

**Негосударственное частное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Национальный открытый институт г. Санкт-Петербург»**

Тарелкин Е.П., Блинов А.Ф.

# **Геодезическая астрономия**

**Учебное пособие**

Рекомендовано Саморегулируемой организацией  
НП «Изыскатели Санкт-Петербурга и Северо-Запада»  
для студентов, обучающихся по направлениям  
120100.62 «Геодезия и дистанционное зондирование»  
и 120700.62 «Землеустройство и кадастры»  
и слушателей курсов повышения квалификации

Санкт-Петербург  
2015

**УДК 528.2**

**ББК 26.11**

**T19**

**ТАРЕЛКИН, ЕВГЕНИЙ ПЕТРОВИЧ**

**БЛИНОВ, АЛЕКСАНДР ФРИДРИХОВИЧ**

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 120100.62 «Геодезия и дистанционное зондирование» и 120700.62 «Землеустройство и кадастры» и слушателей курсов повышения квалификации. В пособии изложены теоретические вопросы дисциплины.

ISBN 978-5-906759-13-9

**УДК 528.2**

**ББК 26.11**

© Тарелкин Е.П. 2015

© Блинов А.Ф. 2015

©НОИР 2015

© ИКЦ 2015

## Предисловие

Согласно Федеральному государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования подготовки бакалавров по направлению «Геодезия и дистанционное зондирование», объектом профессиональной деятельности выпускника являются: поверхность Земли, других планет и их спутников; искусственные и естественные объекты на поверхности (в том числе территориальные и административные образования) и внутри Земли и других планет, а также околоземное космическое пространство; геодинамические явления и процессы; гравитационные, электромагнитные и другие физические поля.

Согласно Федеральному государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования подготовки бакалавров по направлению «Землеустройство и кадастры», объектом профессиональной деятельности выпускника являются: земельные и другие виды природных ресурсов; категории земельного фонда; территории административных образований; территориальные зоны; зоны с особыми условиями использования территорий; зоны специального правового режима; землепользования и земельные участки в зависимости от целевого назначения и разрешенного использования; земельные угодья; единые объекты недвижимости и кадастрового учета; информационные системы и технологии кадастра недвижимости; геодезическая и картографическая основы землеустройства и кадастра недвижимости.

Область профессиональной деятельности бакалавров включает:

- получение измерительной пространственной информации о поверхности Земли, отображение поверхности Земли или отдельных её территорий на планах и картах;
- осуществление координатно-временной привязки объектов, явлений и процессов на поверхности Земли;
- организация и осуществление работ по сбору и распространению геопространственных данных как на территорию Российской Федерации в целом, так и на отдельных её регионах с целью развития их инфраструктуры.

Цель изучения дисциплины – сформировать у будущих бакалавров знания в области геодезической астрономии, метод ко-

торой используется в геодезии как для определения исходных геодезических дат, так и для решения частных вопросов, связанных с определением астрономических широт, долгот и азимутов.

Задачи дисциплины:

- сформировать знания о способах астрономических определений в геодезии;
- сформировать умение в выборе способов астрономических определений, исходя из требуемой точности к их результатам.

В результате изучения дисциплины обучающийся должен иметь представление:

- о роли и месте дисциплины «Геодезическая астрономия» в комплексе специальных дисциплин;
- о роли и месте астрономических определений в комплексе геодезических работ.

Изучение курса «Геодезическая астрономии» опирается на знания, полученные студентами при изучении дисциплины «Геодезия», «Высшая геодезия» и «Астрономия».

Большое значение в изучении курса имеет самостоятельная работа обучающихся. Она имеет целью закрепление и углубление полученных знаний и навыков, подготовку к предстоящим занятиям и зачёту по дисциплине, а также формирование навыков ответственного труда и самостоятельности в поиске и приобретении новых знаний.

Для эффективной организации самостоятельной работы над учебным материалом целесообразно придерживаться следующих рекомендаций.

1. Ознакомиться с учебной литературой (учебниками и учебными пособиями):

- перелистать, познакомиться со структурой, запомнить рубрикации разделов, приложений, определить к каким разделам дисциплины относится тот или иной фрагмент источника, выделить материал, не вошедший в структуру дисциплины;
- ознакомиться с введением и сформировать свое мнение о содержимом источника.

2. Ввести в память своего персонального компьютера программы и справочную литературу (например, переписать их с компьютера преподавателя).

3. При работе над конкретным разделом дисциплины:

- проработать по учебникам и учебным пособиям нужный раздел и имеющиеся к нему приложения;

- постараться понять соответствующий учебный материал на концептуальном уровне;
- поработать с приложениями: предметным и именным указателями, указателем иностранных слов, толковым словарем;
- совершить «экскурсию» по Интернет;
- при наличии электронного конспекта и/или презентации по данной теме, использовать их;
- при возникновении неясностей в рассматриваемом разделе – задать вопрос преподавателю при личной встрече или по Интернету.

4. Решить предлагаемые в разделе задачи, взяв их из задачника; при заочном обучении решения задач пересылать преподавателю через Интернет.

5. По мере продвижения вперед не забывать регулярно «оглядываться назад», повторяя содержание пройденного материала; это позволит составить образное представление о структуре дисциплины, её логичной целостности.

<b>Введение</b>	<b>8</b>
<b>1. Координаты светил</b>	<b>15</b>
1.1 <i>Основное содержание астрономического ежегодника</i>	15
1.2 <i>Вычисление видимых мест звёзд</i>	17
1.3 <i>Вычисление видимых мест Солнца</i>	20
<b>2. Эфемериды светил</b>	<b>22</b>
2.1 <i>Понятие и назначение эфемерид светил</i>	22
2.2 <i>Порядок вычисления эфемерид светил</i>	22
2.3 <i>Использование компьютерных программ для вычисления эфемерид</i>	25
<b>3. Особенности конструкции астрономических приборов</b>	<b>27</b>
3.1 <i>Оптико-механические системы астрономических приборов</i>	27
3.2 <i>Уровни</i>	28
3.3 <i>Подготовка приборов к наблюдениям</i>	29
<b>4. Порядок производства астрономических наблюдений</b>	<b>31</b>
4.1 <i>Оборудование астрономического пункта</i>	31
4.2 <i>Порядок производства астрономических наблюдений</i>	32
4.3 <i>Порядок обработки результатов астрономических наблюдений</i>	34
<b>5. Зенитальные способы астрономических определений</b>	<b>36</b>
5.1 <i>Сущность зенитальных способов астрономических определений</i>	36
5.2 <i>Наивыгоднейшие условия в зенитальных способах</i>	37
5.3 <i>Основные зенитальные способы определения астрономических широт и долгот</i>	39
<b>6. Азимутальные способы астрономических определений</b>	<b>41</b>
6.1 <i>Сущность азимутальных способов астрономических определений</i>	41
6.2 <i>Наивыгоднейшие условия в азимутальных способах</i>	41
6.3 <i>Основные способы определения астрономического азимута</i>	44

<b>Указатель персоналий</b>	<b>46</b>
<b>Список рекомендуемой литературы</b>	<b>49</b>
<i>Основная литература</i>	49
<i>Дополнительная литература</i>	49
<i>Руководящие документы и справочная литература</i>	49
<b>Аннотация сайтов Интернет</b>	<b>50</b>

## Введение

Из курса геодезии известно, что для любой точки на Земле могут быть определены координаты. Значения координат зависят от выбранной системы координат (СК). Например, числовое значение координат точки в СК-42 будет отличаться от значения координат в СК-63. Точно также, геодезические эллипсоидальные координаты точки (широта  $B$  и долгота  $L$ ) на эллипсоиде Красовского будут отличаться от таких же координат на эллипсоиде Кларка.

Астрономические координаты (широта  $\varphi$  и долгота  $\lambda$ ) являются абсолютными, то есть не зависящими от принятой системы координат и используемого эллипсоида. Для того, чтобы в этом убедиться, достаточно вспомнить формулы сферической астрономии. В них отсутствуют какие-либо параметры принятого в системе координат эллипсоида, например:

$$\begin{aligned} \sin z \cdot \cos A &= \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos t - \sin \delta \cdot \cos \varphi \quad , \quad (1) \\ s &= t + \alpha \quad , \\ s &= S + \lambda \quad , \end{aligned}$$

описывают взаимосвязь между:

- координатами точки  $\varphi$  и  $\lambda$ ;
- координатами светила во второй экваториальной системе координат – прямое восхождение  $\alpha$  и склонение  $\delta$ ;
- видимым положением светила на небесной сфере – зенитное расстояние  $z$  и азимут  $A$ ;
- звёздным временем по Гринвичу производства наблюдения  $S$ .

Отметим, что в данном примере: азимут светила  $A$  отсчитывается от точки севера  $N$ , а величины  $s$  – местное звёздное время и  $t$  – часовой угол светила являются величинами промежуточными.

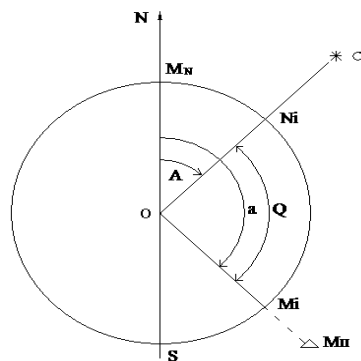


Рис. 1 Определение азимута направления на местный предмет



В формулах присутствует величина  $A$  – азимут светила. Если при астрономических наблюдениях измерить угол  $Q$  между направлением  $Ni$  на светило  $\sigma$  и направлением  $Mi$  на местный предмет  $Mn$  (рис. 1), можно получить астрономический азимут  $a$  направления на местный предмет.

*Предварительный вывод.* Если в точке стояния угломерного прибора (теодолита) измерить зенитное расстояние и направление на небесное светило, координаты которого известны, зарегистрировать время наблюдения, то можно определить астрономические координаты точки стояния и астрономический азимут направления на местный предмет.

Важный вопрос – зачем нужны астрономические координаты и азимуты, если в подавляющем большинстве случаев в практике выполнения геодезических работ достаточно получить прямоугольные координаты  $x$  и  $y$  и дирекционный угол  $\alpha$  направления на местный предмет?

Дополнительный вопрос: можно ли непосредственно использовать астрономические координаты точки в целях геодезии? При развитии государственной геодезической сети (ГГС) создавались так называемые пункты Лапласа, на которых определялись астрономические широты, долготы и азимуты. На выполнение наблюдений на одном пункте выделялся приблизительно 1 месяц. Средняя квадратическая ошибка (СКО) определения широты  $m_\varphi = 0.45''$ . В линейной мере это составляет 13-14 метров, что явно недостаточно.

*Цель производства высокоточных астрономических определений.* Для пунктов Лапласа классическими методами геодезии (триангуляция, полигонометрия) определялись прямоугольные координаты  $x$  и  $y$ . По формулам, изучаемым в курсе высшей геодезии, из них вычислялись геодезические эллипсоидальные координаты пункта: широта  $B$  и долгота  $L$ . Ответим на вопросы: отличаются ли геодезические координаты от астрономических, если отличаются – то почему и что даёт геодезисту знание величин этих отличий?

На примере широт вспомним, от чего они отсчитываются (рис. 2).

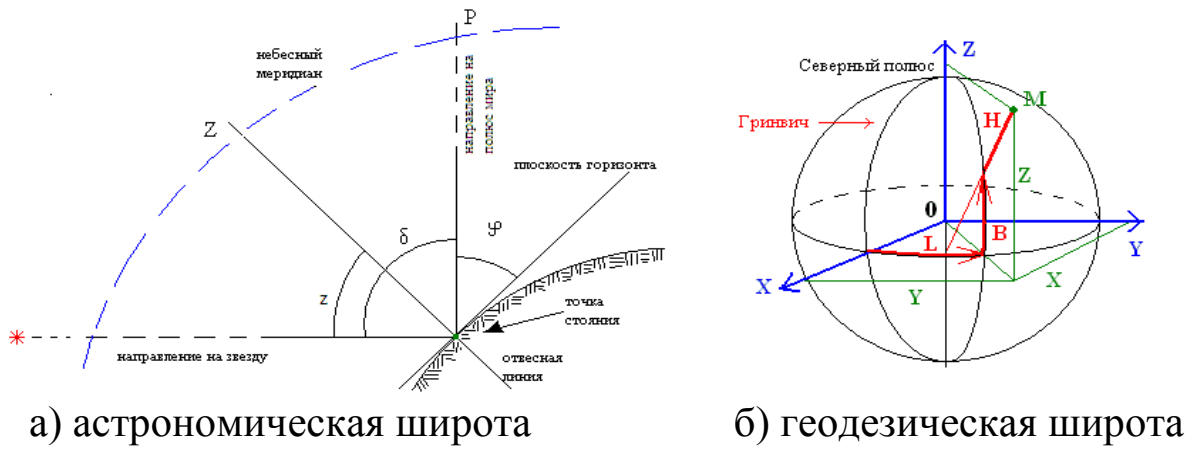


Рис. 2 Широты в геодезии

Согласно рисунка 2а астрономическая широта  $\varphi$  – угол между направлением на полюс мира  $P$  и плоскостью горизонта. Плоскость горизонта перпендикулярна отвесной линии. Согласно рисунка 2б геодезическая широта  $B$  – угол между нормалью к поверхности эллипсоида и плоскостью экватора. Таким образом, астрономическая широта определяется относительно отвесной линии (вектора силы тяжести в данной точке), геодезическая широта - относительно нормали к поверхности эллипсоида.

Эти две линии в общем случае не совпадают, так как нормаль проводится к поверхности математически строгой фигуры – эллипсоиду, а положение отвесной линии зависит от распределения притягивающих масс в теле Земли (рис. 3а).

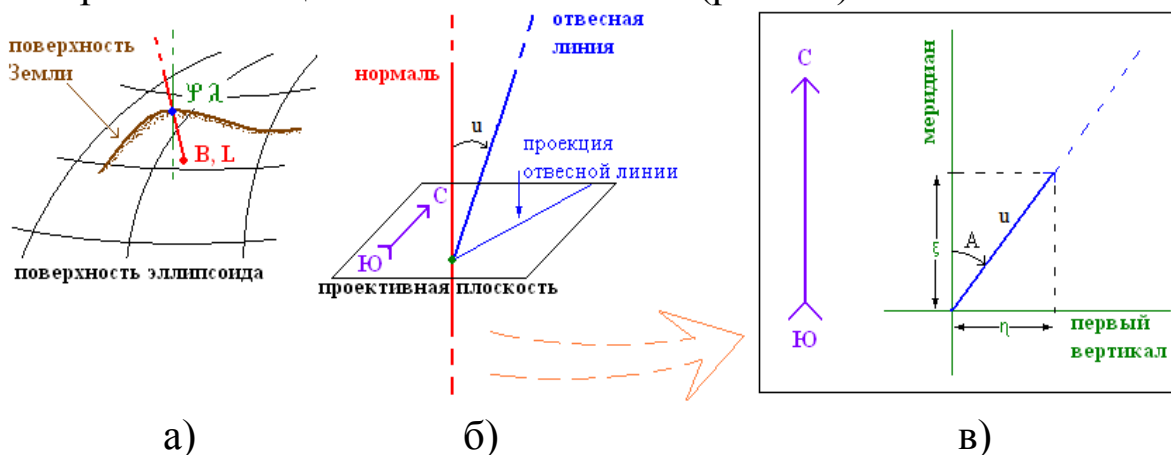


Рис. 3 Уклонение отвесной линии

Угол  $u$  (рис. 3б) между нормалью и отвесной линией называется углом уклонения отвесной линии от нормали (УОЛ). Его величина в равнинных районах составляет единицы или 1-2 десятков секунд, в горных районах может достигать нескольких де-

сятков секунд. Из курса геодезии известно, что значение УОЛ по сути есть угол наклона поверхности геоида (квазигеоида) к поверхности эллипсоида и может быть использовано для определения его высоты относительно поверхности эллипсоида.

Для удобства работы с УОЛ, её значение разлагается на составляющие: в меридиане  $\xi$  и в первом вертикале  $\eta$  (рис. 3в). Эти величины можно получить из формул:

$$\begin{aligned}\xi &= \varphi - B \quad , \\ \eta &= (\lambda - L) \cdot \cos \varphi \quad .\end{aligned}$$

Если вычислено значение УОЛ в первом вертикале  $\eta$  – можно от астрономического азимута направления на местный предмет  $a$  перейти к геодезическому азимуту  $A$ :

$$A = a - \eta \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad .$$

От геодезического азимута  $A$  можно перейти к дирекционному углу  $\alpha$ :

$$\alpha = A + \gamma \quad .$$

Величину сближения меридиан  $\gamma$  можно вычислить по формуле:

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} l \cdot \sin \varphi - 1/3 \cdot \operatorname{tg}^3 l \cdot \sin \varphi \quad ,$$

или по более простой, но менее точной формуле:

$$\gamma'' = l'' \cdot \sin \varphi \quad .$$

В обеих последних формулах величина  $l$  – разность долготы точки стояния  $L$  и долготы осевого меридиана зоны  $L_0$  в плоскости проекции Гаусса:

$$l = L - L_0 \quad .$$

Таким образом, определение астрономических широт и долгот на пунктах Лапласа позволяет получить значение составляющих УОЛ, что, в свою очередь даёт возможность:

- определять форму геоида или квазигеоида;
- от измеренного астрономического азимута перейти к дирекционному углу и использовать его в качестве исходного; астрономический азимут на пунктах Лапласа определялся со СКО в 0.5".

На современном этапе нечасто возникает проблема определения астрономических широт и долгот, но встречаются ситуации, когда необходимо определить астрономический азимут с заданной точностью.

Вопросами точного определения астрономических координат заинтересовались в эпоху великих географических открытий, то есть в XVI веке. Особых проблем с определением широт не возникало. Координаты звёзд и Солнца к тому времени были из-

мерены с достаточной точностью. Широту можно было определить по зенитному расстоянию Полярной звезды, Солнца и т.п.

Основной проблемой являлось определение долготы. Обратим внимание на формулу (1). В ней присутствует значение звёздного времени на Гринвичском меридиане. Это значит, что при определении долготы необходимо регистрировать время наблюдения по часам, синхронизированным с часами, находящимися на нулевом меридиане (Гринвичском). То есть, необходимо взять часы, привезти их, например, в Гринвичскую обсерваторию, синхронизировать с часами в обсерватории, затем перевезти в точку производства астрономических наблюдений.

В ту эпоху уже были созданы маятниковые часы для астрономических наблюдений, но их нельзя было перевозить. Они из-за тряски при перевозке останавливались. Безусловно, маятниковые часы использовались повсеместно в разных частях света, но устанавливались они приблизительно по местному времени.

Только в 1764 году учёный Х.Гюйгенс изобрёл систему, которую он назвал баланс-спираль. Эта система широко используется до сих пор в механических часах. Эти часы можно было перевозить на любое расстояние, но у них был один существенный недостаток – они были очень чувствительны к изменению температуры. Только в 30-40 годах XVII века удалось создать удовлетворительные хронометры. Изначально они использовались в морской навигации. Но позже ими заинтересовались геодезисты. Применение хронометров позволило не только точно определять долготу, но и повысить точность определения широты. С другой стороны, точные определения координат пунктов и азимутов позволили:

- создавать достаточно точные и обширные геодезические сети, необходимые для картографирования территорий;
- изучать фигуру Земли и её размеры.

Потребности геодезистов вызвали:

- активную работу астрономических обсерваторий по уточнению координат светил;
- совершенствование конструкций хронометров и расширение их производства;
- создание и организацию производства точных возимых (полевых) астрономических приборов.

История развития геодезической астрономии может занять целую книгу. В данном вопросе отметим несколько фамилий.

В 1740 году датский астроном Х.Горребоу разработал способ определения широты из наблюдения звёзд в меридиане.

В 1857 году американский астроном-геодезист Э.Талькотт усовершенствовал способ определения широты, разработанный Х.Горребоу. Способ Талькотта используется и по сегодняшний день.

В 1874 году российский астроном-геодезист Н.Я.Цингер разработал и усовершенствовал способ определения долготы из наблюдения пар звёзд вблизи первого вертикала, идея которого была предложена ещё в 1780 году.

Несколько позже, опираясь на работы Н.Я.Цингера, российский геодезист М.В.Певцов разработал способ определения широты из наблюдения звёзд вблизи меридиана.

В середине XIX века британским моряком Т.Сомнером был разработан способ совместного определения широт и долгот. Идея совместного определения астрономических координат в середине XX века была развита советским астрономом-геодезистом А.В.Мазаевым.

К середине XIX века ведущими астрономо-геодезистами была замечена существенная разница между измеренными астрономическими координатами и полученными от другого астрономического пункта путём проложения рядов триангуляции. Так было открыто УОЛ, что дало новый толчок к развитию теории фигуры Земли и научной дисциплины «Геодезическая гравиметрия».

Астрономические определения широко использовались при развитии ГГС в 50-е – 80-е годы XX века. Всего на территории РФ было определено более 3.6 тысяч пунктов Лапласа.

Изученный ранее курс «Астрономии» дал необходимые теоретические знания. Теперь стоит задача применить эти знания на практике. В числе практических задач, стоящих перед геодезистом, есть и такие, которые требуют производства определений координат точек местности, азимутов направлений и некоторых других данных. Эти величины могут определяться с использованием методов геодезической астрономии. Поэтому предметом курса «Геодезической астрономии» являются методы и способы определения астрономических координат точек местности и астрономических азимутов направлений, а именно:

- определение необходимости и возможности производства астрономических определений в целях геодезии;

- обоснование и выбор наиболее оптимальных условий для производства таких определений, исходя из требований к точности производства работ;
- изучение методик и приёмов производства астрономических наблюдений и их математической обработки;
- практическое освоение конкретных способов определения астрономических координат и азимутов.

В курс дисциплины включена теоретическая часть и учебная практика. В теоретической части изучаются:

- вопросы вычисления координат светил, как во 2-й экваториальной, так и в горизонтной системах координат;
- знакомство с особенностями устройства астрономических приборов, оборудование службы времени; организация наблюдений небесных светил на астрономическом пункте;
- зенитальные и азимутальные астрономических определений.

Учебная практика предусматривает более глубокое изучение студентами устройства геодезических приборов и аппаратуры, производства астрономических определений координат и азимута.

# 1. Координаты светил

## 1.1 Основное содержание астрономического ежегодника

Основным источником сведений о координатах звёзд являются фундаментальные каталоги, создаваемые в разных странах. Список основных из них представлен на рис. 4:

### СОКРАЩЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ЗВЕЗДНЫХ КАТАЛОГОВ

Название, автор	Обозначение
Sixth Catalogue of Fundamental Stars .....	FK6
HIPPARCOS and TYCHO Catalogues .....	HIP
Fifth Fundamental Catalogue .....	FK5
Fourth Fundamental Catalogue, Resulting from the Revision of the FK3, W. Fricke, A. Kopff. ....	FK4
Dritter Fundamentalkatalog des B.J .....	FK3
Catalog of 5268 Standard Stars, 1950.0 Based on the Normal System N30, H. R. Morgan .....	N30
General Catalogue of 33342 Stars (Epoch 1950), B. Boss .....	GC
Preliminary General Catalogue of 6188 Stars (Epoch 1900), L. Boss .....	PGC

Сокращения Br, Grb, Pi, H, Rad — ссылки на каталоги Брайля (Ауверс), Грумбриджа, Пиаччи, Гевелия и Радклиффской обсерватории.

Рис. 4 Список основных звёздных каталогов

Координаты светил в разных каталогах могут отличаться друг от друга на небольшие величины, пренебрежимо малые, если используются в целях геодезической астрономии. В каталогах координаты приведены на некую дату (дату составления). При обработке астрономо-геодезических измерений необходимо использовать т.н. *видимые места* светил. Это значит, что координаты, взятые из каталога, должны быть исправлены за: прецессию, нутацию, собственное движение, годичный параллакс, годичную абerrацию. Эти вычисления весьма объёмны и требуют дополнительных сведений.

Для облегчения работы астрономов существуют ежегодные издания, в которых эти исправления уже сделаны. Одним из таких изданий является Астрономический ежегодник (АЕ), издаваемый Институтом прикладной астрономии Российской академии наук. Координаты звёзд в нём вычислены с использованием FK6 и HIP.

АЕ содержит координаты Солнца, Луны, планет и звёзд (более 700), а также большой объём дополнительной информации. В

данном вопросе рассмотрим две важных для нас таблицы. В приведённой формуле:

$$s = S + \lambda$$

присутствует величина  $S$  – звёздное время на Гринвиче. Эта величина вычисляется по формуле, известной из курса астрономии:

$$S = S_0 + T_0 + \mu \cdot T_0^h$$

Здесь:  $T_0$  – всемирное время,  $\mu$  – редукция ( $9.856^s$ ),  $S_0$  – звёздное время в Гринвичскую полночь. Эта величина даётся в таблице АЕ «Звёздное время», образец которой дан на рисунке 5:

ЗВЕЗДНОЕ ВРЕМЯ 2009									
Дата		0 <sup>h</sup> всемирного времени			Дата		0 <sup>h</sup> всемирного времени		
		Звёздное время		Уравнение равно- денствий			Звёздное время		Уравнение равно- денствий
		истинное	среднее				истинное	среднее	
		h m s	s	0.0001			h m s	s	0.0001
Июль	1	18 36 43.7461	42.8421	+ 9118 – 78	Авг.	16	21 38 05.3629	04.3890	+ 9797 – 58
	2	18 40 40.3022	39.3974	9147 – 99		17	21 42 01.9271	00.9444	9793 + 34
	3	18 44 36.8610	35.9528	9175 – 93		18	21 45 58.4902	57.4997	9788 +117
	4	18 48 33.4219	32.5082	9203 – 65		19	21 49 55.0501	54.0551	9783 +167
	5	18 52 29.9844	29.0635	9230 – 21		20	21 53 51.6055	50.6105	9776 +174

Рис. 5 Фрагмент таблицы «Звёздное время»

Следующая полезная информация связана с явлением астрономической рефракции. Из рис. 6 видно, что из-за уменьшения плотности воздуха по мере увеличения высоты над поверхностью Земли, луч от небесного объекта искривляется:

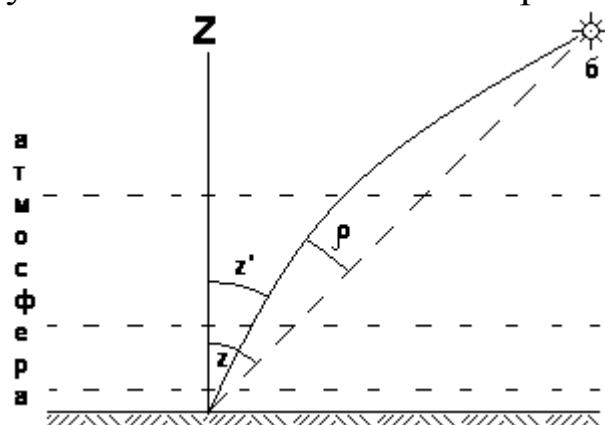


Рис. 6 Астрономическая рефракция

Как видно из рисунка, при измерении зенитного расстояния вместо угла  $z$  будет измерена величина  $z'$ . Разница  $\rho$  и есть астро-



номическая рефракция. Её оценочное значение может быть получено из таблицы «Рефракция», фрагмент которой приведён на рис. 7:

**Х. РЕФРАКЦИЯ (точность 1'')**  
Средняя рефракция ( $T = 10^{\circ}\text{C}$ ,  $B = 760\text{ мм}$ )

$z$	Рефр.	$z$	Рефр.	$z$	Рефр.	$z$	Рефр.	$z$	Рефр.	$z$	Рефр.
$0^{\circ}$	0''	$42^{\circ}00'$	0 52	$60^{\circ}00'$	1 41	$65^{\circ}00'$	2 04	$70^{\circ}00'$	2 38	$75^{\circ}00'$	3 33
5	5	30	0 53	10	1 41	10	2 05	10	2 40	10	3 36
10	10	43 00	0 54	20	1 42	20	2 06	20	2 41	20	3 38
$41^{\circ}00'$	51	58 00	1 33	40	2 02	40	2 36	40	3 29	40	5 08
30	52	30	1 34	50	2 03	50	2 37	50	3 31	50	5 13
42 00	52	59 00	1 36								
		30	1 38	65 00	2 04	70 00	2 38	75 00	3 33	80 00	5 18

Поправки за температуру  $T$  и барометрическое давление  $B$

$T$	$-20^{\circ}$	$-15^{\circ}$	$-10^{\circ}$	$-5^{\circ}$	$0^{\circ}$	$+5^{\circ}$	$+10^{\circ}$	$+15^{\circ}$	$+20^{\circ}$	$+25^{\circ}$	$+30^{\circ}$	$+35^{\circ}$	$B$	760	750	740	730	720
$z$													$z$					
$0^{\circ}$	+	+	+	+	+	+		-	-	-	-	-	$0^{\circ}$					
10	0''	0''	0''	0''	0''	0''	0''	0''	0''	0''	0''	0''	10	0	0	0	0	0
20	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	20	0	0	0	0	1
30	3	2	2	1	1	0	0	0	1	1	2	2	30	0	0	0	1	2
	4	3	3	2	1	1	0	1	1	2	3	3				1	1	
78	33	26	21	16	10	5	0	5	9	14	18	22	78	0	4	7	10	14
79	36	29	23	17	11	5	0	5	10	15	20	24	79	0	4	8	11	15
80	40	32	25	19	12	6	0	6	11	16	22	27	80	0	4	8	12	17
	+	+	+	+	+	+		-	-	-	-	-		+	+	+	+	+

Рис. 7 Фрагмент таблицы «Рефракция»

Как видно, исходными данными для определения величины рефракции являются: зенитное расстояние  $z$ , температура воздуха  $T$  и давление воздуха  $B$ .

## 1.2 Вычисление видимых мест звёзд

### СРЕДНИЕ МЕСТА

№ по АЕ	№ FK6	№ HIP	$\alpha$	$100\mu\alpha$	$\delta$
			h m s	s	$^{\circ}$ ' ''
341	524*	69112	14 08 50.926890	- 0.9386	+77 32 51.05139
340	522*	69226	14 10 23.933625	- 0.1695	+25 05 30.03694
342	523	69427	14 12 53.745120	+ 0.0471	-10 16 25.33196
343	GC	69481	14 13 27.808894	+ 0.6960	+51 47 16.32326
345	526*	69673	14 15 39.672025	- 7.7180	+19 10 56.67706

Рис. 8 Фрагмент таблицы «Средние места звёзд»

Звёзды в АЕ имеют свой уникальный номер. В отдельную группу выделены близполюсные звёзды, номера которых начи-

наются с буквы N. Соответственно, видимые места (координаты) сведены в две таблицы. Кроме того, есть и ещё одна таблица – средние места звёзд (рис. 8).

Для каждой звезды указаны как средние за год координаты, так и их номера по каталогам FK6 и HIP.

Образец таблицы «Видимые места близполюсных звёзд» приведён на рис. 9:

ВЕРХНЯЯ КУЛЬМИНАЦИЯ В ГРИНИЧЕ 2009											
N 4			$\alpha$ UMi <sup>1</sup>			$m = 1.97$			F7		
Двойная верхняя кульминация						XI - 1					
Дата	$\alpha$	$\delta$	Дата	$\alpha$	$\delta$	Дата	$\alpha$	$\delta$	Дата	$\alpha$	$\delta$
	<sup>h</sup> <sub>s</sub> <sup>m</sup>	<sup>o</sup> <sup>'</sup> <sup>''</sup>		<sup>h</sup> <sub>s</sub> <sup>m</sup>	<sup>o</sup> <sup>'</sup> <sup>''</sup>		<sup>h</sup> <sub>s</sub> <sup>m</sup>	<sup>o</sup> <sup>'</sup> <sup>''</sup>		<sup>h</sup> <sub>s</sub> <sup>m</sup>	<sup>o</sup> <sup>'</sup> <sup>''</sup>
Июль 1.3	2 42	+89 18		2 43	+89 18		2 44	+89 18		2 44	+89 18
2.3	10.34	08.06	Авг. 16.2	38.77	08.78	Окт. 1.1	54.47	19.59	Нояб. 16.9	86.40	35.96
3.3	12.27	07.93	17.2	40.86	08.97	2.1	55.48	19.90	17.9	86.62	36.33
4.3	14.26	07.81	18.2	42.80	09.17	3.1	56.51	20.19	18.9	86.75	36.71
5.3	16.25	07.73	19.2	44.58	09.38	4.1	57.60	20.46	19.9	86.77	37.10
	18.22	07.66	20.2	46.23	09.56	5.1	58.79	20.74	20.9	86.67	37.50

Рис. 9 Фрагмент таблицы «Видимые места близполюсных звёзд»

Звезда с номером N4, первая по яркости ( $\alpha$ ) в созвездии UMi – Малой Медведицы, то есть Полярная звезда. Координаты даны на момент верхней кульминации в Гринвиче (Гриниче) на каждую дату. Величина  $m = 1.97$  – яркость звезды.

Например, 1 июля 2009 года координаты даны на момент времени  $S = 2^h 42^m 10.34^s$  и равны  $\alpha = 2^h 42^m 10.34^s$ ,  $\delta = +89^\circ 18' 08.06''$ . 2 июля на момент времени  $S = 2^h 42^m 12.27^s$  и равны  $\alpha = 2^h 42^m 12.27^s$ ,  $\delta = +89^\circ 18' 07.93''$ . На любой другой момент времени координаты получаются *интерполированием*. Рассмотрим пример.

Звезда N4 наблюдалась 2 июля 2009 года в Санкт-Петербурге ( $\lambda_0 = 2^h 00^m 12^s$ ) в  $T_M = 1^h 15^m 43^s$ . Расчёты:

-  $T_0 = T_M - 4^h = 1^h 15^m 43^s - 4^h = 21^h 15^m 43^s$  1 июля 2009 года;

-  $S_0 = 18^h 36^m 44^s$  (по рис. 5 с округлением);

- переводим  $T_0$  в меру «часы и доли часа»:

$$T_0^h = 21 + 15/60 + 43/3600 = 21.262^h$$

-  $S = 18^h 36^m 44^s + 21^h 15^m 43^s + 9.856^s \cdot 21.262 = 15^h 55^m 57^s$

- вычисляем, сколько времени прошло с момента верхней кульминации до момента наблюдений по Гринвичскому звёздному времени:

$$\Delta S = S - \alpha = 15^h 55^m 57^s - 2^h 42^m 10^s = 13^h 13^m 47^s$$

- переводим  $\Delta S$  в доли суток;  
 $\Delta S = (13 + 13/60 + 47/3600)/24 = 0.551^d$  - это интерполяционный коэффициент;
- за сутки прямое восхождение изменилось на  $+1.93^s$ ; соответственно, за 0.551 суток оно изменилось на  $+1.93 \cdot 0.551 = +1.06^s$
- прибавляем к значению прямого восхождения на 1 июля 2009 вычисленное изменение и получаем на момент наблюдения  $\alpha = 2^h 42^m 10.34^s + 1.06^s = 2^h 42^m 11.40^s$
- аналогично вычисляется значение прямого восхождения: изменение за сутки равно  $-0.13''$ , за 0.551 суток  $-0.07''$ ,  $\delta = +89^\circ 18' 08.06'' - 0.07'' = +89^\circ 18' 07.99''$ .

**ВИДИМЫЕ МЕСТА ЗВЁЗД 2009**  
Верхняя кульминация в Гриниче

Дата	326) $\alpha$ Vir			327) 69 H UMa			329) 24 CVn			328) $\zeta$ Vir		
	0.98	IV-13	B1	5.40	IV-13	A1	4.68	IV-15	A5	3.38	IV-15	A3
	h m		° '		h m		° '		h m		° '	
	13 25		-11 12		13 28		+59 53		13 34		+48 57	
Июнь 26.9	43.092	45	49.22	25	50.683	251	54.48	192	52.701	157	66.59	194
5.9	43.047	62	48.97	35	50.432	281	56.40	152	52.544	181	68.53	160
15.8	42.985	79	48.62	44	50.151	311	57.92	107	52.363	204	70.13	121
25.8	42.906	92	48.18	51	49.840	327	58.99	56	52.159	220	71.34	76
Июль 5.8	42.814	102	47.67	57	49.513	335	59.55	8	51.939	229	72.10	33
											12.152	43
											12.109	59
											12.050	77
											11.973	90
											11.883	100
											47.24	69
											46.55	69
											45.86	70
											45.16	66
											44.50	61

Рис. 10 Фрагмент таблицы «Видимые места звёзд»

Для остальных звёзд (не близполюсных) координаты даются не на каждые сутки, а на каждые 10 суток (рис. 10):

Разберём аналогичный пример. Звезда 326 ( $\alpha$  Vir – альфа Девы – Спика), яркостью  $m = 0.98$ , наблюдалась 2 июля 2009 года в Санкт-Петербурге ( $\lambda_0 = 2^h 00^m 12^s$ ) в  $T_M = 2^h 35^m 52^s$ . Расчёты:

- $T_0 = 22^h 35^m 52^s$  1 июля 2009 года;
- $T_0^h = 22 + 35/60 + 52/3600 = 22.598^h$
- $S = 18^h 36^m 44^s + 22^h 35^m 52^s + 9.856^s \cdot 22.598 = 17^h 16^m 19^s$
- необходимо определиться – сколько полных суток прошло от момента верхней кульминации 25 июня. Для этого можно начертить две шкалы времени: всемирного и звёздного Гринвичского (рис. 11):



Рис. 11 Шкалы времени

На шкалах отмечаются моменты верхней кульминации и момент производства наблюдений. Из рисунка видно, что от момента верхней кульминации 28 июня до момента наблюдения прошло 6 звёздных суток и отрезок времени от последней кульминации до момента наблюдений, равный:  $17^h 16^m 19^s - 13^h 25^m 43^s = 3^h 50^m 36^s$ , тогда интерполяционный коэффициент в долях десятисуточного интервала будет

- $(6 + (3 + 50/60 + 36/3600)/24)/10 = 0.616$
- $\alpha = 13^h 25^m 42.906^s - 0.092^s \cdot 0.616 = 13^h 25^m 42.849^s$
- $\delta = -11^\circ 12' 48.18'' + 0.51 \cdot 0.616 = -11^\circ 12' 47.87''$

### 1.3 Вычисление видимых мест Солнца

#### СОЛНЦЕ 2009

Дата	0 <sup>h</sup> земного времени						Верхняя кульминация	Изменение на 1 <sup>h</sup> западной долготы
	Видимое прямое восхождение	Видимое склонение	Часовое изменение	Видимый радиус	Уравнение времени (ист.-средн.) +12 <sup>h</sup>	Часовое изменение		
Июль 1	6 40 31.581	+23 06 43.97	-10.009	15 45.44	11 56 12.165	-0.4840	12 03 53.64	+0.478
2	6 44 39.613	23 02 31.67	11.015	15 45.43	11 56 00.689	0.4722	12 04 04.97	0.466
3	6 48 47.354	22 57 55.28	12.016	15 45.43	11 55 49.507	0.4596	12 04 16.00	0.453
4	6 52 54.786	22 52 54.92	13.012	15 45.43	11 55 38.636	0.4462	12 04 26.71	0.439
5	6 57 01.890	22 47 30.73	14.003	15 45.43	11 55 28.094	0.4322	12 04 37.08	0.425

Рис. 12 Фрагмент таблицы «Солнце»

В формулах сферической астрономии используется величина  $t$  – часовой угол светила. Для его вычисления используется координата светила прямое восхождение  $\alpha$ . При обработке наблюдений Солнца поступают иначе. Опираясь на курс астрономии, можно записать формулу:

$$t = m + (12^h + \eta) ,$$

где:  $m$  – местное солнечное время,  $\eta$  – уравнение времени. Образец таблицы с координатами Солнца показан на рис. 12.

Важным отличием в представлении координат Солнца от координат звёзд является то, что координаты Солнца изменяются нелинейно. Более того, из-за годового перемещения Солнца по эклиптике, сами координаты в течение суток существенно меняются. Для получения координат на момент наблюдений, они вычисляются с использованием *квадратичного интерполирования*. Рассмотрим пример: Солнце наблюдалось 2 июля 2009 года в Санкт-Петербурге ( $\lambda_0 = 2^h 00^m 12^s$ ) в  $T_0 = 11^h 45^m 24^s$ . Расчёты:

-  $T_0 = 7^h 45^m 24^s$

-  $T_0^h = 7.757$

- выписываем часовые изменения (изменения за 1 час) склонения на: начало текущих суток (2 июля)  $V_0\delta = -11.015''$ , на начало следующих суток (3 июля)  $V_1\delta = -12.016''$ ;

- вычисляем приведённое значение часового изменения склонения  $V\delta$ :

$$V\delta = V_0\delta + \frac{V_1\delta - V_0\delta}{48} \cdot T_0^h = -11.015'' + \frac{-12.016'' + 11.015''}{48} \cdot 7.757 = -11.177''$$

- выписываем значение склонения на начало суток  $\delta_0 = +23^\circ 02' 31.67''$  и вычисляем склонение на момент наблюдения:

-  $\delta = \delta_0 + V\delta \cdot T_0^h = +23^\circ 02' 31.67'' - 11.177'' \cdot 7.757 = 23^\circ 01' 04.97''$

- аналогично поступаем для уравнения времени:  $V_0\eta = -0.4722^s$ ,  $V_1\eta = -0.4596^s$ :

$$V\eta = V_0\eta + \frac{V_1\eta - V_0\eta}{48} \cdot T_0^h = -0.4722^s + \frac{-0.4596^s + 0.4722^s}{48} \cdot 7.757 = -0.4702^s$$

$(\eta + 12^h) = (\eta + 12^h)_0 + V\eta \cdot T_0^h = 11^h 56^m 00.689^s - 0.4702^s \cdot 7.757 = 11^h 55^m 57.042^s$

## 2. Эфемериды светил

### 2.1 Понятие и назначение эфемерид светил

В геодезии при измерениях зрительную трубу наводят на визирную цель. При этом стараются сделать так, чтобы визирная цель была ясно видна. При наблюдении звёзд возникают трудности, а именно: звёзды наблюдаются на некоторых высотах и на них практически невозможно навестись по прицелу, некоторые звёзды обладают малой яркостью и трудноразличимы невооружённым глазом, в поле зрения трубы может оказаться более одной звезды и звёзды постоянно перемещаются в поле зрения.

Решить эти проблемы можно, составив *эфемериды* звёзд. Эфемериды — координаты небесных светил и другие переменные астрономические величины, вычисленные для ряда последовательных моментов времени и сведенные в таблицы.

В целях геодезической астрономии эфемериды могут включать в себя для каждой звезды сведения: номер звезды (например, по АЕ), её яркость  $m$ , азимут  $A$ , зенитное расстояние  $z$ , время нахождения звезды на указанных  $A$  и  $z$ . Время удобно указывать местное звёздное  $s$ . Если наблюдения производятся с использованием декретного времени, необходимо ежедневно перевычислять в него звёздное.

Безусловно, нет смысла вычислять эфемериды для всех более 700 звёзд на все 24 часа суток. Эфемериды составляются только на те звёзды, которые можно использовать при реализации того или иного способа астрономических определений.

Важным условием использования эфемерид является требование предварительной ориентировки астрономического прибора в меридиане. То есть на астрономическом пункте заранее определяется астрономический азимут местного предмета с невысокой точностью ( $m_a \approx 15'' - 30''$ ), по которому и выставляется горизонтальный круг прибора.

### 2.2 Порядок вычисления эфемерид светил

Эфемериды можно вычислять, исходя из целей:

- где находится данная звезда в заданное время;
- какая звезда будет находиться в заданном месте в заданное время.

*Вычисление эфемерид конкретной звезды.* Пример: вычислить горизонтные координаты Полярной звезды в Санкт-Петербурге (приближённые координаты точки стояния  $\varphi_0 = 60^\circ 00' 10''$ ,  $\lambda_0 = 2^h 00^m 05^s$ ) 2 июля 2009 года в  $T_M = 23^h$ .

Выписываем координаты Полярной звезды с округлением:  $\alpha = 2^h 42^m 10^s$ ,  $\delta = +89^\circ 18' 08''$ . Вычисляем местное звёздное время:

-  $T_0 = T_M - 4^h = 23^h 00^m 00^s - 4^h = 19^h 00^m 00^s$  ;

-  $T_0^h = 19.0^h$  ;

-  $S_0 = 18^h 36^m 44^s$  ;

-  $s = S_0 + T_0 + \mu \cdot T_0^h + \lambda_0 =$

$$= 18^h 36^m 44^s + 19^h 00^m 00^s + 9.856^s \cdot 19.0 + 2^h 00^m 05^s = 15^h 39^m 56^s$$

- вычисляем часовой угол звезды:

$$t = s - \alpha = 15^h 39^m 56^s - 2^h 42^m 10^s = 12^h 57^m 46^s$$

- переводим значение часового угла из часовой меры в градусную:

$$t = 12 \cdot 15^\circ + 57 \cdot 15' + 46 \cdot 15'' = 194^\circ 26' 30''$$

- для вычисления зенитного расстояния воспользуемся формулой:

$$\cos z = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos t = 0.860089$$

$$z = 30^\circ 40' 24''$$

- для вычисления азимута используем теорему синусов:

$$\sin a = \frac{\cos \delta \cdot \sin t}{\sin z} = -0.005954$$

$a = -0^\circ 20' 28''$ , поскольку результат с минусом - приводим в IV четверть и получаем  $a = 359^\circ 39' 32''$

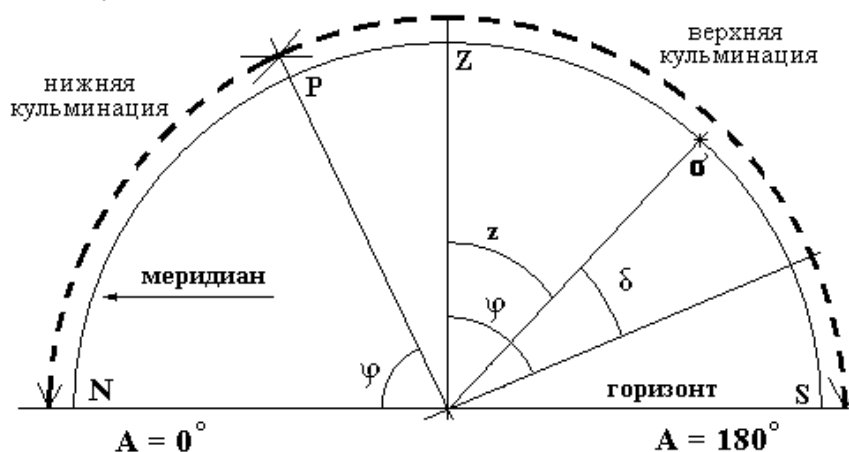


Рис. 13 Прохождение звёзд через меридиан

*Подбор звезды и вычисление эфемерид по заданным координатам.* Необходимо отметить, что строгое задание координат  $a$  и  $z$  редко имеет смысл. В данной точке небесной сферы вообще

может не оказаться ни одной звезды. Поэтому задаётся 1-2 параметра ( $a, z, s$ ), причём эти параметры могут задаваться жёстко или в некоторых пределах. Рассмотрим примеры.

*Прохождение звезды через меридиан.* Рассмотрим рис. 13. Из рисунка видно, что:

- при прохождении через меридиан звезда находится либо в верхней, либо в нижней кульминации;
- азимут звезды  $A$  будет равен либо  $0^\circ$ , либо  $180^\circ$ ;
- часовой угол звезды  $t$  будет равен либо  $0^h$  (верхняя кульминация), либо  $12^h$  (нижняя кульминация); отсюда:

$$s = \alpha \quad \text{для верхней кульминации;}$$

$$s = \alpha \pm 12^h \quad \text{для нижней кульминации.}$$

- зенитное расстояние легко вычисляется по формулам:

$$z = \varphi - \delta \quad \text{для ситуации на рис. 13 (A = 180^\circ);}$$

$$z = \delta - \varphi \quad \text{для ситуации на рис. 14а (A = 0^\circ, \text{верхняя кульминация});}$$

$$z = 180^\circ - \varphi - \delta \quad \text{для ситуации на рис. 14б (A = 0^\circ, \text{нижняя кульминация});}$$

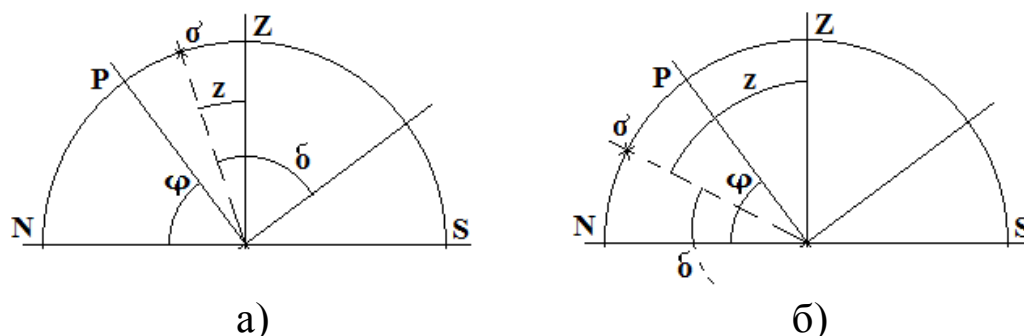


Рис. 14 Варианты прохождения звёзд через меридиан

Например, при тех же условиях (Санкт-Петербург, 2 июля 2009 года,  $\varphi_0 = 60^\circ 00' 10''$ ), звезда № 326 в верхней кульминации будет иметь эфемериды:  $A = 180^\circ$ ,  $s = 13^h 25^m 43^s$ ,  $z = 71^\circ 12' 59''$ .

Несколько сложнее составлять эфемериды для прохождения звёзд через другие вертикалы, например, через первый вертикал.

*Прохождение звезды через альмукутантарат* (заданное зенитное расстояние). Методики вычисления эфемерид могут быть различными и зависят от планируемого способа астрономических определений.

*Эфемериды заданной звезды, проходящей через заданный альмукутантарат.* Например, для звезды № 326 ( $\alpha$  Vir) для тех же



условий (координаты точки, дата) определим, в какие моменты времени и на каких азимутах она пересечёт альмукантарат с  $z = 80^\circ$ .

- воспользуемся формулой:

$$\sin \delta = \sin \varphi \cdot \cos z - \cos \varphi \cdot \sin z \cdot \cos A ,$$

приведя её к виду:

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

- подставим значения и получим  $\cos A = -0.700400$ ,  $A = -45^\circ 32' 27''$ . Знак минус показывает, что азимут лежит во II и III четвертях, то есть в южной части небесной сферы. После восхода звезда пересечёт альмукантарат  $80^\circ$  в восточной части неба по азимуту:

$$A_{\text{в}} = 180^\circ - 45^\circ 32' 25'' = 134^\circ 27' 33'' .$$

В западной части небесной сферы (до захода):

$$A_{\text{з}} = 180^\circ + 45^\circ 32' 25'' = 225^\circ 32' 27''$$

- для вычисления часовых углов воспользуемся теоремой синусов:

$$\sin t = \frac{\sin A \cdot \sin z}{\cos \delta} ,$$

подставляя значения азимутов, получаем  $t_{\text{в}} = 314^\circ 13' 36''$ ,  $t_{\text{з}} = 45^\circ 46' 24''$

- переводим в часовую меру:  $t_{\text{в}} = 20^{\text{h}} 56^{\text{m}} 54^{\text{s}}$ ,  $t_{\text{з}} = 3^{\text{h}} 03^{\text{m}} 06^{\text{s}}$ ;

- по формуле  $s = t + \alpha$  вычисляем время:  $s_{\text{в}} = 10^{\text{h}} 22^{\text{m}} 37^{\text{s}}$ ,  $s_{\text{з}} = 16^{\text{h}} 28^{\text{m}} 49^{\text{s}}$ .

*В других случаях*, задав значение зенитного расстояния  $z$ , задаются азимутом  $A$  и временем  $s$ , но в некоторых пределах. Например, азимут от  $70^\circ$  до  $110^\circ$  и т.д. По этим данным вычисляют координаты звезды  $\alpha$  и  $\delta$  тоже в некоторых пределах. Затем по АЕ по таблице «Средние места звёзд» подбирают подходящие звёзды.

### 2.3 Использование компьютерных программ для вычисления эфемерид

Существует много компьютерных программ, позволяющих вычислять видимые места светил на заданный момент времени, а также составлять эфемериды.

Одна из таких программ – Stellarium. Задавая координаты точки стояния, дату и поясное время (среднее солнечное), на

экране получаем вид небесной сферы на указанный момент. Наведясь на звезду, можно получить: её координаты (видимые места), номер по звёздному каталогу НР, азимут и зенитное расстояние, международное название. Изменяя время, можно получить эфемериды звезды для любой ситуации.

### 3. Особенности конструкции астрономических приборов

#### 3.1 Оптико-механические системы астрономических приборов

Для астрономических наблюдений используют либо специальные астрономические приборы, например, астрономические теодолиты (типа ТА), либо модифицируют обычные теодолиты.

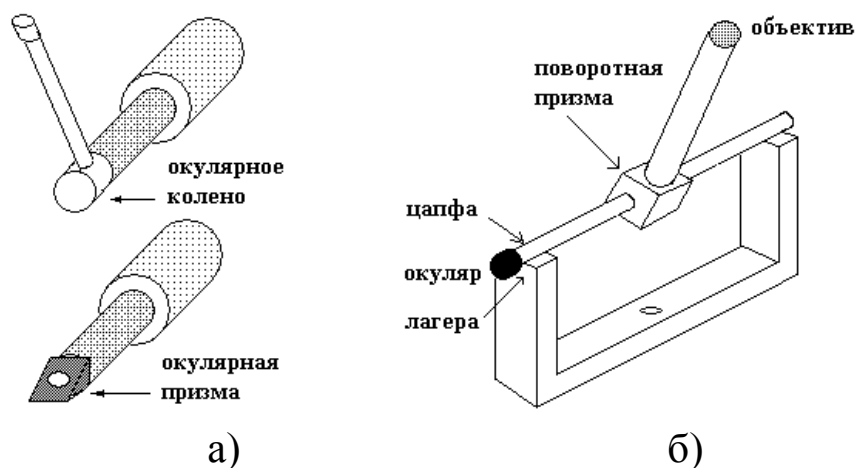


Рис. 15 Зрительные трубы

Так как небесные светила приходится наблюдать на значительных высотах, к зрительным трубам обычных теодолитов присоединяются или окулярные колена, или окулярные призмы (рис. 15а). В конструкциях ТА используются ломаные трубы (рис. 15б).

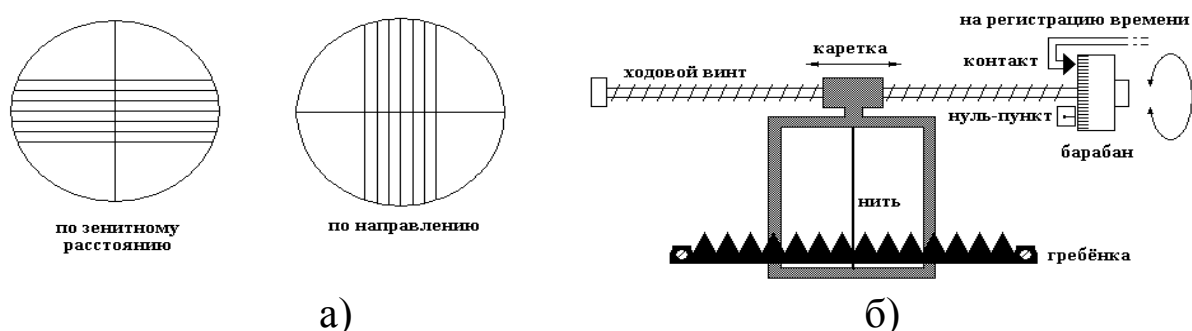


Рис. 16 Сетки нитей и окулярный микрометр

Для наблюдения небесных светил можно использовать обычную сетку нитей зрительной трубы. Но её использование не позволяет получить высокую точность. Для повышения точности в обычные теодолиты устанавливают специальные астрономиче-

ские сетки нитей (рис. 16а). В астрономических теодолитах вместо сетки нитей устанавливают окулярные микрометры, образец которого приведён на рис. 16б. На окулярный микрометр часто устанавливают специальный контакт, позволяющий автоматически регистрировать время наблюдения.

Все приборы, предназначенные для ночных наблюдений, оборудуются подсветками сетки нитей и кругов. При наблюдениях Солнца на окуляр надевается чёрный светофильтр.

В современных приборах могут применяться оптоэлектронные регистраторы, заменяющие сетки нитей и глаз наблюдателя.

### 3.2 Уровни

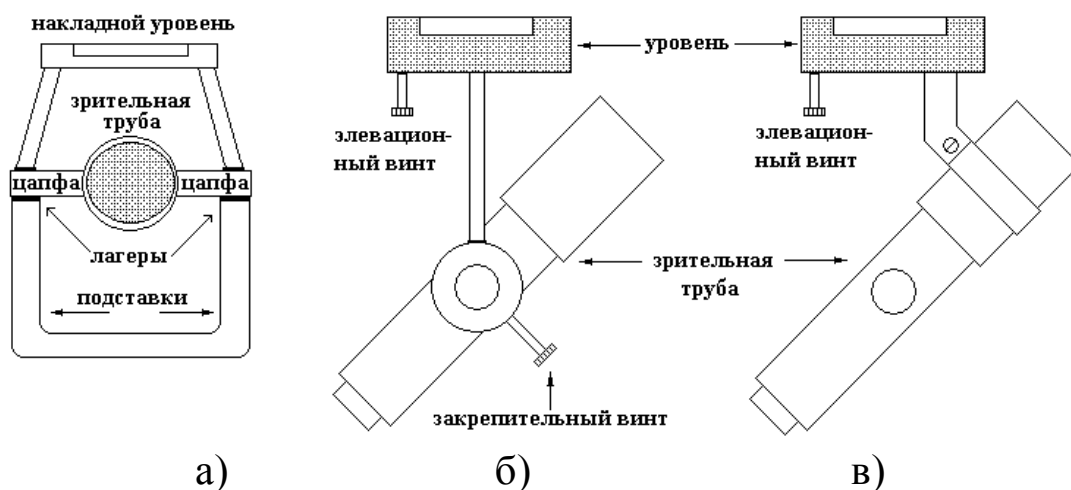


Рис. 17 Уровни в астрономических приборах

Важным устройством в конструкции астрономических приборов являются уровни. Кроме обычных уровней при алидаде горизонтального и вертикального кругов устанавливаются и другие.

*Накладной уровень.* Устанавливается на горизонтальную ось прибора для измерения её наклона в процессе наблюдения (рис. 17а).

Для регистрации наклона зрительной трубы в вертикальной плоскости в процессе производства наблюдений, используются *талькоттовские* уровни. Они входят в конструкцию астрономических приборов (рис. 17б) или прикрепляются к зрительным трубам обычных теодолитов (рис. 17в).

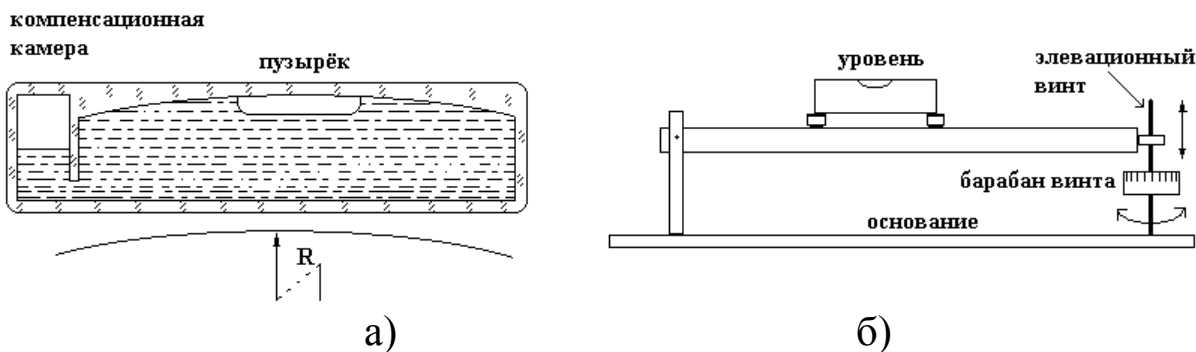


Рис. 18 Устройство цилиндрического уровня

Характеристиками цилиндрического уровня (рис. 18а.) являются: цена деления  $\tau$  и качество обработки внутренней поверхности. На поверхности уровня нанесена шкала. Цена деления – угол, на который необходимо наклонить уровень, для перемещения конца пузырька на одно деление шкалы. Для определения цены деления уровня и качества внутренней поверхности используются экзаменаторы (рис. 18б). При отсутствии экзаменатора цену деления уровня можно оценить по способу Комстока.

В современных приборах применяются электронные уровни.

### 3.3 Подготовка приборов к наблюдениям

Объём подготовительных работ зависит от точности, с которой будут производиться наблюдения. В простейшем случае можно ограничиться установкой окулярной призмы (колена).

Подготовка приборов заключается в проведении всех проверок и исследований, применимых к теодолиту: проверки уровней при алидаде горизонтального круга и при вертикальном круге, проверку двойной коллимационной ошибки, исследование неравенства колонн, определение эксцентриситета горизонтального круга и алидады горизонтального круга, исследование рёна оптического микрометра.

Специфические исследования: исследование накладного и талькоттовского уровней, равенства диаметров (рис. 19а) и формы цапф (рис. 19б) горизонтальной оси, исследования оптических (контактных) микрометров. Проверяется параллельность оси накладного уровня к горизонтальной оси прибора – оси зрительной трубы (рис. 19в).

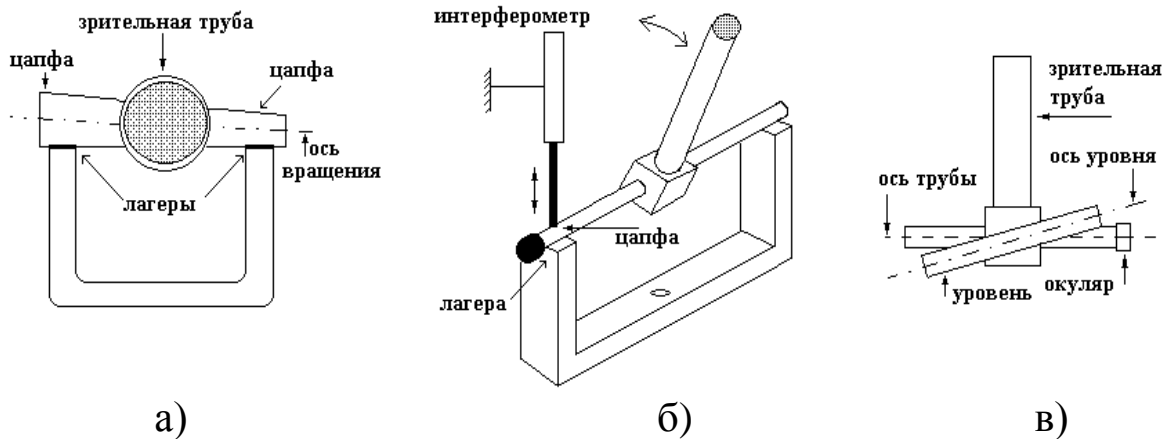


Рис. 19 Некоторые исследования астрономических приборов

Готовится служба времени. При этом подбирается радиоприёмник для приёма сигналов точного времени и часы (хронометр, хронограф). Исследуются вариации хода часов.

Наблюдатель изучает способы производства наблюдений, готовятся эфемериды. Если предполагается определения долготы или определение азимута из наблюдений звёзд в меридиане – наблюдатель определяет лично-инструментальную разность в одной из астрономических обсерваторий.

## 4. Порядок производства астрономических наблюдений

### 4.1 Оборудование астрономического пункта

При оборудовании астрономического пункта обращают внимание на обеспечение устойчивости прибора. Неплохие результаты получают, если пункт представляет собой бетонный или деревянный столб, закапываемый в землю и выступающий над поверхностью грунта на 1.5-2 метра. В верхней части столба замуровывается марка, вокруг столба сооружается помост. Лучшие результаты даёт закладка столба в трубу с тем, чтобы столб не касался грунта на глубину сезонного промерзания (рис. 20а).

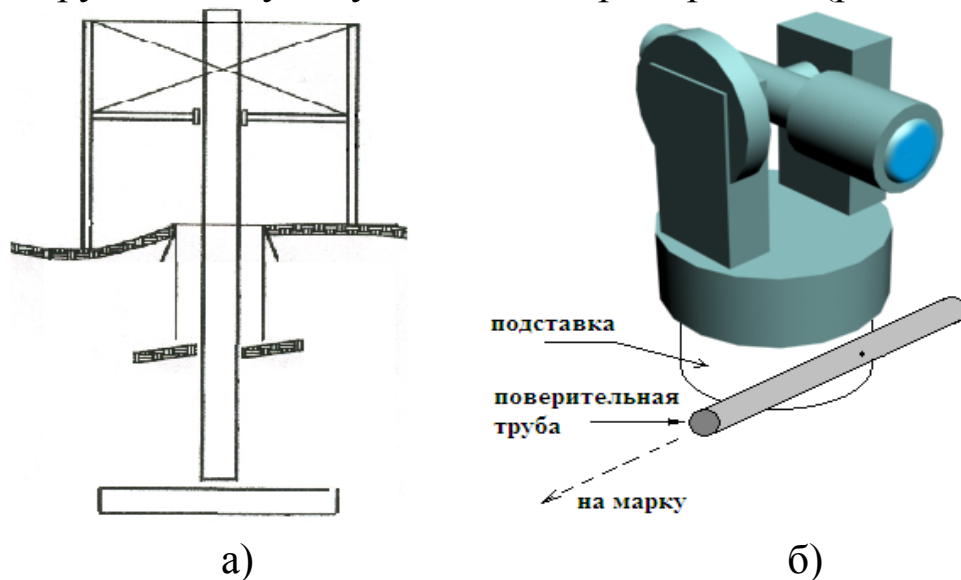


Рис. 20 Организация астрономических наблюдений

Если азимутальные наблюдения будут производиться с сигнала, к прибору присоединяется поверительная труба (рис. 20б).

На заданном удалении закладывается ориентирный пункт (ОРИП). В некоторых случаях это может быть другой астрономический пункт или пункт геодезической сети.

На астрономическом пункте оборудуется место для работы помощника наблюдателя (палатка, крытый автомобильный прицеп или кузов и т.п.), где размещается служба времени, источники электропитания и т.п. Необходимо также решить вопросы по организации отдыха и питания, охраны приборов и инструментов. На пункте прибор ориентируется в меридиане.

## 4.2 Порядок производства астрономических наблюдений

Астрономические наблюдения на пункте начинаются с установки прибора на столб с центрировкой над маркой. При высокоточных наблюдениях прибор со столба не снимается до завершения всех наблюдений на данном пункте. При этом предпринимаются меры для защиты прибора от непогоды.

Наблюдения, производимые подряд в течение промежутка времени (ночи), называются *видимостью*.

Наблюдения в пределах видимости начинаются с приёма сигналов точного времени. При высокоточных наблюдениях принимают сигналы специальных радиостанций, например РВМ, на приёмник, способный принимать телеграфные сигналы (SSB). Если есть возможность – можно использовать INTERNET, протокол NTP. Для менее точных наблюдений можно использовать сигналы, передаваемые радиовещательными станциями, например, радиостанцией «Маяк». В качестве примера на рис. 21 изображена страница журнала приёма сигналов точного времени применительно к приёму сигналов радиостанции «Маяк» и московскому времени  $T_m$ . При этом  $X$  – соответствующие показания часов.

Дата	$T_m$	$X$		Дата	$T_m$	$X$	$u_i$		
26.06 2012	22 <sup>h</sup> 59 <sup>m</sup> 55 <sup>s</sup>	23 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup> 13.5 <sup>s</sup>		26.06 2012	22 <sup>h</sup> 59 <sup>m</sup> 55 <sup>s</sup>	23 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup> 13.5 <sup>s</sup>	<del>-19.3<sup>s</sup></del>	$u_{cp} =$	-19.3 <sup>s</sup>
	22 59 56	23 00 15.2			-19.2	$DUT1 =$	+0.1		
	22 59 57	23 00 16.4			-19.4	$u =$	-19.2		
	22 59 58	23 00 17.3			-19.3	$\omega =$	+0.2		
	22 59 59	23 00 18.4			-19.4				
	23 00 00	23 00 19.1			-19.1				
			Симонович К.П.					Симонович К.П.	

Рис. 21 Журнал приёма сигналов точного времени

В пределах видимости сигналы принимаются каждый час. При наблюдении Полярной звезды приём сигналов может производиться через 2-4 часа. Видимость также завершается приёмом сигналов. По каждому приёму вычисляется поправка часов  $u$ , а из двух смежных приёмов – ход часов  $\omega$ . Вычисляются они по формулам:

$$u = T_m - X,$$

$$\omega = \frac{u_2 - u_1}{(X_2 - X_1)^h}.$$



Здесь: -  $u_2$  и  $u_1$  – поправки часов для первого и последующего приёма сигналов;

-  $X_2$  и  $X_1$  – показания часов для первого и последующего приёма сигналов. Разность показаний часов переводится в меру «часы и доли часа».

При непосредственном наблюдении Солнца используется светофильтр. При надетом светофильтре небо в поле зрения трубы выглядит чёрным. Яркое пятно – Солнце (рис. 22в).

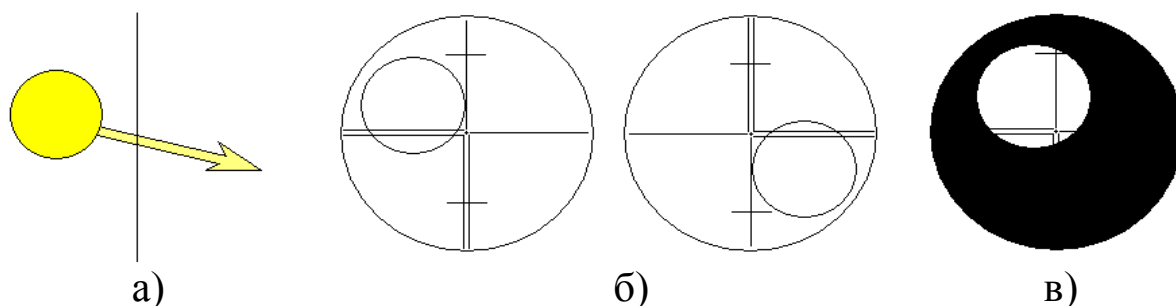


Рис. 22 К наблюдениям Солнца

В северном полушарии Земли Солнце в поле зрения зрительной трубы прямого изображения движется слева – направо (рис. 22а). Поскольку Солнце не является точечным объектом, на Солнце необходимо наводиться дважды – по краям. При реализации азимутальных способов – вертикальной нитью сетки нитей на левый и на правый край Солнца (рис. 22б). При реализации зенитальных способов – на верхний и нижний край соответственно. При касании края Солнца нитью регистрируется по часам (хронومتر) время касания.

При наблюдении Полярной звезды на неё наводятся вертикальной (при азимутальных способах) или горизонтальной (при зенитальных способах) нитью сетки нитей (рис. 23а). Если используется окулярный микрометр – подвижная нить наводится на Полярную звезду и с барабана и гребёнки снимается отсчёт. Во всех случаях в момент наведения регистрируется время.

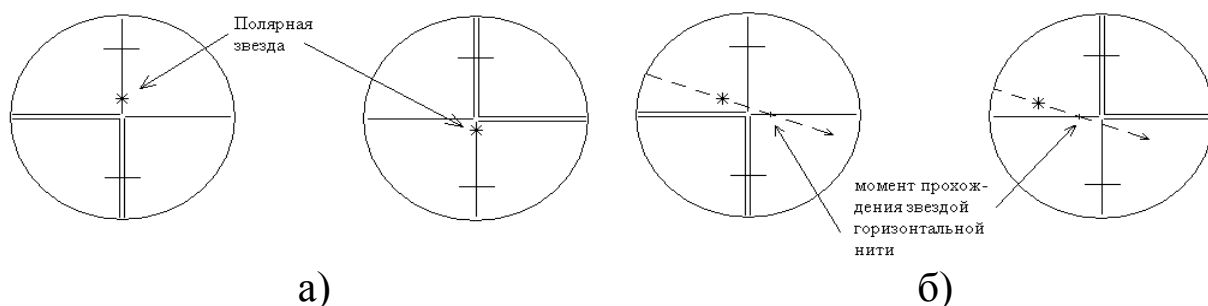


Рис. 23 Наблюдение звёзд

Полярная звезда находится вблизи полюса мира, поэтому движется медленно. Остальные звёзды, как и Солнце, движутся в поле зрения трубы достаточно быстро. Поэтому регистрируется время пересечения нити звездой (рис. 23б). При использовании астрономической сетки нитей – регистрируется время пересечения каждой нити. При использовании окулярного микрометра – делается несколько наведений с регистрацией времени и снятием отсчётов по гребёнке и барабану. При использовании контактного микрометра – время регистрируется автоматически, отсчёт по гребёнке и барабану не снимается.

*Регистрация времени.* При использовании контактного микрометра перед моментом начала наблюдения конкретной звезды наблюдатель подаёт помощнику команду на включение хронографа. Вращением барабана микрометра наблюдатель сопровождает звезду, на хронографе автоматически регистрируется время. После наблюдения подаётся команда на отключение хронографа.

При отсутствии хронографа используется следующий приём. При этом при пересечении нити звездой (Солнцем) или наведением нити на объект наблюдатель подаёт команду вида «Внимание...Есть» и помощник регистрирует и записывает время. В отдельных случаях при отсутствии помощника наблюдатель сам регистрирует время, например, используя специальные часы с регистрацией.

Если предусмотрено в используемом способе наблюдения – снимаются отсчёты по горизонтальному или вертикальному кругам. Также, если предусмотрено, снимаются отсчёты по концам пузырька уровня, накладного или талькоттовского. Отсчёты по уровню снимаются дважды: непосредственно перед первым наведением на светило и сразу после последнего.

### **4.3 Порядок обработки результатов астрономических наблюдений**

Обработка наблюдений начинается с проверки правильности вычисления поправок и хода часов.

В журналах наблюдений вычисляется среднее время наблюдения  $T_{ср}$  для каждого приёма. Из журнала приёма сигналов точного времени выписываются: поправка часов на предшествующий приём сигналов  $u_1$ , время приёма сигналов  $X_1$  и ход часов  $\omega$ . Вычисляется время, прошедшее от момента приёма сигналов до

момента наблюдений, переводится в меру «часы и доли часа», вычисляется поправка за ход часов  $\omega_n$ , вычисляется время наблюдения, исправленное поправкой часов и поправкой за ход часов:

$$\omega_n = \omega \cdot (T_{cp} - X_1)^h$$
$$T_n = T_{cp} + u_1 + \omega_n$$

Журнал наблюдений окончательно обрабатывается: вычисляются средние значения по отсчётам с кругов, окулярного микрометра, вычисляются поправки по отсчётам, снятым с уровней и т.п., зависящее от способа наблюдений. Вычисления в журнале проверяются «во вторую руку».

Дальнейшие вычисления производятся на компьютере или в соответствующих бланках вручную. При этом сначала вычисляются видимые места светил, затем окончательный результат по формулам, соответствующим данному способу наблюдений.

Последний этап – вывод среднего из приёмов или уравнивание результатов наблюдений и оценка точности.

## 5. Зенитальные способы астрономических определений

### 5.1 Сущность зенитальных способов астрономических определений

В основу реализации способов положены формулы:

$$\cos z = \sin \varphi \cdot \sin \delta - \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t \quad (2)$$

$$t = s - \alpha$$

$$s = S + \lambda$$

Для нас в формулах неизвестными являются широта  $\varphi$  и долгота  $\lambda$ . Известными величинами являются: склонение светила  $\delta$  и прямое восхождение  $\alpha$ , которые выбираются из каталогов или астрономического ежегодника (АЕ). Зенитное расстояние  $z$  и время наблюдения  $s$  - измеряемые величины. Отсюда должно быть видно, что задача напрямую не решается, так как в одном уравнении содержится минимум два неизвестных - широта и долгота. В реальности добавляются величины: ошибка измерения зенитного расстояния, ошибка регистрации времени.

Тем не менее, задача разрешима, но при соблюдении определённых условий. Важнейшим из них является такое - перед производством наблюдений необходимо определить приближённые значения широты  $\varphi_0$  и долготы  $\lambda_0$ , например, по карте, или каким-либо приближённым астрономическим способом. А далее, каждый способ реализуется так, чтобы находить не сами значения широт и долгот, а поправки к их приближённым значениям. При этом возможно применение такого метода, когда точное определение какой либо одной величины (широты или долготы) не требует знания точного значения другой величины. Например, можно подобрать такой способ, который позволяет точно определить значение долготы, используя в качестве исходного данного приближённое значение широты. И наоборот - подобрать способ точного определения широты, используя приближённое значение долготы.

Такой подход не исключает и возможность использования способов, когда при получении одной координаты, требуется точное знание другой. Значит, таковая должна быть определена заранее.

Всё это не исключает возможности разработки и применения способов совместного определения обеих координат. Необ-

ходимо лишь помнить то, что для успешного решения систем уравнений, должно быть произведено несколько наблюдений нескольких светил с тем, чтобы иметь избыточные измерения.

## 5.2 Наивыгоднейшие условия в зенитальных способах

Продифференцируем уравнение (2) по переменным  $z, \varphi, t$ :  
 $-\sin z \cdot dz = (\cos \varphi \cdot \sin \delta - \sin \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t) \cdot d\varphi - \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin t \cdot dt$   
 Используя теорему синусов, запишем:

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

Кроме того, возьмём одну из формул из сферической астрономии, преобразуем её и получим:

$$-\sin z \cdot \cos A = \cos \varphi \cdot \sin \delta - \sin \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t$$

Подставим два последних выражения в дифференциальную формулу и получим:

$$-\sin z \cdot dz = -\sin z \cdot \cos A \cdot d\varphi - \cos \varphi \cdot \sin z \cdot \sin A \cdot dt$$

Поделив обе части на  $-\sin z$ , получаем:

$$dz = \cos A \cdot d\varphi + \cos \varphi \cdot \sin A \cdot dt$$

Учитывая источники ошибок в регистрируемом времени наблюдения, можно записать:

$$dt = dT_n + du,$$

где: -  $dT_n$  – дифференциальное изменение регистрации времени;  
 -  $du$  – дифференциальное изменение поправки часов, включая ход часов. Переходя от дифференциалов к малым изменениям, окончательно имеем:

$$\Delta z = \cos A \cdot \Delta \varphi + \cos \varphi \cdot \sin A \cdot (\Delta T + \Delta u).$$

Выводя  $\Delta \varphi$  в правую часть, получаем:

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta z}{\cos A} - \frac{\cos \varphi \cdot \sin A \cdot (\Delta T + \Delta u)}{\cos A}.$$

*Анализ формулы.* Чем ближе светило к меридиану, тем больше значение  $\cos A$ . Чем дальше светило от меридиана, тем больше влияние ошибок  $\Delta z$ ,  $\Delta T$  и  $\Delta u$  на ошибку в получении широты. Чем ближе светило к меридиану, тем меньше значение  $\sin A$ . Тем меньше влияние ошибок в определении времени. Считая  $T = s$ , получаем:

$$\Delta T = \Delta s = \Delta S + \Delta \lambda,$$

что даёт основание считать, что при  $\sin A \approx 0$ , влияние ошибки в знании значения долготы - минимально.

*Вывод: определение широты необходимо производить из наблюдений светил вблизи меридиана.*

Раскрываем скобки в формуле

$$\Delta z = \cos A \cdot \Delta \varphi + \cos \varphi \cdot \sin A \cdot \Delta T + \cos \varphi \cdot \sin A \cdot \Delta u$$

Перепишем последнее слагаемое правой части формулы в левую часть, а  $\Delta z$  - в правую и поменяем знаки:

$$\cos \varphi \cdot \sin A \cdot \Delta u = \Delta z - \cos A \cdot \Delta \varphi - \cos \varphi \cdot \sin A \cdot \Delta T$$

Поделим обе части на  $\cos \varphi \cdot \sin A$  и получим:

$$\Delta u = -\Delta T + \frac{\Delta z}{\cos \varphi \cdot \sin A} - \frac{\Delta \varphi}{\cos \varphi \cdot \operatorname{tg} A}$$

*Анализ формулы.* Величина  $\Delta T$  - ошибка регистрации времени наведения на светило. Она, как мы уже рассматривали, складывающаяся из ошибок: работы часов, вызванных вариациями хода часов, ошибок приёма сигналов точного времени, личных ошибок, связанных с особенностями психомоторных свойств человека-наблюдателя. Из формулы видно, что ошибка  $\Delta T$  полностью входит в ошибку определения поправки часов, а значит и астрономической долготы.

Ошибка  $\Delta z$  включает в себя ошибки: снятия отсчёта по вертикальному кругу, уровня, учёта поправки за рефракцию. Ошибка будет минимальна, если величина  $\sin A$  будет близка к 1, а значит, азимут будет близок к  $90^\circ$  или  $270^\circ$ .

Аналогично, при таких значениях азимута величина  $\operatorname{tg} A$  будет стремиться к бесконечности и влияние ошибки  $\Delta \varphi$  в знании значения широты будет минимальным.

*Выводы:*

- при определении долготы, светила необходимо наблюдать в первом вертикале или вблизи него;
- при определении долготы важным становится более точное определение времени;
- точность определения долготы зенитальными способами ухудшается с увеличением широты ( $\cos \varphi$  стремится к 0 в обоих знаменателях); на высоких широтах способы практически неприменимы.

### 5.3 Основные зенитальные способы определения астрономических широт и долгот

На рис. 2.4 изображена таблица поправки за рефракцию. Эти поправки рассчитаны для идеального состояния атмосферы, чего реально не бывает, особенно накануне смены погоды. Поэтому всегда существует некая неучтённая ошибка рефракции, полностью входящая в измеренное зенитное расстояние. Поэтому при разработке способов наблюдений стараются наблюдать несколько звёзд на одинаковых зенитных расстояниях. При этом ошибка рефракции будет иметь одинаковое значение, то есть являться систематической, а сам способ направлен либо на её выявление, либо на компенсацию. Кратко рассмотрим основные зенитальные способы.

Для повышения точности измерений используется талькоттовский уровень. Ни рис. 6.1. показана необходимость регистрировать наклон зрительной трубы:

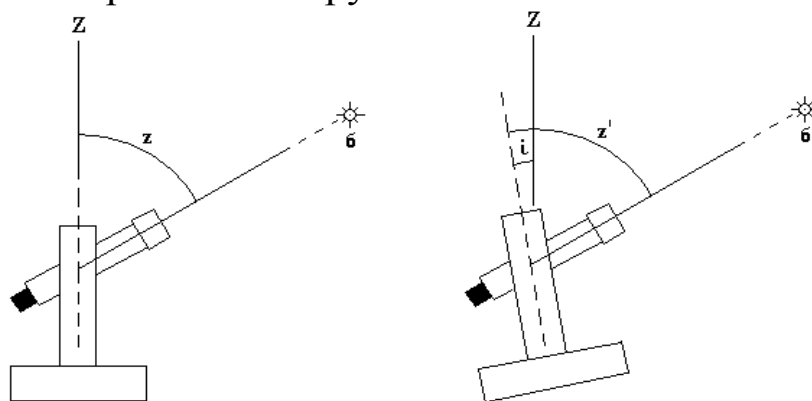


Рис. 6.1. Влияние наклона зрительной трубы и прибора в целом на измеряемое зенитное расстояние

Талькоттовский уровень позволяет непосредственно измерить угол наклона  $i$ .

*Способ Цингера* предназначен для определения долготы. В этом способе последовательно наблюдаются две звезды (пара), располагающиеся на одинаковом зенитном расстоянии вблизи первого вертикала, но одна из них в западной части небесной сферы, другая – в восточной. Эфемериды составляются так, чтобы время прохождения звёзд разнилось примерно на 5 минут, а сумма азимутов была близка к  $360^\circ$ .

*Способ Талькотта* предназначен для определения широты. Звёзды наблюдаются парами строго в меридиане на одинаковых

зенитных расстояниях. При этом одна звезда проходит севернее, другая южнее. Большие трудности возникают при составлении эфемерид. Приходится подбирать в пары весьма слабые звёзды, координат которых нет, например, в Астрономическом ежегоднике.

*Способ Певцова* предназначен для определения широты. Аналогичен способу Цингера, но пары звёзд (северная и южная) подбираются вблизи меридиана.

*Способ Мазаева* предназначен для совместного определения широты и долготы. Несколько менее точный способ. Зрительная труба устанавливается на выбранное зенитное расстояние, обычно  $30^\circ$  или  $45^\circ$ . Прибор горизонтируется по талькоттовскому уровню. В пределах часа (от приёма сигналов до следующего приёма) наблюдается 6-8 звёзд, равномерно распределённых по азимутам. Для каждой звезды составляется уравнение с неизвестными: поправки в широту, долготу и ошибка учёта рефракции. Система уравнений решается, исходя из принципа наименьших квадратов.

*Способ Сомнера* предназначен для совместного определения широты и долготы. Аналогичен способу Мазаева, но светила наблюдаются на различных зенитных расстояниях, поэтому способ характеризуется ещё меньшей точностью. Из-за меньшей точности допускается графическое (нестрогое) уравнивание.

*Определение широты по высоте Полярной звезды.* Измеряется зенитное расстояние Полярной звезды. Способ легко реализуется, но характеризуется средней точностью из-за недоучёта ошибки рефракции.

*Определение широты по зенитному расстоянию Солнца.* Измеряется зенитное расстояние Солнца в период вблизи полдня. Также характеризуется средней точностью.

*Определение долготы по зенитному расстоянию Солнца.* Измеряется зенитное расстояние Солнца в период после восхода или до захода. Также характеризуется средней точностью.



## 6. Азимутальные способы астрономических определений

### 6.1 Сущность азимутальных способов астрономических определений

В формулах сферической астрономии присутствует величина  $A$  - азимут светила. Можно установить, что азимут светила зависит от координат светила, точки стояния и времени наблюдения. Логично предположить, что измеряя азимут светила и регистрируя момент наблюдения, можно, решая обратную задачу, определить астрономические координаты точки стояния - широту и долготу. Однако, так получается не всегда.

Измеряя зенитное расстояние светила, мы имели опорную точку, от которой производили измерения. Это точка зенита  $Z$ . Её положение определялось по уровню. Для измерения азимута также нужна опорная точка, например, ориентирный пункт (ОРП), азимут на который с точки стояния известен. В практическом смысле у нас: либо должен быть сориентирован в меридиане инструмент (теодолит), либо мы должны измерять угол между ОРП и светилом. Это влечёт за собой проблемы: во-первых, необходимо иметь направление с азимутом, определённым с высокой точностью, что бывает далеко не всегда, во-вторых, ориентирование по азимуту вносит дополнительную ошибку за само ориентирование. Поэтому азимутальные способы определения координат рассчитаны на наблюдения разностей направлений минимум пар звёзд.

Это, в каком то смысле, можно считать некоторым недостатком азимутальных способов.

*Важным достоинством азимутальных способов является то, что используя их, мы можем получать астрономические азимуты направлений на земные предметы.*

### 6.2 Наивыгоднейшие условия в азимутальных способах

Обратимся к рис. 1.1. Если считать точку  $O$  центром горизонтального круга (ГК), то линия  $N-S$  - сечение плоскости меридиана. Соответственно, линия  $O-\sigma$  - сечение вертикала светила  $\sigma$ , а линия  $O-Mn$  - вертикал местного предмета  $Mn$ , например, марки.

Астрономический азимут с точки  $O$  на местный предмет  $Mn$  обозначен символом  $a$  и может являться искомой величиной. Азимут  $A$  - азимут светила в некоторый момент  $T$ .  $Q$  - угол между вертикалами светила и местного предмета. Этот угол может быть измерен угломерным прибором (теодолитом).

Если рассматривать вопрос определения азимута местного предмета, то в самом упрощённом виде процедура выглядит так:

- навестись на светило, засечь время наблюдения  $T$  и снять отсчёт по ГК  $Ni$ ;

- навестись на местный предмет и снять отсчёт по ГК  $Mi$ ;

- вычислить угол  $Q$ , как разность отсчётов:

$$Q = Mi - Ni$$

- введя поправку в показания часов, вычислить азимут  $A$ ;

- вычислить азимут местного предмета:

$$a = A + Q$$

Отметим, что для вычисления азимута светила необходимо знать:

- поправку часов, а значит долготу точки стояния  $\lambda$ ;

- широту точки стояния  $\varphi$ .

Для определения выгоднейших условий таких определений, рассмотрим параллактический треугольник (рис. 14.2):

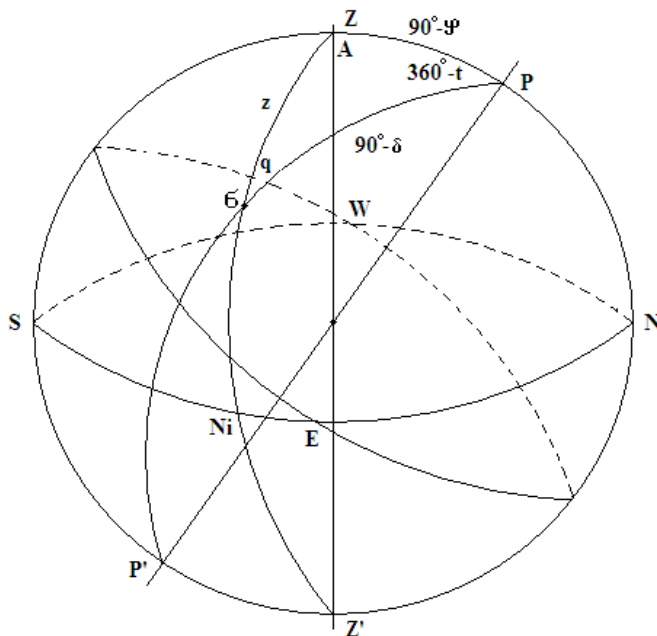


Рис. 7.1. Параллактический треугольник

Запишем формулу «пяти элементов» для этого треугольника, избавившись от скобок в функциях:

$$\sin z \cdot \cos A = \sin(90^\circ - \varphi) \cdot \cos(90^\circ - \delta) - \sin(90^\circ - \delta) \cdot \cos(90^\circ - \varphi) \cdot \cos(360^\circ - t)$$

$$\sin z \cdot \cos A = \cos \varphi \cdot \sin \delta - \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos t$$

Воспользуемся теоремой синусов для параллактического треугольника и, избавившись от скобок в функциях, получим:

$$\sin z = -\frac{\cos \delta \cdot \sin t}{\sin A}$$

Подставим, учтём, что  $(\cos a / \sin a) = \operatorname{ctg} a$ , и получим:

$$\cos \delta \cdot \sin t \cdot \operatorname{ctg} A = \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos t - \sin \delta \cdot \cos \varphi$$

Поделим обе части уравнения на  $\cos \delta$ , перенесём все члены в левую часть и получим:

$$\operatorname{ctg} A \cdot \sin t - \sin \varphi \cdot \cos t + \operatorname{tg} \delta \cdot \cos \varphi = 0$$

Продифференцируем формулу по  $A$ ,  $t$  и  $\varphi$ . Получим выражение:

$$-\frac{\sin t}{\sin^2 A} \cdot dA + (\operatorname{ctg} A \cdot \cos t + \sin \varphi \cdot \sin t) \cdot dt - (\cos \varphi \cdot \cos t + \sin \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta) \cdot d\varphi = 0$$

После ряда преобразований и замены дифференциалов приращениями (ошибками) окончательно получаем:

$$\Delta A = \frac{\cos \varphi \cdot \cos \delta}{\sin z} \cdot (\Delta T + \Delta u) + \frac{\sin A}{\operatorname{tg} z} \cdot \Delta \varphi$$

Анализ формулы. Ошибка определения азимута будет минимальна, при условиях:

- склонение  $\delta$  должно быть как можно больше;
- азимут  $A$  светила должен быть близок к  $0^\circ$  или  $180^\circ$ ;
- зенитное расстояние  $z$  должно быть как можно больше.

Первым двум условиям хорошо соответствует Полярная звезда. Склонение звезды близко к  $90^\circ$ , поэтому первый член уравнения близок к нулю. Поэтому ошибки регистрации времени минимальны. На высоких широтах полюс мира находится близко от зенита, поэтому зенитное расстояние уменьшается. Возрастает влияние второго члена уравнения.

В остальных случаях желательно наблюдать светила на больших зенитных расстояниях.

Влияние условий наблюдений на определение широты и долготы рассматривать не будем, так как азимутальные способы для этих целей в геодезии практически не используются.

### 6.3 Основные способы определения астрономического азимута

Для получения азимута с высокой точностью важно знать наклон горизонтальной оси прибора. Для чего используется наклонный уровень. На рис. 7.2. показано влияние наклона оси:

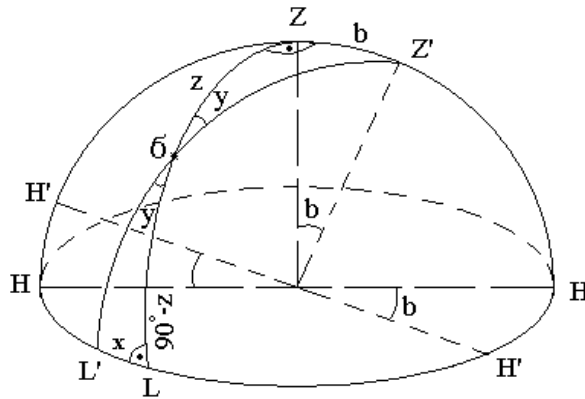


Рис. 7.2. Влияние наклона горизонтальной оси

Из рисунка видно, что при наличии наклона оси на угол  $b$ , вместо отсчёта  $L$  будет снят отсчёт  $L'$ . Угол наклона  $b$  получается по показаниям уровня, разница в отсчётах  $x$  вычисляется по формуле:

$$x = b \cdot \operatorname{ctg} z$$

При производстве наблюдений перед наблюдением светила и после наблюдения снимаются отсчёты с концов пузырька.

Краткое описание основных способов определения азимута.

*Азимут из наблюдения звёзд в меридиане.* Наблюдаются звёзды в меридиане, примерно половину северных и половину южных. Наблюдение одной звезды – приём. Он выполняется в следующей последовательности: наведение на ОРП при круге лево (КЛ), снятие отсчёта по горизонтальному кругу (ГК), установка прибора по эфемеридам несколько в стороне от меридиана (до прохода звездой меридиана), при появлении звезды в поле зрения трубы снимаются отсчёты по концам пузырька уровня, регистрируется прохождение звезды, снимаются отсчёты по уровню и ГК; прибор переводится в положение круг право (КП), по эфемеридам прибор устанавливается за меридианом, при появлении звезды снимаются отсчёты по уровню, регистрируется время прохождения звезды, снимаются отсчёты по уровню и ГК; прибор наводится на ОРП и снимается отсчёт по ГК.

*Азимут по часовому углу Полярной звезды.* Наблюдение Полярной звезды производится в последовательности: наведение на

ОРП и снятие отсчёта по ГК при КЛ, установка прибора по эфемеридам, снятие отсчётов по уровню, наведение на звезду с регистрацией времени и отсчётом по ГК, снятие отсчётов по уровню; перевод прибора в положение КП, установка по эфемеридам, снятие отсчётов по уровню, наведение на звезду с регистрацией времени и отсчётом по ГК, отсчёт по уровню, наведение на ОРП и снятие отсчёта по ГК.

*Азимут по часовому углу Солнца.* Последовательность наблюдений как при наблюдении Полярной звезды, за исключением того, что на Солнце наводятся дважды – на края Солнца. Наблюдения производятся в период, близкий к полудню.

*Азимут по высотам ярких звёзд.* Способ отличается невысокой точностью, но не требует регистрации времени. Наблюдения производятся на яркие опознанные звёзды. Последовательность наблюдений: наведение на ОРП и снятие отсчёта по ГК при КЛ, наведение на выбранную звезду и снятие отсчётов по ГК и вертикальному кругу (ВК), наведение на ОРП и снятие отсчёта по КГ.

## Указатель персоналий

**Аристотель** (384 до н.э. - 322 до н.э.) - древнегреческий философ.

**Бугер Пьер** (1698 - 1758) - французский физик, астроном, специалист в области геодезической гравиметрии, один из руководителей Перуанской экспедиции по установлению формы и размеров Земли (1736 - 1746).

**Бюффон Жорж-Луи Леклерк** (1707 - 1788) - французский натуралист. В 1745 году предложил гипотезу возникновения планет солнечной системы из фрагментов Солнца, вырванных ударом кометы.

**Галилей Галилео** (1564 -1642) - итальянский физик, астроном, математик. Существенное внимание уделял общим проблемам зарождавшегося научного метода, а также отграничению науки от всякого рода околонучных и псевдонаучных теорий. Сделал важные астрономические открытия, подрывавшие основы средневековых представлений о космосе и утверждавшие идею единства небесных и земных явлений.

**Гершель Вильям** (1738 - 1822) - английский астроном и оптик. Построил свой крупнейший телескоп-рефлектор с диаметром зеркала 122 см, сделал ряд важных открытий в области космологии.

**Годен Луи** (1704 - 1760) - французский астроном, академик Французской академии наук, один из руководителей Перуанской экспедиции по установлению формы и размеров Земли (1736 - 1746).

**Джинс Джеймс** (1877 - 1946) - английский математик, физик и астроном. В 1916 году предложил гипотезу происхождения планет солнечной системы из фрагментов Солнца, вырванных из него притяжением близко пролетевшей звезды.

**Кант Иммануил** (1724 - 1804) - немецкий философ, родоначальник немецкой классической философии. В 1755 году предложил гипотезу возникновения солнечной системы из газопылевого облака.

**Кеплер Иоганн** (1571 - 1630) - немецкий астроном. Открыл законы движения планет (Кеплера законы), на основе которых составил таблицы движения планет. Заложил основы теории за-

тмений. Изобрел телескоп, в котором объектив и окуляр - двояковыпуклые линзы.

**Кондамин Шарль Мари** (1701 - 1774) - французский астроном, геодезист, путешественник, один из руководителей Перуанской экспедиции по установлению формы и размеров Земли (1736 - 1746).

**Коперник Николай** (1473-1543) - польский астроном, создатель учения о гелиоцентрической системе мира, автор сочинения «Об обращениях небесных сфер» (1543), запрещенного католической церковью с 1616 по 1828 год.

**Лаплас Пьер-Симон** (1749 - 1827) - выдающийся французский математик, физик, астроном, член Французского географического общества, специалист в области небесной механики и дифференциального исчисления, один из создателей теории вероятности.

**Мопертюи Пьер Луи де** (1698 - 1759) - французский астроном и геодезист, последователь и распространитель идей И. Ньютона, руководитель Лапландской экспедиции по изучению формы и размеров Земли (1736 - 1737).

**Ньютон Исаак** (1643 - 1727) - английский физик, астроном, математик, член Лондонского королевского общества и его президент. Автор гениальнейшего произведения «Математические начала натуральной философии». В нем изложена теория всемирного тяготения, обоснованы законы движения небесных тел (законы Кеплера), математически доказано, что Земля, по своей форме, представляет сплюснутый сфероид.

**Птолемей Клавдий** (ок. 90 – ок. 168) - древнегреческий астроном, географ, математик. Разработал геоцентрическую систему мира.

**Струве Василий Яковлевич** (Фредерик-Георг-Вильгельм) (1793 - 1864) - выдающийся астроном, директор Пулковской обсерватории, профессор Дерптского университета. С целью уточнения формы и размеров Земли, по его инициативе и под его руководством, выполнены градусные измерения по «дуге Струве».

**Хаббл Эдвин** (1889-1953) - американский астроном. Вывел закон, названный его именем: «Чем дальше галактика, тем больше её скорость».

**Хойл Фред** (1915 - 2001) - британский астроном. Разработал гипотезу возникновения планет солнечной системы и остатков взорвавшейся новой - спутника Солнца.

**Шмидт Отто Юльевич** (1891 - 1956) - выдающийся советский учёный и государственный деятель. Предложил гипотезу возникновения солнечной системы из газопылевого облака.

**Эратосфен Киренский** (276 до н. э. - 194 до н. э.) - греческий математик, астроном, географ и поэт, глава Александрийской библиотеки.

**Янский Карл** (1905 - 1950) - американский инженер, один из пионеров радиоастрономии. Открыл (1932) космическое радиоизлучение.



# Список рекомендуемой литературы

## Основная литература

1. Засов А. В. Астрономия : учебное пособие / А. В. Засов, Э. В. Кононович. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 256 с.
2. Кононович Э. В. Общий курс астрономии : учебное пособие / Э. В. Кононович, В. И. Мороз ; ред. В. В. Иванов. – 4-е изд. – Москва : ЛИБРОКОМ, 2011. – 544 с.
3. Пандул И. С. Геодезическая астрономия применительно к решению инженерно-геодезических задач / И. С. Пандул. – Санкт-Петербург : Политехника, 2011. – 327 с. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/>

## Дополнительная литература

1. Жаров В. Е. Сферическая астрономия / В. Е. Жаров. – Москва : Фрязино, 2006. – 480 с.
2. Клищенко А. П. Астрономия : учебное пособие / А. П. Клищенко, В. И. Шупляк. – Москва : Новое знание, 2004. – 224 с.
3. Уралов С. С. Курс геодезической астрономии / С. С. Уралов. – Москва : Книга по Требованию, 2013. – 592 с.

## Руководящие документы и справочная литература

1. Абалакин В. К. Геодезическая астрономия и астрометрия : Справочное пособие / В. К. Абалакин, И. И. Краснорылов, Ю. В. Плахов. – Москва : Картгеоцентр - Геодезиздат, 1996. – 435 с.
2. Астрономический атлас / Пер. с итал. В. С. Гостик. – Минск : Поппури, 2012. – 232 с.

## Аннотация сайтов Интернет

1. Российское общество содействия развитию фотограмметрии и дистанционного зондирования. – Режим доступа: <http://rsprs.euro.ru/>
2. Официальный сайт Международного общества содействия развитию фотограмметрии и дистанционного зондирования. – Режим доступа: <http://www.isprs.org/>
3. Сайт научного электронного журнала по геодезии, картографии и навигации. – Режим доступа: <http://www.geoprofi.ru/>
4. Сайт Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК). – Режим доступа: <http://www.miiigaik.ru/sitemap/>
5. Российская астрономическая сеть. – Режим доступа: <http://astronet.ru>
6. Сайт Центрального научно-исследовательского института геодезии, аэросъемки и картографии (ЦНИИГАиК). – Режим доступа: <http://cniigaik.ru/info/>
7. Сайт Сибирской Государственной геодезической академии (СГГА), г. Новосибирск. – Режим доступа: <http://www.ssga.ru/>
8. Проект «Астрогалактика». – Режим доступа: <http://astrogalaxy.ru>
9. Новости астрономии и космонавтики. – Режим доступа: <http://astronomiya.com>
10. Официальный сайт Федерального агентства кадастра объектов недвижимости Российской Федерации. – Режим доступа: <http://www.kadastr.ru/>
11. Официальный сайт некоммерческого партнерства «Кадастровые инженеры». – Режим доступа: <http://www.roskadastre.ru/>
12. Астрофорум – астрономический портал. – Режим доступа: <http://astronomy.ru>
13. Сайт саморегулируемой организации «Изыскатели Санкт-Петербурга и Северо-Запада». – Режим доступа: <https://www.izisk.spb.ru/>
14. Астрономия 21 век. – Режим доступа: <https://astro21vek.ru>
15. Сайт компании Геокосмос. – Режим доступа: <http://www.geokosmos.ru/>
16. Официальный сайт Федерального космического агентства РФ. – Режим доступа: <http://www.federalspace.ru/>

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное пособие  
ISBN 978-5-906759-13-9

Тарелкин Е. П. Геодезическая астрономия : учебное пособие  
/ Е. П. Тарелкин, А. Ф. Блинов. – Санкт-Петербург : НОИР г.  
Санкт-Петербург, 2015. – 52 с.

Ответственный за выпуск Грызлова А.В.  
Редактор Федорова Т.Л.

Подписано в печать 24.10.2014

Заказ № 1024/14

Формат 60x84  $\frac{1}{16}$

Усл. печ.л. 4,9.

Тираж 300 экз.

Отпечатано в ООО «Информационно-консалтинговый  
центр» по заказу НЧОУ ВПО  
«Национальный открытый институт г.Санкт-Петербург»

197183 г. Санкт-Петербург, ул. Сестрорецкая дом 6  
Тел. +7-812-430-07-16 доб. 224