

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 $s = \alpha_O$.

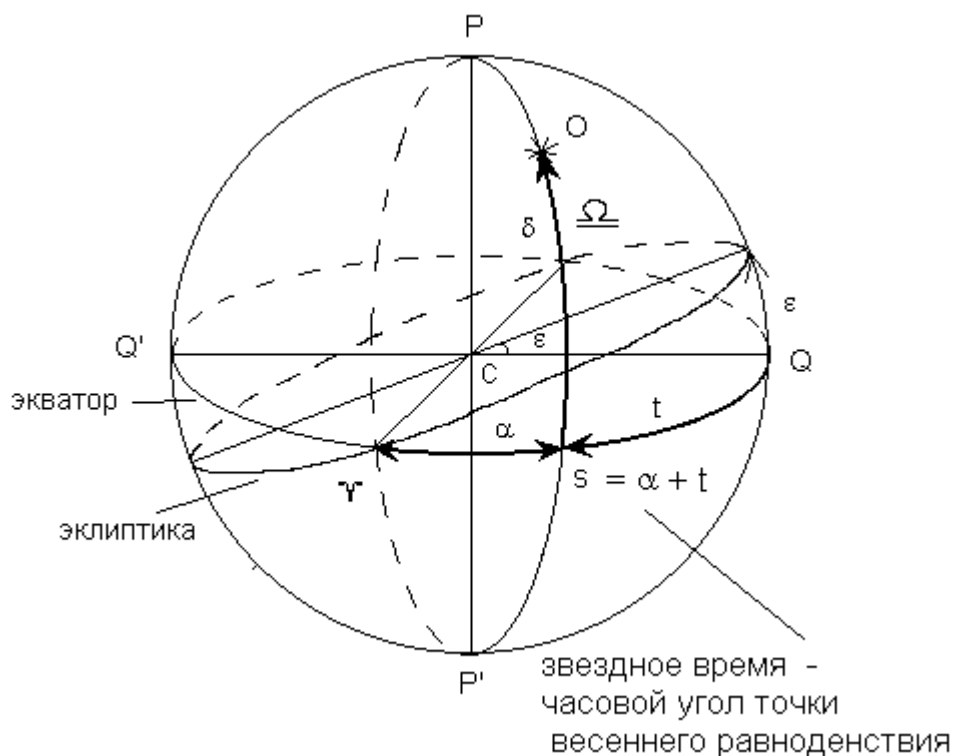


Рис. 17. Связь звездного времени s с прямым восхождением α и часовым углом t светила

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:

$$T_{\odot} = t_{\odot} + 12^h. \tag{13}$$

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** η :

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

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 η 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).

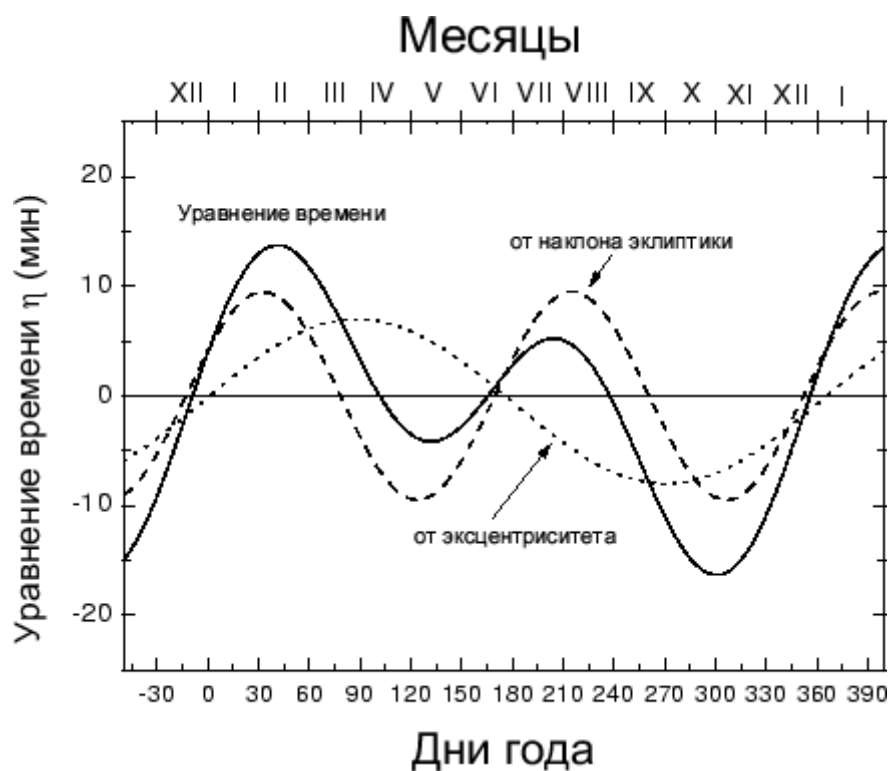


Рис. 18. Изменение уравнения времени η в течение года

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 λ места на Земле выразить в часовой мере и считать положительной к востоку от Гринвича, то имеет место следующее соотношение:

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

Поясное время. В 1884 г. введена поясная система счета среднего времени. Счет времени ведется только на 24 основных географических меридианах, расположенных друг от друга по долготе точно через 15° ~~или~~ ^{или} ~~или~~ ^{или} с нулевого

меридиана. Границы поясов отстоят, как правило, на 15° от основного меридиана. Номера поясов N от 0 до 23. Местное среднее солнечное время основного меридиана какого-либо часового пояса называется поясным временем $T_{\text{п}}$, по которому и ведется счет времени на всей территории, лежащей в данном часовом поясе. Поясное время связано со всемирным через номер часового пояса:

$$T_{\text{п}} = UT + N^h. \quad (20)$$

Декретное время. В 1930 г. декретом правительства СССР стрелки часов переведены на 1 час вперед относительно поясного времени:

$$T_{\text{д}} = T_{\text{п}} + 1^h. \quad (21)$$

Это время и называется декретным временем.

Летнее время. В 1981 г. в СССР, по примеру большинства стран мира, было введено еще и летнее время, на 1 час опережающее декретное. Летнее время вводится с последнего воскресенья марта по последнее воскресенье октября:

$$T_{\text{л}} = T_{\text{д}} + 1^h. \quad (22)$$

Таким образом, то время, которое мы называем московским, зимой является декретным временем второго часового пояса и опережает всемирное время UT на 3 часа. Летом отличие от гринвичского времени составляет 4 часа.

7. Связь среднего времени со звездным

Удобнее всего переходить от звездного времени к среднему через тропический год. Его продолжительность в звездных сутках ровно на одни сутки больше, чем продолжительность в средних солнечных сутках. Связано это с тем, что за год Солнце делает полный оборот на небесной сфере в ту же сторону, в какую вращается Земля. Поэтому за год Земля делает относительно Солнца на один оборот меньше, чем относительно звезд.

Тропический год равен 365.2422 средних солнечных суток и 366.2422 звездных суток. Поэтому связь среднего солнечного времени и звездного времени осуществляется через равенство: $365.2422 \text{ ср.суток} = 366.2422 \text{ зв.суток}$. Или

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

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

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 λ . Так как на этом меридиане полночь наступит на λ^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° . *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 γ 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 α 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 β 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 α 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?