в пределах от  $45^\circ$  до  $65^\circ$ .

2. Дополнительные условия, по которым происходит объединение в пары «южных» и «северных» звезд:

- 2.1. Разность зенитных расстояний звезд пары в меридиане — не более  $6^\circ$ .

- 2.2. Разность моментов кульминаций звезд пары — не более  $\pm 30^m$ , минимальная разность моментов между кульминациями должна быть равна времени наблюдения одной звезды плюс время, затрачиваемое на переход к наблюдениям второй звезды данной пары (не менее  $\pm 15^m$ ).

Для составления рабочих эфемерид наблюдения звезд в меридиане отбираются все звезды, удовлетворяющие пунктам 1.1–1.3 из списка условий. После отбора звезд необходимо убедиться, что все отобранные звезды присутствуют также и в таблице АЕ «Видимые места звезд». Те звезды, для кото-

рых отсутствуют видимые координаты, *не используются* для составления эфемерид наблюдений.

При составлении рабочих эфемерид для определения широты по наблюдениям пар звезд в меридиане при одном положении круга, в силу того, что количество северных звезд, удовлетворяющих условиям отбора, заметно меньше, чем южных, к отобранным северным звездам подбираются подходящие по критериям южные звезды.

Подбор пар и расчет эфемерид наблюдений для программы определения широты по наблюдениям пар южных и северных звезд в меридиане при одном положении круга ведется в следующем порядке:

1. Отбираются все звезды, удовлетворяющие пунктам 1.1—1.3 из списка условий.
2. В пары к северным звездам, наблюдаемым в нижней кульминации, южные звезды подбирают по склонению:

$$\delta_S = \delta_N - (180^\circ - 2\varphi_0) \pm 6^\circ, \quad (2.14)$$

где  $\varphi_0$  — приближенное значение широты, используемое при вычислении эфемерид.

3. Для полученных кандидатов в пары проверить, что разность моментов времени между кульминациями северной и южной звезды пары должна быть не менее 15 и не более  $30^m$ . Не проходящие по этому критерию кандидаты в пары отбрасываются.

4. Вычисляются эфемеридные зенитные расстояния отобранных звезд:

$$\begin{aligned} z^S &= \varphi_0 - \delta_S, \\ z^N &= 180^\circ - (\varphi_0 + \delta_N). \end{aligned} \quad (2.15)$$

5. Для всех отобранных звезд вычисляется *скорость движения звезды по азимуту*:

$$v_A = 15 \frac{|\cos \delta|}{\sin z}, \quad [v_A] = ' / m. \quad (2.16)$$

6. Поскольку измерение зенитного расстояния звезды для повышения точности результата должно проводиться многократно и симметрично относительно меридиана, то установочные азимуты инструмента отличаются от  $0^\circ$  и  $180^\circ$ . Для этого рассчитываются углы упреждения установки инструмента для наблюдения звезды до меридиана и после меридиана. Угол упреждения рассчитывается исходя из вычисленной скорости движения звезды по азимуту (2.16) и выбранного времени упреждения. В силу особенностей используемого теодолита (отсутствие подвижной горизонтальной нити сетки), для наблюдения до меридиана время упреждения  $t^m$  (выраженное в минутах времени) следует выбрать равным  $3-4^m$ , а для наблюдения после меридиана —  $2^m$ . Угол упреждения вычисляется по формуле

$$\Delta A_{1,2} = v_A t_{1,2}^m \quad (2.17)$$

и выражается в минутах дуги. Индексы 1 и 2 относятся к наблюдению до и после меридиана соответственно.



Установочные азимуты вычисляются для южной и северной звезд пары при наблюдениях до и после меридиана.

Южная звезда в верхней кульминации:

$$A_1^S = 360^\circ - \Delta A_1^S \text{ — до меридиана,}$$

$$A_2^S = \Delta A_2^S \text{ — после меридиана.}$$

Северная звезда в нижней кульминации:

$$A_1^N = 180^\circ - \Delta A_1^N \text{ — до меридиана,}$$

$$A_2^N = 180^\circ + \Delta A_2^N \text{ — после меридиана.} \quad (2.18)$$

7. Определяется момент звездного времени наблюдения:

$$\begin{aligned} s^S &= \alpha^S, \\ s_{\text{НК}}^N &= \alpha^N \pm 12^h. \end{aligned} \quad (2.19)$$

При проведении наблюдений необходимо учитывать, что установочные азимуты вычислены для выбранного времени упреждения  $t^m$ , и реальные моменты наблюдения определяются как

$$\begin{aligned} s_1^S &= s^S - t_1^m, & s_2^S &= s^S + t_2^m, \\ s_{\text{НК},1}^N &= s_{\text{НК}}^N - t_1^m, & s_{\text{НК},2}^N &= s_{\text{НК}}^N + t_2^m. \end{aligned} \quad (2.20)$$

### Задание

Рассчитать эфемериды для наблюдения звезд в меридиане. Использовать приведенную выше методику. Экваториальные координаты звезд взять из таблицы АЕ «Средние места звезд (J2000.0)». Для составления эфемерид можно использо-

вать только те звезды из таблицы средних мест, для которых существуют соответствующие записи в таблице АЕ «Видимые места звезд». Результаты вычислений поместить в две таблицы. В первую таблицу (см. табл. 2.3) поместить все звезды, удовлетворяющие пунктам 1.1—1.3 из списка условий, отсортированные по виду кульминации (азимуту) и звездному времени кульминации. Во вторую таблицу (рабочие эфемериды для определения широты по наблюдениям звезд в меридиане) поместите пары звезд, удовлетворяющие всем вышеуказанным критериям. Сами пары и звезды внутри пары должны быть отсортированы по звездному времени (см. табл. 2.4).

Таблица 2.3

Звезды, проходящие меридиан места наблюдения в выбранный диапазон звездного времени

№	№ по АЕ	Название	$m$	$\alpha$ , hh mm	$\delta$ , ° '	$s$ кульм, hh mm	$z_{\text{кл}}$ , ° '	$A_{\text{кл}}$ , ° '	$z_{\text{кп}}$ , ° '	$A_{\text{кп}}$ , ° '	$v_A$ , '/m
01	378	bet Ser	3.65	15 46	+15 23	15 46	41 27	0 0	318 33	180 0	21.8
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Таблица 2.4

Рабочие эфемериды для определения широты по наблюдениям звезд в меридиане

№ пары	№ по АЕ	$m$	$s$ кульм, hh mm	$s_1$ , hh mm	$A_1$ , ° '	$s_2$ , hh mm	$A_2$ , ° '	$z_{\text{кл}}$ , ° '
01	401 S	3.8	16 32	16 28	358 47	16 34	0 37	54 53
	129 N	4.2	16 55	16 51	179 31	16 57	180 15	56 49
...	...	...	...	...	...	...	...	...

## 2.5. Эфемеридные вычисления для способа равных высот

### Методика расчета эфемерид наблюдений

Основная идея метода — наблюдения пары звезд с небольшой разностью склонений на одном и том же альмукантаре [11]. Следовательно, первым критерием отбора является малая разность склонений звезд, т. е.  $\Delta\delta \leq \Delta\delta_{\max}$ , а вторым, естественно, нахождение звезд на одном зенитном расстоянии, при одном и том же звездном времени. Запишем для параллактических треугольников двух произвольно выбранных звезд с малой разницей склонений формулы косинусов для зенитного расстояния и, поскольку наблюдения ведутся на одной высоте, приравняем эти выражения друг другу. На этом этапе будем считать, что звезды проходят одну и ту же высоту в один и тот же момент звездного времени  $T$ .

$$\begin{aligned} \sin \varphi \sin \delta_e + \cos \varphi \cos \delta_e \cos(\alpha_e - T) &= \\ = \sin \varphi \sin \delta_w + \cos \varphi \cos \delta_w \cos(T - \alpha_w). \end{aligned} \quad (2.21)$$

Проделав преобразования, получим

$$\begin{aligned} &\sin \left( T - \frac{\alpha_w + \alpha_e}{2} \right) + \\ &+ \cos \left( T - \frac{\alpha_w + \alpha_e}{2} \right) \operatorname{tg} \left( \frac{\delta_w + \delta_e}{2} \right) \cdot \\ &\cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\delta_w - \delta_e}{2} \right) \operatorname{ctg} \left( \frac{\alpha_e - \alpha_w}{2} \right) = \\ &= \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \left( \frac{\delta_w - \delta_e}{2} \right) \operatorname{cosec} \left( \frac{\alpha_e - \alpha_w}{2} \right), \end{aligned} \quad (2.22)$$

или

$$\sin \left( T - \frac{\alpha_w + \alpha_e}{2} \right) + \cos \left( T - \frac{\alpha_w + \alpha_e}{2} \right) \operatorname{tg} m = \frac{\sin n}{\cos m}, \quad (2.23)$$

где углы  $m$  и  $n$  соответственно равны:

$$\operatorname{tg} m = \operatorname{tg} \left( \frac{\delta_w + \delta_e}{2} \right) \operatorname{tg} \left( \frac{\delta_w - \delta_e}{2} \right) \operatorname{ctg} \left( \frac{\alpha_e - \alpha_w}{2} \right), \quad (2.24)$$

$$\sin n = \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \left( \frac{\delta_w - \delta_e}{2} \right) \operatorname{cosec} \left( \frac{\alpha_e - \alpha_w}{2} \right) \cos m, \quad (2.25)$$

и тогда

$$T = n - m + \frac{\alpha_w + \alpha_e}{2}. \quad (2.26)$$

В итоге имеем следующую систему формул для поиска звездного времени, когда пара звезд находится на одном зенитном расстоянии:

$$T = n - m + \frac{\alpha_w + \alpha_e}{2}, \quad (2.27)$$

$$\sin n = \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \left( \frac{\delta_w - \delta_e}{2} \right) \operatorname{cosec} \left( \frac{\alpha_e - \alpha_w}{2} \right) \cos m, \quad (2.28)$$

$$\operatorname{tg} m = \operatorname{tg} \left( \frac{\delta_w + \delta_e}{2} \right) \operatorname{tg} \left( \frac{\delta_w - \delta_e}{2} \right) \operatorname{ctg} \left( \frac{\alpha_e - \alpha_w}{2} \right). \quad (2.29)$$

Для реальных наблюдений невозможно использовать одно-временное прохождение звезд через альмукантарат. В силу этого подбираются такие пары, где одна из звезд проходит общую высоту раньше другой. Альмукантарат при этом смещается выше или ниже по отношению к таковому при одновременном прохождении, в зависимости от прямых восхождений и склонений звезд пары. Требуемый промежуток времени между прохожде-

ниями зависит от инструмента, скорости движения звезды по высоте и опыта наблюдателя. Для условий летней практики принят промежуток времени между прохождениями альмукантарата, равный  $10^m$ .

Ранее отмечалось, что наилучшие условия наблюдения — наблюдение звезд вблизи первого вертикала, т. е. азимуты этих звезд должны равняться примерно  $90^\circ$  для западной и  $270^\circ$  для восточной звезды.

Теперь рассмотрим ограничения, связанные с инструментом, с помощью которого производятся наблюдения. Если инструмент укомплектован прямой трубой, то для удобства наблюдений приходится использовать сравнительно низкие альмукантараты. Следовательно, четвертым критерием отбора являются ограничения по зенитным расстояниям:  $z_{\min} < z < z_{\max}$ .

Для определения критериев отбора по часовым углам примем, что среднее зенитное расстояние наблюдений составляет  $\bar{z} \approx 55^\circ$ . Решая параллактический треугольник для прохождения звездой первого вертикала на зенитном расстоянии  $\bar{z}$ , по формуле пяти элементов получаем

$$\begin{aligned} \sin \bar{z} \cos 90^\circ &= \sin(90^\circ - \varphi) \cos(90^\circ - \delta) - \\ &\quad - \cos(90^\circ - \varphi) \sin(90^\circ - \delta) \cos t, \\ \cos t &= \frac{\operatorname{tg}(90^\circ - \varphi)}{\operatorname{tg}(90^\circ - \delta)}. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Применяя к тому же треугольнику теоремы косинусов и синусов, получаем выражения для стороны  $90^\circ - \delta$ :

$$\begin{aligned}\cos(90^\circ - \delta) &= \cos(90^\circ - \varphi) \cos \bar{z} + \sin(90^\circ - \varphi) \sin \bar{z} \cos 90^\circ, \\ \cos(90^\circ - \delta) &= \cos(90^\circ - \varphi) \cos \bar{z}, \\ \frac{\sin(90^\circ - \delta)}{\sin 90^\circ} &= \frac{\sin \bar{z}}{\sin t}, \\ \sin(90^\circ - \delta) &= \frac{\sin \bar{z}}{\sin t}.\end{aligned}\tag{2.31}$$

Подставляем (2.31) в (2.30) и получаем окончательное выражение для часового угла:

$$\operatorname{tg} t = \frac{\operatorname{tg} \bar{z}}{\cos \varphi}.\tag{2.32}$$

Проводя расчет часового угла для широты Екатеринбурга и  $\bar{z}$ , получим среднее значение западного часового угла в первом вертикале  $\bar{t}_w \approx 4.5^h$ . На востоке соответственно  $\bar{t}_e \approx 19.5^h$ . Это позволяет сформулировать третий критерий для отбора пары Цингера, т. е.  $t_w \simeq \bar{t}_w \pm 1.5^h$  и  $t_e \simeq \bar{t}_e \pm 1.5^h$ .

Необходим и пятый критерий отбора звезд — звездная величина, т. е. в летнее время на сумеречном небе в городских условиях наблюдение слабых звезд практически невозможно, значит, необходимо учитывать звездную величину при подборе пары:  $m \leq m_{\max}$ .

Формулы для подсчета зенитного расстояния звезд пары  $z$ :

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta_w + \cos \varphi \cos(T - \alpha_w)\tag{2.33}$$

или

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta_e + \cos \varphi \cos(T - \alpha_e), \quad (2.34)$$

и азимутов  $A_w, A_e$ :

$$\operatorname{tg} A_w = \frac{\sin(T - \alpha_w)}{\sin \varphi \cos(T - \alpha_w) - \operatorname{tg} \delta_w \cos \varphi}, \quad (2.35)$$

$$\operatorname{tg} A_e = \frac{\sin(T - \alpha_e)}{\sin \varphi \cos(T - \alpha_e) - \operatorname{tg} \delta_e \cos \varphi}. \quad (2.36)$$

Параметры отбора пар выбраны следующим образом:

- глубина погружения Солнца под горизонт —  $3^\circ$ ;
- разность моментов прохождений —  $10^m$ ;
- ограничение по звездной величине (max) — 5;
- максимальная разность склонений звезд —  $5^\circ$ ;
- ограничения на часовые углы (min—max) —  $3-6^h, 18-21^h$ ;
- ограничения по зенитным расстояниям (min—max) —  $45-65^\circ$ .

Для реализации изложенного алгоритма используется компьютерная программа, входящая в состав программно-аппаратного комплекса обеспечения учебной практики по астрометрии. Программа создает текстовые файлы эфемерид наблюдений по входным файлам экваториальных координат Солнца и звезд из АЕ.



## Типовые вопросы

1. Объясните, по какой причине эфемериды для астрономических наблюдений рассчитываются как функция звездного времени? Возможно ли использование того или иного вида солнечного времени для построения эфемерид?
2. Почему требуемая точность вычисления эфемерид обычно определяется именно величиной углового поля зрения инструмента?
3. На каких этапах эфемеридных вычислений и с какой целью используется процедура интерполяции табличных значений?
4. Объясните суть процедуры линейной интерполяции.
5. По какой причине порядок интерполирования при двумерной линейной интерполяции не имеет значения?
6. Рассчитайте для широты Екатеринбурга время прохождения звезды через поле зрения теодолита GeoBox TE-02 для среднего склонения звезд, кульминирующих к югу и северу от зенита (в нижней кульминации).
7. Рассчитайте время полного захода Солнца под горизонт (от нижнего до верхнего края) для даты середины учебной практики. Зависит ли это время от склонения Солнца?
8. Влияет ли рефракция на время полного погружения Солнца под горизонт?
9. Сравните величину погрешности при использовании начальной аналитической модели рефракции и при использовании таблиц рефракции из «Астрономического ежегодника». Расчет сделайте для предельных высот наблюдений.

10. Сколько требуется среднего времени, чтобы Солнце после полного погружения под горизонт ушло на глубину более  $6^\circ$ ? Расчет проведите для даты начала учебной практики.
11. Рассчитайте время погружения Солнца под горизонт на  $6^\circ$  для дат начала и конца практики.
12. Рассчитайте момент истинной полуночи по звездному и среднему времени для дат начала и конца практики.
13. Определите условия видимости Луны для всего промежутка практики.
14. Определите, возможно ли во время практики наблюдать покрытие ярких звезд Луной?
15. Каким образом можно определить, не будут ли в поле зрения инструмента одновременно видны несколько эфемеридных звезд?
16. Можно ли наблюдать кульминации Полярной звезды в течение учебной практики?
17. Рассчитайте, на сколько изменяется высота Полярной звезды на промежутке времени в  $10^s$ . Расчет проведите для полуночи по гражданскому времени для даты середины практики. Оцените, как ошибка фиксации момента времени наблюдения Полярной звезды может влиять на точность определения широты.
18. При наблюдениях в каких местах суточной параллели Полярной звезды можно получить максимальную точность определения широты места?
19. Рассчитайте, в какой момент звездного времени происходят элонгации Полярной звезды. Видны ли они в период наблюдений?

20. Какой знак имеет ошибка определения широты при наблюдении прохождений звезд вблизи меридиана вследствие неточной ориентации инструмента в меридиане?
21. Рассчитайте, насколько изменяется высота звезды со склонением  $\delta = 0^\circ$  при ее прохождении через меридиан, если она проходит полное поле зрения теодолита GeoBox TE-02.
22. Определите минимально возможный промежуток времени относительно эфемеридного момента кульминации северной звезды, чтобы ее можно было пронаблюдать на всех трех нитях инструмента. Взять северные звезды с максимальным и минимальным из возможных склонений.
23. Выше или ниже наблюдаются звезды пар Цингера относительно высоты, которую они проходят в одно и то же время?
24. Рассчитайте время прохождения звезд пар Цингера через нити инструмента. Рассмотрите случай со средней высотой пары и прохождением альмукантарата точно в первом вертикале.
25. Возможно ли наблюдение по методу Цингера в меридиане?
26. Опишите характер видимого движения звезд пар Цингера в поле зрения инструмента вблизи первого вертикала.
27. На сколько меняется скорость движения звезды, выбранной для наблюдения по методу Цингера, по азимуту и высоте при прохождении от одного края поля зрения инструмента до другого? Для расчета возьмите характерное склонение звезд, образующих пары Цингера для широты и долготы Екатеринбурга.
28. Допустимо ли усреднять наблюденные моменты времени прохождения звездами пар Цингера нитей инструмента для последующего расчета поправки хронометра?

### 3. СЛУЖБА ВРЕМЕНИ

Любые астрометрические наблюдения требуют точной временной привязки, поэтому одним из важных разделов практики является служба времени. Соответственно, одним из важнейших приборов на практике являются высокоточные часы. Не менее важен и протокол их применения, который должен минимизировать дополнительные погрешности, связанные в основном с человеческим фактором.

На примере азимутальной программы, как одной из наиболее требовательных к точности измерений, определим необходимую точность фиксации моментов времени. Ошибка определения азимута направления на земной объект вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta A = \cos q \frac{\cos \delta}{\sin z} \Delta t - \sin A \frac{\cos z}{\sin z} \Delta \varphi + \frac{\sin q}{\sin z} \Delta \delta, \quad (3.1)$$

где  $\Delta t = \Delta T + \Delta u - \Delta \alpha$ ,  $\Delta T$  — ошибка в фиксации момента наблюдения светила по часам, когда оно имеет часовой угол  $t$ ;  $\Delta u$  — ошибка в известной поправке хронометра относительно местного времени;  $\Delta \alpha$  — ошибка в значении координаты [6]. Для оценки можно считать  $\Delta \alpha$ ,  $\Delta \delta$ ,  $\Delta \varphi$  равными нулю, так как точность каталожных данных достаточно высока, чтобы

гарантировать низкую погрешность результата. Поскольку наблюдения проводятся в основном в меридиане (для нашей широты используют обычно верхнюю кульминацию), параллактический угол  $q$  будет близок к  $0^\circ$ ,  $180^\circ$ . С учетом широты места наблюдения и допустимого диапазона высот в верхней кульминации, склонение объектов в среднем близко к нулю.

Используемые на практике электронные теодолиты Геобох ТЕ-02 обеспечивают точность измерения углов на уровне  $\pm 2''$  и разрешающую способность трубы —  $3.5''$ . Исходя из этого, можно принять предельную требуемую погрешность определения азимута  $\Delta A = \pm 4''$ .

Подставим все значения в (3.1) и получим, что предельная погрешность фиксации момента времени составляет  $\Delta T \approx 0.1—0.2^s$ . С другой стороны, ошибка определения поправки хронометра в методе Цингера вблизи первого вертикала оценивается как  $\Delta u \sim \Delta T$  [6].

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод, что желательная точность фиксации моментов времени должна быть порядка  $0.1—0.01^s$ .

Точные часы должны обеспечивать:

- качественную синхронизацию с эталонным временем;
- точность снятия отсчетов не меньше одной сотой секунды;
- равномерность хода;
- возможность фиксации моментов времени через кнопку или иное подходящее устройство фиксации для исключения метода «глаз—ухо», требующего высокой квалификации наблюдателя и промежуточных этапов при фиксации моментов времени.

### 3.1. Реализация службы времени методами спутниковой навигации

Источником точного времени могут служить:

- отдельные высокоточные часы;
- встроенные в компьютер аппаратные часы;
- время, передаваемое глобальными системами спутниковой навигации, с которым могут быть синхронизированы компьютерные часы.

Отдельные высокоточные часы, так называемые рабочие эталоны единиц времени и частоты, могли бы быть хорошим вариантом. Они обеспечивают высокую точность, но требуют периодической сверки с эталонами, являются сложным и дорогостоящим оборудованием, и их использование в полевых условиях затруднено.

Поскольку желательно обеспечить компьютерную фиксацию моментов времени (для уменьшения роли человеческих ошибок при полевых наблюдениях), то очевидным было бы использование встроенных в компьютеры аппаратных часов. Ход компьютерных часов определяется характеристиками обычного нетермостатированного кварцевого генератора, что не позволяет получить относительную точность хода автономных часов компьютера лучше, чем  $10^{-4}$ — $10^{-5}$ . Использование компьютерных часов возможно при регулярной (и достаточно частой) их синхронизации с каким-либо эталоном времени.

Возможно использование компьютерных часов, синхронизированных с интернет-серверами точного времени по протоколу NTP (Network Time Protocol). Точность синхронизация порядка  $0.1^s$  может быть достигнута при наличии стабильной

связи с сервером времени в сети. Но обеспечить необходимую точность синхронизации в реальных условиях трудно.

Технически доступным и стабильным является вариант использования времени, передаваемого спутниковыми навигационными системами [12] (собственная погрешность  $\Delta t \sim 10^{-9}$  с), с которым могут быть периодически синхронизированы компьютерные часы.

### **Использование систем глобальной спутниковой навигации в целях службы времени**

Для решения задач практики используется специализированный высокоточный приемник службы времени Trimble<sup>©</sup> Acutime Gold GPS Smart Antenna. GPS-приемник имеет два интерфейса: PPS (Pulse Per Second) и COM-порт (RS-422). После включения питания он автоматически отслеживает сигналы навигационных спутников, генерирует секундную метку (1PPS) и посылает сообщение на COM-порт, содержащее привязку метки к UTC в пределах  $\pm 15$  нс. Реально нет необходимости для задач практики реализовывать столь высокую точность синхронизации. Другой вариант работы с приемником заключается в подключении COM-порта к компьютеру без дополнительной обработки pps-сигнала. Производитель приемника предоставляет программу [13], которая позволяет периодически синхронизировать компьютерные часы с часами приемника. Заявленная производителем точность синхронизации составляет порядка 0.001 с [14]. Наличие в комплекте оборудования преоб-

разователя сигналов интерфейса RS-422 в сигналы USB-порта позволяет подключить приемник сигналов спутниковой навигационной системы к любому современному компьютеру.

### **Методика использования спутникового оборудования**

Технические характеристики приемника службы времени Trimble® Acutime Gold GPS Smart Antenna описаны в [14] и на официальном сайте компании Trimble <http://www.trimble.com/timing/acutime-gold-gps-antenna.aspx?dtID=overview>. Внешний вид приемника без модуля преобразования интерфейса приведен на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Приемник службы времени Trimble® Acutime Gold GPS Smart Antenna



Приемник следует закрепить на стойке, так чтобы была обеспечена максимальная видимость верхней полусферы. Ветви кустов и деревьев могут создавать помехи прохождению сигналов. Приемник необходимо подсоединить к комплектному кабелю, а сам кабель — к модулю преобразования интерфейса RS-422  $\Leftrightarrow$  USB. USB-кабель от модуля подключить к свободному порту компьютера; комплектный блок питания подключить к модулю преобразования интерфейса и включить в сеть электропитания. Выключателем питания включить модуль преобразования интерфейса.

Для нормальной работы модуля преобразования интерфейса на компьютере должны быть установлены драйверы для работы с преобразователями интерфейса фирмы Future Technology Devices International Limited® (FTDI). В случае их отсутствия драйверы следует установить до подключения устройства. Драйверы можно получить по адресу: <http://www.ftdichip.com/Drivers/VCP.htm>.

Для того чтобы подключенный приемник службы времени мог выполнять свою основную функцию — периодически синхронизировать встроенные часы компьютера с высокоточной шкалой атомного времени, передаваемой с сигналами глобальной системы спутникового позиционирования, — на компьютере должно быть установлено и запущено специализированное программное обеспечение. Оно может быть получено по адресу: [http://www.trimble.com/timing/acutime-gold\\_support.asp?Nav=Collection-68392](http://www.trimble.com/timing/acutime-gold_support.asp?Nav=Collection-68392). Для работы с приемником необходима программа Trimble GPS Studio©. Все подробности работы с Trimble GPS Studio© описаны в [13]. Для подключения, инициализации и использования приемника служ-

бы времени необходимо последовательно выполнить операции, описанные в руководстве пользователя [13] в главе «Using GPS Studio With GPS Timing Receivers». После этого в программе Trimble GPS Studio<sup>©</sup> в меню Tools выбрать пункт TimeKeeper и активировать периодическую синхронизацию компьютерных часов в режиме UTC с периодом 5—10 мин.

Ввод информации о моменте времени пересечения звездой нити в поле зрения трубы осуществляется с помощью специального устройства (необходимость такого устройства возникает из-за отсутствия контактных микрометров на используемых инструментах), подключаемого к компьютеру по шине USB. Оно позволяет одновременно обрабатывать информацию от восьми независимых кнопочных пультов и получить доступ к этой информации из внешних программ. Кнопочный ввод наблюдателем информации о моменте времени позволяет уменьшить количество промежуточных этапов в передаче и фиксации данных. Также такой способ позволяет получить погрешность фиксации момента, зависящую от человеческого фактора, на уровне характерного времени психофизиологических реакций человека (порядка 0.01 с), что соответствует необходимой точности фиксации моментов времени для задач практики.

Устройство ввода сигналов реализовано с применением программируемого преобразователя интерфейсов FTDI Mini Module FT2232H (см. <http://www.ftdichip.com/Products/Modules/Development-Modules.htm>). Это модуль преобразователя протокола шины USB в стандартные последовательные и параллельные интерфейсы на основе специализированной микросхемы

FT2232H — высокоскоростного двухпортового USB-моста, реализующего весь физический уровень и протоколы USB шины. Внешний вид FTDI Mini Module FT2232H показан на рис. 3.2. Для использования модуля совместно с проводными кнопчными пультами (длина проводов 10—15 м) имеются дополнительные входные формирователи сигналов, защищенные от маломощных высоковольтных (до 3—5 кВ) входных помех и от дребезга контактов кнопчных пультов. Принципиальная схема устройства ввода доступна по адресу: [http://astro.ins.urfu.ru/sites/default/files/chair/study/courses/practice/astrometry/fig\\_ft2232hmodule.eps](http://astro.ins.urfu.ru/sites/default/files/chair/study/courses/practice/astrometry/fig_ft2232hmodule.eps). Устройство подключается к любому свободному USB-порту компьютера.



Рис. 3.2. Внешний вид FTDI Mini Module FT2232H

Для нормальной работы устройства ввода сигналов на компьютере должны быть установлены драйверы преобразователя интерфейса фирмы Future Technology Devices International Limited® (см. выше). Для устройства ввода сигналов от кнопочных пультов используется программа Chr, работающая под управлением Microsoft® Windows, версии от XP и выше. Программа фиксирует моменты нажатия кнопок на пультах и выводит значения моментов времени в отдельные для каждого пульта области вывода с точностью до сотых долей секунды. Далее эти значения переносятся в журналы наблюдений. Тестирование программы в течение летней практики на ноутбуке с операционной системой Microsoft® Windows 7 показало, что она выполняет все необходимые функции, но для бесперебойной работы должны быть отключены возможности операционной системы по гибернации и уходу в «сон», а также хранитель экрана.

*Обратите внимание, что программно-аппаратный комплекс приема сигналов времени от спутниковых навигационных систем и устройство фиксации моментов времени нажатия кнопок на кнопочных пультах выдает конечные результаты в системе UTC времени с учетом часовой зоны. Для обработки наблюдений все эти моменты должны быть переведены в звездное время на дату наблюдения.*

## 3.2. Шкалы времени

При выполнении задач практики необходимо оперировать разными шкалами времени. Все эфемеридные вычисления и алгоритмы обработки используют шкалу звездного времени.

Программно-аппаратный комплекс приема сигналов времени от спутниковых навигационных систем и устройство фиксации моментов времени нажатия кнопок на кнопочных пультах работают со средним поясным временем (точнее — в системе UTC с учетом часовой зоны). Вследствие этого необходимо четко понимать особенности различных шкал времени и способы перехода от одной шкалы к другой.

## Использование шкал времени

Одноименные промежутки времени, отнесенные к различным шкалам времени (звездной или среднесолнечной), неодинаковы. Это связано с неравенством одноименных единиц времени. Кроме того, шкала звездного времени непрерывно смещается относительно шкалы солнечного времени, поэтому начало звездных суток ( $S = t_{\gamma} = 0^h 0^m$ ) в разные дни года приходится на различные моменты солнечных суток.

Как осуществляется связь между основными системами времени — средней и звездной? Исходя из действительного числа звездных и средних солнечных суток в тропическом году, можно определить соотношение между единицами звездного и среднего времени:

$$\begin{aligned} 365.2421897 \dots \text{ средних суток} &= \\ = 366.2421897 \dots \text{ звездных суток.} &\quad (3.2) \end{aligned}$$

Таким образом, в единице среднего времени (сутки, час, минута, секунда) содержится  $\frac{366.2422\dots}{365.2422\dots}$  соответствующих единиц звездного времени, или в более общей формулировке: в любом произвольном промежутке времени, измеренном в средних

единицах, содержится в  $\frac{366.2422...}{365.2422...}$  раз больше звездных единиц. Соответственно, в любом произвольном промежутке времени, измеренном в звездных единицах, содержится в  $\frac{365.2422...}{366.2422...}$  раз меньше средних единиц. Приведенные рассуждения позволяют осуществить перевод *промежутков времени*, выраженных в одних единицах, в *те же* промежутки времени, но выраженные в других единицах.

Только что мы рассмотрели связь между единицами звездного и среднего времени. А теперь нам надо узнать, как устанавливается связь между основными системами времени. Нуль-пункты шкал звездного и среднего времени (начала соответствующих суток) являются «скользящими» — они непрерывно смещаются друг относительно друга в течение года. Для связи шкал звездного и среднего времени в «Астрономическом ежегоднике» на каждую дату приводятся значения звездного времени в  $0^h$  всемирного времени, т. е. в момент нижней кульминации среднего солнца на начальном меридиане. Обозначим эту величину через  $S_0 = s(M = 0^h)$ , которая характеризует часовой угол точки весеннего равноденствия в указанный физический момент. Для связи шкал воспользуемся схемой, изображенной на рис. 3.3 и представляющей своеобразную временную ось.

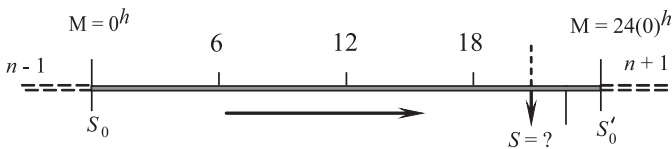


Рис. 3.3. Связь шкал звездного и среднего времени

Пусть по верхней линейке течет среднее время, а по нижней — звездное время. Жирной линией здесь выделены средние сутки. По среднему времени мы не только отмечаем время, но и меняем даты (например, дата  $n$ , а также две другие, смежные с заданной —  $(n - 1)$  и  $(n + 1)$ ). Вертикальными штрихами на схеме отмечены моменты  $M = 0^h$  даты  $n$  и последующей даты  $(n + 1)$ ; для каждого из этих моментов указано звездное время  $S_0$  и  $S'_0$  в среднюю гринвичскую полночь (см. в АЕ таблицу «Звездное время»).

На практике приходится решать два вида задач по переходу от одной шкалы времени к другой. Решение обоих видов задач проще осуществить при помощи редукции на начальный меридиан.

**Первым** и наиболее часто встречающимся на практике видом задач является задача вычисления звездного времени  $s$  в пункте с долготой  $\lambda$  в фиксированный момент времени часовой зоны  $T_N$  в заданную дату.

При вычислениях, проводимых для учебной астрономической обсерватории, следует использовать значение долготы пункта  $\lambda = 04^h 02^m 32.68^s$  в. д.

Решение задачи осуществляется в следующем порядке:

1. Перейти от времени часовой зоны  $T_N$  к всемирному времени  $UTC$ :

$$UTC = T_N - N, \quad (3.3)$$

где  $N = 5^h$  для четвертой часовой зоны [3].

2. Всемирное время  $UTC$  суть промежуток времени  $\Delta M$ , прошедший с момента средней гринвичской полночи до момен-

та времени  $UTC$ , измеренный в средних солнечных единицах. Переведем этот промежуток времени в звездные единицы и получим промежуток времени, прошедший с момента средней гринвичской полночи ( $UTC = 0^h, M = 0^h$ ), в звездных единицах  $\Delta s$ :

$$\Delta s = \Delta M \frac{366.2421897...}{365.2421897...} \equiv UTC \frac{366.2421897...}{365.2421897...}. \quad (3.4)$$

3. Звездное время в среднюю гринвичскую полночь  $s(M = 0^h) = S_0$  получаем из АЕ на заданную дату (обратите внимание на возможную смену даты на Гринвиче при переходе от времени зоны к гринвичскому времени). Используя ранее полученное значение  $\Delta s$ , вычисляем звездное время на Гринвиче в заданный момент всемирного времени  $UTC$ :

$$S = S_0 + \Delta s. \quad (3.5)$$

4. Осуществляем обратный переход от начального меридиана к пункту с заданной долготой  $\lambda$  и, используя правило «разность времен есть разность долгот», получаем искомое значение местного звездного времени  $s$ :

$$s = S + \lambda \text{ для пунктов восточнее Гринвича.} \quad (3.6)$$

Рассмотренная последовательность операций может быть выражена как

$$s(\lambda, T_N) = S_0 + (T_N - N) \frac{366.2421897...}{365.2421897...} + \lambda, \quad (3.7)$$

где  $T_N$  определяется согласно номеру часовой зоны.



**Вторым** видом задач является определение местного среднего времени или времени часовой зоны по звездному времени  $s$  в пункте наблюдения с долготой  $\lambda$ . Так, по сути дела, находят среднее время, поскольку оно непосредственно из наблюдений не определяется. Такую задачу решают в пунктах с хорошо известной долготой (ими являются астрономические обсерватории) посредством наблюдений кульминаций звезд с высокоточными значениями их прямых восхождений.

Решение задачи осуществляется в следующем порядке:

1. Производим редукцию местного звездного времени  $s$  на начальный меридиан, используя правило «разность времен есть разность долгот», и получаем звездное время на Гринвиче  $S$ :

$$S = s - \lambda \text{ для пунктов восточнее Гринвича.} \quad (3.8)$$

2. Разность между звездным временем на Гринвиче  $S$  и звездным временем в среднюю гринвичскую полночь  $S_0$  суть интервал времени, прошедшего с момента средней гринвичской полночи, выраженный в звездных единицах времени. Переводя его в средние единицы времени, получим интервал времени, прошедшего с момента средней гринвичской полночи, выраженный в средних единицах времени  $\Delta M$ , или всемирное время  $UTC$ :

$$\Delta M \equiv UTC = (S - S_0) \frac{365.2421897...}{366.2421897...}. \quad (3.9)$$

3. По всемирному времени  $UTC$  получаем время часовой зоны:

$$T_N = UTC + N. \quad (3.10)$$

4. Местное среднее солнечное время  $m$  определяем, используя правило «разность времен есть разность долгот», по всемирному времени  $UTC$  и известной долготе заданного пункта  $\lambda$ :

$$m = UTC + \lambda \text{ для пунктов восточнее Гринвича.} \quad (3.11)$$

Рассмотренная последовательность операций может быть выражена как

$$\begin{aligned} T_N(s, \lambda) &= (s - \lambda - S_0) \frac{365.2421897...}{366.2421897...} + N, \\ m(s, \lambda) &= (s - \lambda - S_0) \frac{365.2421897...}{366.2421897...} + \lambda. \end{aligned} \quad (3.12)$$

## Типовые вопросы

1. Объясните, чем определяется то, что для разных программ астрометрических наблюдений требуется различная точность фиксации моментов времени.
2. Каким фактором ограничивается предельная точность фиксации моментов времени, в случае если то или иное событие наблюдается человеком?
3. Какой из факторов оказывает сильное влияние на точность фиксации момента времени: рефракция, атмосферное размытие?

4. С чем связан тот факт, что для звезд с различными экваториальными координатами требуется различная точность фиксации моментов времени для получения требуемой итоговой точности наблюдений? Почему при одной точности фиксации моментов наблюдения окажутся неравноточными?
5. Опишите, какие источники точного времени (часы) могут применяться при полевых наблюдениях. Укажите их достоинства и недостатки.
6. Какие еще преимущества, кроме высокой точности, дает использование спутниковых навигационных систем в качестве источника времени?
7. Укажите внешние факторы, которые могут осложнить либо сделать невозможным применение спутниковой навигационной системы в реальных условиях.
8. С какой точностью должны быть взяты звездное время на Гринвиче в среднюю гринвичскую полночь и опорная долгота пункта, чтобы при пересчете среднего времени, полученного от спутниковой навигационной системы, в звездное, погрешность перевода не превысила 0.01 с?
9. Сделайте оценку, аналогичную указанной в предыдущем вопросе, для коэффициента перевода средних промежутков времени в звездные промежутки времени  $\left(\frac{366.2422...}{365.2422...}\right)$ .
10. Что такое критическая дата, и попадает ли хотя бы одна из таких дат на период летней учебной практики?
11. Опишите алгоритм выбора звездного времени на Гринвиче на момент средней гринвичской полночи из таблиц АЕ, на текущее время наблюдения.

12. Укажите, при каких ограничениях и в каких задачах возможно применение при наблюдениях средних часов вместо звездных.
13. На какую величину за время проведения практики сместится шкала звездного времени относительно среднего времени? Приведите числовые примеры для начала и конца практики.
14. Докажите аналитически, что разность средних либо звездных времен пунктов с произвольно выбранными долготами всегда равна разности долгот этих пунктов.
15. Покажите, какую погрешность в определении момента звездного времени по кульминации звезды с известными координатами можно получить, если разрешающая способность трубы инструмента составляет  $3''$ .
16. Является ли шкала звездного времени равномерной шкалой?
17. Опишите способ приближенного определения звездного времени на произвольный момент среднего времени без использования таблиц АЕ.
18. Опишите практические методы синхронизации часов.
19. На какой угол поворачивается Земля за  $1^h$  звездного и среднего времени?
20. Дайте общее определение понятия «сутки».
21. Объясните причину разной продолжительности года в звездных и средних сутках.
22. Определите моменты истинной и средней полуночи для даты середины практики. Каково в этот день уравнение времени?

23. На сколько среднее солнечное время отличается от поясного времени для учебной астрономической обсерватории?
24. Укажите, как определить звездное время на момент истинного полудня в заданную дату?
25. Рассчитайте абсолютную погрешность григорианского календаря.
26. На сколько разойдутся среднее и звездное время за время прохождения звезды через поле зрения инструмента при наблюдении южной кульминации звезды с нулевым склонением?
27. На сколько могут различаться моменты кульминации при переносе инструмента из крайней восточной в крайнюю западную точки учебной обсерватории?

## 4. ШИРОТНО-ДОЛГОТНАЯ ПРОГРАММА (ПОЛЕВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ)

Применяемые на практике электронные цифровые теодолиты Geobox TE-02 (рис. 4.1) имеют настраиваемые режимы работы горизонтального и вертикального кругов. Перед проведением любых видов измерений следует убедиться и, при необходимости, настроить следующие режимы (см. [15]):

1. Вертикальный круг должен находиться в режиме измерения зенитных расстояний.
2. Для горизонтального круга установите такой вариант снятия отсчетов с круга (кнопкой R/L на пульте прибора (рис. 4.2): выбор между «круг право» (КП) и «круг лево» (КЛ)), чтобы при физически левом положении вертикального круга относительно наблюдателя (труба инструмента направлена окуляром на наблюдателя) отсчеты по горизонтальному кругу увеличивались при повороте алидадной части инструмента по часовой стрелке.

В программах, предусматривающих наблюдения Полярной звезды при двух положениях вертикального круга инструмента (определение широты по измеренным зенитным расстояни-



Рис. 4.1. Общее устройство и внешний вид электронного цифрового теодолита GeoBox TE-02



Рис. 4.2. Отсчетное устройство и пульт управления теодолитом GeoBox TE-02

ям Полярной; определение астрономического азимута направления по наблюдениям Полярной), *необходимо* снять с инструмента ручку для переноски, закрепленную двумя винтами с накатанной головкой. В противном случае не удастся сделать перекладку трубы с установленной на ней угловой насадкой для наблюдения на малых зенитных расстояниях.

При осуществлении программ, содержащих в себе измерение зенитного расстояния объекта, необходимо обязательно снять показания термометра и барометра, которые в дальнейшем будут использованы для вычисления поправки за рефракцию. Показания термометра и барометра должны быть записаны в журнал наблюдений соответствующей программы.

Во всех журналах наблюдений обязательно должны быть указаны дата наблюдений, номер теодолита и фамилии наблюдателей. Делать исправления в журналах *запрещено*. Допускается только зачеркивание неверной записи и добавление верной.

## **4.1. Подготовка к наблюдениям.**

### **Поверки и юстировки инструмента**

Перед началом измерений теодолит необходимо тщательно осмотреть и проверить, так как даже серийно выпускаемые приборы имеют свои индивидуальные особенности. В первую очередь производят проверку и регулировку его механических деталей, обращая внимание на состояние и работу всех винтов прибора: подъемных, зажимных и наводящих винтов лимба и алидады, наводящего винта уровня вертикального круга, исправительных (юстировочных) винтов уровней, колонок, сетки



нитей и т. п. Вращение лимба и алидады должно быть плавным, без заеданий и колебаний. Горизонтальный и вертикальный угломерные круги не должны иметь механических повреждений; изображения делений шкал и сетки нитей должны быть четкими. Зрительная труба должна быть уравновешенной и иметь свободное вращение.

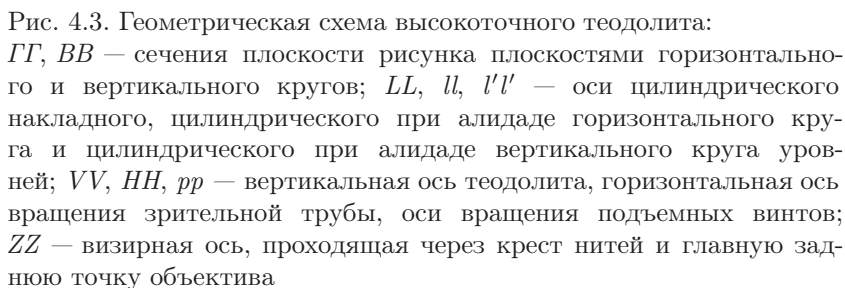
Присутствие пыли и грязи на оптических деталях прибора не допускается. После внешнего осмотра теодолита выполняют его поверки и юстировки.

В соответствии с принципом измерения горизонтального угла конструкция теодолита должна удовлетворять следующим основным геометрическим условиям (рис. 4.3):

- 1) ось цилиндрического уровня  $ll$  должна быть перпендикулярна к оси вращения теодолита  $VV$ ;
- 2) визирная ось зрительной трубы  $ZZ$  должна быть перпендикулярна к горизонтальной оси теодолита (оси вращения трубы)  $HH$ ;
- 3) горизонтальная ось теодолита  $HH$  должна быть перпендикулярна к оси вращения теодолита  $VV$ .

Дополнительные геометрические условия вытекают из теории измерения вертикальных углов.

Действия, имеющие целью установить соблюдение предъявляемых к конструкции прибора геометрических условий, называются поверками. Для обеспечения выполнения нарушенных условий производят юстировку (регулировку) прибора. Рассмотрим основные поверки и юстировки теодолитов.



Ось цилиндрического уровня алидады горизонтального круга должна быть перпендикулярна к оси вращения теодолита. Выполнение этого условия позволяет с помощью уровня устанавливать ось вращения теодолита в отвесное положение,

а, следовательно, плоскость лимба — в горизонтальное положение.

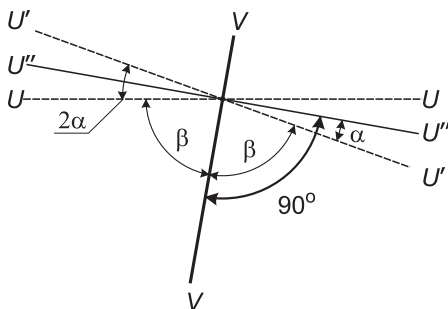


Рис. 4.4. Проверка положения оси цилиндрического уровня при алидаде горизонтального круга теодолита:  $VV$  — вертикальная ось вращения теодолита;  $UU$  — положение оси цилиндрического уровня, выставленного «на середину»;  $U'U'$  — положение оси цилиндрического уровня после поворота алидады на  $180^\circ$ ;  $U''U''$  — положение оси цилиндрического уровня после юстировки исправительными винтами уровня

Предварительно плоскость лимба приводят в горизонтальное положение по невыверенному уровню, для чего поворотом алидады устанавливают цилиндрический уровень параллельно линии, соединяющей два подъемных винта, и вращая их в противоположные стороны, приводят пузырек уровня в нуль-пункт. Затем алидаду поворачивают на  $90^\circ$  и вращением третьего винта приводят пузырек уровня в нуль-пункт. При этом ось цилиндрического уровня занимает горизонтальное положение  $UU$ , образуя с осью вращения  $VV$  прибора угол  $\beta$  (рис. 4.4). К отсчету по горизонтальному кругу прибавляют  $180^\circ$  и полученное значение поворотом алидады устанавливают на горизонтальном круге, т. е. поворачивают алидаду на  $180^\circ$ . При

этом ось цилиндрического уровня, сохраняя с осью вращения угол  $\beta$ , занимает положение  $U'U'$  и отклоняется от горизонтального положения на угол  $2\alpha$ . Как видно из рис. 4.4,  $2\alpha + 2\beta = 180^\circ$ , а  $\alpha + \beta = 90^\circ$ , т. е. биссектриса  $U''U''$  угла  $2\alpha$  перпендикулярна к оси вращения прибора.

Для юстировки половину отклонения следует устранить юстировочными винтами уровня, а затем повторить поверку. Поверку и юстировку следует выполнять до тех пор, пока после поворота алидады на  $180^\circ$  пузырек уровня будет отклоняться не более чем на 0.5 деления уровня. Поверку и юстировку уровней, расположенных под углом  $90^\circ$ , следует проводить поочередно.

Следует заметить, что ошибка в отсчете по горизонтальному кругу из-за невыполнения этого условия, т. е. из-за наклона вертикальной оси теодолита, не исключается при выводе среднего из результатов измерений при «круге лево» и «круге право».

При наличии круглого уровня в теодолите должно выполняться следующее условие: ось круглого уровня должна быть параллельна вертикальной оси вращения теодолита. Юстировка круглого уровня производится его исправительными винтами после точной установки вертикальной оси теодолита по выверенному цилиндрическому уровню.

## **Правильность установки сетки нитей трубы**

Правильность установки сетки нитей трубы проверяют после приведения оси вращения теодолита в отвесное положение с помощью отъюстированного уровня при алидаде.

При проверке трубу наводят на хорошо видимую точку. Если изображение точки при вращении трубы вокруг горизонтальной оси, пройдя вдоль вертикального штриха, будет находиться посередине между штрихами бисектора, то сетка установлена правильно. Если будет замечено смещение изображения точки более чем на треть величины бисектора, то сетку необходимо развернуть. Для этого следует снять колпачок, закрывающий юстировочные винты сетки, слегка отпустить винты, скрепляющие окуляр с корпусом трубы, и развернуть окуляр вместе с сеткой. После этого проверка повторяется вновь. При выполнении проверки допускается также наводить на выбранную точку горизонтальную нить сетки, смещая затем изображение точки в поле зрения наводящим винтом алидады.

Вертикальность бисектора (вертикальной нити) сетки можно проверить, совмещая его с изображением нити отвеса, нижняя часть которого опущена в ведро с маслом (машинным, трансформаторным) или с водой, смешанной с просеянными опилками.

### **Перпендикулярность визирной оси зрительной трубы и ее горизонтальной оси вращения (коллимация)**

Как известно, визирная ось трубы должна проходить через оптический центр объектива и перекрестие сетки нитей. Если указанное условие выполняется, то при вращении трубы вокруг горизонтальной оси визирная ось образует коллимационную плоскость. При несоблюдении условия визирная ось будет описывать не плоскость, а две конические поверхности. Угол  $C$

между фактическим положением визирной оси  $OK'$  и требуемым положением  $OK$  (рис. 4.5) называется *коллимационной погрешностью*. Следует понимать, что в плоскости горизонтального круга инструмента угол  $K'OK$  будет равен коллимационной погрешности только в том случае, если визирная ось находится в плоскости истинного горизонта. В противном случае на точность измерения горизонтального угла будет оказывать влияние не сама величина коллимационной погрешности  $C$ , а ее проекция на плоскость горизонта  $x = C \cos(h)$ , где  $h$  — высота наблюдаемого объекта над плоскостью горизонта. Другими словами, наблюдение объектов вблизи зенита практически не искажается коллимацией, а точное определение коллимации следует производить при наблюдении объектов, лежащих вблизи плоскости горизонта.

Как видно из рис. 4.5, при КП отсчет по лимбу  $\Pi''$  будет меньше правильного отсчета  $\Pi'$  на величину  $x$ , а при КЛ отсчет  $\Pi''$  будет больше правильного отсчета<sup>1</sup>  $\Pi''$  на ту же величину  $x$ , т. е.

$$\Pi' = \text{КП} + x, \quad (4.1)$$

$$\Pi' \pm 180^\circ = \text{КЛ} - x, \quad (4.2)$$

где отсчет  $\Pi''$  при «круге право» обозначен как КП, а при «кру-

---

<sup>1</sup> Знак «−» выбирается, если значение КЛ − КП положительно и близко к  $180^\circ$ ; знак «+» выбирается, если значение КЛ − КП отрицательно и близко к  $-180^\circ$ .

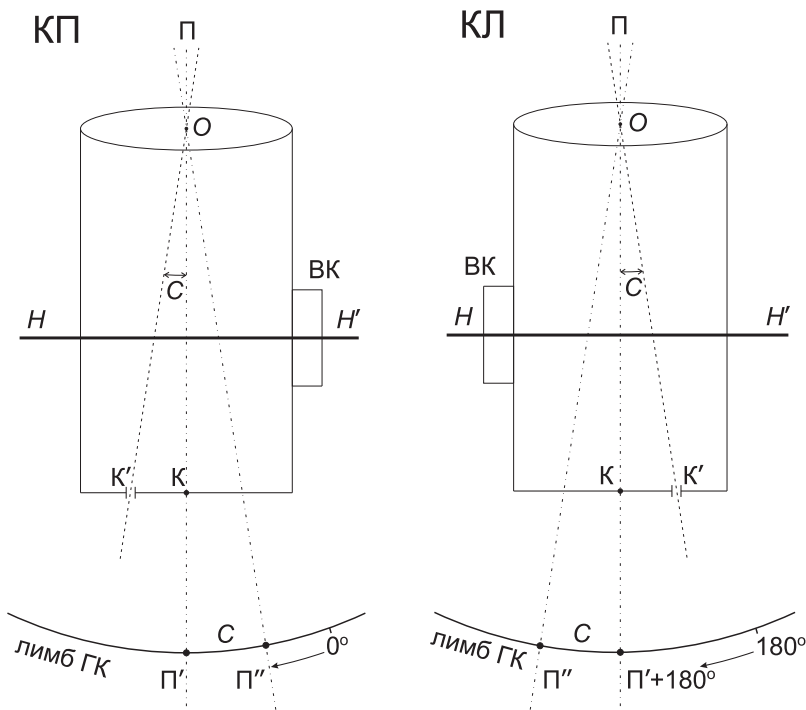


Рис. 4.5. Определение коллимационной погрешности теодолита

ге лево» — КЛ. Следовательно,

$$\Pi' = \frac{(\text{КП} + \text{КЛ}) \pm 180^\circ}{2}, \quad (4.3)$$

$$x = \frac{(\text{КЛ} - \text{КП}) \pm 180^\circ}{2}. \quad (4.4)$$

Для проверки теодолита с *двусторонней* отсчетной системой по лимбу необходимо:

- привести ось вращения прибора в отвесное положение;
- навести зрительную трубу на удаленную, отчетливо види-

мую цель и сделать отсчет КЛ по горизонтальному кругу;  
— перевести трубу через зенит, навести ее на ту же цель  
и вновь сделать отсчет КП по горизонтальному кругу.

Разность отсчетов КЛ – КП, полученных при двух положениях вертикального круга, должна быть равна  $180^\circ$ . Отклонение разности от  $180^\circ$ , согласно формуле (4.4), равно двойной коллимационной погрешности.

В теодолитах с *односторонней* системой отсчетов по лимбу разность отсчетов КЛ – КП будет искажена не только влиянием коллимационной погрешности  $C$ , но и влиянием эксцентриситета алидады, величина которого в отдельных образцах теодолитов может достигать  $\pm 1'$ . Определение двойной коллимационной погрешности указанных теодолитов следует выполнять следующим образом.

Ось вращения теодолита приводят в отвесное положение, визируют на одну и ту же точку при двух положениях вертикального круга и получают по горизонтальному кругу разность отсчетов  $КЛ_1 - КП_1$ .

Затем открепляют винт подставки, поворачивают теодолит в подставке на  $180^\circ$ , приводят вертикальную ось вращения прибора в отвесное положение, вновь наводят *на ту же точку* и получают разность  $КЛ_2 - КП_2$ . Величина двойной коллимационной погрешности равна<sup>2</sup>:

$$2C = \frac{(КЛ_1 - КП_1 \pm 180^\circ) + (КЛ_2 - КП_2 \pm 180^\circ)}{2}. \quad (4.5)$$

Фактически по формуле (4.5) вычисляется величина  $2x$ , а не  $2C$ . Для повышения точности определения коллима-

---

<sup>2</sup> Правило выбора знака см. в сноске 1.



ции следует наблюдать объекты, расположенные максимально близко к плоскости горизонта.

Для того чтобы исправить коллимацию, необходимо выставить на горизонтальном круге «истинный» отсчет (точка  $\Pi'$  на рис. 4.5), т. е. отсчет, исправленный за коллимацию. Определение «истинного» отсчета для теодолитов с двухсторонней системой снятия отсчетов по горизонтальному кругу осуществляется следующим образом:

$$\begin{aligned} 2C &= КЛ - КП \pm 180^\circ, \\ 2C - 2C &= КЛ - КП \pm 180^\circ - 2C, \\ 0^\circ &= (КЛ - C) - (КП + C) \pm 180^\circ, \end{aligned} \quad (4.6)$$

а для теодолитов с односторонней системой отсчетов вычисляется как

$$\begin{aligned} 4C &= (КЛ_1 - КП_1 \pm 180^\circ) + (КЛ_2 - КП_2 \pm 180^\circ), \\ 4C - 4C &= (КЛ_1 - КП_1 \pm 180^\circ) + \\ &+ (КЛ_2 - КП_2 \pm 180^\circ) - 4C, \\ 0^\circ &= (КЛ_1 - C) - (КП_1 + C) \pm 180^\circ (КЛ_2 - C) - \\ &- (КП_2 + C) \pm 180^\circ. \end{aligned} \quad (4.7)$$

*«Истинным» отсчетом для обоих случаев является значение  $(КЛ - C)$  для  $КЛ$  и  $(КП + C)$  для  $КП$ . Величина  $C$  входит в эти соотношения с учетом своего знака. После выставления исправленного отсчета для соответствующего круга объект-марка сместится с креста сетки нитей. Объект необходимо вернуть в крест сетки нитей. Для этого отвернуть кол-*

пачок и шпилькой при слегка отпущенных вертикальных исправительных винтах переместить оправу сетки при помощи боковых исправительных винтов до совмещения перекрестия сетки с изображением наблюдаемой точки. Затем снова производится полная процедура определения коллимации. Точная установка перпендикулярности осей, т. е. исправление коллимации, обычно достигается в несколько приемов.

## Место зенита вертикального круга

*Местом зенита* (MZ) называют отсчет по вертикальному кругу, который соответствует направлению визирной оси трубы в истинный зенит. Для идеального инструмента  $MZ = 90^\circ$ .

Место зенита MZ вертикального круга следует определять при тех же условиях, что и коллимационную ошибку. Перед взятием отсчетов приводят пузырек уровня при вертикальном круге на середину (за исключением приборов с компенсатором). Вычисление и исправление MZ производят одновременно с определением и исправлением коллимации. Значение MZ определяется по отсчетам вертикального круга в двух положениях инструмента при наведении на один предмет, расположенный вблизи горизонта (в том случае, если MZ определяется одновременно с коллимацией).

Введем понятие «основной круг» или «основное положение верхней части теодолита». Основным считается такое положение, при котором с увеличением зенитного расстояния трубы отсчеты по вертикальному кругу возрастают. Как правило, это положение «круг лево». Второе положение назовем дополнительным [1]. Обозначим отсчеты по вертикальному кругу при

основном положении через МО и при дополнительном положении — через МД.

Для любого типа теодолита при произвольно установленном круге место зенита МЗ вычисляется по одной из следующих формул:

$$MZ = \frac{KL + KP}{2} \pm 180^\circ, \quad (4.8)$$

$$MZ = \frac{KL + KP}{2}, \quad (4.9)$$

где КЛ и КП — отсчеты по вертикальному кругу при наведении на неподвижный объект. Выбор формулы производится следующим образом:

- если  $MO < MD$ , то формула (4.8);
- если  $MO > MD$ , то формула (4.9).

Кроме того, если известно, что место зенита мало ( $359^\circ - 360^\circ - 1^\circ$ ), то применяется формула (4.9).

Можно сделать выбор формулы опытным путем: если при переводе трубы через зенит *нулевой отсчет* проходит через индекс отсчетного устройства, то используется формула (4.8), если не проходит — то формула (4.9). Правило действует при любом месте зенита.

Во всех случаях если при вычислении по формуле (4.8) получится  $(KL + KP)/2 > 180^\circ$ , то перед  $180^\circ$  берется знак «−», если  $< 180^\circ$ , то «+».

## Вычисление зенитного расстояния

Метод вычисления зенитного расстояния зависит от того, было ли предварительно определено место зенита или нет.

**При известном месте зенита.**

$$Z = MO - MZ, \quad (4.10)$$

$$Z = MZ - MD. \quad (4.11)$$

Зенитное расстояние всегда положительная величина, лежащая в пределах от 0 до  $180^\circ$ . Поэтому при получении отрицательного значения необходимо прибавить  $360^\circ$ .

**Место зенита неизвестно.**

Сделаны отсчеты по вертикальному кругу при двух положениях:

$$Z = \frac{MO}{2} - \frac{MD}{2} + 180^\circ, \quad (4.12)$$

где  $180^\circ$  прибавляется, если  $Z$  получается отрицательным. Формула действует при любом  $MZ$ .

Если значения  $MZ$  у теодолита получились более установленной величины, то значение  $MZ$  вертикального круга теодолита уменьшают перемещением сетки в вертикальном направлении юстировочными винтами сетки нитей. Для юстировки  $MZ$  устанавливают на вертикальном круге исправленный отсчет, определяемый следующим образом:

$$MZ = \frac{KЛ + КП}{2}, \quad (4.13)$$

$$MZ - MZ = \frac{KЛ + КП}{2} - MZ, \quad (4.14)$$

$$0 = \frac{(KЛ - MZ) + (КП - MZ)}{2}. \quad (4.15)$$

Таким образом, исправленным отсчетом будет являться  $КЛ - МZ$  либо  $КП - МZ$ .

Далее юстировочными винтами перемещают оправу с сеткой до совмещения горизонтальной нити с изображением выбранной цели. После этого необходимо убедиться в том, что визирная ось трубы перпендикулярна к оси вращения трубы и горизонтальная нить сетки перпендикулярна к вертикальной оси вращения теодолита. Юстировку  $МZ$  в теодолитах с компенсаторами производят только в условиях мастерских смещением специальной юстировочной призмы.

Для теодолита GeoBox TE-02 *обязательными ежедневными поверками* являются поверки цилиндрического уровня при алидаде, коллимации и места нуля вертикального круга. Поверки должны вестись в соответствии с паспортом инструмента [15]. Поверку коллимационной погрешности, в случае если нет возможности обеспечить две длинных базы измерений, можно проводить по методике, описанной выше, в варианте двусторонней отсчетной системы. Проверку и программное корректирование места зенита вертикального круга проводят строго в соответствии с пунктом 7 паспорта инструмента.

## 4.2. Методика ориентации инструмента

При проведении наблюдений инструмент устанавливается, горизонтируется. После этого производятся текущие поверки инструмента [15] (коллимация и место зенита), чтобы убедиться в его работоспособности и пригодности к наблюдениям. Взамен окуляра к инструменту присоединяется насадка для наблюдений на малых зенитных расстояниях (рис. 4.6).



Рис. 4.6. Насадка теодолита GeoBox TE-02 для наблюдений на малых зенитных расстояниях

Подбираем ближайший момент времени из эфемерид Полярной звезды по звездному времени. За 10 мин до этого момента выставляем на горизонтальном круге отсчет, равный соответствующему эфемеридному азимуту (работаем только при одном «круге лево»). Для этого выполняем следующие операции:

1. Открыв горизонтальный круг зажимным винтом горизонтального наведения, выставляем поворотом алидады максимально близкое к эфемеридному значение азимута.

2. Закрепив горизонтальный круг зажимным винтом, винтом точного горизонтального наведения выставляем точное эфемеридное значение азимута.
3. Нажатием на кнопку «Hold» блокируем изменение показаний горизонтального круга при повороте алидады.
4. Открыв вертикальный круг зажимным винтом вертикального наведения, грубо выставляем эфемеридное зенитное расстояние Полярной звезды.
5. Закрепив вертикальный круг зажимным винтом вертикального наведения, винтом точного вертикального наведения устанавливаем точное значение эфемеридного зенитного расстояния Полярной звезды.
6. Открыв горизонтальный круг зажимным винтом, поворачивая инструмент по азимуту, наводим трубу на Полярную звезду. Приводим звезду в центр креста нитей, закрепляем горизонтальный круг и, действуя винтом точного горизонтального наведения и винтом точного вертикального наведения, удерживаем звезду в кресте нитей.
7. При совпадении эфемеридного момента со звездным временем по вспомогательному хронометру помощник дает команду на прекращение ведения Полярной звезды винтами точного наведения.
8. Повторное нажатие на кнопку «Hold» разблокирует изменение показаний горизонтального круга при повороте алидады.
9. Если в дальнейшем не планируется наблюдать Полярную звезду, то следует заменить зенитную окулярную насадку на рабочий окуляр. При этом необходимо с помощью яркого источника света (фонарика) тщательно проверить пе-

реднюю и заднюю линзы окуляра и наружную поверхность коллимационной пластины теодолита на наличие загрязнений. При наличии даже *минимальных* следов загрязнений или *подозрений* на них *обязательно* очистить поверхности.

После осуществления всей последовательности действий отсчет по ГК должен быть равен азимуту Полярной. Это обеспечивает отсчет, равный  $0^\circ$  на юге. После этого наводимся на какой-либо предмет тем же КЛ и снимаем отсчет по ГК, получив тем самым азимут этого предмета. Таким образом, мы привязали наш инструмент к ориентиру и, если случайно произойдет сбой, можем проконтролировать ориентацию инструмента. Все данные записываются в журнал наблюдений.

**Внимание!** После ориентации инструмента в течение всей ночи наблюдений *запрещается* нажимать кнопку L/R, меняющую направление отсчета по ГК, и кнопку «Hold». Если подобное произойдет, то процедуру ориентации инструмента по Полярной звезде необходимо повторить!

### 4.3. Определение широты пункта наблюдения

#### Определение широты по наблюдениям Полярной звезды

Для определения широты по наблюдениям Полярной звезды проводят измерение зенитного расстояния Полярной и соответствующих моментов времени при КП и КЛ [6].

При каждом положении круга инструмента (КП и КЛ) делаются наведения на Полярную. По эфемеридам выставляем



азимут и высоту Полярной для выбранного момента времени и, действуя винтом точного вертикального наведения и винтом точного горизонтального наведения, приводим звезду в центр сетки нитей. Наблюдатель, удерживая Полярную звезду в центре креста нитей, в момент, когда с его точки зрения наведение на звезду является наиболее точным, нажимает на кнопку пульта фиксации момента времени, прекращая одновременно с этим ведение звезды по азимуту и высоте. В журнал наблюдений (см. прил. 2, рис. 2) записываются момент времени, показания горизонтального и вертикального кругов. Далее процедура повторяется для другого положения круга. Между наблюдениями на разных кругах снимаются и записываются в журнал показания барометра и термометра. Все вышеперечисленные действия составляют один полный прием наблюдений.

### Определение широты по наблюдениям звезд в меридиане

**Внимание!** Ведение звезды по азимуту *не допускается!*

Измерение зенитного расстояния ведется *только на средней вертикальной нити* инструмента.

Наблюдение обеих звезд пары ведется *при одном положении круга* (как правило, это КЛ).

По вычисленным эфемеридам наблюдения пар звезд в меридиане выбираем удобную по времени пару. Примерно за 8—10 мин разворачиваем инструмент в южную или северную сторону меридиана в зависимости от того, какая звезда пары кульминирует раньше. На горизонтальном круге (положение инструмента — «круг лево») выставяем отсчет по вычисленным

эфемеридам с упреждением по азимуту относительно меридиана навстречу движению звезды (положение «до меридиана»). На вертикальном круге выставляем эфемеридное зенитное расстояние этой звезды. Теодолит ТЕ-02 имеет прямое изображение, и, следовательно, звезда пойдет слева направо, практически параллельно горизонтальной нити. Когда звезда появляется в поле зрения трубы, подводим звезду на горизонтальную нить винтом точного вертикального наведения.

Для инструмента без окулярного микрометра, когда звезда находится вблизи средней вертикальной нити, на звезду наводят среднюю горизонтальную нить сетки и удерживают на ней винтом точного вертикального наведения. Непосредственно при пересечении звездой вертикальной нити наблюдатель прекращает ведение по высоте. В момент пересечения вертикальной нити наблюдатель нажимает кнопку пульта фиксации момента времени, снимает отсчет по вертикальному кругу и сообщает его помощнику для записи в журнал (см. прил. 2, рис. 3). Момент времени также фиксируется помощником в журнале наблюдений.

После прохождения звездой вертикальной нити и фиксации результатов наблюдения наблюдатель наводящим винтом горизонтального круга поворачивает трубу по азимуту в направлении суточного движения так, чтобы средняя вертикальная нить сетки оказалась перед наблюдаемой звездой. Величину угла выноса средней вертикальной нити перед звездой следует выбрать минимально необходимой для того, чтобы успеть повторить все действия, описанные в предыдущем абзаце.

Всего необходимо провести три измерения зенитного расстояния и момента времени для прохождения звезды через среднюю вертикальную нить сетки в положении звезды «до меридиана».

После проведенных трех измерений инструмент для этой же звезды по вычисленным эфемеридам устанавливается по азимуту в положение «после меридиана». В этом положении проводятся еще три измерения зенитного расстояния и момента времени для прохождения звезды через среднюю вертикальную нить сетки, как описано выше.

Шесть измерений при симметричных положениях звезды относительно меридиана составляют полный цикл наблюдений одной звезды пары. После завершения цикла наблюдений первой звезды пары такой же цикл из шести измерений проводится для второй звезды пары. Для этого производится перевод инструмента на вторую звезду путем поворота алидады по азимуту. Перекладывать трубу через зенит в этой программе нельзя!

Моменты прохождения звездой центральной нити для первого измерения в положениях «до меридиана» и «после меридиана» должны быть приблизительно равны эфемеридным моментам. Невыполнение этого условия говорит о том, что инструмент сбит по азимуту.

#### 4.4. Определение приближенного астрономического азимута по часовому углу Полярной звезды

Определение астрономического азимута по часовому углу Полярной с помощью среднего оптического теодолита может быть выполнено с ошибкой  $3\text{--}5''$  при условии тщательного исследования правильности вращения горизонтальной оси и учета соответствующей поправки горизонтального угла  $Q$  между Полярной и земным предметом за неправильную форму цапф. Для определения астрономического азимута с указанной точностью астрономические координаты пункта достаточно знать приближенно со средними квадратическими ошибками  $\Delta\varphi = 10''$ ,  $\Delta\lambda = \Delta u = 1^\circ$ .

Для определения азимута с ошибкой  $3''$  необходимо выполнить шесть приемов измерения угла  $Q$  между Полярной и земным предметом, а с ошибкой  $5''$  — три-четыре приема.

Каждый прием измерения угла  $Q$  выполняется в следующем порядке:

— при КЛ:

- 1) наведение трубы на земной предмет, запись отсчетов по горизонтальному лимбу;
- 2) наведение трубы на Полярную, запись отсчетов по часам (секундомеру) и по горизонтальному лимбу;

— при КП:

- 1) наведение трубы на Полярную, запись отсчетов по часам (секундомеру) и по горизонтальному лимбу;

- 2) наведение трубы на местный предмет, запись отсчетов по горизонтальному лимбу.

Результаты наблюдений заносятся в журнал наблюдений (см. прил. 2, рис. 1).

## 4.5. Определение долготы и поправки хронометра по наблюдениям звезд на равных высотах методом Цингера

### Методика определения поправки хронометра по наблюдениям методом Цингера

**Внимание!** Ведение звезды по зенитному расстоянию *не допускается!*

После ориентирования инструмента выбираем подходящую по времени пару, выставляем отсчеты по эфемеридам. После этого и до окончания наблюдения обеих звезд пары *недопустимо* откреплять зажимной винт вертикального наведения и пользоваться винтом точного вертикального наведения.

При появлении звезды в поле зрения подводим ее к вертикальной нити винтом точного горизонтального наведения, но не сажаем звезду на нить, а ведем рядом. Когда звезда пересекает горизонтальную нить, наблюдатель нажимает кнопку пульта фиксации момента времени. Момент времени записывается в журнал (см. прил. 2, рис. 4). Всего должно быть три отсчета (по числу нитей у теодолита).

Затем, вращая алидаду по азимуту, поворачиваем инструмент примерно на  $180^\circ$ , закрепляем алидаду и выставляем винтом точного горизонтального наведения точное эфемеридное

значение азимута второй звезды пары. Далее действия повторяются, и мы получаем три отсчета моментов времени для второй звезды пары.

## Типовые вопросы

1. Опишите возможности работы с горизонтальным кругом электронного цифрового теодолита GeoBox TE-02.
2. Сделайте выводы о возможности реализации на теодолите GeoBox TE-02 метода полных круговых приемов для измерения горизонтальных углов.
3. Укажите, при выполнении каких условий возможно корректное измерение вертикальных углов теодолитом GeoBox TE-02.
4. Опишите предварительные этапы подготовки теодолита GeoBox TE-02 к работе.
5. Что характеризует величина места нуля теодолита GeoBox TE-02 в случае, если он полностью исправен и проходит все обязательные поверки.
6. К каким последствиям для измерения вертикальных и горизонтальных углов будет приводить неустраненная коллимационная погрешность инструмента?
7. Что может приводить к большому значению коллимационной ошибки?
8. Рассчитайте, какую погрешность в ориентации инструмента по азимуту даст неучтенная поправка механического хронометра в  $1^m$ .
9. Каким способом должно производиться ведение Полярной звезды при ориентации инструмента?

10. Учитывая, что для определения широты по Полярной звезде необходимо измерить высоту Полярной, укажите, в какой части суточной параллели звезды это выгоднее всего делать.
11. С какой целью определение широты по наблюдениям пар звезд в меридиане ведется при одном положении круга инструмента?
12. Какая поверка обязательно должна выполняться и контролироваться в течение ночи наблюдений, чтобы были выполнены главные условия метода Цингера?
13. С чем связано, что метод Цингера реализуется при одном положении круга инструмента?
14. Допустимо ли ведение звезды по азимуту в методе Цингера? Есть ли причины, ограничивающие это ведение?
15. Как влияет на коллимационную погрешность рост влажности в течение ночи наблюдений?
16. Какие действия с теодолитом могут привести к необходимости повторного ориентирования инструмента?
17. На каких этапах наблюдений необходимо проверять и выводить фокусировку трубы?
18. Почему фокусировку инструмента необходимо проверять в темное время суток?
19. Что может приводить к самопроизвольному смещению цилиндрического уровня исправного инструмента?
20. Опишите возможные процедуры определения углового расстояния боковых нитей от средней с максимальной точностью.
21. Какова процедура исправления места нуля у теодолита GeoBox TE-02?

22. По какой координате необходимо вести трубу инструмента непосредственно перед пересечением звездой нити в меридианных наблюдениях?
23. В какую сторону следует вращать наводящие винты инструмента для получения максимально стабильных результатов?
24. Как проверить стабильность установки инструмента при наблюдениях?
25. Возможно ли провести ориентацию инструмента не по Полярной звезде?
26. Возможно ли использовать Полярную звезду для ориентации инструмента только один раз за период практики?
27. Необходимо ли пользоваться центриром инструмента и всегда устанавливать его точно над одной точкой?



## 5. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ (КАМЕРАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА)

При обработке журналов наблюдений существует ряд предварительных операций, которые осуществляются для всех программ наблюдений.

1. Точность хода компьютерных часов (не хуже  $10^{-3}$  с), синхронизированных по атомным эталонам систем спутникового глобального позиционирования, заведомо превышает требуемую для программ наблюдений. Поэтому никаких дополнительных поправок часов в полученные моменты времени не вводится.
2. В журналах фиксируется время момента наблюдения, полученное от спутниковой навигационной системы в шкале UTC (атомное координированное время, воспроизводящее среднюю солнечную шкалу времени, но единицей измерения является эфемеридная секунда). Алгоритмы обработки программ наблюдений подразумевают использование моментов звездного времени. Поэтому все моменты наблюдений, записанные в журналах, должны быть пересчитаны в моменты звездного времени и только после этого использоваться

в алгоритмах обработки наблюдений. Процедура пересчета подробно описана в разделе 3.2.

3. Все измеренные зенитные расстояния должны быть исправлены за рефракцию. Поправки за рефракцию берутся из таблиц «Средняя рефракция» и «Поправки к средней рефракции за температуру  $T$  и барометрическое давление  $B$ », публикуемых в АЕ (см. бумажное издание: в электронной версии таблицы рефракции отсутствуют) либо в постоянной части «Астрономического календаря» [16]. Полученные по таблицам поправки должны быть прибавлены к измеренным зенитным расстояниям.
4. При вычислениях в качестве экваториальных координат звезд следует брать координаты из таблицы АЕ «Видимые места звезд», интерполированные на дату наблюдения. Прямое восхождение брать с точностью до сотых временной секунды, склонение — до десятых угловой секунды.

## 5.1. Методы обработки программ наблюдений

**Внимание!** В случае, если измерения в программе наблюдений проводятся для нескольких нитей в поле зрения инструмента, *запрещается* производить усреднение измеренных величин и их приведение на среднюю нить. Результаты наблюдений для каждой нити обрабатываются отдельно. Усреднять допускается только итоговые результаты обработки.

В качестве приближенных значений координат пункта наблюдения (для учебной астрономической обсерватории кафедры астрономии и геодезии) необходимо использовать следующие

щие величины:

$$\begin{aligned}\varphi &= +56^{\circ}49'40'', \\ \lambda &= 04^h02^m32.68^s \text{ в. д.}\end{aligned}\tag{5.1}$$

После определения широты пункта наблюдений по измеренному зенитному расстоянию Полярной звезды в качестве приближенного значения должна использоваться широта, полученная в этой программе.

### Определение широты по наблюдениям Полярной звезды

Обработка наблюдений ведется *раздельно* для измерений при КП и КЛ.

Обработка наблюдений ведется в следующем порядке:

1. Зафиксированные моменты времени, в том случае, если они измерены по средней шкале, перевести в моменты звездного времени. Алгоритм перевода описан в разделе 3.2.
2. Отсчеты вертикального круга исправить за место зенита MZ инструмента. Исправленное значение вертикального угла  $z_{\text{изм}}$  вычисляется в соответствии с (4.10) или (4.11).
3. Для измеренных в приеме температуры и давления по соответствующим таблицам «Астрономического ежегодника» либо постоянной части «Астрономического календаря» определить значение рефракции  $\rho$  с точностью до угловых секунд.

4. Вычислить исправленное за рефракцию истинное значение зенитного расстояния:

$$z_{\text{испр}} = z_{\text{изм}} + \rho. \quad (5.2)$$

5. Для вычисления широты необходимо воспользоваться разделом АЕ «Широта по наблюдениям Полярной». Раздел содержит три таблицы для определения трех поправок к измеренной высоте Полярной звезды над горизонтом. Поэтому измеренные и исправленные за рефракцию зенитные расстояния следует пересчитать в высоту по соотношению  $z + h = 90^\circ$ . Обратите внимание на имеющиеся примечания к таблицам.

Из первой таблицы определяется первая поправка  $\Delta\varphi_1$ . Для этого табличные значения должны быть интерполированы на момент наблюдений, взятый с точностью минимум до секунд.

По второй таблице определяется вторая поправка  $\Delta\varphi_2$  как функция двух переменных: высоты и звездного времени наблюдения. Для получения поправки следует сделать двумерную интерполяцию табличных значений на полученные при наблюдениях высоту и момент времени. Высоту следует брать из журналов наблюдений с точностью до угловых минут, а время — с точностью до временных минут.

Третья таблица содержит третью поправку  $\Delta\varphi_3$  также как функцию двух переменных: даты наблюдений и момента звездного времени наблюдений. Для получения поправки следует сделать двумерную интерполяцию табличных значений на дату и полученное при наблюдениях время. Время

при интерполяции необходимо брать с точностью до десятых долей часа.

6. По получении всех поправок вычислить итоговое значение широты:

$$\varphi = h + \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_3. \quad (5.3)$$

После завершения цикла расчетов широты для одного положения вертикального круга расчеты повторить для измерений с другим положением круга. В итоге вычислить усредненное по двум кругам значение широты.

Результаты расчетов поместить в таблицу (см. ниже).

После выполнения расчетов необходимо провести статистическую обработку полученных результатов для всех приемов.

## Задание

Проведите анализ на выпадающие значения, определите среднее значение широты, ее среднеквадратичное отклонение, укажите доверительный интервал для вероятности 0.97.

Определение широты по наблюдениям Полярной звезды

№ приема	Круг КЛ/КП	$s$ , $hh\ mm\ ss$	$z_{\text{изм}}$ , $^{\circ}\ ' \ ''$	Рефр., $\rho''$	$z_{\text{испр}}$ , $^{\circ}\ ' \ ''$	$h$ , $^{\circ}\ ' \ ''$	$\Delta\varphi_1$ , $' \ ''$	$\Delta\varphi_2$ , $' \ ''$	$\Delta\varphi_3$ , $''$	$\varphi$ , $^{\circ}\ ' \ ''$	$\varphi_{\text{средн}}$ в приеме
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

## Определение широты по наблюдениям пар звезд в меридиане при одном положении вертикального круга

При вычислении широты по измеренному зенитному расстоянию звезд в меридиане мы предполагаем, что наблюдение звезды производится точно в меридиане. В реальности, из-за неточности ориентации инструмента и наблюдения нескольких положений звезды вблизи меридиана и симметрично относительно него, это не так. Необходимо исправить измеренные значения зенитного расстояния за внемеридиональные наблюдения.

Цикл вычислений широты проводится для каждой пары из южной и северной звезд, выделяются следующие этапы:

1. После обработки журнала наблюдений и выборки из АЕ *видимых*  $\alpha_v$  и  $\delta_v$  ( $\alpha_v^N$ ,  $\delta_v^N$  — для северной звезды в нижней кульминации;  $\alpha_v^S$ ,  $\delta_v^S$  — для южной звезды в верхней кульминации) звезд пары прямые восхождения звезд исправить поправками за влияние суточной аберрации по формуле

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= 0.0213^s \cos \varphi_0 \sec \delta \cos t \cong \pm 0.0213^s \cos \varphi_0 \sec \delta, \\ \alpha^{N, S} &= \alpha_v^{N, S} + \Delta\alpha, \end{aligned} \tag{5.4}$$

где  $\varphi_0$  — приближенное значение широты, используемое при вычислении эфемерид; знак «плюс» берется для южной звезды ( $t \simeq 0^h$ ), знак «минус» — для северной звезды ( $t \simeq 12^h$ ). Часовой угол в (5.4) приближенно вычисляется

по формулам

$$\begin{aligned} t^S &= s - \alpha_v^S, \text{ верхняя кульминация,} \\ t^N &= s - \alpha_v^N \pm 12^h, \text{ нижняя кульминация,} \end{aligned} \quad (5.5)$$

где  $s$  — момент звездного времени наблюдений.

2. Вычислить часовые углы звезд в моменты каждого измерения их зенитных расстояний по формулам

$$\begin{aligned} t_i^S &= s_i - \alpha^S, \text{ верхняя кульминация,} \\ t_i^N &= s_i - \alpha^N \pm 12^h, \text{ нижняя кульминация,} \end{aligned} \quad (5.6)$$

где  $s_i$  — звездное время в момент измерения зенитного расстояния, исправленное за ход хронометра. Индекс  $i$  здесь и далее соответствует порядковому номеру наблюдения зенитного расстояния звезды в положениях вблизи меридиана для северной или южной звезды пары. Таким образом,  $s = T + u$ , где  $T$  — показания звездного хронометра;  $u$  — поправка хронометра на момент времени измерений. В случае использования времени спутниковых навигационных систем оно непосредственно пересчитывается в звездное время, поправка за ход не вводится.

3. Для астрономического инструмента, у которого деления вертикального круга нанесены *по ходу часовой стрелки*, измеренное зенитное расстояние  $z'$  звезды определить по формуле

$$z' = M_z - z_{\text{КП}}^{\text{изм}} = z_{\text{КЛ}}^{\text{изм}} - M_z, \quad (5.7)$$

где  $M_z$  — место зенита инструмента.



Если деления оцифрованы против хода часовой стрелки, то  $z_{\text{КЛ}}^{\text{изм}} - M_z$  заменяется на  $M_z - z_{\text{КЛ}}^{\text{изм}}$ , а  $M_z - z_{\text{КП}}^{\text{изм}}$  заменяется на  $z_{\text{КП}}^{\text{изм}} - M_z$ .

4. Вычислив видимые зенитные расстояния  $z'$  южной и северной звезд, найти поправки за рефракцию  $\rho_S$  и  $\rho_N$ , пользуясь таблицами рефракции АЕ. Определив  $\rho_S$  и  $\rho_N$ , находят истинные зенитные расстояния  $z_i$  для каждого из моментов наблюдений южной и северной звезд пары:

$$z_i = z' + \rho. \quad (5.8)$$

5. Вычислить величины

$$z_{m0} = \varphi_0 - \delta^S, \quad (5.9)$$

$$z_{m0} = 180^\circ - (\delta^N + \varphi_0) \text{ в нижней кульминации,} \quad (5.10)$$

для обеих звезд пары.

6. Определить редукцию близмеридионального зенитного расстояния светила на меридиан для всех измеренных зенитных расстояний звезд пары:

$$\begin{aligned} r_i &= z_i - z_m^i, \text{ верхняя кульминация,} \\ r_i &= z_m^i - z_i, \text{ нижняя кульминация,} \end{aligned} \quad (5.11)$$

где  $z_m$  — искомое зенитное расстояние звезды в меридиане. Для принятых обозначений редукция  $r_i$  всегда положительна.

Для звезд в *верхней кульминации*

$$\sin\left(\frac{r_i}{2}\right) = \frac{\cos \varphi_0 \cos \delta}{\sin \frac{1}{2}(z_i + z_{m_0})} \sin^2 \frac{t_i}{2}. \quad (5.12)$$

Учитывая, что редукция  $r$  — малый угол,  $\sin\left(\frac{r_i}{2}\right)$  можно разложить в ряд до первой степени по  $r$  и получить следующее выражение для величины редукции:

$$r_i'' = \frac{2\varrho'' \cos \varphi_0 \cos \delta}{\sin \frac{1}{2}(z_i + z_{m_0})} \sin^2 \frac{t_i}{2}, \quad (5.13)$$

где  $\varrho'' = 206\,264.8$  — число секунд в радиане. Редукция, полученная по формуле (5.13), выражена в секундах дуги. Редукция на меридиан близмеридионального зенитного расстояния для звезды в нижней кульминации может быть вычислена также по формулам (5.12), (5.13), если часовой угол отсчитывать от северной части меридиана (т. е. вычесть  $12^h$  из стандартно определенного часового угла северной звезды в нижней кульминации).

По формуле (5.12) вычисляется редукция на меридиан  $r_i^N$ ,  $r_i^S$  для всех наблюдений зенитного расстояния северной и южной звезд пары.

7. Вычислить меридиональные зенитные расстояния для всех измерений зенитного расстояния северной и южной звезд пары:

$$\begin{aligned} z_m^i &= z_i - r_i, \text{ верхняя кульминация,} \\ z_m^i &= z_i + r_i, \text{ нижняя кульминация.} \end{aligned} \quad (5.14)$$

8. Для каждой из звезд пары по полученным меридиональным зенитным расстояниям (5.14) вычислить средние арифметические меридиональные зенитные расстояния звезд пары  $z_m^N$  и  $z_m^S$ .
9. По полученным средним меридиональным зенитным расстояниям вычислить широту места для данной пары звезд:

$$\varphi = \frac{1}{2} (\varphi_N + \varphi_S) = 90^\circ - \frac{1}{2} (\delta^N - \delta^S) + \frac{1}{2} (z_m^S - z_m^N) . \quad (5.15)$$

Формула (5.15) верна в случае, когда северная звезда пары наблюдается в нижней кульминации. Для случая верхней кульминации на севере вычисление ведется по формуле

$$\varphi = \frac{1}{2} (\varphi_N + \varphi_S) = \frac{1}{2} (\delta^N + \delta^S) + \frac{1}{2} (z_m^S - z_m^N) . \quad (5.16)$$

10. Вычислить разницу  $\varphi - \varphi_0$ . Если

$$|\varphi - \varphi_0| \geq 1'' , \quad (5.17)$$

то следует вернуться к этапу 5, используя в качестве  $\varphi_0$  рассчитанное на этапе 9 значение  $\varphi$ , и повторить расчет.

Приведенная выше процедура обработки наблюдений повторяется для всех пар звезд, наблюдавшихся в программе. В завершение расчета производится статистический анализ результатов, полученных по всем наблюдаемым парам звезд: отбрасываются выпадающие значения, находится среднее значение широты, ее среднеквадратичное отклонение, указывается доверительный интервал для вероятности 0.97.

## 5.2. Вычисление астрономического азимута земного предмета по наблюдениям Полярной звезды

### Поправки в отсчеты горизонтального круга и измеренное значение азимута

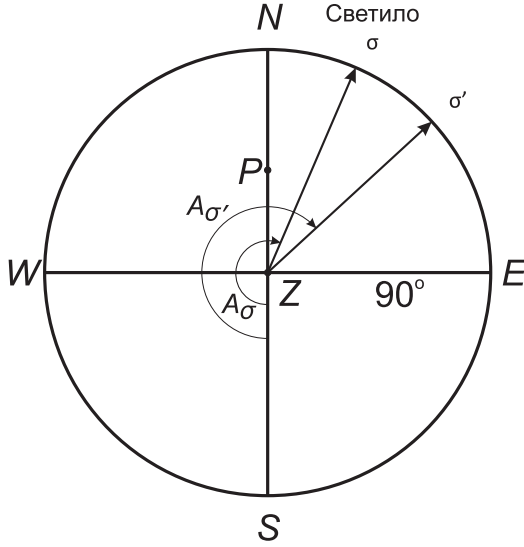
**Влияние коллимационной ошибки.** При наблюдении светила или объекта на некотором зенитном расстоянии  $z$  в отсчеты, снятые по горизонтальному кругу, необходимо ввести поправку

$$\Delta M_c = \frac{c}{\sin z} = c \operatorname{cosec} z. \quad (5.18)$$

Коллимационную ошибку принято считать положительной, если она приводит к уменьшению отсчета горизонтального круга, т. е. когда при обращении наблюдателя лицом к светилу визирная ось образует с правым концом горизонтальной оси угол, равный  $90^\circ - c$ . При этом считается, что деления на лимбе нанесены по ходу часовой стрелки. Коллимационная ошибка входит в отсчеты горизонтального круга при КП и КЛ с разными знаками.

**Поправка за влияние суточной аберрации.** Вследствие влияния суточной аберрации изображение светила смещается по дуге большого круга к апексу суточного движения (см. рисунок), к точке востока, на величину

$$\sigma\sigma' = 0.32'' \cos \varphi \sin \sigma E. \quad (5.19)$$



Определение поправки к азимуту светила за суточную абберрацию:  
 $\sigma$  — истинное положение светила;  $\sigma'$  — видимое положение светила;  
 $A_\sigma$  — истинный азимут светила (без влияния суточной абберрации);  
 $A_{\sigma'}$  — видимый азимут светила, искаженный суточной абберрацией

Из треугольника  $Z\sigma\sigma'$

$$\sin (A_{\sigma'} - A_\sigma) = \sin \sigma\sigma' \frac{\sin Z\sigma E}{\sin z}. \quad (5.20)$$

В силу того, что угол  $A_{\sigma'} - A_\sigma$  и дуга  $\sigma\sigma'$  суть малые величины, можно записать

$$A_{\sigma'} - A_\sigma = 0.32'' \cos \varphi \sin \sigma E \frac{\sin Z\sigma E}{\sin z}. \quad (5.21)$$

Из треугольника  $Z\sigma E$

$$\frac{\sin \sigma E}{\sin \left( \frac{3\pi}{2} - A_\sigma \right)} = \frac{\sin 90^\circ}{\sin Z\sigma E},$$

$$\sin \sigma E \sin Z\sigma E = -\cos A_\sigma. \quad (5.22)$$

Следовательно,

$$A_{\sigma'} - A_\sigma = -0.32'' \cos \varphi \frac{\cos A_\sigma}{\sin z},$$

$$A_{\sigma'} = A_\sigma - 0.32'' \cos \varphi \frac{\cos A_\sigma}{\sin z},$$

$$A_{\sigma'} = A_\sigma + \delta A, \quad (5.23)$$

$$\delta A = -0.32'' \cos \varphi \frac{\cos A_\sigma}{\sin z}. \quad (5.24)$$

Для азимута Полярной звезды можно принять  $\cos A_\sigma \simeq \cos 180^\circ = -1$  и тогда

$$\delta A = 0.32'' \frac{\cos \varphi}{\sin z}. \quad (5.25)$$

### Вычисление приближенного астрономического азимута ( $\pm 3-5''$ ) по часовому углу Полярной со средним моментом наблюдений

Входными данными для расчета азимута по одному приему наблюдений являются отсчеты по горизонтальному кругу на светило  $M_\sigma^{\text{КП}}$ ,  $M_\sigma^{\text{КЛ}}$  и на земной предмет  $M^{\text{КП}}$ ,  $M^{\text{КЛ}}$  а также моменты времени  $T_\sigma^{\text{КП}}$ ,  $T_\sigma^{\text{КЛ}}$  прохождения светила через вертикал с отсчетом  $M_\sigma$ . В расчете должны использоваться **видимые** экваториальные координаты  $(\alpha, \delta)$  Полярной на дату наблюдения. Широта пункта наблюдения  $\varphi$  должна быть из-

вестна с погрешностью не более  $10''$ . Поправка хронометра  $u$  при использовании времени спутниковых навигационных систем принимается равной нулю.

Если азимут Полярной вычисляется со средним в приеме моментом наблюдений [4], то вычисленный по формуле (1.35) азимут Полярной  $A'_\sigma$  необходимо не только исправить за влияние суточной аберрации, но и ввести дополнительную поправку  $\Delta A_w$ , вызываемую тем, что азимут Полярной, вычисленный со средним в приеме моментом наблюдений, вообще не равен азимуту Полярной, полученному как среднее арифметическое из ее азимутов, вычисленных для каждого из моментов наблюдений. Азимут Полярной, как и всякой другой звезды, в результате суточного вращения Земли меняется непропорционально времени, и указанная выше поправка  $\Delta A_w$  является поправкой за ускорение в движении Полярной по азимуту. Исправленный азимут звезды находят по формуле

$$A_\sigma = A'_\sigma + \Delta A_w. \quad (5.26)$$

Поправка за коллимацию при вычислениях со средним моментом наблюдения вводится автоматически, поскольку при вычислениях используются средние по КП и КЛ значения горизонтальных углов, а зенитное расстояние Полярной в одном приеме остается почти неизменным.

Вычисление астрономического азимута земного предмета в одном приеме наблюдений ведется в следующем порядке:

1. Вычислить средний момент наблюдения Полярной в приеме:

$$T_H = \frac{T_{\sigma}^{\text{КП}} + T_{\sigma}^{\text{КЛ}}}{2}. \quad (5.27)$$

2. Вычислить часовой угол Полярной на средний момент наблюдения:

$$t = T_H + u(T_H) - \alpha. \quad (5.28)$$

Поправку хронометра на средний момент наблюдения  $u(T_H)$  при использовании времени спутниковых навигационных систем принять равной нулю.

3. Вычислить с учетом известного часового угла промежуточное значение азимута Полярной  $A'_{\sigma}$  на средний момент наблюдения:

$$\tan A'_{\sigma} = -\frac{\cos \delta \sin t}{\cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos t}. \quad (5.29)$$

4. Рассчитать разность

$$\Delta T = |T_H - T_{\sigma}^{\text{КП}}| = |T_H - T_{\sigma}^{\text{КЛ}}|. \quad (5.30)$$

5. Для среднего момента наблюдения Полярной вычислить ее зенитное расстояние:

$$z = 90^{\circ} - \varphi + \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_3, \quad (5.31)$$

где поправки  $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\varphi_3$  берутся из «Астрономического ежегодника» — «Таблицы высот и азимутов Полярной» по



аргументам широты, высоты Полярной, времени и даты наблюдения. Интерполяция поправок на средний момент наблюдения обязательна. Высоту Полярной в этих вычислениях следует принять равной широте места наблюдения.

6. Вычислить поправку за ускорение в движении Полярной по азимуту, выраженную в угловых секундах:

$$\Delta A_w = 5.454 \left( \frac{\Delta T}{100} \right)^2 \frac{d^2 A}{dt^2}, \quad (5.32)$$

где  $\Delta T$  выражено в секундах времени;  $\frac{d^2 A}{dt^2}$  вычисляется как

$$\begin{aligned} \frac{d^2 A}{dt^2} = & -\frac{1}{2} \sin 2\varphi \operatorname{ctg} z \sin A'_\sigma - \\ & -\frac{1}{2} \cos^2 \varphi (\operatorname{ctg}^2 z + \operatorname{cosec}^2 z) \sin 2A'_\sigma. \end{aligned} \quad (5.33)$$

7. Вычислить поправку за суточную аберрацию, выраженную в угловых секундах:

$$\delta A = 0.32'' \frac{\cos \varphi}{\sin z}. \quad (5.34)$$

8. Рассчитать окончательное значение астрономического азимута Полярной звезды на средний момент наблюдения:

$$A_\sigma = A'_\sigma + \Delta A_w - \delta A. \quad (5.35)$$

9. Вычислить отсчет по горизонтальному кругу на Полярную для среднего момента наблюдений:

$$M_\sigma = \frac{1}{2} (M_\sigma^{\text{КЛ}} + (M_\sigma^{\text{КП}} \pm 180^\circ)). \quad (5.36)$$

10. Рассчитать значение места юга горизонтального круга:

$$M_S = M_\sigma - A_\sigma . \quad (5.37)$$

11. Вычислить отсчет по горизонтальному кругу на земной объект:

$$M = \frac{1}{2} (M^{\text{КЛ}} + (M^{\text{КП}} \pm 180^\circ)) . \quad (5.38)$$

12. Вычислить астрономический азимут земного объекта:

$$A = M - M_S . \quad (5.39)$$

Полученные при вычислениях в разных приемах, но при одной установке инструмента значения места юга  $M_S$  позволяют контролировать качество наблюдений и расчетов в приеме. В идеальном случае все значения места юга для различных приемов должны совпадать. Отклонения значения места юга в приеме от среднего по всем приемам, превышающие две-три величины заявленной погрешности инструмента, могут указывать на ошибку при наблюдениях или в расчете.

По завершении расчетов всех приемов наблюдений азимута земного предмета все значения азимута, полученные при одной установке инструмента, должны быть подвергнуты стандартной процедуре статистической обработки результатов многократных измерений случайной величины. При расчете должна быть учтена приборная погрешность инструмента. В итоге должны быть получены среднее значение азимута и его доверительный интервал для выбранной доверительной вероятности (доверительную вероятность принять равной 0.97).

### 5.3. Вычисление поправки хронометра по наблюдениям пар звезд на равных высотах методом Цингера

В методе Цингера используется следующий прием для вычисления редукции  $r$ , определенной в разделе 1.3.

**Внимание!** В расчетах должны использоваться *видимые* экваториальные координаты звезд на момент наблюдения. Экваториальные координаты для расчета должны быть взяты с точностью не хуже, чем  $0.01^s$ .

Пусть  $\alpha_e$ ,  $\delta_e$  и  $\alpha_w$ ,  $\delta_w$  — видимые координаты восточной и западной звезды,  $T_e$  и  $T_w$  — соответственные моменты наблюдений этих звезд на одной и той же высоте по звездному времени,  $u$  — поправка часов,  $\varphi$  — широта места наблюдения. Так как обе звезды наблюдаются на одном и том же зенитном расстоянии  $z$ , то по формулам сферического треугольника имеем:

$$\begin{aligned} \sin \varphi \sin \delta_e + \cos \varphi \cos \delta_e \cos t_e &= \\ &= \sin \varphi \sin \delta_w + \cos \varphi \cos \delta_w \cos t_w . \end{aligned} \quad (5.40)$$

Часовые углы восточной и западной звезд определим симметрично относительно меридиана:

$$\begin{aligned} t_w &= (T_w + u) - \alpha_w, \\ t_e &= \alpha_e - (T_e + u) . \end{aligned} \quad (5.41)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned}
\alpha &= \frac{1}{2} (\alpha_w + \alpha_e), \\
\delta &= \frac{1}{2} (\delta_w + \delta_e), \\
\beta &= \frac{1}{2} (\alpha_e - \alpha_w), \\
\varepsilon &= \frac{1}{2} (\delta_w - \delta_e), \\
t &= \frac{1}{2} (t_w + t_e) = \frac{1}{2} (\alpha_e - \alpha_w - T_e + T_w), \\
r &= \frac{1}{2} (t_w - t_e) = u + \frac{1}{2} (T_e + T_w) - \frac{1}{2} (\alpha_e + \alpha_w). \quad (5.42)
\end{aligned}$$

Следовательно, искомая поправка часов может быть записана в виде

$$\begin{aligned}
u &= \frac{1}{2} (\alpha_e + \alpha_w) - \frac{1}{2} (T_e + T_w) + r = \\
&= \alpha - \frac{1}{2} (T_e + T_w) + r, \quad (5.43)
\end{aligned}$$

где полуразность часовых углов  $r$  западной и восточной звезд пары подлежит дальнейшему определению, а прочие элементы (5.43) известны.

Из (5.42) следует:

$$\begin{aligned}
\delta_w &= \delta + \varepsilon, \\
\delta_e &= \delta - \varepsilon, \\
t_e &= \alpha_e - (T_e + u) = t - r, \\
t_w &= (T_w + u) - \alpha_w = t + r. \quad (5.44)
\end{aligned}$$

Подставив (5.44) в (5.40), получим

$$\begin{aligned} & \sin \varphi \sin(\delta - \varepsilon) + \cos \varphi \cos(\delta - \varepsilon) \cos(t - r) = \\ & = \sin \varphi \sin(\delta + \varepsilon) + \cos \varphi \cos(\delta + \varepsilon) \cos(t + r). \end{aligned} \quad (5.45)$$

Из чего следует

$$\begin{aligned} & \cos \varphi (\cos(\delta - \varepsilon) \cos(t - r) - \cos(\delta + \varepsilon) \cos(t + r)) = \\ & = \sin \varphi (\sin(\delta + \varepsilon) - \sin(\delta - \varepsilon)) \end{aligned} \quad (5.46)$$

и

$$\begin{aligned} & \cos \varphi ((\cos \delta \cos \varepsilon + \sin \delta \sin \varepsilon) (\cos t \cos r + \sin t \sin r) - \\ & - (\cos \delta \cos \varepsilon - \sin \delta \sin \varepsilon) (\cos t \cos r + \sin t \sin r)) = \\ & = 2 \sin \varphi \sin \varepsilon \cos \delta. \end{aligned} \quad (5.47)$$

Разделив на  $\cos \varphi$ , раскрыв скобки и произведя приведение подобных членов, получаем

$$\begin{aligned} & 2 \sin \delta \sin \varepsilon \cos r \cos t + 2 \cos \delta \cos \varepsilon \sin r \sin t = \\ & = 2 \operatorname{tg} \varphi \sin \varepsilon \cos \delta. \end{aligned} \quad (5.48)$$

Далее, разделив обе части (5.48) на  $2 \cos \delta \cos \varepsilon \sin t$ , имеем

$$\sin r + \cos r \operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varepsilon \operatorname{ctg} t = \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \varepsilon \operatorname{cosec} t. \quad (5.49)$$

Введем вспомогательные углы  $m$  и  $n$  такие, что

$$\begin{aligned}\operatorname{tg} m &= \operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varepsilon \operatorname{ctg} t, \\ \sin n &= \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \varepsilon \operatorname{cosec} t \cos m,\end{aligned}\tag{5.50}$$

тогда

$$\sin r + \cos r \operatorname{tg} m = \frac{\sin n}{\cos m},\tag{5.51}$$

или

$$\sin r \cos m + \cos r \sin m = \sin n,\tag{5.52}$$

и, следовательно,

$$\sin(r + m) = \sin n,\tag{5.53}$$

и

$$r + m = n,\tag{5.54}$$

а потому

$$r = n - m.\tag{5.55}$$

После вычисления величин  $n$ ,  $m$  и  $r$  их приводят к тем же единицам измерения, что и значения прямых восхождений звезд и моментов времени их наблюдений на соответствующих высотах, и вычисляют значение поправки часов для одного из-

меренного альмукантарата:

$$u = \frac{1}{2} (\alpha_e + \alpha_w) - \frac{1}{2} (T_e + T_w) + (n - m) . \quad (5.56)$$

В каждой паре звезд расчет ведется отдельно для нитей, задающих одну высоту (две верхних, две средних, две нижних). Таким образом, для каждой пары рассчитывается три значения поправки хронометра, и, при отсутствии выпадающих значений, все они усредняются в одну величину поправки для данной пары. Расчет повторяется для всех наблюдаемых пар. Общее усреднение поправок делать не нужно.

Поправка часов должна быть исправлена за влияние суточной аберрации. Согласно [6], поправка за влияние суточной аберрации  $\delta\alpha$  в поправку хронометра вычисляется как

$$\delta\alpha = 0.021^s \cos z , \quad (5.57)$$

где  $z$  — эфемеридное зенитное расстояние пары.

Если при проведении наблюдений используется время, синхронизированное со временем спутниковых навигационных систем с точностью не хуже, чем  $0.01^s$ , то основной вклад в случайную погрешность полученной поправки часов будут вносить ошибки визирования и ошибки определения экваториальных координат звезд. Основными причинами систематической погрешности полученной поправки часов можно считать неточность знания астрономических широты и долготы пункта наблюдения и несимметрию звезд пары относительно первого вертикала (при симметричном положении неточность широты

вклада в поправку часов не дает). Значения астрономических широты и долготы при расчете берутся в соответствии с (5.1).

## Типовые вопросы

1. Насколько необходимо исправлять измеренные при наблюдениях высоты за полученное перед наблюдениями место нуля вертикального круга теодолита GeoBox TE-02?
2. Какую дополнительную погрешность зенитного расстояния может дать изменение температуры воздуха на  $10^{\circ}\text{C}$  в течение ночи? Давление считать постоянным.
3. Оцените дополнительную погрешность определения широты по парам звезд в меридиане, если вместо видимого склонения в расчетах будет использовано среднее склонение звезды.
4. Оцените дополнительную погрешность определения поправки хронометра по методу Цингера, если вместо видимого склонения и прямого восхождения в расчетах будет использовано среднее склонение и прямое восхождение звезды.
5. Какую систематическую погрешность в определение широты будет вносить отсутствие поправки за рефракцию при наблюдении Полярной звезды?
6. Предложите методику определения широты по наблюдениям Полярной звезды без использования специальных таблиц из «Астрономического ежегодника».
7. Насколько необходимо отклониться от меридиана по азимуту, чтобы погрешность в определении широты превысила предел разрешения зрительной трубы теодолита GeoBox TE-02?



8. Укажите размерности всех переменных, наименования и порядки величин, входящих во все формулы расчета, при расчете определения поправки хронометра по методу Цингера.
9. Укажите, как по полученной поправке хронометра получить уточненную долготу пункта наблюдения.
10. Объясните причину, по которой в методе Цингера нельзя производить усреднение наблюденных моментов времени на среднюю нить.
11. Как ведет себя угол наклона суточной параллели звезды по отношению к горизонту в течение звездных суток? Укажите области наибольшего и наименьшего наклонов.
12. Как соотносятся прямые восхождения звезд в паре Цингера, если первая звезда — восточная, а вторая — западная?
13. В каком случае ряды наблюдений могут иметь систематически увеличивающиеся либо уменьшающиеся результаты?
14. Опишите процедуру проверки результатов на выпадающие значения.
15. Что характеризует дисперсия результатов наблюдения?
16. Можно ли считать среднее и дисперсию для ряда наблюдений, полученного разными наблюдателями?
17. Влияет ли рефракция на наблюдения по методу Цингера?
18. Покажите, с какой точностью должны использоваться промежуточные результаты вычислений тригонометрических функций в методе Цингера.

## Список библиографических ссылок

1. Руководство по астрономическим определениям. ГКИНП-01-153-81. М. : Недра, 1984.
2. Об исчислении времени : Федер. закон Рос. Федерации от 3.06.2011 г. № 107-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rg.ru/2011/06/06/vremya-dok.html>.
3. О внесении изменений в Федеральный закон «Об исчислении времени» : Федер. закон Рос. Федерации от 21.07.2014 г. № 248-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rg.ru/2014/07/25/vremiya-dok.html>.
4. Справочник геодезиста : в 2 кн. / ред. В. Д. Большаков, Г. П. Левчук. М. : Недра, 1985. Кн. 1. 455 с.
5. Справочник геодезиста : в 2 кн. М. : Недра, 1985. Кн. 2. 440 с.
6. *Кузнецов А. Н.* Геодезическая астрономия. М. : Недра, 1966. 370 с.
7. *Шукстова З. Н.* Лабораторный практикум по астрометрии астрономической специальности: Сферическая астрономия. Общая астрономия. Астрометрия. Свердловск : Урал. гос. ун-т, 1968. 141 с.
8. *Истомин Л. Ф., Фролова Н. Б.* Определение геодезического азимута направления : метод. указания. Свердловск : Урал. гос. ун-т., 1989. 28 с.

9. *Шукстова З. Н., Фролова Н. Б.* Подготовка к астрометрическим определениям : лабораторный практикум по астрометрии. Екатеринбург : Урал. гос. ун-т, 1993. 43 с.
10. *Цингер Н. Я.* Об определении времени по соответствующим высотам различных звезд. СПб., 1874. 108 с.
11. *Куликов Д. К.* Теория эфемерид пар Цингера и каталог 500 пар звезд в системе ГКЗ на эпохи 1950.0 и 1970.0. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1951. 244 с.
12. *Одуан К., Гино Б.* Измерение времени. Основы GPS. М. : Техносфера, 2002. 400 с.
13. Trimble® GPS Studio Application User guide [Electronic resource]. URL: [http://trl.trimble.com/dscgi/ds.py/Get/File-550718/GPSSStudioUG\\_1B\\_August2011.pdf](http://trl.trimble.com/dscgi/ds.py/Get/File-550718/GPSSStudioUG_1B_August2011.pdf).
14. Acutime Gold datasheet [Electronic resource]. URL: [http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-366428/Acutime\\_DS.pdf](http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-366428/Acutime_DS.pdf).
15. Электронный теодолит TE-02/05/20 : Описание. Инструкция пользователя [Электронный ресурс]. URL: <http://www.geobox.ru/documents/TE020520.pdf>.
16. Астрономический календарь. Постоянная часть / ред. В. К. Абалякин. М. : Наука, 1981.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1

### Список контрольных тестов

1. По какой причине эфемериды для астрономических наблюдений рассчитываются как функция звездного времени? Возможно ли использование того или иного вида солнечного времени для построения эфемерид?
2. Почему требуемая точность вычисления эфемерид обычно определяется именно величиной углового поля зрения инструмента?
3. На каких этапах эфемеридных вычислений и с какой целью используется процедура интерполяции табличных значений?
4. Объясните суть процедуры линейной интерполяции.
5. По какой причине порядок интерполирования при двумерной линейной интерполяции не имеет значения?
6. Рассчитайте для широты Екатеринбурга время прохождения звезды через поле зрения теодолита GeoBox TE-02 для среднего склонения звезд, кульминирующих к югу и северу от зенита (в нижней кульминации).

7. Рассчитайте время полного захода Солнца под горизонт (от нижнего до верхнего края) для даты середины учебной практики. Зависит ли это время от склонения Солнца?
8. Покажите, влияет ли рефракция на время полного погружения Солнца под горизонт.
9. Сравните величину погрешности при использовании начальной аналитической модели рефракции и при использовании таблиц рефракции из «Астрономического ежегодника». Расчет сделайте для предельных высот наблюдений.
10. Сколько требуется среднего времени, чтобы Солнце после полного погружения под горизонт ушло на глубину более  $6^\circ$ ? Расчет проведите для даты начала учебной практики.
11. Рассчитайте время погружения Солнца под горизонт на  $6^\circ$  для дат начала и конца практики.
12. Рассчитайте момент истинной полуночи по звездному и среднему времени для дат начала и конца практики.
13. Определите условия видимости Луны для всего промежутка практики.
14. Определите, возможно ли во время практики наблюдать покрытие ярких звезд Луной?
15. Каким образом можно определить, не будут ли в поле зрения инструмента одновременно видны несколько эфемеридных звезд?
16. Можно ли наблюдать кульминации Полярной звезды в течение учебной практики?
17. Рассчитайте, на сколько изменяется высота Полярной звезды на промежутке времени в  $10^s$ . Расчет проведите для полуночи по гражданскому времени, дата — середина прак-

тики. Оцените, как ошибка фиксации момента времени наблюдения Полярной звезды может влиять на точность определения широты.

18. В каких местах суточной параллели Полярной звезды можно получить максимальную точность определения широты места?
19. Рассчитайте, в какой момент звездного времени происходят элонгации Полярной звезды. Видны ли они в период наблюдений?
20. Какой знак имеет ошибка определения широты вследствие неточной ориентации инструмента в меридиане при наблюдении прохождений звезд вблизи меридиана?
21. Рассчитайте, насколько изменяется высота звезды со склонением  $\delta = 0^\circ$  при ее прохождении через меридиан, если она проходит полное поле зрения теодолита GeoBox TE-02.
22. Определите минимально возможный промежуток времени относительно эфемеридного момента кульминации северной звезды, чтобы ее можно было пронаблюдать на всех трех нитях инструмента. Взять северные звезды с максимальным и минимальным из возможных склонений.
23. Выше или ниже наблюдаются звезды пар Цингера относительно высоты, которую они проходят в одно и то же время?
24. Рассчитайте время прохождения звезд пар Цингера через нити инструмента. Рассмотрите случай со средней высотой пары и прохождением альмукантарата точно в первом вертикале.
25. Возможно ли наблюдение по методу Цингера в меридиане?
26. Опишите характер видимого движения звезд пар Цингера в поле зрения инструмента вблизи первого вертикала.

27. Насколько меняется скорость движения звезды, выбранной для наблюдения по методу Цингера, по азимуту и высоте при прохождении от одного края поля зрения инструмента до другого? Для расчета возьмите характерное склонение звезд, образующих пары Цингера для широты и долготы Екатеринбурга.
28. Допустимо ли усреднять наблюденные моменты времени прохождения звездами пар Цингера нитей инструмента для последующего расчета поправки хронометра? Обоснуйте ответ.
29. Объясните, чем определяется то, что для разных программ астрометрических наблюдений требуется различная точность фиксации моментов времени.
30. Каким фактором ограничивается предельная точность фиксации моментов времени в случае, если то или иное событие наблюдается человеком?
31. Какой из факторов оказывает сильное влияние на точность фиксации момента времени: рефракция, атмосферное размытие?
32. С чем связан тот факт, что для звезд с различными экваториальными координатами требуется различная точность фиксации моментов времени для получения требуемой итоговой точности наблюдений, либо при одной точности фиксации моментов наблюдения окажутся неравноточными?
33. Опишите, какие источники точного времени (часы) могут применяться при полевых наблюдениях. Укажите их достоинства и недостатки.

34. Какие еще преимущества, кроме высокой точности, дает использование спутниковых навигационных систем в качестве источника времени?
35. Укажите внешние факторы, которые могут осложнить либо сделать невозможным применение спутниковой навигационной системы в реальных условиях.
36. С какой точностью должны быть взяты звездное время на Гринвиче в среднюю гринвичскую полночь и опорная долгота пункта, чтобы при пересчете среднего времени, полученного от спутниковой навигационной системы, в звездное, погрешность перевода не превысила 0.01 с?
37. Прodelайте то же (см. вопрос 36) для коэффициента перевода средних промежутков времени в звездные промежутки времени ( $\frac{366.2422...}{365.2422...}$ ).
38. Что такое критическая дата, и выпадает ли хотя бы одна из таких дат на период летней учебной практики?
39. Опишите алгоритм выбора звездного времени на Гринвиче на момент средней гринвичской полночи из таблиц «Астрономического ежегодника», на текущее время наблюдения.
40. Укажите, при каких ограничениях и в каких задачах при наблюдениях возможно применение средних часов вместо звездных.
41. На какую величину за время проведения практики сместится шкала звездного времени относительно среднего времени? Приведите числовые примеры для начала и конца практики.
42. Докажите аналитически, что разность средних либо звездных времен пунктов с произвольно выбранными долготами всегда равна разности долгот этих пунктов.



43. Какую погрешность в определении момента звездного времени по кульминации звезды с известными координатами можно получить, если разрешающая способность трубы инструмента составляет  $3''$ ?
44. Является ли шкала звездного времени равномерной шкалой?
45. Опишите способ приближенного определения звездного времени на произвольный момент среднего времени без использования таблиц «Астрономического ежегодника».
46. Опишите практические методы синхронизации часов.
47. На какой угол Земля поворачивается за  $1^h$  звездного и среднего времени?
48. Дайте общее определение понятия «сутки».
49. Укажите причину разной продолжительности года в звездных и средних сутках.
50. Определите моменты истинной и средней полуночи для даты середины практики. Каково в этот день уравнение времени?
51. На сколько среднее солнечное время отличается от поясного времени для учебной астрономической обсерватории?
52. Укажите, как определить звездное время на момент истинного полудня в заданную дату?
53. Рассчитайте абсолютную погрешность григорианского календаря.
54. На сколько разойдутся среднее и звездное время за время прохождения звезды через поле зрения инструмента при наблюдении южной кульминации звезды с нулевым склонением?

55. На сколько могут различаться моменты кульминации при переносе инструмента из крайней восточной в крайнюю западную точки учебной обсерватории?
56. Опишите возможности работы с горизонтальным кругом электронного цифрового теодолита GeoBox TE-02.
57. Сделайте выводы о возможности реализации на теодолите GeoBox TE-02 метода полных круговых приемов для измерения горизонтальных углов.
58. Укажите, при выполнении каких условий возможно корректное измерение вертикальных углов теодолитом GeoBox TE-02.
59. Опишите предварительные этапы подготовки инструмента к работе.
60. Что характеризует величина места нуля вертикального круга теодолита GeoBox TE-02 в случае, если он полностью исправен и проходит все обязательные поверки?
61. К каким последствиям для измерения вертикальных и горизонтальных углов будет приводить неустранимая коллимационная погрешность инструмента?
62. Что может привести к большому значению коллимационной ошибки?
63. Рассчитайте, какую погрешность в ориентации инструмента по азимуту даст неучтенная поправка механического хронометра в  $1^m$ .
64. Каким способом должно производиться ведение Полярной звезды при ориентации инструмента?

65. Учитывая, что для определения широты по Полярной звезде необходимо измерить высоту Полярной, укажите, в какой части суточной параллели звезды это выгоднее всего делать.
66. С какой целью определение широты по наблюдениям пар звезд в меридиане ведется при одном положении круга инструмента?
67. Какая поверка обязательно должна выполняться и контролироваться в течение ночи наблюдений, чтобы были выполнены главные условия метода Цингера?
68. С чем связано, что метод Цингера реализуется при одном положении круга инструмента?
69. Допустимо ли ведение звезды по азимуту в методе Цингера? Есть ли причины, ограничивающие это ведение?
70. Как влияет на коллимационную погрешность рост влажности в течение ночи наблюдений?
71. Какие действия с теодолитом могут привести к необходимости повторного ориентирования инструмента?
72. На каких этапах наблюдений необходимо проверять и выводить фокусировку трубы?
73. Почему фокусировку инструмента необходимо проверять в темное время суток?
74. Что может приводить к самопроизвольному смещению цилиндрического уровня исправного инструмента?
75. Опишите возможные процедуры определения углового расстояния боковых нитей от средней с максимальной точностью.
76. Какова процедура исправления места нуля вертикального круга у теодолита GeoBox TE-02?

77. По какой координате необходимо вести трубу инструмента непосредственно перед пересечением звездой нити в меридианных наблюдениях?
78. В какую сторону следует вращать наводящие винты инструмента для получения максимально стабильных результатов?
79. Как проверить стабильность установки инструмента при наблюдениях?
80. Возможно ли провести ориентацию инструмента не по Полярной звезде?
81. Возможно ли использовать Полярную звезду для ориентации инструмента только один раз за период практики?
82. Необходимо ли пользоваться центриром инструмента и всегда устанавливать его точно над одной точкой?
83. Насколько необходимо исправлять измеренные при наблюдениях высоты за полученное перед наблюдениями место нуля вертикального круга теодолита GeoBox TE-02?
84. Оцените, какую дополнительную погрешность зенитного расстояния может дать изменение температуры воздуха на  $10^{\circ}\text{C}$  в течение ночи. Давление считать постоянным.
85. Оцените дополнительную погрешность определения широты по парам звезд в меридиане, если вместо видимого склонения в расчетах будет использовано среднее склонение звезды.
86. Оцените дополнительную погрешность определения поправки хронометра по методу Цингера, если вместо видимого склонения и прямого восхождения в расчетах будет использовано среднее склонение и прямое восхождение звезды.

87. Какую систематическую погрешность в определение широты будет вносить отсутствие поправки за рефракцию при наблюдении Полярной звезды?
88. Предложите методику определения широты по наблюдениям Полярной звезды без использования специальных таблиц «Астрономического ежегодника».
89. На сколько необходимо отклониться от меридиана по азимуту, чтобы погрешность в определении широты превысила предел разрешения зрительной трубы теодолита GeoBox TE-02?
90. В процедуре расчета определения поправки хронометра по методу Цингера укажите для всех переменных их размерности, наименования и порядки величин, входящих во все формулы расчета.
91. Укажите, как по полученной поправке хронометра вычислить уточненную долготу пункта наблюдения.
92. Объясните причину, по которой в методе Цингера нельзя производить усреднение наблюденных моментов времени на среднюю нить.
93. Как ведет себя угол наклона суточной параллели звезды по отношению к горизонту в течение звездных суток? Укажите области наибольшего и наименьшего наклонов.
94. Как соотносятся прямые восхождения звезд в паре Цингера, если первая звезда — восточная, а вторая — западная?
95. В каком случае ряды наблюдений могут иметь систематически увеличивающиеся либо уменьшающиеся результаты?
96. Опишите процедуру проверки результатов на выпадающие значения.
97. Что характеризует дисперсия результатов наблюдения?

98. Можно ли считать среднее и дисперсию для ряда наблюдений, полученного разными наблюдателями?
99. Влияет ли рефракция на наблюдения по методу Цингера?
100. Покажите, с какой точностью должны использоваться промежуточные результаты вычислений тригонометрических функций в методе Цингера.

# Приложение 2

## Журналы наблюдений

Журнал наблюдений астрономического азимута земного предмета по наблюдениям Полярной звезды со средним моментом наблюдения

Дата:		Инструмент:	
C =		MZ =	
t° c =		P <sub>мм рт. ст.</sub> =	
S <sub>n</sub> :		S <sub>к</sub> :	

Наблюдатель:	
--------------	--

№	$M^{кл}$	$M_{\sigma}^{кл}$	$T_{\sigma}^{кл}$	$M_{\sigma}^{кп}$	$T_{\sigma}^{кп}$	$M^{кп}$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Наблюдатель:	
--------------	--

№	$M^{кл}$	$M_{\sigma}^{кл}$	$T_{\sigma}^{кл}$	$M_{\sigma}^{кп}$	$T_{\sigma}^{кп}$	$M^{кп}$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Рис. 1. Вид журнала наблюдений для азимутальной программы

## Журнал для наблюдения Полярной звезды

Дата:	Инструмент:
C =	MZ =
S <sub>n</sub> :	S <sub>к</sub> :

№	отсчёт ВК (КЛ)	Т (КЛ)	отсчёт ВК (КП)	Т (КП)
	° ' "	h m s	° ' "	h m s
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	
	Темп., °C =		Р, мм рт. ст. =	

Рис. 2. Вид журнала наблюдений Полярной звезды



### Журнал наблюдений прохождения южных и северных звезд в меридиане

Дата:	Инструмент:
C =	MZ =
$\varphi^{\circ} \text{с} =$	$P_{\text{мм}}^{\text{пр. ст.}} =$
$S_{\text{н}} :$	$S_{\text{к}} :$

Наблюдатель:

Круг:

№ звезды	Т до меридиана hh mm ssss	$M_{\text{вк}}$ о ' "	Т после меридиана hh mm ssss	$M_{\text{вк}}$ о ' "

Наблюдатель:

Круг:

№ звезды	Т до меридиана hh mm ssss	$M_{\text{вк}}$ о ' "	Т после меридиана hh mm ssss	$M_{\text{вк}}$ о ' "

Наблюдатель:

Круг:

№ звезды	Т до меридиана hh mm ssss	$M_{\text{вк}}$ о ' "	Т после меридиана hh mm ssss	$M_{\text{вк}}$ о ' "

Наблюдатель:

Круг:

№ звезды	Т до меридиана hh mm ssss	$M_{\text{вк}}$ о ' "	Т после меридиана hh mm ssss	$M_{\text{вк}}$ о ' "

Наблюдатель:

Круг:

№ звезды	Т до меридиана hh mm ssss	$M_{\text{вк}}$ о ' "	Т после меридиана hh mm ssss	$M_{\text{вк}}$ о ' "

Рис. 3. Вид журнала наблюдений для определения широты по звездам в меридиане

### Журнал наблюдений пар Цингера

Дата:		Инструмент:	
C:		MZ:	
S <sub>г</sub> :		S <sub>к</sub> :	

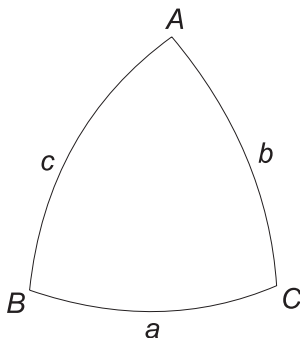
  

Наблюдатель:								
№ пары	№ звезды по АЕ	Показания хронометра						Среднее для контроля
		восточная звезда			западная звезда			
		h	m	s	h	m	s	
		S ср.			S ср.			
Наблюдатель:								
		S ср.			S ср.			
Наблюдатель:								
		S ср.			S ср.			
Наблюдатель:								
		S ср.			S ср.			
Наблюдатель:								
		S ср.			S ср.			

Рис. 4. Вид журнала наблюдений для метода Цингера

## Приложение 3

### Формулы сферического треугольника



Сферический треугольник. Стороны и углы

#### Формулы косинусов.

$$\begin{aligned}\cos a &= \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A, \\ \cos b &= \cos a \cos c + \sin a \sin c \cos B, \\ \cos c &= \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos C.\end{aligned}\tag{1}$$

#### Формула синусов.

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin c}{\sin C}.\tag{2}$$

**Формулы пяти элементов.**

$$\begin{aligned}\sin a \cos B &= \cos b \sin c - \sin b \cos c \cos A, \\ \sin a \cos C &= \cos c \sin b - \sin c \cos b \cos A, \\ \sin b \cos A &= \cos a \sin c - \sin a \cos c \cos B, \\ \sin b \cos C &= \cos c \sin a - \sin c \cos a \cos B, \\ \sin c \cos A &= \cos a \sin b - \sin a \cos b \cos C, \\ \sin c \cos B &= \cos b \sin a - \sin b \cos a \cos C.\end{aligned}\tag{3}$$

**Формулы котангенсов.** Во всяком сферическом треугольнике произведение котангенса крайнего угла на синус среднего угла равно произведению котангенса крайней стороны на синус средней стороны минус произведение косинусов средних элементов.

$$\begin{aligned}\cot A \sin B &= \cot a \sin c - \cos c \cos B, \\ \cot B \sin C &= \cot b \sin a - \cos a \cos C, \\ \cot C \sin A &= \cot c \sin b - \cos b \cos A.\end{aligned}\tag{4}$$

# Оглавление

<b>Предисловие</b>	<b>3</b>
<b>1. Определение широты, поправки хронометра, астрономического азимута направления</b>	<b>6</b>
1.1. Зенитальные методы определения астрономической широты места. Выгоднейшие условия наблюдений . . . . .	6
1.2. Основы определения астрономического азимута направления . . . . .	16
1.3. Метод равных высот для определения поправки хронометра . . . . .	25
<b>2. Эфемеридные вычисления</b>	<b>33</b>
2.1. Расчет продолжительности времени наблюдений	35
2.2. Эфемериды для наблюдения Полярной звезды .	38
2.3. Эфемеридные вычисления для задачи определения азимута земного предмета . . . . .	40
2.4. Эфемеридные вычисления для меридианных наблюдений . . . . .	40
2.5. Эфемеридные вычисления для способа равных высот . . . . .	51

<b>3. Служба времени</b>	<b>59</b>
3.1. Реализация службы времени методами спутнико- вой навигации . . . . .	61
3.2. Шкалы времени . . . . .	67
<b>4. Широотно-долготная программа (полевые наблю- дения)</b>	<b>77</b>
4.1. Подготовка к наблюдениям. Поверки и юстиров- ки инструмента . . . . .	79
4.2. Методика ориентации инструмента . . . . .	92
4.3. Определение широты пункта наблюдения . . . .	95
4.4. Определение приближенного астрономического азимута по часовому углу Полярной звезды . . .	99
4.5. Определение долготы и поправки хронометра по наблюдениям звезд на равных высотах мето- дом Цингера . . . . .	100
<b>5. Обработка и анализ данных наблюдений (каме- ральная обработка)</b>	<b>104</b>
5.1. Методы обработки программ наблюдений . . . .	105
5.2. Вычисление астрономического азимута земного предмета по наблюдениям Полярной звезды . . .	115
5.3. Вычисление поправки хронометра по наблюдени- ям пар звезд на равных высотах методом Цингера	122
<b>Список библиографических ссылок</b>	<b>130</b>
<b>Приложения</b>	<b>131</b>

*Учебное издание*

**Островский Андрей Борисович**

**АСТРОМЕТРИЯ:  
УЧЕБНАЯ ПРАКТИКА**

Учебно-методическое пособие

Заведующий редакцией	М. А. Овечкина
Редактор	Н. В. Чапаева
Корректор	Н. В. Чапаева
Оригинал-макет	А. Б. Островский

План выпуска 2016 г. Подписано в печать 15.04.2016.  
Формат  $60 \times 84^{1/16}$ . Бумага офсетная. Гарнитура Times.  
Уч.-изд. л. 6.0. Усл. печ. л. 8.8. Тираж 50 экз. Заказ 90.

Издательство Уральского университета.

620 000, г. Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ

620 000, г. Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.

Тел.: +7 (343) 350-56-64, 350-90-13

Факс: +7 (343) 358-93-06

E-mail: [press-urfu@mail.ru](mailto:press-urfu@mail.ru)



Для заметок

