

## Практическое занятие №2 Определение положения небесных светил на любую дату и время суток

### Теория

Единицей измерения времени в астрономии служат *сутки* - промежуток времени, в течение которого Земля делает полный оборот вокруг своей оси относительно какой-нибудь точки на небе. В зависимости от этой точки отсчета различают *звездные сутки* - промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями точки весеннего равноденствия, и *истинные солнечные сутки* - промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями центра Солнца. Солнечные сутки примерно на 4 минуты длиннее звездных, так как Солнце движется среди звезд в сторону вращения Земли, и для того, чтобы его догнать, Земле надо сделать относительно звезд чуть больше одного оборота. Для измерения больших промежутков времени используют *тропический год* - промежуток времени между двумя последовательными прохождениями центра Солнца через точку весеннего равноденствия.

Для измерения времени можно использовать как звездные, так и истинные солнечные сутки. Если используются звездные сутки, измеряемое время называют *звездным временем*, а если истинные солнечные сутки - то *истинным солнечным временем*. Однако это не означает, что мы измеряем два каких-то независимых друг от друга времени. Фактически, это как бы две разные линейки для измерения времени. Так, расстояние между городами можно выразить и в километрах, и в милях. Ситуация с измерением времени та же самая.

### 1. Звездное время

За начало звездных суток на данном географическом меридиане принимается момент верхней кульминации точки весеннего равноденствия. *Звездное время* - время, протекшее с момента верхней кульминации точки весеннего равноденствия до любого другого ее положения, выраженное в долях звездных суток (звездные часы, минуты и секунды). Таким образом, звездное время  $s$  равно по величине часовому углу точки весеннего равноденствия, или сумме часового угла какого либо светила  $O$  и его прямого восхождения (см. рис. 17):

$$s = t_{\gamma}, \quad (11)$$

$$s = t_O + \alpha_O. \quad (12)$$

Отсюда, в частности, следует, что в момент верхней кульминации какой-либо звезды  $O$  звездное время в точности равно ее прямому восхождению  $s = \alpha_O$ .

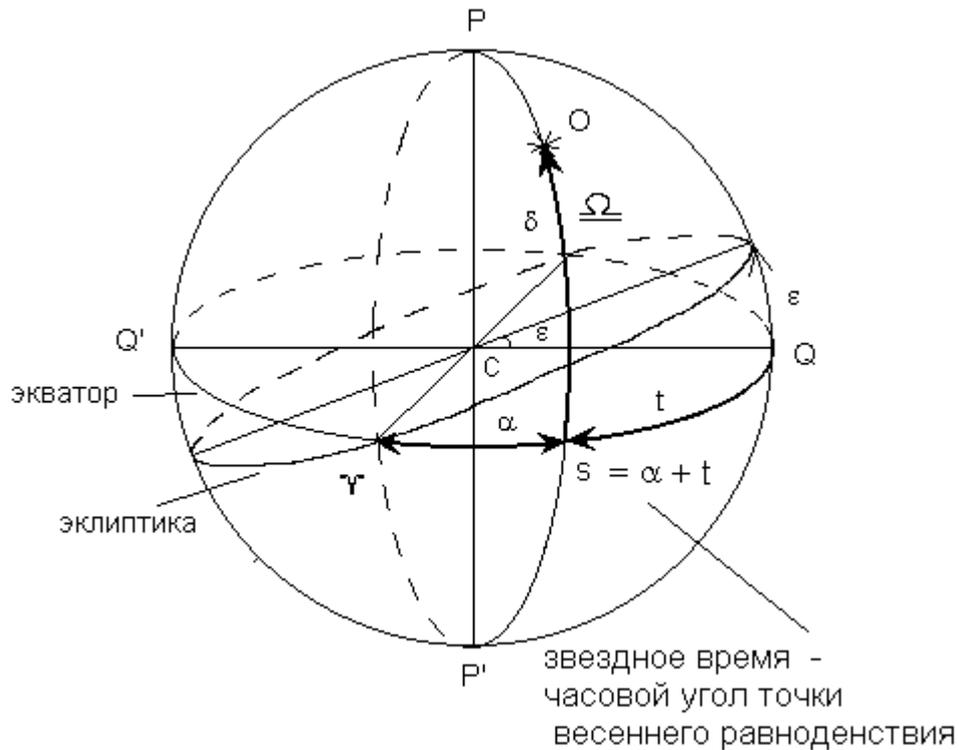


Рис. 17. Связь звездного времени  $s$  с прямым восхождением  $\alpha$  и часовым углом  $t$  светила

## 2. Истинное солнечное время

За начало истинных солнечных суток принимается момент нижней кульминации центра Солнца. Истинное солнечное время  $T_{\odot}$  - это время, протекшее от момента нижней кульминации центра Солнца до любого другого его положения, выраженное в долях истинных солнечных суток (истинные солнечные часы, минуты и секунды). Значит, истинное солнечное время равно часовому углу центра Солнца плюс 12 часов:

$$T_{\odot} = t_{\odot} + 12^h. \quad (13)$$

К сожалению, продолжительность истинных солнечных суток различна в течение года, т.к.:

1) Солнце движется не по небесному экватору, а по наклонной к нему эклипике, т.е. изменение прямого восхождения Солнца за один день вблизи солнцестояний больше, чем вблизи равноденствий. Поэтому между нижними кульминациями Солнца вблизи солнцестояний и равноденствий проходят немного разные промежутки времени.

2) Солнце и по эклиптике движется неравномерно из-за эллиптичности орбиты Земли.

По этим причинам, например, истинные солнечные сутки 22 декабря приблизительно на 50 секунд длиннее, чем 23 сентября. Понятно, что использование истинного солнечного времени неудобно, и поэтому было введено среднее солнечное время.

### 3. Среднее солнечное время

Были введены две фиктивные точки - *среднее эклиптическое Солнце* и *среднее экваториальное Солнце*. Среднее эклиптическое Солнце равномерно движется по эклиптике и совпадает с истинным в момент прохождения Земли перигелия. Среднее экваториальное Солнце движется равномерно по экватору со средней скоростью истинного Солнца и одновременно со средним эклиптическим Солнцем проходит точку весеннего равноденствия.

*Средние солнечные сутки* - промежуток времени между двумя последовательными нижними кульминациями среднего экваториального Солнца на одном и том же географическом меридиане. За начало солнечных суток принимается нижняя кульминация среднего экваториального Солнца, и среднее солнечное время  $T_M$  равно

$$T_M = t_M + 12^h, \quad (14)$$

где  $t_M$  - часовой угол среднего экваториального Солнца.

Понятно, что среднее солнечное время нельзя непосредственно измерить из астрономических наблюдений, его можно только вычислить. Связь между истинным солнечным временем и средним солнечным временем выражается через **уравнение времени**  $\eta$  :

$$\eta = T_M - T_{\odot}. \quad (15)$$

Заметим, что уравнение времени можно определить не только как разность между средним и истинным солнечным временем, но и наоборот, как разницу между истинным и средним солнечным временем. В Астрономическом Ежегоднике используется второе определение, но мы, вслед за Воронцовым-

Вельяминовым, будем использовать первое. Значение  $\eta$  изменяется от  $+14^m$  (около 11 февраля) до  $-16^m$  (около 3 ноября), и его величина на каждый день дается в Астрономическом Ежегоднике (см. также рис. 18).

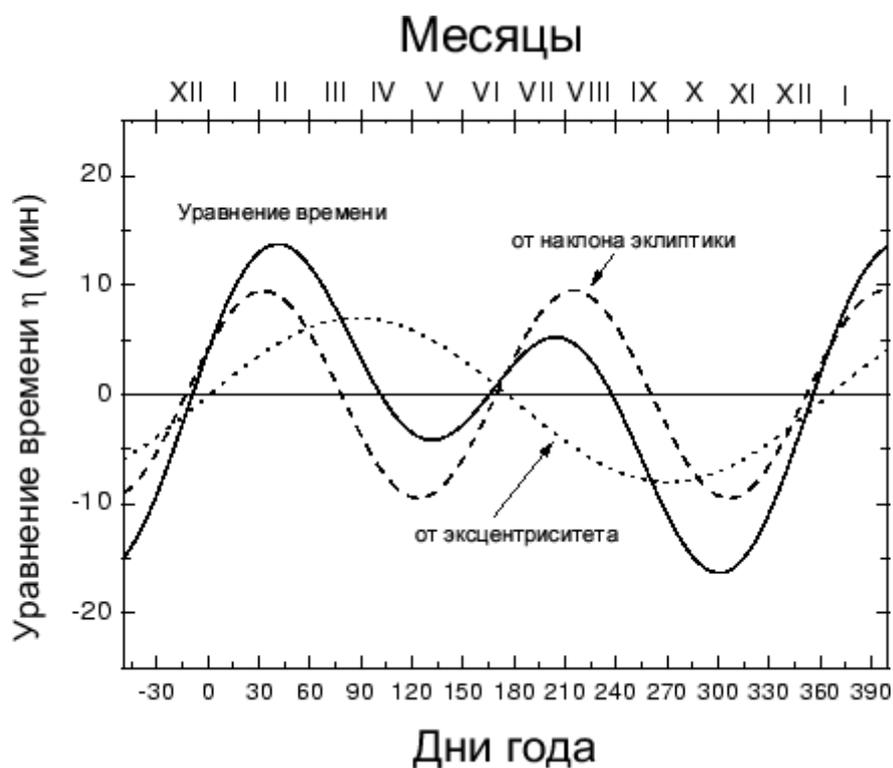


Рис. 18. Изменение уравнения времени  $\eta$  в течение года

#### 4. Эфемеридное время

Наблюдения показали, что и средние сутки не являются постоянной величиной. Причина - неравномерность вращения Земли вокруг своей оси. Существует вековое замедление вращения Земли из-за приливного трения, сезонные изменения, связанные с перераспределением воздушных и водяных масс на поверхности Земли. Обнаружены и нерегулярные, скачкообразные изменения скорости Земли, причина которых неизвестна. Величина этих неравномерностей - тысячные доли секунды.

Поэтому было введено равномерное эфемеридное время, которое определяется по движению Луны и планет. В 1956 г. Международный комитет мер и весов принял за основу эфемеридного времени *эфемеридную секунду*, как  $1/31\,556\,925.9747$  часть тропического года на 12 часов эфемеридного времени 0 января 1900 года.

В настоящее время вместо эфемеридного времени используют так называемое земное динамическое время, которое приблизительно соответствует эфемеридному.

## 5. Атомное время

Развитие науки привело к ситуации, когда техническими средствами можно обеспечить измерение времени с большей точностью, чем из астрономических наблюдений. В 1964 г. Международный комитет мер и весов в качестве эталона времени принял атомные цезиевые часы.

В основе атомного времени лежит *атомная секунда*, как промежуток времени, за который происходит 9 192 631 771 колебание электромагнитной волны, которую излучает атом цезия при переходе с одного фиксированного энергетического уровня на другой.

Атомная секунда немного меньше эфемеридной, и за год разность между атомным и эфемеридным временем достигает 0.9 сек. Поэтому почти каждый год атомные часы переводят на 1 секунду назад. Сигналы точного времени, передаваемые по радио, соответствуют атомному времени. Эти сигналы передаются в виде шести секундных импульсов, причем начало последнего сигнала означает конец часа. Несколько радиостанций мира круглосуточно ведут непрерывную передачу сигналов точного времени.

## 6. Системы счета времени

**Местное время** - это время, измеренное на данном географическом меридиане.

Разность любых местных времен на двух меридианах в один и тот же физический момент, равна разности долгот этих меридианов:

$$s_1 - s_2 = \lambda_1 - \lambda_2 \quad (16)$$

$$T_{\odot,1} - T_{\odot,2} = \lambda_1 - \lambda_2 \quad (17)$$

$$T_{M,1} - T_{M,2} = \lambda_1 - \lambda_2 \quad (18)$$

**Всемирное время UT** - местное среднее солнечное время гринвичского ( $\lambda=0$ ) меридиана. Если долготу  $\lambda$  места на Земле выразить в часовой мере и считать положительной к востоку от Гринвича, то имеет место следующее соотношение:

$$T_M = UT + \lambda. \quad (19)$$



$$1 \text{ ср. сутки} = \frac{366.2422}{365.2422} = 1.002738 = K \text{ зв. суток}, \quad (23)$$

$$1 \text{ зв. сутки} = \frac{365.2422}{366.2422} = 0.997270 = K' \text{ ср. суток}. \quad (24)$$

Все остальные единицы времени соотносятся друг с другом через эти же коэффициенты, т.е. 1 ср. час = 1.002738 зв. часа, и т.д., т.е.

$$s_1 - s_2 = (T_1 - T_2) \cdot K'$$

и

$$T_1 - T_2 = (s_1 - s_2) \cdot K.$$

Для удобства вычисления звездного времени на тот или иной момент, определенный по среднему солнечному времени, в Астрономическом Ежегоднике дается значение звездного времени на среднюю гринвичскую полночь  $S_0$ . За средние солнечные сутки величина  $S_0$  увеличивается на  $3^m 56^s.555$ , т.к. звездные сутки короче средних именно на эту величину.

Зная  $S_0$ , можно вычислить звездное время  $s_0$  в среднюю полночь на данном меридиане  $\lambda$ . Так как на этом меридиане полночь наступит на  $\lambda^h$  раньше, чем в Гринвиче, то и величина  $s_0$ , будет несколько меньше, чем  $S_0$ :

$$s_0 = S_0 - 3^m 56^s.555 \frac{\lambda^h}{24^h} = S_0 - 0.0027379 \cdot \lambda^h. \quad (25)$$

Для Казани ( $\lambda = 3^h 16^m$ )  $s_0 = S_0 - 32^s$ .

Пример. Необходимо найти звездное время в Казани на момент  $3^h$  среднего солнечного времени. Для этого надо найти звездное время в местную среднюю полночь  $s_0$ , и прибавить к нему промежуток времени в средние  $3^h$ , переведенный в промежуток звездного времени:

$$s = s_0 + T_M \cdot K'.$$

## 8. Календарь

Календарь - это система счета длительных промежутков времени.

Природа предоставила нам 3 естественных периодических процесса: смена дня и ночи, смена лунных фаз, смена времен года. В разное время у разных народов в основе календаря лежали разные процессы, поэтому существовали солнечные, лунные, лунно-солнечные календари. В основе солнечных календарей лежит продолжительность тропического года, в основе лунных календарей - лунного месяца, лунно-солнечные календари сочетают оба периода.

Мы живем по солнечному календарю. Из практических соображений календарь должен удовлетворять следующим условиям:

- 1) Календарный год должен содержать целое число суток.
- 2) Продолжительность календарного года должна быть как можно ближе к продолжительности тропического года.

### 8.1. Юлианский календарь

Как мы уже знаем, тропический год содержит 365.2422 солнечных суток или  $365^d 5^h 48^m 46^s \approx 365^d 6^h$ . На основе этого факта александрийский астроном Созиген разработал, а римский император Юлий Цезарь в 46 г. до нашей эры ввел календарь, называемый ныне *юлианским*. Суть его заключается в следующем. Продолжительность простого календарного года устанавливается в  $365^d$ . При этом за 4 года накапливается разница почти в 1 сутки, поэтому каждый четвертый год содержит  $366^d$  и называется високосным. Принято считать високосными те годы, номера которых делятся на 4 без остатка (например, 2004 г.).

Юлианский год длиннее тропического на  $0^d.0078$  и за 128 лет расхождение начинает составлять 1 сутки. Юлианским календарем пользовались около 16 столетий, и за это время накопилась разница в 10 суток. Это приводило к путанице в определении дат церковных праздников.

Например, по правилам христианской церкви праздник Пасхи должен наступать в первое воскресенье после первого полнолуния после дня весеннего равноденствия. В 325 г. день весеннего равноденствия приходился на 21 марта, а в 1582 г. - на 11 марта, что и приводило к трудностям в определении даты Пасхи.

### 8.2. Григорианский календарь

Реформа юлианского календаря стала необходимостью и в 1582 г. была проведена римским папой Григорием XIII, поэтому новый календарь носит название *григорианского*. Проект нового календаря был разработан итальянским математиком и врачом Лилио и направлен на приближение средней продолжительности календарного года к продолжительности тропического года. Суть реформы состоит в следующем.

- 1) Было устранено накопившееся расхождение в 10 суток юлианского календаря с учетом тропических лет (после 4 октября постановили считать 15 октября).
- 2) В юлианском календаре за 400 лет расхождение с реальным временем составляет почти ровно 3 суток. Поэтому в григорианском календаре принято не считать високосными те годы столетий, у которых номера не делятся без остатка на 400. Например, 2000 год был високосным, а 1900 - нет.

В результате средняя за 400 лет продолжительность календарного года в григорианском календаре составляет  $365^d.2425$ , расхождение всего  $0^d.0003$ , что даст расхождение в 1 сутки лишь через 3300 лет.

В России григорианский календарь был введен только в 1918 году (после 1 февраля постановили считать сразу 14 февраля), а православная церковь до сих пор пользуется юлианским.

Григорианский календарь называют еще новым стилем, а юлианский - старым стилем.

Начало календарного года (1 января), начало счета лет (от рождения Христова), деление года на 12 месяцев и недели по 7 дней - это условность, принятая по соглашению, традиция.

## 9. Линия перемены даты

При счете календарных дней необходимо условиться, на каком меридиане начинаются новые сутки. По международному соглашению таким меридианом является меридиан, отстоящий от гринвичского на  $180^\circ$ . *Линия перемены даты*, в океане проходит по этому меридиану, и огибает острова. Так что линия перемены даты всюду проходит по экватории океана.

К западу от линии перемены даты, называемой еще демаркационной линией, число месяца всегда на единицу больше, чем к востоку от нее (например, к западу, на Чукотке, 15 сентября, а к востоку, на Аляске, 14 сентября), поэтому при пересечении демаркационной линии это необходимо учитывать. При пересечении этой линии с запада на восток надо уменьшить число месяца на единицу, а с востока на запад - прибавить. На морских судах такое изменение производят в ближайшую полночь после пересечения линии перемены даты. Суда, плывущие на восток, (из Китая в Калифорнию) дважды считают одну и ту же дату (после 15 сентября вновь наступает 15 сентября), а плывущие на запад

(из Калифорнии в Китай) - пропускают одну дату (после 14 сентября сразу считают 16 сентября). Очевидно, что Новый год и новый месяц также начинаются на линии перемены даты.

## 10. Юлианские дни

В астрономии часто возникает задача определения числа суток, прошедших между двумя далеко отстоящими датами (наблюдения комет, переменных звезд, вспышки Новых и Сверхновых звезд).

Для удобства решения этой задачи в XVI веке н.э. Скалигер ввел понятие *юлианского периода* длиной 7980 лет, предложил считать за его начало 1 января 4713 года до н.э. и вести непрерывный счет дней, называемых *юлианскими днями*  $JD$ , начиная с этой даты. Началом юлианского дня считается средний гринвичский полдень. Юлианские даты дней текущего года даются в астрономических календарях и Астрономическом Ежегоднике. Например, 0 часов 1 января 2000 г. в Гринвиче это  $JD\ 2451544.5$ . Часто первые две цифры юлианской даты опускаются.

Период и дни названы Скалигером юлианскими в честь его отца Юлия, и не имеют отношения к Юлию Цезарю.

### Примеры решения задач

1. Звезда  $\gamma$  Малой Медведицы ( $\alpha = 15^h 20^m 49^s$ ) наблюдалась в нижней кульминации, причем звездные часы в это время показывали  $3^h 39^m 33^s$ . Какова поправка часов?

*Решение:* Поправкой часов называется разность между правильным временем и показанием часов

$$\Delta s = s_{\text{ист}} - s_{\text{часов}}$$

. В момент нижней кульминации в соответствии с формулой (12) звездное время равно  $3^h 20^m 49^s$ , следовательно

$$\Delta s = -18^m 44^s$$

поправка часов .

2. В Орле по часам, идущим по киевскому звездному времени, в  $4^h 48^m$  наблюдалась верхняя кульминация Капеллы ( $\alpha = 5^h 10^m$ ). Какова разность долгот этих двух городов?

*Решение:* Разность долгот двух пунктов равна разности двух любых местных времен, в данном случае звездных. В Орле звездное время равно прямому восхождению  $\alpha$  звезды в момент верхней кульминации, поэтому разность

$$\Delta \lambda = 5^h 10^m - 4^h 48^m = 0^h 22^m$$

долгот составляет .

3. Затмение Луны 2 апреля 1950 г. началось в  $19^h 03^m$  по всемирному времени. Когда оно началось в Алма-Ате ( $\lambda = 5^h 08^m$ , V часовой пояс) по поясному, декретному и местному солнечному времени?

*Решение:* Поясное время равно всемирному плюс номер пояса в часах, так что  $T_{\text{п}} = 0^h 03^m 3$  апреля. Декретное время опережает на 1 час поясное:  $T_{\text{д}} = 1^h 03^m$ . Местное среднее солнечное время отличается от гринвичского на величину долготы в часах, поэтому  $T_{\text{М}} = 0^h 11^m$ .

4. Когда по поясному времени Казани ( $\lambda = 3^h 16^m 29^s$ , III часовой пояс) 22 июня произойдет кульминация Солнца, если уравнение времени в этот день равно  $+1^m 20^s$ .

*Решение:* В момент верхней кульминации Солнца истинное солнечное время  $T_{\odot} = 12^h 00^m$ . Местное среднее солнечное время отличается от

$$T_{\text{М}} = T_{\odot} + \eta = 12^h 01^m 20^s$$

истинного на величину уравнения времени. Для того, чтобы найти поясное время, надо знать

$$UT = T_{\text{М}} - \lambda = 12^h 01^m 20^s - 3^h 16^m 29^s = 8^h 44^m 51^s$$

всемирное и прибавить к нему номер пояса в часах  $T_{\text{п}} = UT + N^h = 8^h 44^m 51^s + 3^h = 11^h 44^m 51^s$ .

5. Пароход, покинув Владивосток в субботу 6 ноября, прибыл в Сан-Франциско в среду, 23 ноября. Сколько суток он был в пути?

*Решение:* Поскольку пароход пересекал линию перемены даты с запада на восток, то на нем дважды считали одну и ту же дату, следовательно, число суток в пути было  $N^d = 23 - 6 + 1 = 18^d$ .

6. В момент верхней кульминации  $\beta$  Большой Медведицы ( $\alpha = 10^h 55^m 48^s$ ) звездные часы показывали  $10^h 55^m 32^s$ . Определить поправку часов. Указать, когда по этим неисправленным часам будет кульминация  $\alpha$  Большой Медведицы ( $\alpha = 10^h 57^m 34^s$ ).

7. Путешественники заметили, что по местному времени затмение Луны началось в  $5^h 13^m$ , тогда как по астрономическому календарю это затмение должно было состояться в  $3^h 51^m$  по гринвичскому времени. Какова их долгота?

8. 14 июня по наблюдениям на судне, произведенным с секстаном, кульминация Солнца произошла в  $8^h 23^m$  по хронометру, показывающему гринвичское звездное время. Кульминация произошла при зенитном расстоянии  $z = 22^\circ 02'$  (рефракция учтена). Определить долготу и широту судна, если по морскому астрономическому ежегоднику в этот день и час координаты Солнца

$$\alpha_{\odot} = 5^h 26^m, \delta_{\odot} = +18^\circ 25'$$

были

9. Полное затмение Солнца должно было произойти в пункте с долготой  $\lambda = 2^h 30^m$  в  $9^h 27^m$  гринвичского времени. Уравнение времени в этот день было  $\eta = -9^m$ . Произошло ли затмение до момента истинного полудня?

10. 26 сентября Солнце в пункте с долготой  $\lambda = 2^h 30^m$  восходит по местному среднему солнечному времени в  $5^h 51^m$  утра, а заходит в  $5^h 51^m$  вечера. Чему равно в этот день уравнение времени?

11. Корабль, покинувший Сан-Франциско утром в среду 12 октября, прибыл во Владивосток ровно через 16 суток. Какого числа месяца и в какой день недели он прибыл?