1.2. Измерение времени

1.2.1. Основы измерения времени

Измерение времени является одной из важнейших задач астрономии. Часто возникает необходимость определить момент времени, когда наступит то или другое небесное явление. При рассмотрении систем сферических координат мы видим, что горизонтальные координаты (Z и A), а также координата (t) в первой экваториальной системе являются функциями времени и непрерывно меняются вследствие видимого вращения небесной сферы.

Для измерения времени было необходимо установить единицы измерения и системы счета времени, а также для счета единиц времени нужны специальные устройства, работа которых должна систематически контролироваться. При этом гораздо удобнее, если бы единица времени была постоянной, в противном случае должна быть известна закономерность, с которой она меняется.

Следовательно, любой периодически повторяющийся процесс может быть использован для измерения времени. И поскольку вращение Земли вокруг своей оси является одним из наиболее равномерных движений в природе, естественно, что это движение было принято за основу для измерения времени и долгое время служило исходным эталоном для установления единиц измерения, а также исчисления времени. Именно промежуток времени, в течение которого Земля, вращаясь вокруг своей оси, делает один оборот, и принимался за основную единицу времени, называемую сутками [5].

Однако в середине XIX в. учеными было экспериментально доказано, что движение Земли вокруг своей оси неравномерно, а значит, продолжительность суток непостоянна. Скорость вращения Земли вокруг оси подвержена изменениям векового, периодического и нерегулярного характера, пренебрегать которыми мы не имеем права. И хотя причины, вызывающие неравномерность вращения Земли, не могут считаться окончательно установленными, их можно определить и учесть.

Теперь остановимся на методах измерения времени без учета неравномерностей в движении Земли. Поскольку измерение времени основано на суточном вращении Земли вокруг оси и на обращении Земли вокруг Солнца, то о прошедшем времени можно судить по углу поворота Земли от некоторого начального положения. Для фиксации начального положения берут определенную точку на небесной сфере и определяют момент ее верхней кульминации.

В астрономии за такие точки принимаются:

а) точка весеннего равноденствия;

б) центр видимого диска Солнца (истинное Солнце);

в) «среднее Солнце» – фиктивная точка, положение которой может быть вычислено для любого момента времени [3].

Это хотя и подвижные точки, но их движение по небесной сфере хорошо изучено, и положение для любого момента времени может быть определено с высокой степенью точности [5].

Значение времени равно часовому углу избранной точки на небе. Так, по первой точке определяют звездное время, по второй точке – истинное солнечное время, по третьей точке – среднее солнечное время.

Между этими системами счета времени осуществляется взаимосвязь, и в дальнейшем будет сказано, как выполняется переход от одного времени к другому.

1.2.2. Звездное время, истинное солнечное время, среднее время

Звездное время

За единицу звездного времени принимают промежуток времени, в течение которого Земля делает один полный оборот вокруг своей оси относительно точки весеннего равноденствия. Эта единица называется ***звездными сутками.***

За начало звездных суток (0^h звездного времени) принимается момент верхней кульминации точки весеннего равноденствия. Таким образом, звездные сутки – это промежуток времени между двумя последовательными верхними кульминациями точки весеннего равноденствия на меридиане данного пункта.

Звездные сутки содержат 24 звездных часа, звездный час содержит 60 звездных минут, а звездная минута – 60 звездных секунд.

Время, прошедшее от начала звездных суток до любого другого момента, определяемого положением точки весеннего равноденствия, выраженное в звездных часах, минутах и секундах, называется звездным временем и обозначается буквой s, т.е.

$$s = t_\gamma .$$

Теперь рассмотрим принцип определения местного звездного времени.

Местное звездное время s на данном меридиане равно часовому углу точки весеннего равноденствия. Но точка γ на небе ничем не отмечена, и измерить ее часовой угол нельзя. Однако, обратившись к рисунку 1.6, мы видим, что для нахождения s нужно отнаблюдать любую звезду с известными координатами σ (α, δ) и вычислить ее часовой угол (t) по формуле

$$\mathrm{tg}t = \frac{\sin Z \sin A}{\cos Z \cos\varphi + \sin Z \sin\varphi \cos A}. \tag{1.15}$$

А сумма часового угла светила с его прямым восхождением даст часовой угол точки весеннего равноденствия для данного момента времени, т.е.

$$t_\gamma = \alpha + t, \tag{1.16}$$

но $t_\gamma = s$, следовательно, имеем

$$s = \alpha + t. \tag{1.17}$$

Из формулы (1.17) видно, что в любой точке земной поверхности звездное время в любой момент численно равно сумме прямого восхождения и часового угла светила [3].

Звездное время удобно для астрономических наблюдений. В повседневной жизни лучше использовать солнечное время, так как начало звездных суток (когда $s = 0^h$, т.е. точка весеннего равноденствия в верхней кульминации, или в точке Q на рис. 1.9) приходится на разные моменты солнечных суток и бывает то днем, то ночью.

Истинное солнечное время

Движение Солнца существенно отличается от движения других светил. Так как Земля вращается вокруг Солнца по орбите (имеющей вид эллипса), совершая полный оборот в течение одного года, то положение Солнца относительно точки весеннего равноденствия непрерывно изменяется. Следовательно, солнечные и звездные единицы времени не равны между собой [5].

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

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

До 1925 года за начало истинных солнечных суток принимался момент верхней кульминации истинного Солнца, т.е. истинный полдень.

Смена суток в полдень неудобна, поэтому с 1 января 1925 года за начало истинных солнечных суток принимается момент нижней кульминации истинного Солнца, т.е. истинная полночь.

Таким образом, истинными сутками называется промежуток времени между истинными полуночами.

Истинные солнечные сутки подразделяются на 24 истинных часа, истинный час содержит 60 истинных минут, истинная минута – 60 истинных секунд.

Время, прошедшее от 0^h истинного солнечного времени до любого другого момента, выраженное в часах, минутах и секундах, называется местным истинным солнечным временем и обозначается буквой $m_{\odot}$. Мерой истинного солнечного времени является часовой угол ($t_{\odot}$) истинного Солнца, увеличенный на 12^h, т.е.

$$m_{\odot} = t_{\odot} + 12^{\mathrm{h}}. \tag{1.18}$$

Следовательно, чтобы определить истинное солнечное время в любой момент, достаточно получить из наблюдений в этот момент часовой угол истинного Солнца.

По истинному солнечному времени идут только солнечные часы. В повседневной жизни истинное солнечное время не используют, поскольку часовой угол истинного Солнца изменяется непропорционально времени. Это происходит по двум основным причинам:

1. Движение Солнца по эклиптике неравномерно вследствие неравномерности движения Земли по эллиптической орбите.
2. Склонение Солнца в течение года меняется в пределах

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

Вследствие наклона эклиптики к экватору проекции одинаковых дуг эклиптики на экватор не равны между собой. Поэтому часовые углы Солнца, отсчитываемые по экватору, будут изменяться неравномерно.

В результате этих двух факторов продолжительность истинных суток в течение года меняется, причем разница доходит до 50 секунд. Но для повседневной жизни в современных условиях необходим равномерный счет времени, поэтому используют среднее солнечное время.

Среднее солнечное время

При создании более совершенной системы измерения времени по Солнцу в астрономии было введено понятие фиктивной точки, которая равномерно движется по эклиптике со скоростью, равной средней скорости движения истинного Солнца, соответствующей средней скорости движения Земли. Эта фиктивная точка называется ***средним эклиптическим Солнцем***.

Среднее эклиптическое Солнце равномерно движется по эклиптике со средней скоростью Солнца и совпадает с истинным Солнцем около 3 января и 4 июля [4].

Однако введение среднего эклиптического солнца не привело к постоянной единице времени, т.к. снимало только один фактор – неравномерность видимого движения Солнца по эклиптике.

Поэтому была введена вторая фиктивная точка, которая равномерно движется по экватору. Эта точка называется ***средним экваториальным Солнцем***.

Среднее экваториальное Солнце равномерно движется по небесному экватору с постоянной скоростью среднего эклиптического Солнца и одновременно с ним проходит точку весеннего равноденствия [4].

Следовательно, среднее Солнце делает полный оборот по экватору за тот же период, за который совершает истинное Солнце полный оборот по эклиптике.

Так как среднее экваториальное Солнце движется по экватору равномерно, то часовые углы его, при условии, что влияние неравномерностей во вращательном движении Земли во внимание не принимается, возрастают тоже равномерно и, следовательно, оно пригодно для измерения времени.

Момент верхней кульминации среднего экваториального Солнца на меридиане данного пункта называется средним полднем, момент нижней – средней полночью. А средними сутками называется промежуток между последовательными средними полуночами.

Средние солнечные сутки также подразделяются на 24 средних часа, средний час содержит 60 средних минут, средняя минута – 60 средних секунд.

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

Среднее солнечное время отсчитывается от нижней кульминации среднего Солнца и определяется формулой

$$M = t_{ср.} + 12^{h}, \tag{1.19}$$

где $t_{ср.}$ – часовой угол среднего экваториального Солнца.

Гринвичское среднее солнечное время называется всемирным или мировым временем и в «Астрономическом ежегоднике» (АЕ) обозначается буквой M.

Найдем связь между средним и истинным солнечным временем. Пусть S – местное звездное время, t и α – соответственно, часовой угол и прямое восхождение среднего экваториального Солнца, $t_{\odot}$ и $\alpha_{\odot}$ – соответственно, часовой угол и прямое восхождение истинного Солнца.

Тогда можно записать:

$$s = \alpha + t;$$
$$s_{\odot} = \alpha_{\odot} + t_{\odot}, \tag{1.20}$$

или

$$t_{\odot} - t = \alpha - \alpha_{\odot}. \tag{1.21}$$

Полученная разность часовых углов истинного и среднего экваториального Солнца называется уравнением времени и обозначается буквой η.

Таким образом, если известно m, то можно вычислить $m_{\odot}$, используя уравнение времени

$$\eta = m_{\odot} - m. \tag{1.22}$$

Эта разность в течение года бывает положительной и отрицательной. Поэтому в «Астрономическом ежегоднике» публикуется всегда положительная величина – уравнение времени плюс 12^h:

$$E = \eta + 12^{\mathrm{h}}. \tag{1.23}$$

1.2.3. Измерение времени на разных меридианах

На одном и том же меридиане Земли время будет одинаковым, на разных меридианах – различным. Поэтому время, определенное в данный момент в данной точке, называется местным временем. Местное время на меридиане Гринвича обозначается большими буквами:

S – гринвичское звездное время;

$M_{\odot}$ – гринвичское истинное солнечное время;

M – гринвичское среднее солнечное время, называемое всемирным временем.

В АЕ публикуется на каждую дату S_0 – звездное время на Гринвиче, когда $M = 0^h$.

Для трех точек на небесной сфере, указанных в п. 1.2.1, с использованием формулы (1.7) можно записать:

$$\lambda_A - \lambda_B = t_{\gamma_A} - t_{\gamma_B};$$
$$\lambda_A - \lambda_B = t_{\odot A} - t_{\odot B};$$
$$\lambda_A - \lambda_B = t_{cp_A} - t_{cp_B}.$$

Но так как $s = t_\gamma$; $m_\odot = t_\odot + 12^h$; $m = t_{ср} + 12^h$, получим

$$\lambda_A - \lambda_B = s_A - s_B;$$

$$\lambda_A - \lambda_B = m_{\odot A} - m_{\odot B};$$

$$\lambda_A - \lambda_B = m_A - m_B.$$

Предположим, что точка B лежит на Гринвиче, тогда $\lambda_B = 0^h$, следовательно, для любой точки Земли получим следующие равенства:

$$s = S + \lambda;$$

$$m_\odot = M_\odot + \lambda; \qquad (1.24)$$

$$m = M + \lambda.$$

1.2.4. Связь среднего солнечного времени со звездным временем

Из многочисленных астрономических наблюдений установлено, что в течение тропического года

365,2422 средних солнечных суток = 366,2422 звездных суток.

Отсюда видно, что средние солнечные сутки равны $(1 + \mu)$ звездных суток, где $\mu = \dfrac{1}{365,2422} = 0,0027379$. Переходя от суток к единицам времени, получим: $s = m(1+\mu)$.

Но звездные и средние солнечные сутки начинаются не в один и тот же момент, поэтому справедлива формула

$$s = s_0 + m(1+\mu), \qquad (1.25)$$

где s_0 – местное звездное время в 0^h местное среднего солнечного времени. Применительно к Гринвичу (1.25) будет такой:

$$S = S_0 + M(1 + \mu). \qquad (1.26)$$

Установим связь между s_0 и S_0, которое публикуется в АЕ. Для этого найдем разность выражений (1.25) и (1.26):

$$s - S = s_0 + m(1+\mu) - S_0 - M(1+\mu).$$

Воспользуемся равенством (1.24):

$$\lambda = s_0 + (M + \lambda)(1+\mu) - S_0 - M(1+\mu),$$

отсюда окончательно получим

$$s_0 = S_0 - \mu\lambda. \tag{1.27}$$

Формулы (1.25) и (1.27) позволяют получить m, зная s.

Обратный переход от S к m выполняется в соответствии с (1.25) по формуле, предложенной автором,

$$m = \frac{s - s_0}{1+\mu}. \tag{1.28}$$

1.2.5. Поясное и декретное время

В 1884 году предложена поясная система счета среднего времени. Здесь Земля разграничена на 24 часовых пояса, в которых поясное время

$$T_n = M + n, \tag{1.29}$$

где T_n – величина постоянная, n – номер пояса (в Республике Беларусь $n = 2^h$).

В Республике Беларусь, как и в других странах, также используется декретное время

$$D = T_n + k, \tag{1.30}$$

где k – добавка к поясному времени, установленная декретом. С 1991 года в Республике Беларусь зимой $k = 0^{\mathrm{h}}$, летом $k = 1^{\mathrm{h}}$. По декретному времени идут бытовые часы.

В соответствии с (1.29) и (1.30) запишем

$$D = M + (n + k). \tag{1.31}$$

Формулы (1.24), (1.25), (1.27), (1.28), (1.31) позволяют решать различные задачи по расчету времени.

Например, в определенный момент D отнаблюдена звезда. Найти на этот момент местное время S при известной долготе пункта.

Решение:

$$M = Д - (n + k);$$

$$m = M + \lambda;$$

$$s = S_0 - \mu\lambda + m(1+\mu),$$

где S_0 берут из АЕ на дату наблюдений.

Эти формулы можно объединить в одну:

$$s = S_0 - \mu\lambda + \left[Д - (n+k) + \lambda\right](1+\mu).$$

Решим другую задачу. Найти долготу пункта с известной широтой φ, если во время D точно определены A и Z для звезды с известными координатами α и δ.

Решение:

1) по формуле (1.10) находим часовой угол звезды t;
2) по формуле (1.17) найдем местное звездное время S;
3) по формуле (1.31) найдем всемирное время M;
4) по формуле (1.28) найдем звездное время на Гринвиче S;
5) по формуле (1.24) получим долготу пункта

$$\lambda = s - S.$$

В этой последовательности можно определить долготу пункта по Солнцу, но координаты Солнца $\alpha_\odot$ и $\delta_\odot$ надо интерполировать на момент динамического времени

$$M^* = M + \Delta T, \tag{1.32}$$

где ΔT – небольшая поправка в секундах, выбираемая для данного года наблюдений из АЕ.

Но при определении долготы по Солнцу удобно пользоваться не звездным временем, как указано выше, а солнечным временем:

$$m = t_\odot - E;$$

$$\lambda = m - M,$$

где $t_\odot$ вычисляется по формуле (1.10), а E выбирается из АЕ.

В дальнейшем рассмотрим учет факторов, искажающих видимое положение светил.

1.2.6. Рефракция

Лучи света от небесного тела, прежде чем попасть в глаз наблюдателя, проходят сквозь атмосферу Земли и преломляются в ней, что вызывает рефракцию (рис. 1.13). Здесь Z' – измеренное зенитное расстояние до касательной к рефракционной кривой $M\sigma'$, ρ – угол рефракции,

$$\rho = Z - Z', \tag{1.33}$$

где Z – зенитное расстояние без рефракции.

Значение ρ зависит от Z', температуры воздуха T и атмосферного давления B.

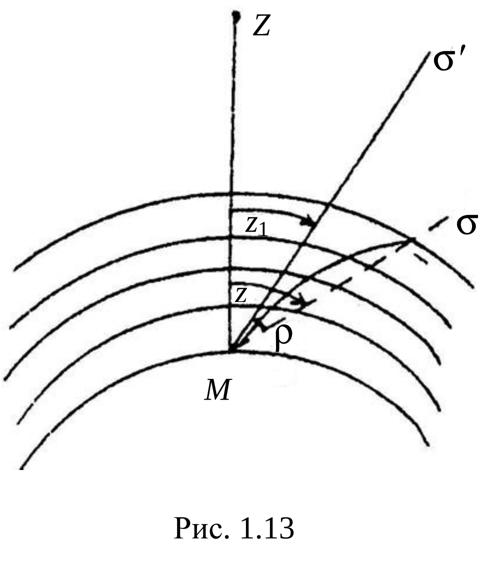

Рис. 1.13

1.2.7. Аберрация

Пусть в точке *К* (рис. 1.14) находится перекрестие сетки нитей, а *О* – объектив трубы. Пока луч света проходит отрезок *ОК*, наблюдатель переместится в точку *К*′ из-за вращения Земли со скоростью 0,464 км/с на экваторе и от вращения Земли вокруг Солнца со скоростью 29,75 км/с. Такие скорости сопоставимы со скоростью света *c*.

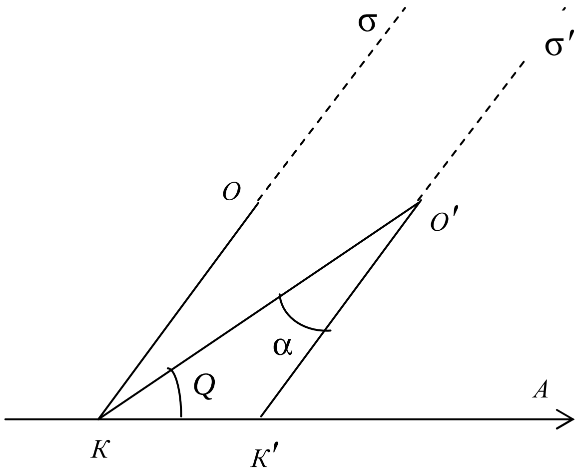

Рис. 1.14

Таким образом, $OK = \tau\, c$; $KK_1 = r\, v$, где τ – момент времени прохождения света через трубу. В результате угол α″ (см. рис. 1.14) равен

$$\alpha'' = \rho'' \frac{\upsilon}{c} \sin\theta, \tag{1.34}$$

что приведет к непопаданию луча света в точку *К* на величину *КК*′, поэтому вводится в наблюдения поправка за аберрацию.

1.2.8. Суточный и годичный параллаксы

Координаты небесных тел, определенные на поверхности Земли, называют топоцентрическими.

Направление на светило из центра Земли (точка *О* на рис. 1.15) дает геоцентрические координаты светила δ. Суточный параллакс есть угол *P*′, под которым был виден радиус Земли.

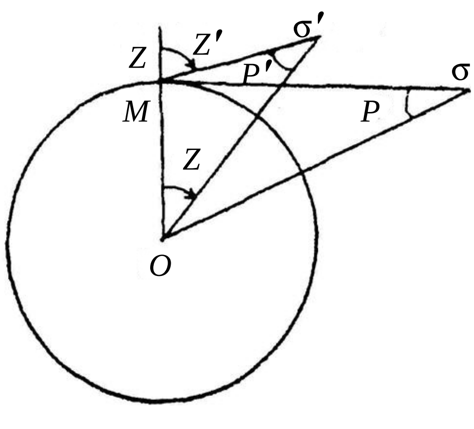

Рис. 1.15

Когда светило на горизонте, получим наибольшее значение суточного параллакса P, указанное в *АЕ*, при этом

$$P' = P \sin Z'. \qquad (1.35)$$

Величина P практически равна нулю для звезд, для Солнца P = 8,8″, для Луны P = 57′.

Зенитное расстояние из центра Земли равно

$$Z = Z' - P'. \qquad (1.36)$$

Угол, под которым со звезды был бы виден радиус земной орбиты (рис. 1.16) при условии, что направление на звезду перпендикулярно к a, называется годичным параллаксом звезды π, при этом

$$\pi'' = \rho'' \frac{a}{\Delta}, \qquad (1.37)$$

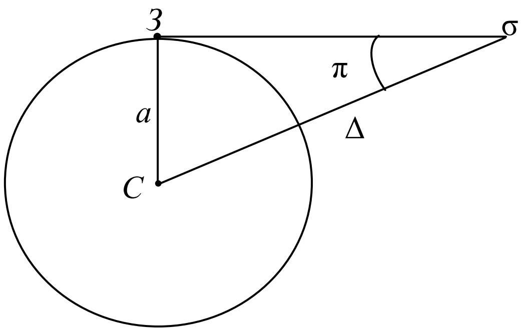

Рис. 1.16

где $\rho'' = 206265''$, а Δ – расстояние до звезды. Величина a близка к астрономическое единице *а.е.*= 149 597 870 км. Зная π из наблюдений в течение года, можно найти расстояние до звезды

$$\Delta = \rho'' \frac{a}{\pi''}. \qquad (1.38)$$

Если принять $\pi = 1''$, то получим парсек, причем *пс* = 206 265 *а.е.* – это расстояние больше величины расстояния, равного одному световому году – 0,3067 *пс*.

1.2.9. Прецессия и нутация

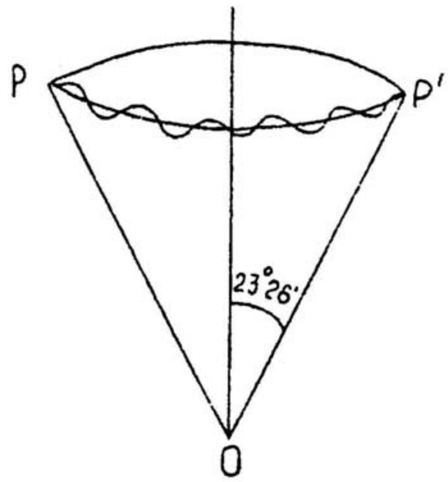

Рис. 1.17

Если бы Земля имела форму шара равной плотности и являлась бы абсолютно твердым телом, то направление оси вращения Земли было бы неизменным. На самом деле на экваториальные выступы Земли действуют силы притяжения от Луны и от Солнца.

В результате ось вращения Земли *OP* (рис. 1.17.) прецессирует, изменяя свое направление в пространстве, описывая окружность с периодом 26 тыс. лет. Например, через 13 тыс. лет земная ось будет направлена на точку P' рядом со звездой Вега. Волнообразные изменения направления оси, вызванные притяжением Луны с периодом 18,7 лет, называются нутацией.

1.2.10. Собственное движение звезд

Из сравнения экваториальных координат одних и тех же звезд за значительные промежутки времени можно обнаружить, что их координаты изменяются с течением времени. Большая часть этих изменений вызывается прецессией, нутацией, аберрацией и годичным параллаксом. Если исключить влияние этих причин, то изменение координат уменьшается, но не исчезает полностью. Оставшееся смещение звезды на небесной сфере за год называется собственным движением звезды. Оно выражается в секундах дуги в год. Самое большое собственное движение у «летящей» звезды Барнардо составляет 10,27″. Собственные движения звезд за несколько тысячелетий искажают форму созвездий.

1.2.11. Схема редукции наблюденных координат звезд

1. Освобождая наблюденные координаты звезд от влияния рефракции, получаем координаты в месте наблюдения на поверхности Земли, как бы лишенной атмосферы.
2. Учитывая суточную аберрацию, мы будем иметь координаты светила для невращающейся Земли.
3. Освобождая наблюдения от влияния суточного параллакса, мысленно переносим наблюдателя в центре Земли и получаем геоцентрические координаты светила.

Исправляя наблюденное положение светила поправками 1, 2, 3, приводим светило на «видимое» место.

4. Учитывая влияние годичной аберрации, мы как бы «останавливаем» движение Земли вокруг Солнца.
5. Исправляя координаты звезд за годичный параллакс, относим координаты светила к центру Солнца и получаем гелиоцентрические координаты.
6. Вводя в полученные координаты светила поправки за прецессию и нутацию, будем иметь координаты, отнесенные к среднему полюсу мира и к средней точке весеннего равноденствия.

Исправляя видимое место поправками 4, 5, 6, приводим светило на среднее место.