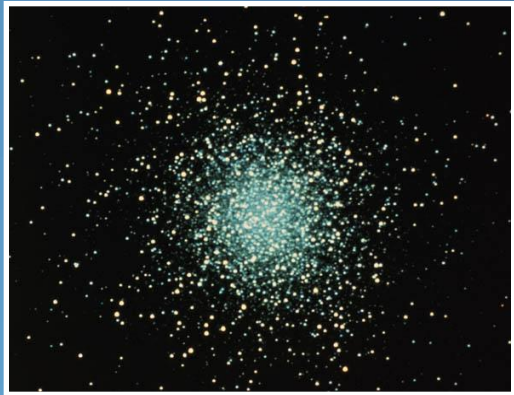


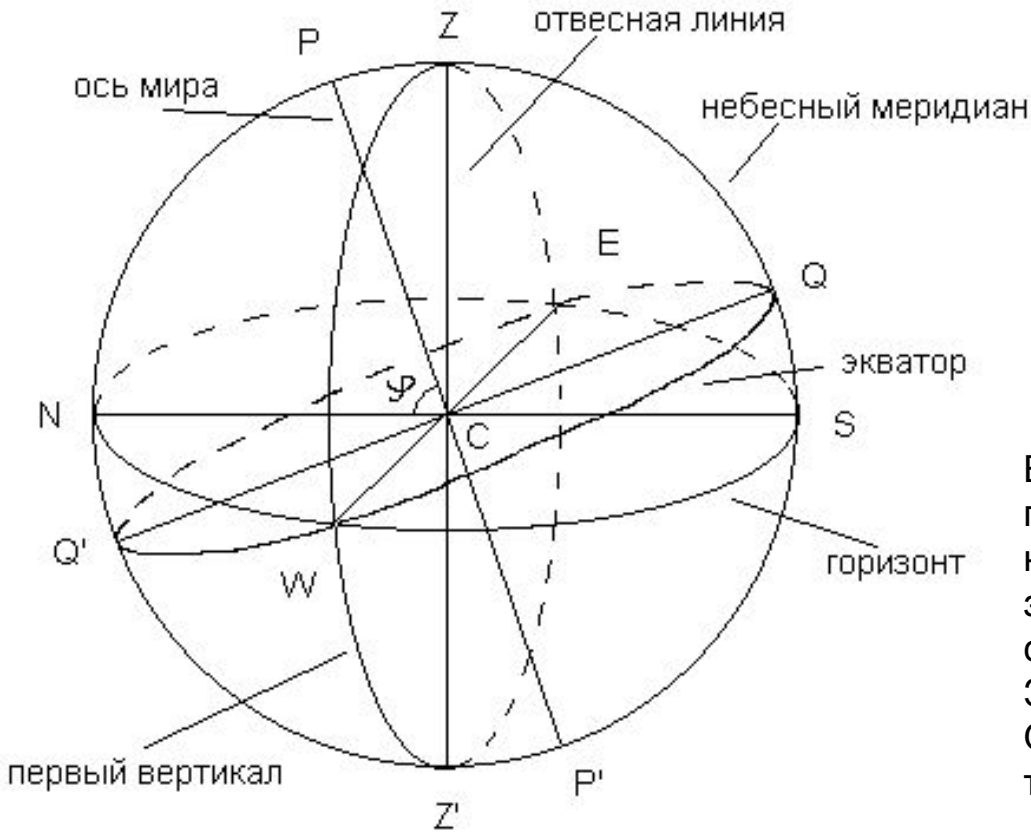
КУРС ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ



Небесная сфера, основные понятия

- Одной из важнейших астрономических задач, без которой невозможно решение всех остальных задач астрономии, является определение положения небесного светила на небесной сфере.
- *Небесная сфера* - это воображаемая сфера произвольного радиуса, описанная из глаза наблюдателя, как из центра. На эту сферу мы проектируем положение всех небесных светил. Расстояния на небесной сфере можно измерять только в угловых единицах, в градусах, минутах, секундах или радианах. Например, угловые диаметры **Луны** и **Солнца** равны примерно 0.5° .

Небесная сфера



Одним из основных направлений, относительно которого определяется положение наблюдаемого небесного светила, является *отвесная линия*.

Плоскость, перпендикулярная отвесной линии, называется *горизонтальной плоскостью*.

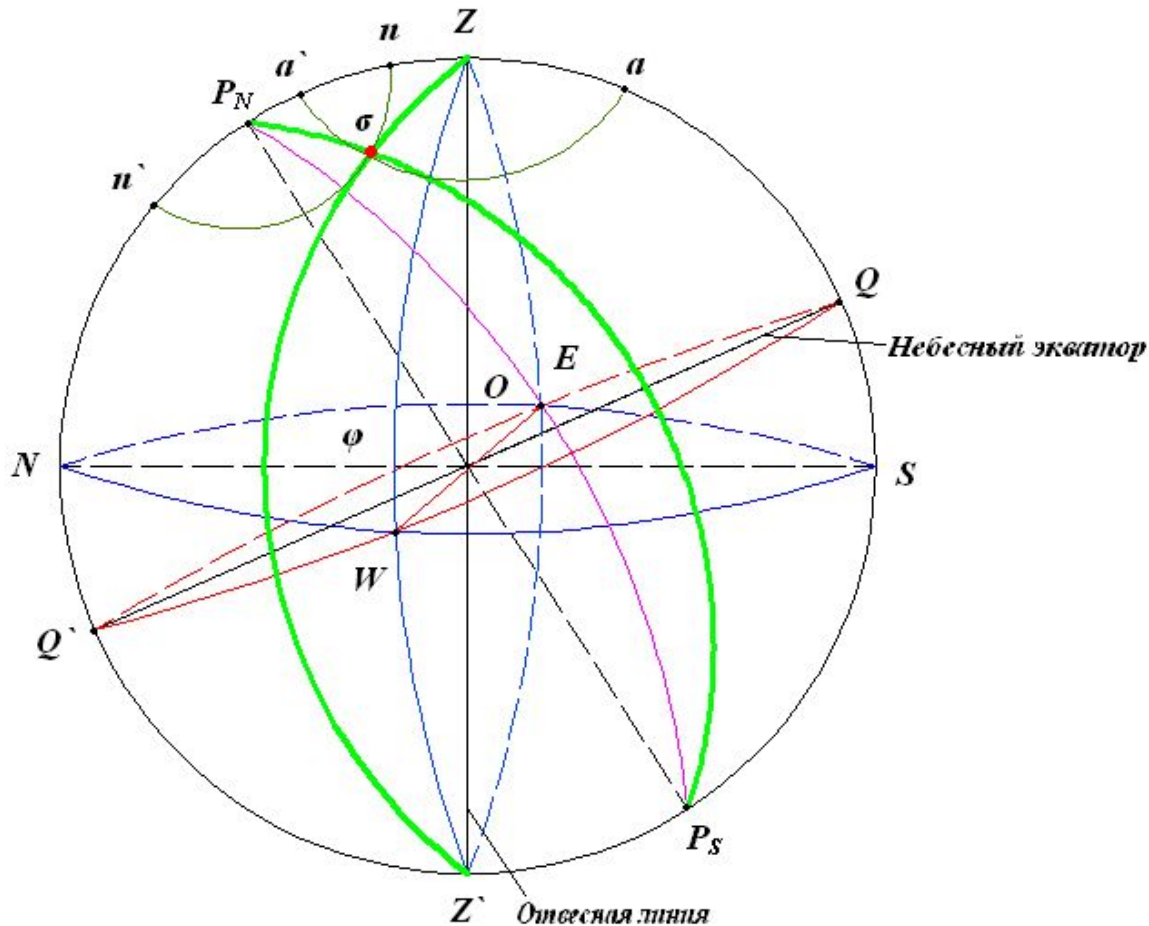
В каждой точке Земли наблюдатель видит половину сферы, плавно вращающейся с востока на запад вместе с будто прикрепленными к ней звездами. Это видимое вращение небесной сферы объясняется равномерным вращением Земли вокруг своей оси с запада на восток. Отвесная линия пересекает небесную сферу в точке *зенита*, *Z* и в точке *надир*, *Z'*.

Большой круг небесной сферы, по которому горизонтальная плоскость, проходящая через глаз наблюдателя (точка *C* на рис.2), пересекается с небесной сферой, называется *истинным горизонтом*. Напомним, что большим кругом небесной сферы является круг, проходящий через центр небесной сферы. Круги, образованные пересечением небесной сферы с плоскостями, не проходящими через ее центр, называются малыми кругами. Линия, параллельная земной оси и проходящая через центр небесной сферы, называется *осью мира*. Она пересекает небесную сферу в *северном полюсе мира*, *P*, и в *южном полюсе мира* *P'*.

Большой круг небесной сферы, плоскость которого перпендикулярна оси мира, называется *небесным экватором*. Небесный экватор делит небесную сферу на две части: северную и южную. Небесный экватор параллелен экватору Земли.

Плоскость, проходящая через отвесную линию и ось мира, пересекает небесную сферу по линии *небесного меридиана*. Небесный меридиан пересекается с истинным горизонтом в *точках севера, N, и юга, S*. А плоскости этих кругов пересекаются по *полуденной линии*. Небесный меридиан является проекцией на небесную сферу земного меридиана, на котором находится наблюдатель. Поэтому на небесной сфере есть только один меридиан, ведь наблюдатель не может находиться на двух меридианах одновременно!

Небесный экватор пересекается с истинным горизонтом в *точках востока, E, и запада, W*. Линия EW перпендикулярна полуденной. Точка Q - верхняя точка экватора, а Q' - нижняя точка экватора.



Большие круги, плоскости которых проходят через отвесную линию, называются *вертикалами*. Вертикал, проходящий через точки W и E, называется *первым вертикалом*.

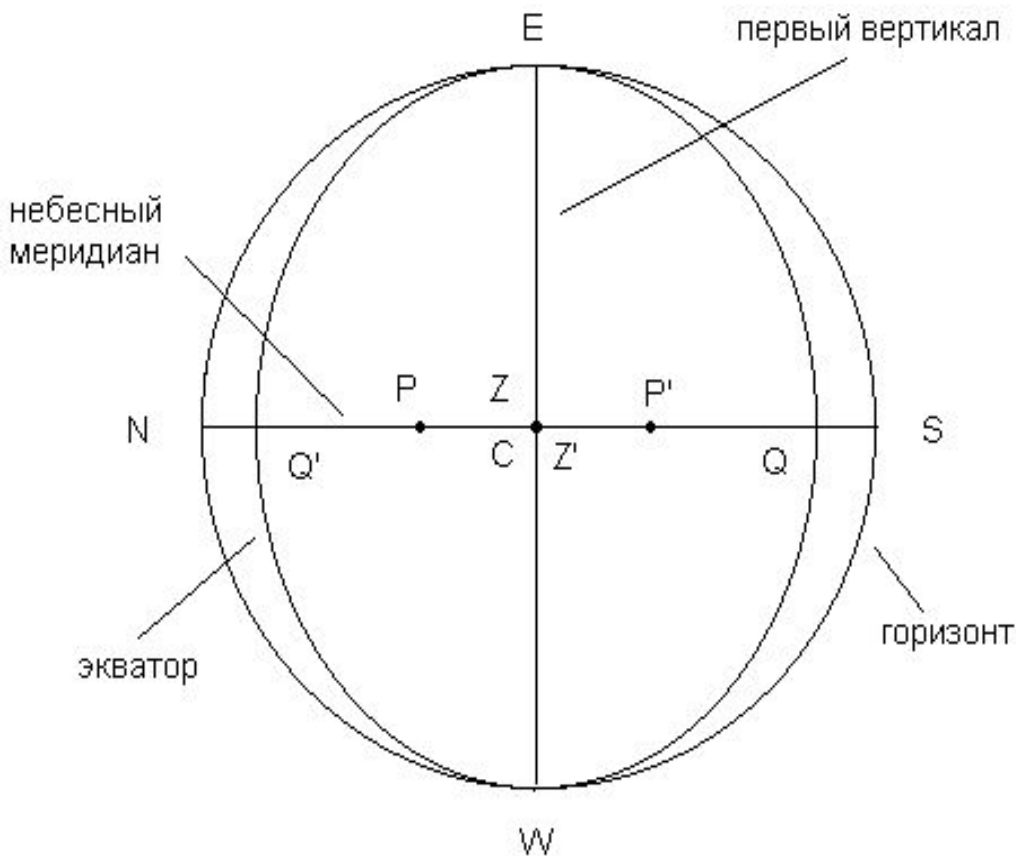
Большие круги, плоскости которых проходят через ось мира, называются *кругами склонения или часовыми кругами*.

Малые круги небесной сферы, плоскости которых параллельны небесному экватору, называются *небесными или суточными параллелями*. Суточными они называются потому, что по ним происходит суточное движение небесных светил. Экватор также является суточной параллелью.

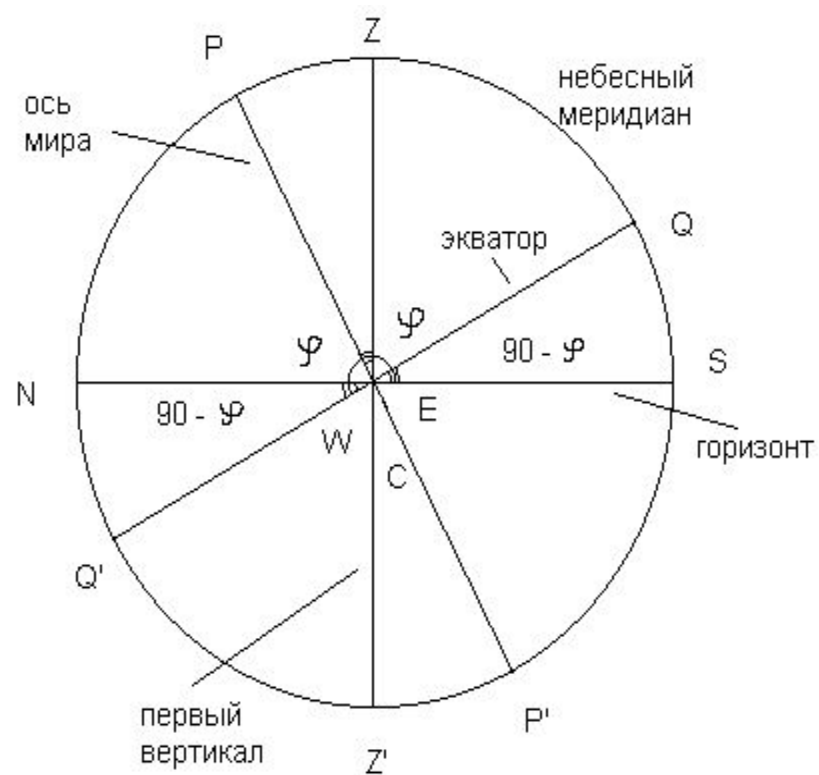
Малый круг небесной сферы, плоскость которого параллельна плоскости горизонта, называется *альмукуантаратом*.

Небесная сфера





Проекция небесной сферы на плоскость горизонта



Проекция небесной сферы на плоскость небесного меридиана

Горизонтальная система координат

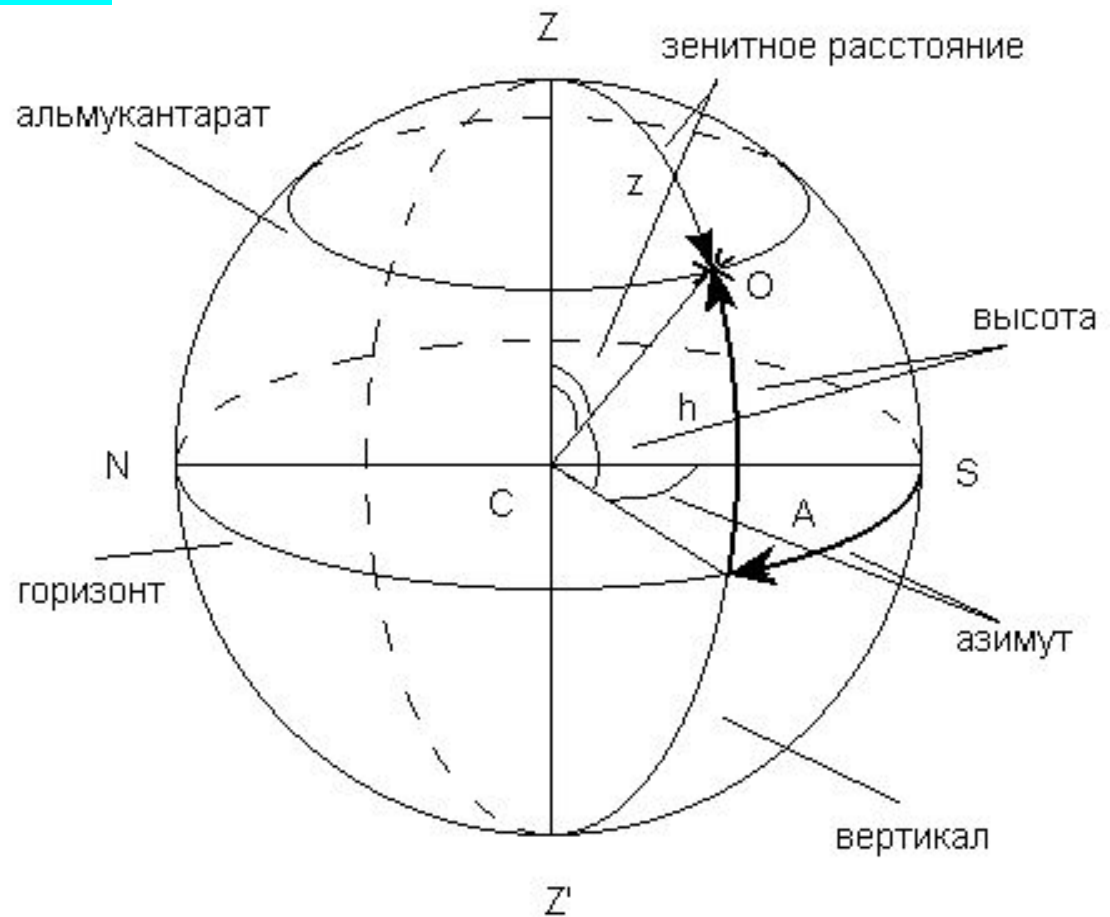
Основная плоскость –
плоскость горизонта;

Начальная точка –
точка юга.

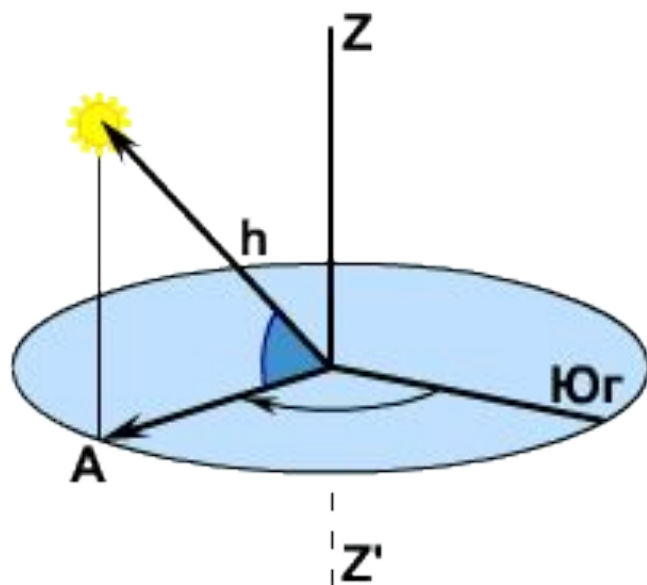
$$0^\circ \leq Z \leq 180^\circ \quad 0^\circ \leq A \leq 360^\circ$$

$$-90^\circ \leq h \leq 90^\circ$$

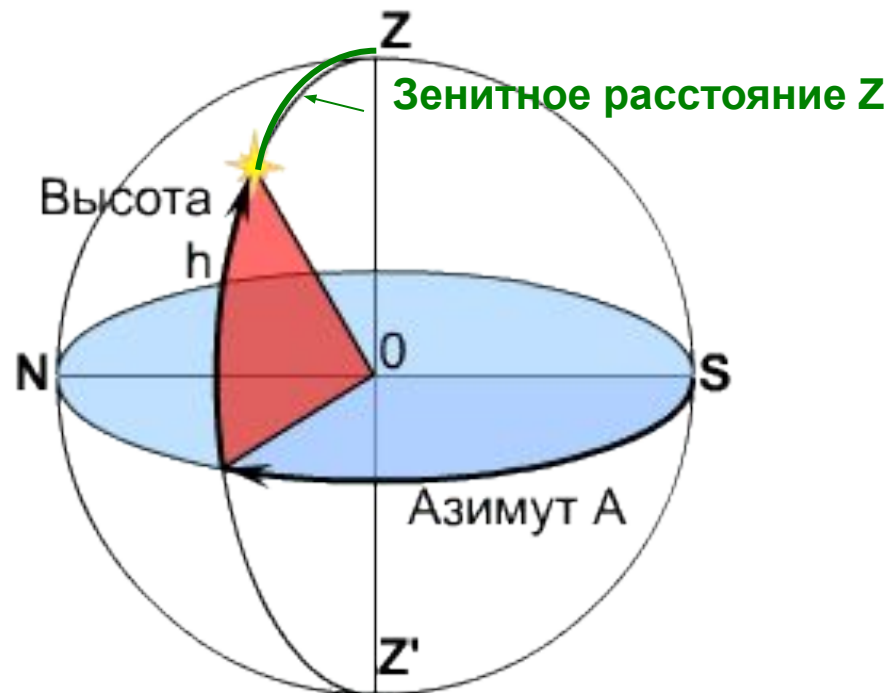
$$Z+h=90^\circ$$



Горизонтальная система координат



© ООО ФИЗИКОН, 2003



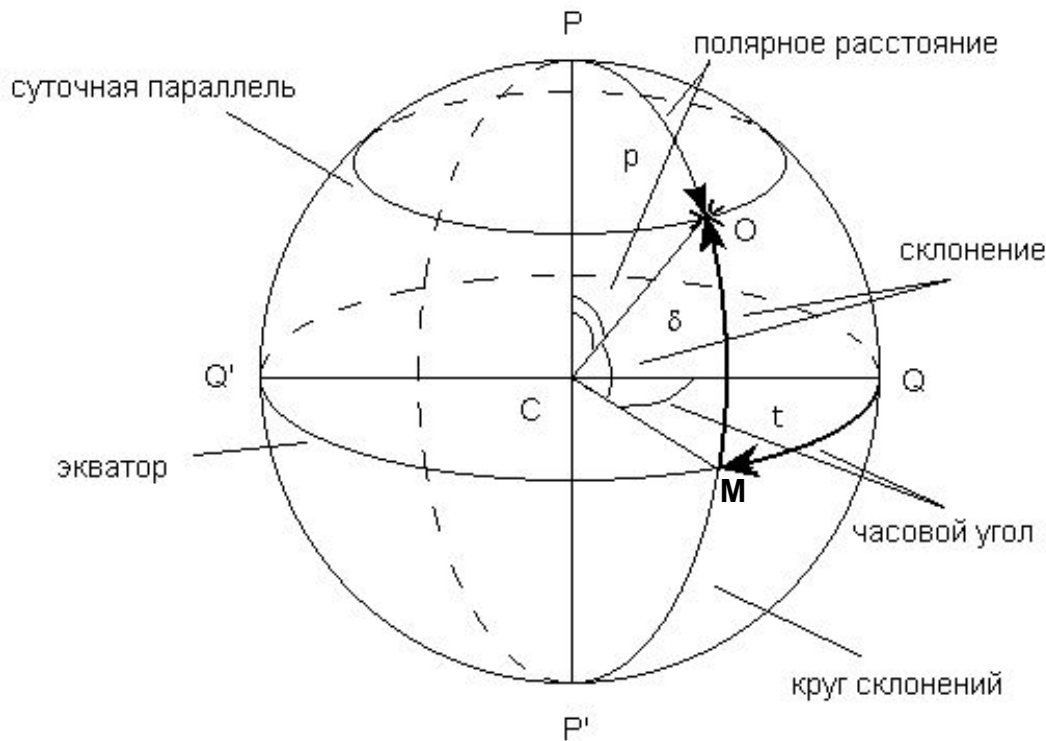
$$0^\circ \leq Z \leq 180^\circ$$

$$0^\circ \leq A \leq 360^\circ$$

$$-90^\circ \leq h \leq 90^\circ$$

$$Z + h = 90^\circ$$

Первая экваториальная система координат



Основная плоскость – плоскость экватора, начальная точка – верхняя точка экватора.

Координаты:

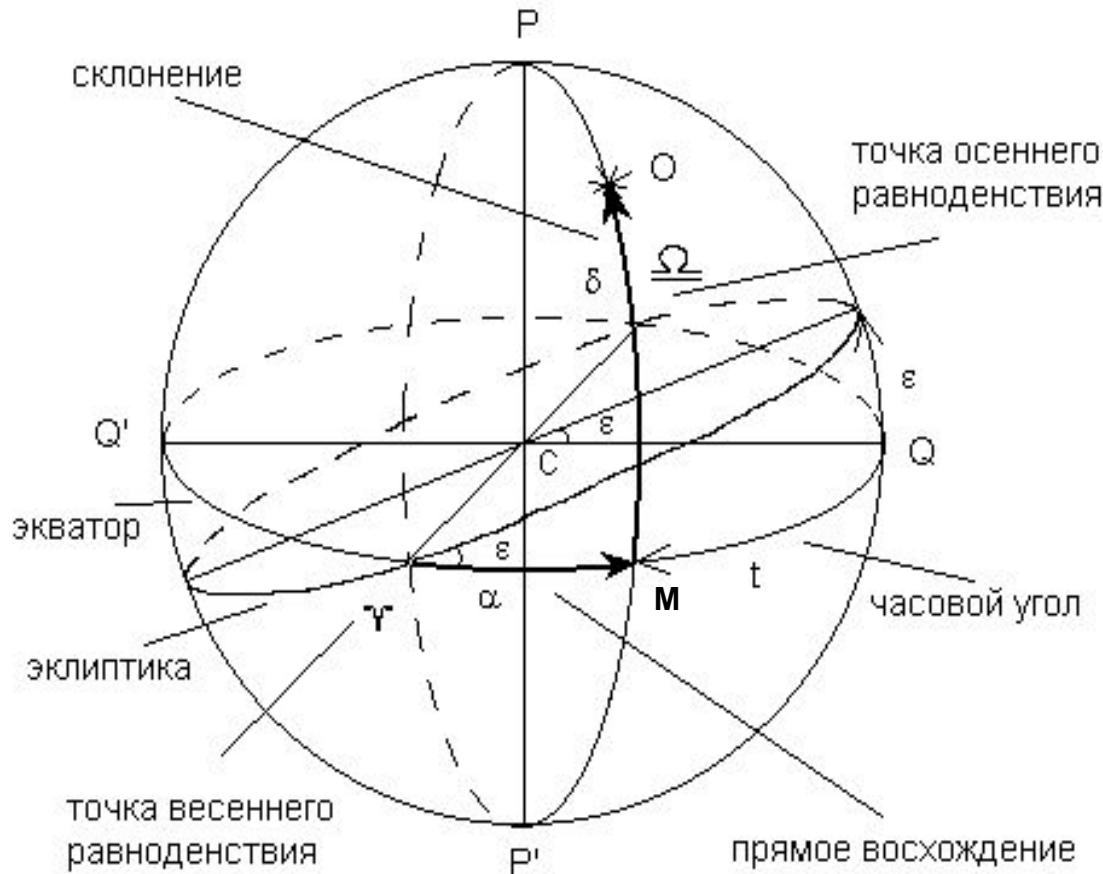
-склонение, дуга круга Склонений **MO**, обозначается **δ** .

Вторая координата – часовой угол **t** .

Склонение выражается в градусной мере, часовой угол в часовой мере,

$$-90^{\circ} \leq \delta \leq 90^{\circ} ; 0^h \leq t \leq 24^h$$

Вторая экваториальная система координат



Основная плоскость – плоскость экватора, начальная точка – точка весеннего равноденствия Υ экватора.

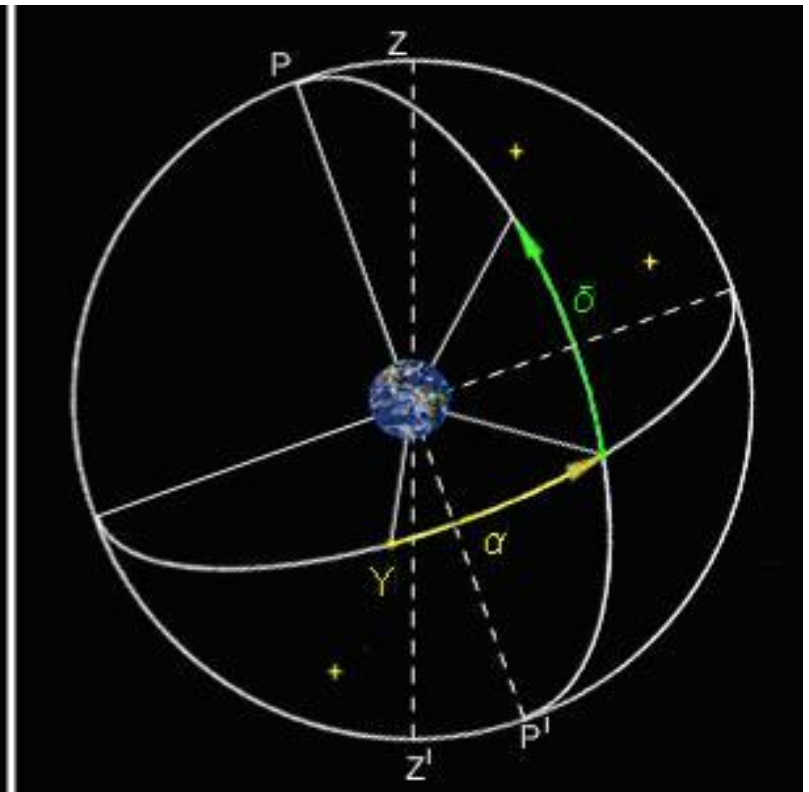
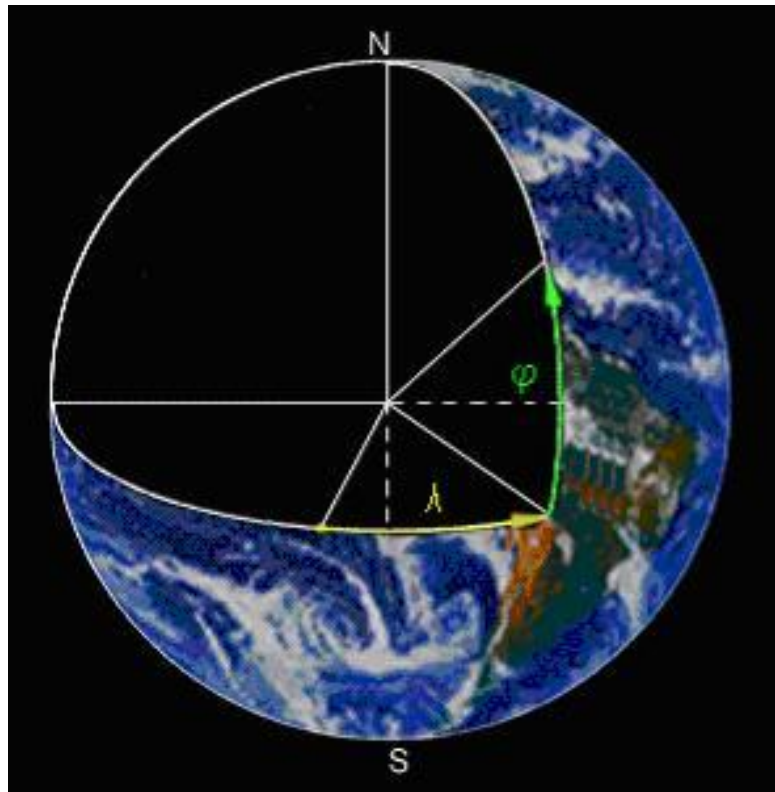
Координаты: склонение, дуга круга Склонений MO , обозначается δ ,

вторая координата – прямое восхождение α . Склонение выражается в градусной мере, прямое восхождение в часовой мере,

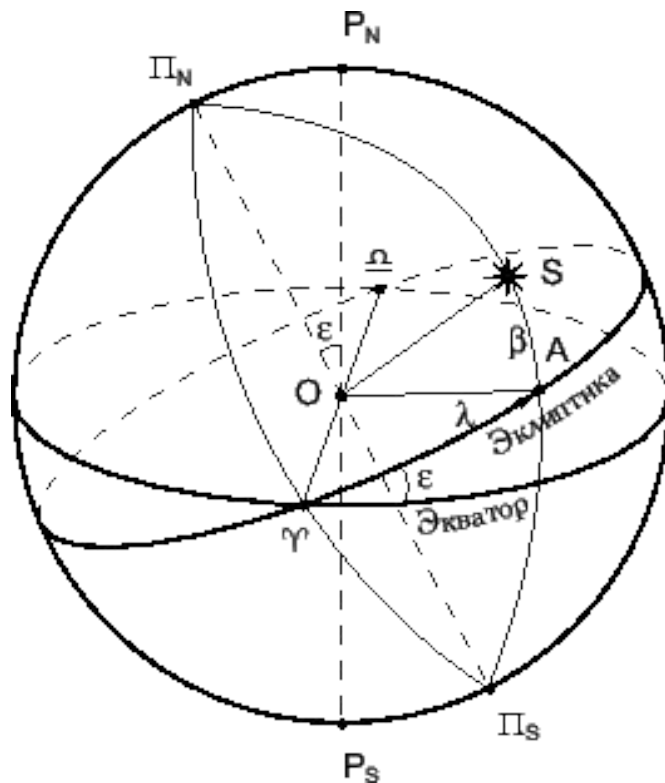
$$-90^\circ \leq \delta \leq 90^\circ ; 0^h \leq \alpha \leq 24^h$$

$$t + \alpha = s - \text{звёздное время}$$

Сходство географической и 2-й экваториальной систем координат



Эклиптическая система координат



Главной плоскостью в эклиптической системе координат является плоскость эклиптики. Северный полюс эклиптики обозначим через Π_N ; по определению дуга $P_N\Pi_N$ равна примерно $23,5^\circ$. Южный полюс эклиптики обозначим как Π_S , $\Pi_N\Pi_S$ – ось эклиптики.

Линия пересечения двух плоскостей - небесного экватора и эклиптики называется линией узлов. Эклиптика делит небесную сферу на два полушария: северное и южное.

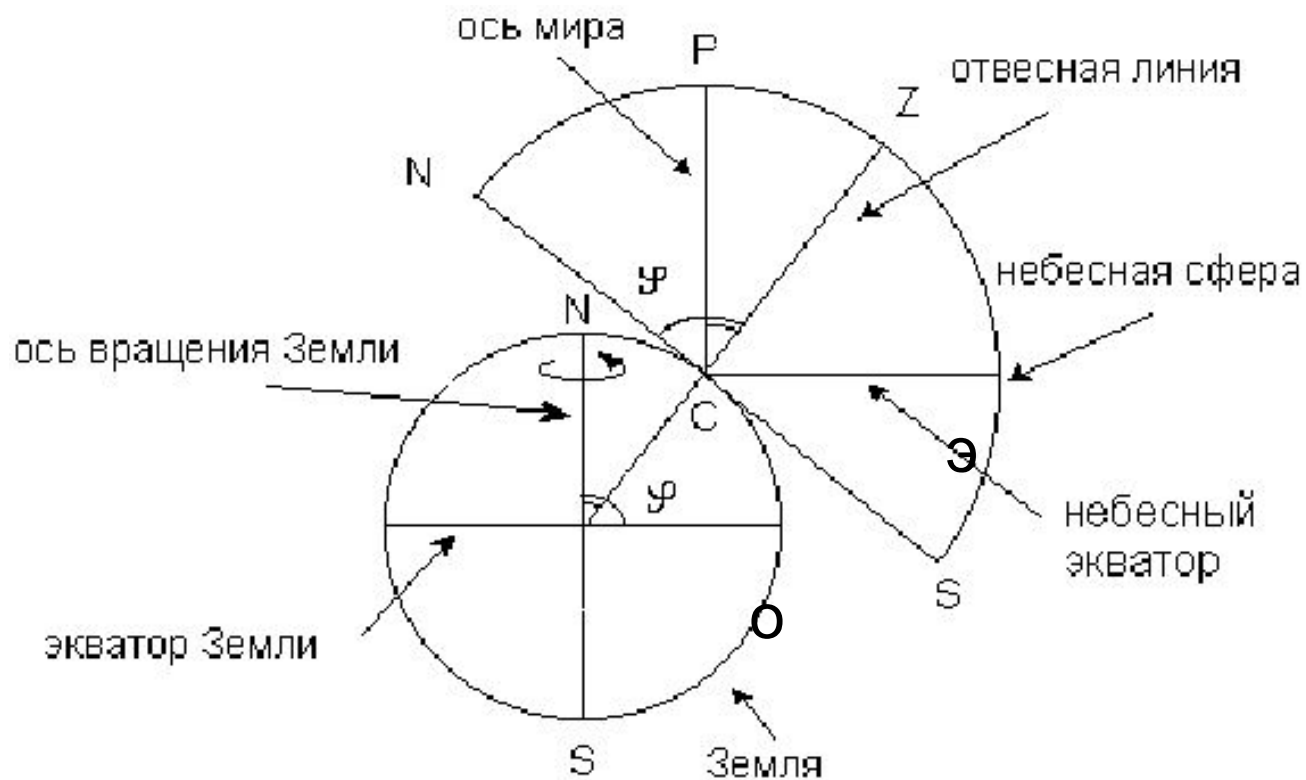
Большой круг, проведенный через полюсы эклиптики и небесный объект, называется кругом широты.

Дуга круга широты AS, отсчитываемая от плоскости эклиптики, называется **эклиптической широтой**: $AS=\beta$ $-90^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$.

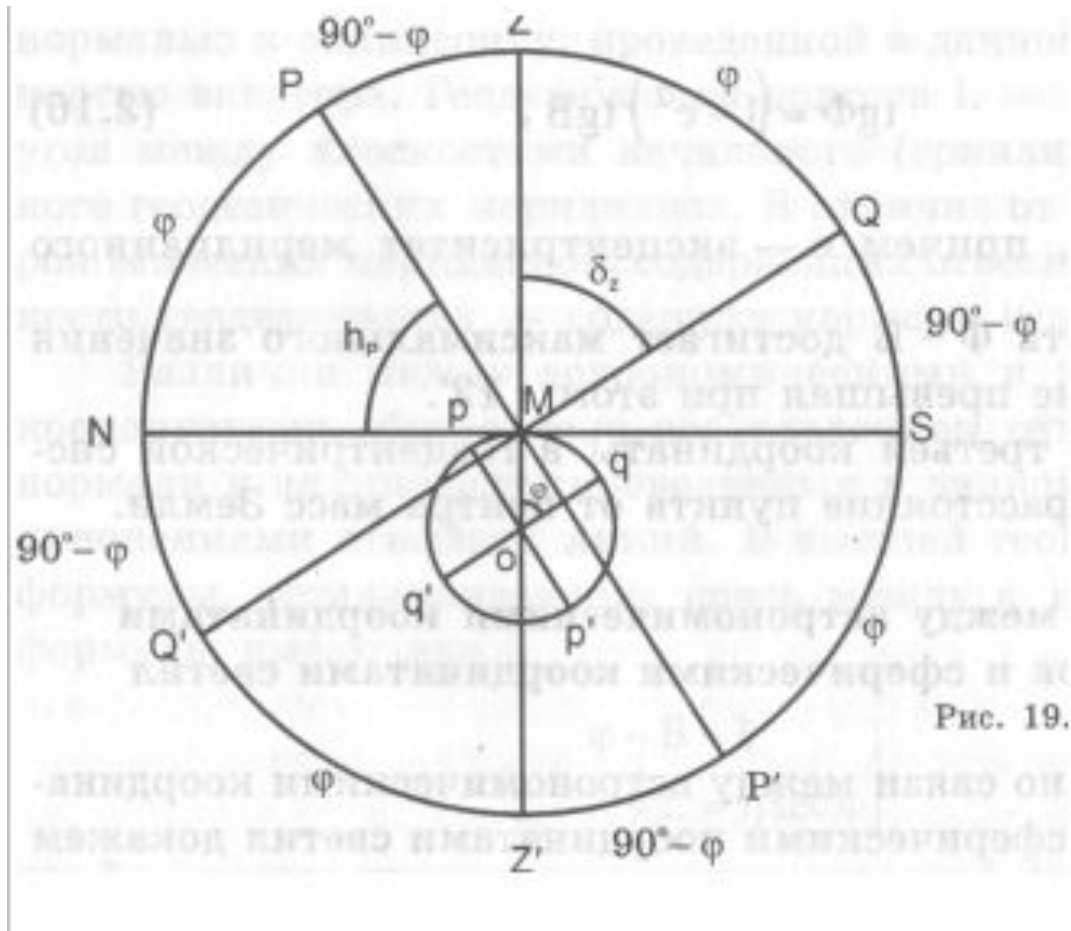
Широта положительна в северном и отрицательна в южном полушарии

Второй координатой является **эклиптическая долгота** λ , равная двугранному углу между большим кругом, который проходит через полюсы эклиптики и динамическую точку весеннего равноденствия, и кругом широты: $\sphericalangle A=\lambda$. Долгота измеряется от точки весеннего равноденствия от 0° до 360° против часовой стрелки, если смотреть с северного полюса эклиптики, то есть в направлении возрастания прямых восхождений.

Высота полюса мира над горизонтом



Высота полюса мира над горизонтом



Связь между временем и долготами пунктов

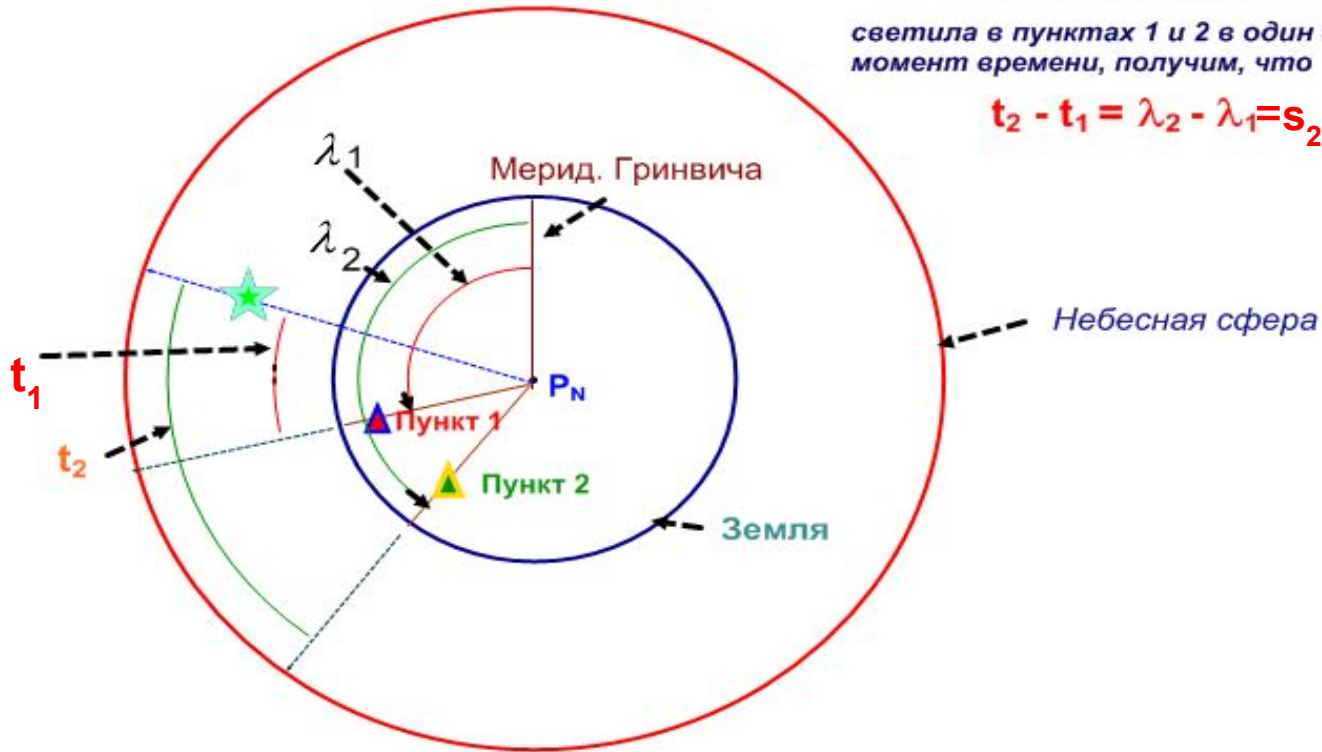
Измерив



часовые углы

светила в пунктах 1 и 2 в один и тот же момент времени, получим, что

$$t_2 - t_1 = \lambda_2 - \lambda_1 = S_2 - S_1$$



Суточное вращение небесной сферы

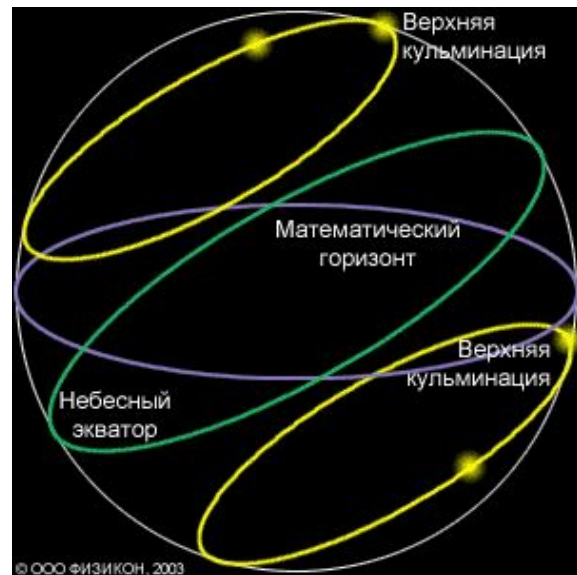
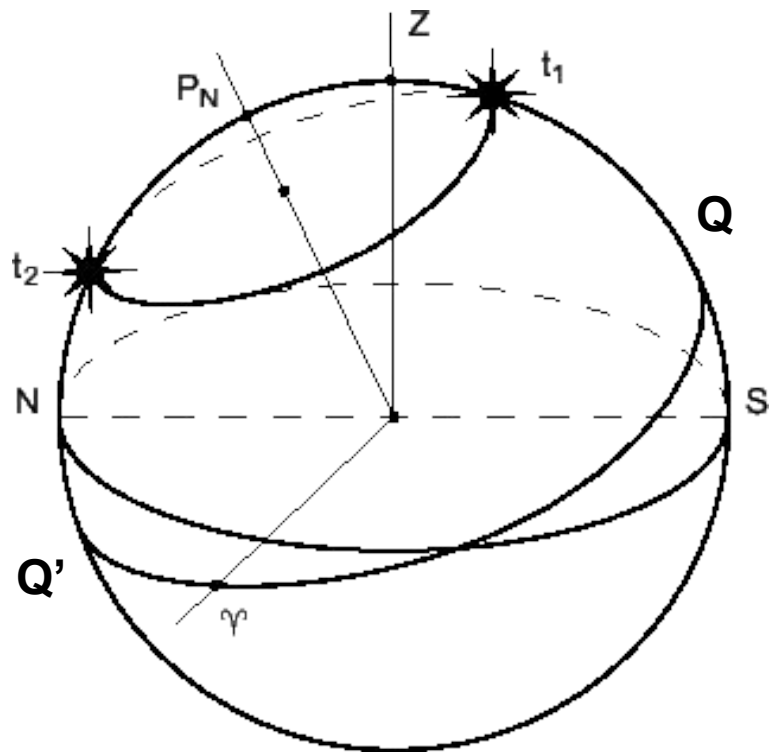


Вращение небесной сферы, кульминации светил

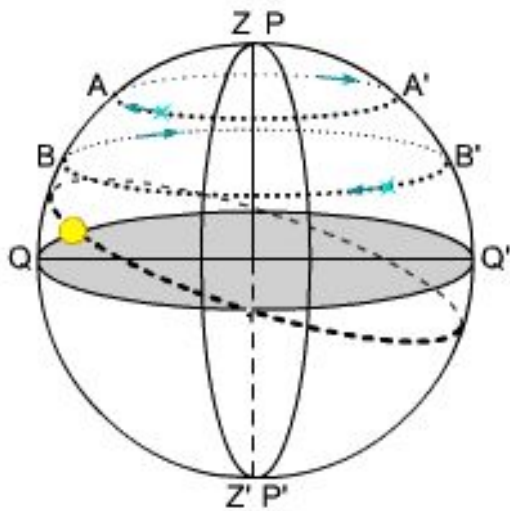
За сутки каждое светило дважды проходит меридиан. Прохождение светилом меридиана называется кульминацией. Различают верхнюю и нижнюю кульминации.

t_1 – верхняя кульминация;

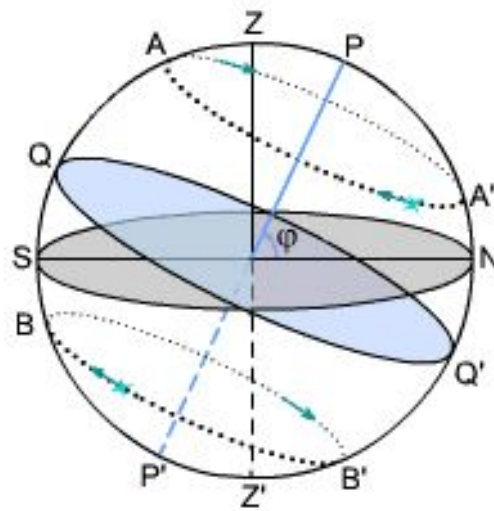
t_2 – нижняя кульминация;



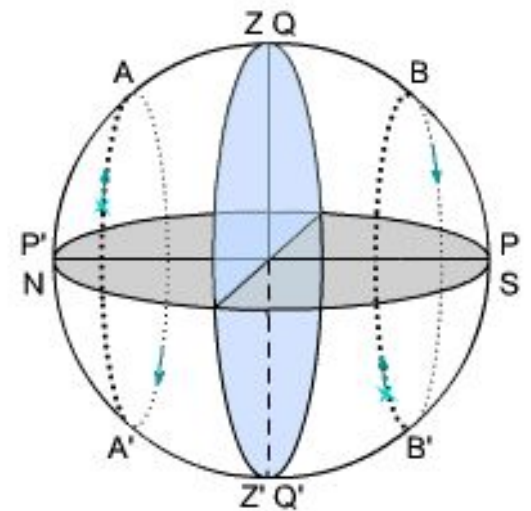
Вид суточного движения светил на разных широтах



а) Северный полюс Земли

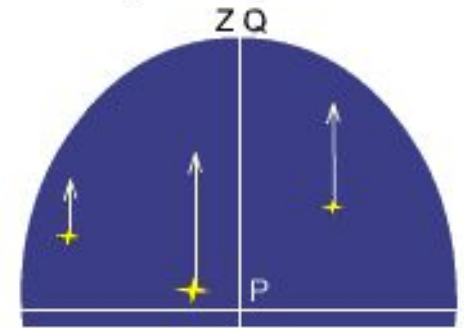
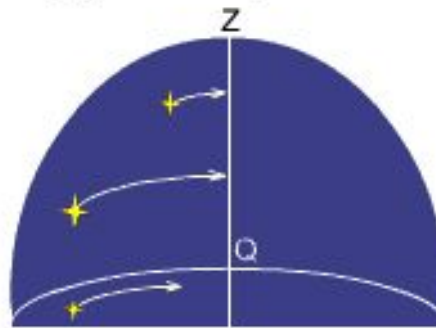
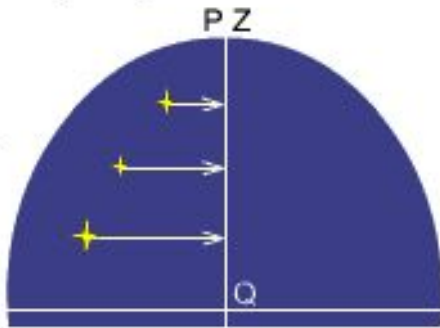


б) средние широты Земли

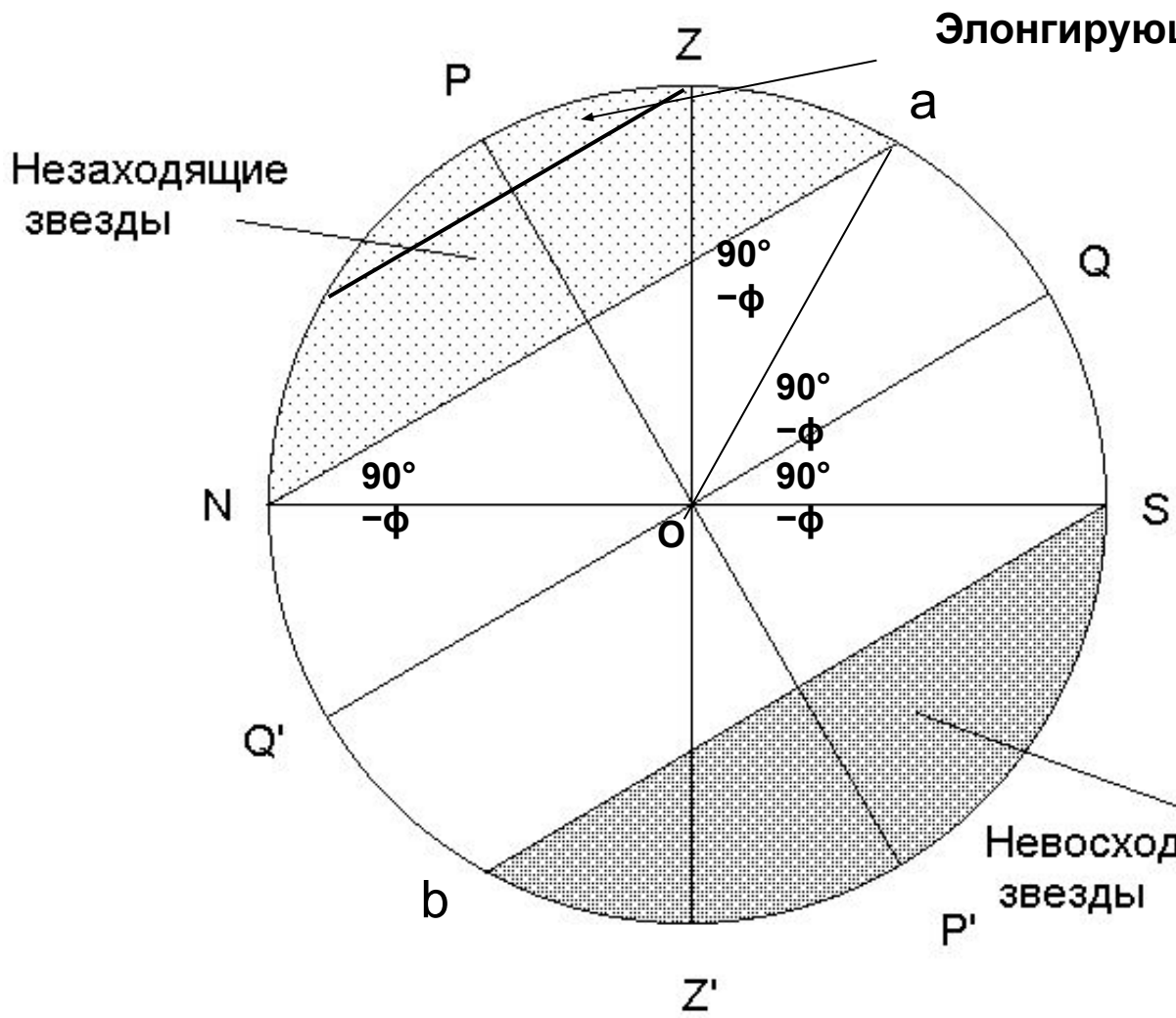


в) экватор Земли

© ООО ФИЗИКОН, 2003



Разделение светил по виду суточного движения



Элонгирующие звёзды

1. Незаходящие звёзды

$$\delta \geq (90^\circ - \varphi)$$

2. Восходящие и заходящие звёзды

$$-(90^\circ - \varphi) \leq \delta \leq (90^\circ - \varphi)$$

3. Невосходящие звёзды

$$\delta \leq -(90^\circ - \varphi)$$

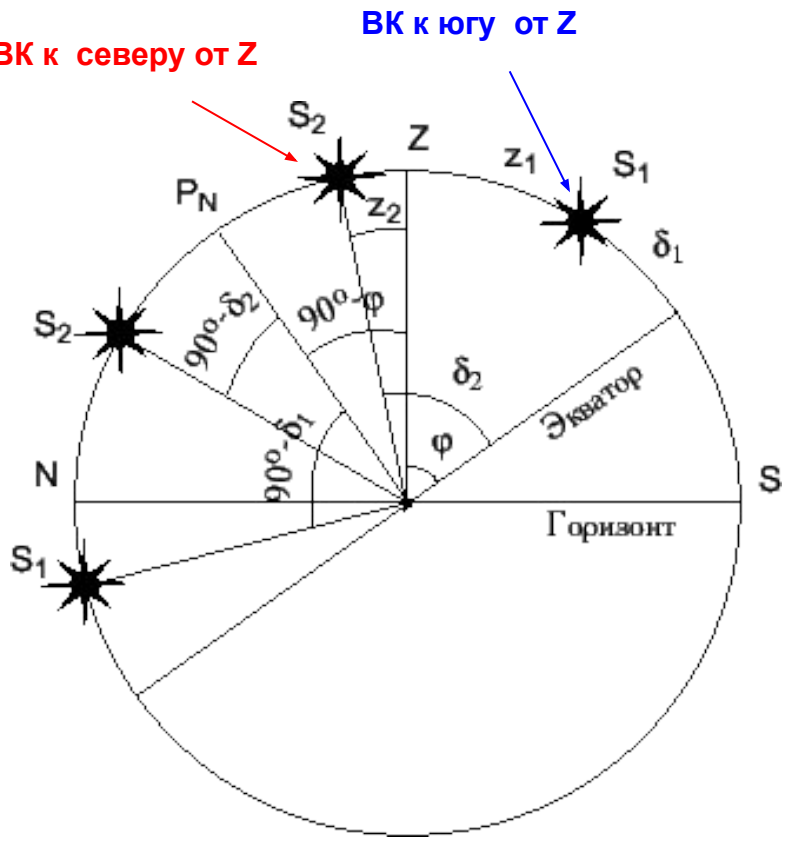
4. Звёзды, проходящие 1-ый вертикал над горизонтом

$$0^\circ \leq \delta \leq \varphi$$

5. Элонгирующие звёзды

$$\delta > \varphi$$

Координаты светил в верхней и нижней кульминациях



Для верхней кульминации

Если $\delta < \varphi$ (№1), то $A=0^\circ$; $S = \alpha$; $z = \varphi - \delta$

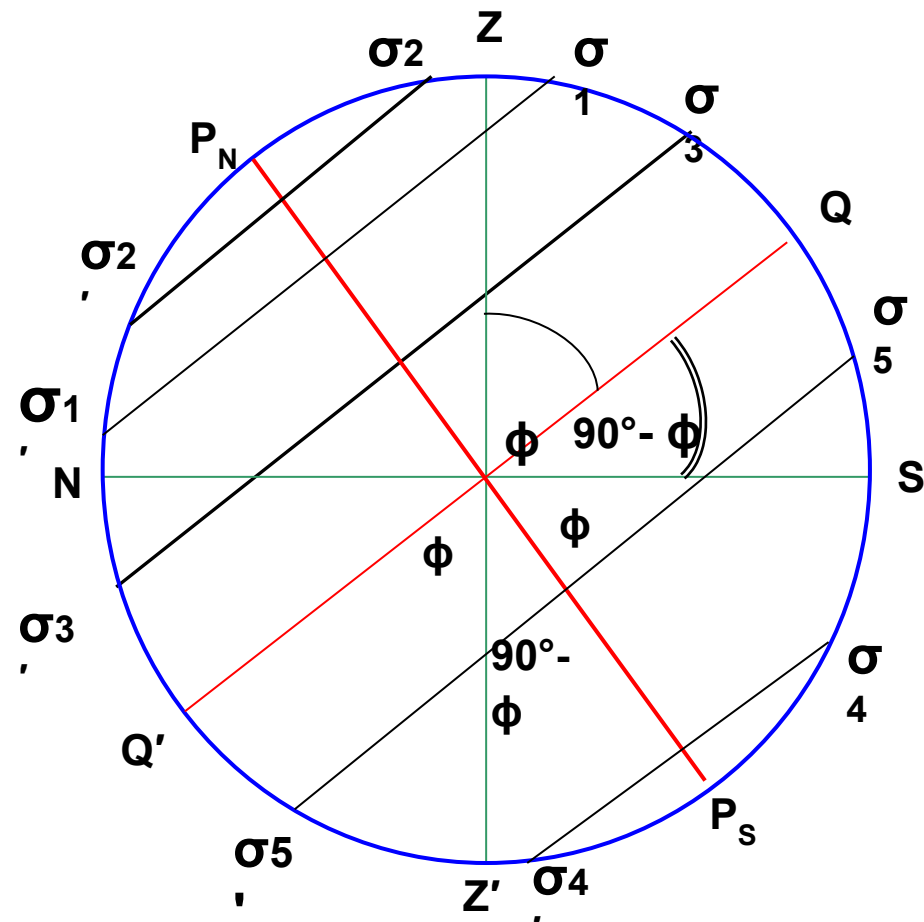
Если $\delta > \varphi$ (№2), то $A=180^\circ$; $S = \alpha \pm 12^h$; $z = \delta - \varphi$

Для нижней кульминации

Если $\delta < \varphi$ (№1), то $A=180^\circ$; $S = \alpha \pm 12^h$; $Z = 180^\circ - (\varphi + \delta)$

Если $\delta > \varphi$ (№2), то $A=180^\circ$; $S = \alpha \pm 12^h$; $Z = 180^\circ - (\varphi + \delta)$

Прохождения светил через меридиан



В практике геодез-ой астрономии часто требуется определить горизонтальные координаты светил в меридиане (верхней или нижней кульминации), т.е необходимо знать Z , A и S светила при прохождении им меридиан. Рассмотрим случаи: а) незаходящей звезды σ_1 ; б) элонгирующей σ_2 ; в) восходящей и заходящей σ_3 ; г) невосходящей σ_4 .

Получим S , Z и A для верхней кульминации (ВК).

Для звёзд с $\delta < \phi$ (σ_1 , σ_3 , σ_4), $S = \alpha$, т.к. $t = 0^h$; $A = 0^\circ$; $Z = \phi - \delta$, т.к для σ_1 дуга $Z \sigma_1 = ZQ - Q\sigma_1$, аналогично для σ_3 , σ_5 и σ_4 .

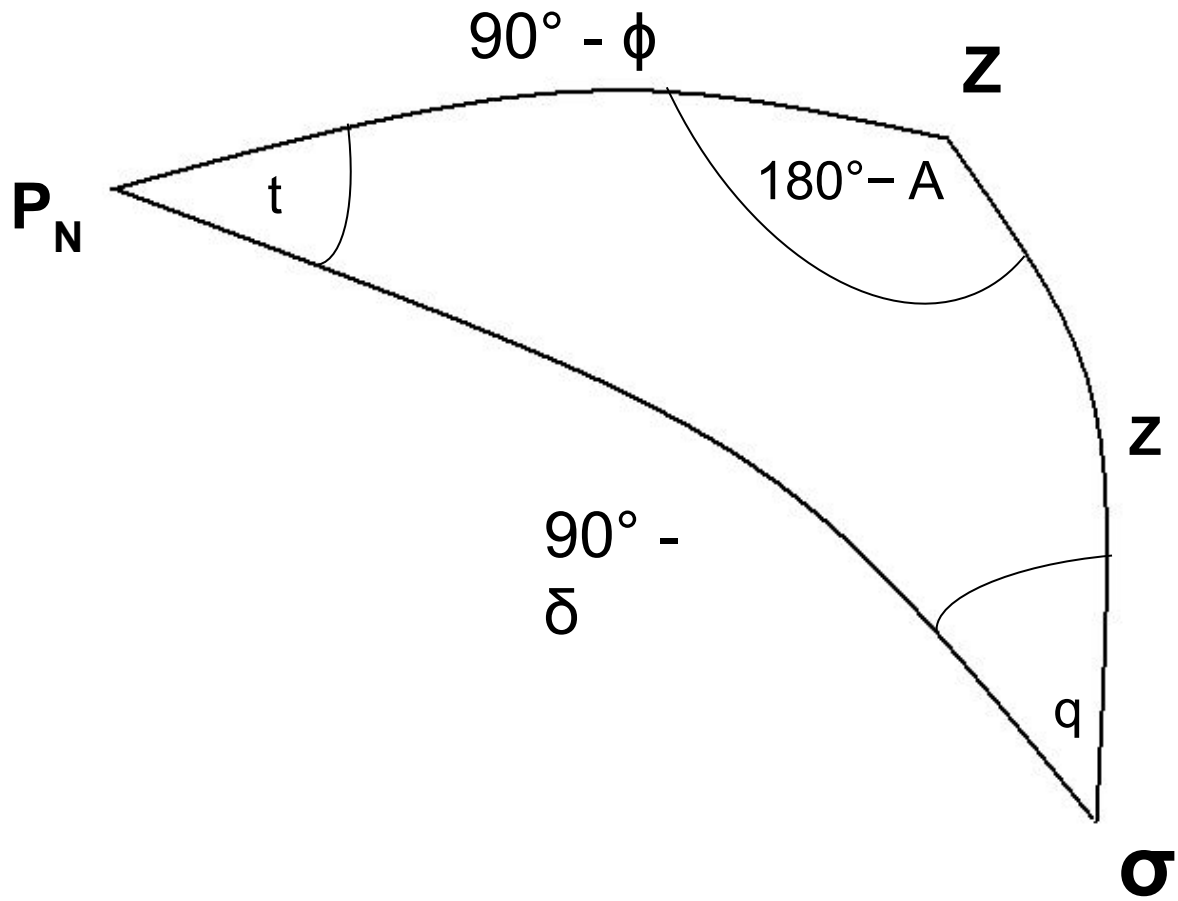
Для звёзд с $\delta > \phi$ (σ_2) $S = \alpha$, т.к $t = 0^h$; $A = 180^\circ$; $Z = \delta - \phi$.

Получим S , Z и A для нижней кульминации (НК).

Для звёзд с $\delta > -\phi$ (σ_1 , σ_2 , σ_3 , σ_5) $S = \alpha \pm 12^h$, т.к $t = 12^h$; $A = 180^\circ$; $Z = 180^\circ - \delta - \phi$ или $Z = 180^\circ - (\delta + \phi)$.

Для звёзд с $\delta < -\phi$ (σ_4) $S = \alpha \pm 12^h$, т.к $t = 12^h$; $A = 0^\circ$; $Z = 180^\circ + (\delta + \phi)$.

Связь между системами координат, параллактический треугольник



Основные формулы параллактического треугольника

- **Исходные формулы**

- $\cos Z = \sin \phi \times \sin \delta + \cos \phi \times \cos \delta \times \cos t$

- $-\sin Z \times \cos A = \sin \delta \times \cos \phi - \cos \delta \times \sin \phi \times \cos t$

- $\sin Z \times \sin A = \cos \delta \times \sin t$

- $\sin \delta = \sin \phi \times \cos Z + \cos \phi \times \sin Z \times \cos A_N$

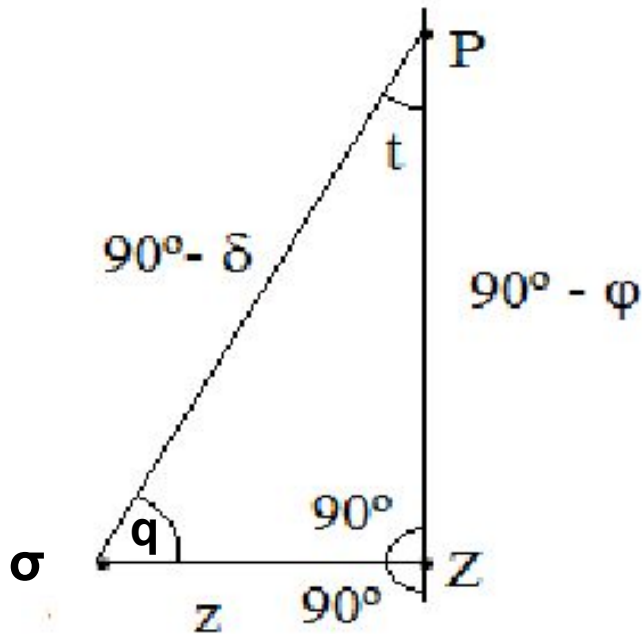
- **Производные формулы**

- $\operatorname{ctg} A_N = \sin \phi \times \operatorname{ctg} t - \cos \phi \times \operatorname{tg} \delta \times \operatorname{cosec} t$

- $\cos A = (\sin \delta - \sin \phi \times \cos Z) / (\cos \phi \times \sin Z)$

Прохождение светил через 1-ый вертикал.

Т.к. угол параллактического треугольника при $Z = 90^\circ$, то по правилу Непера-Модюи:
 $\cos z = \sin \delta / \sin \varphi$; $\cos t = \operatorname{tg} \delta / \operatorname{tg} \varphi$.

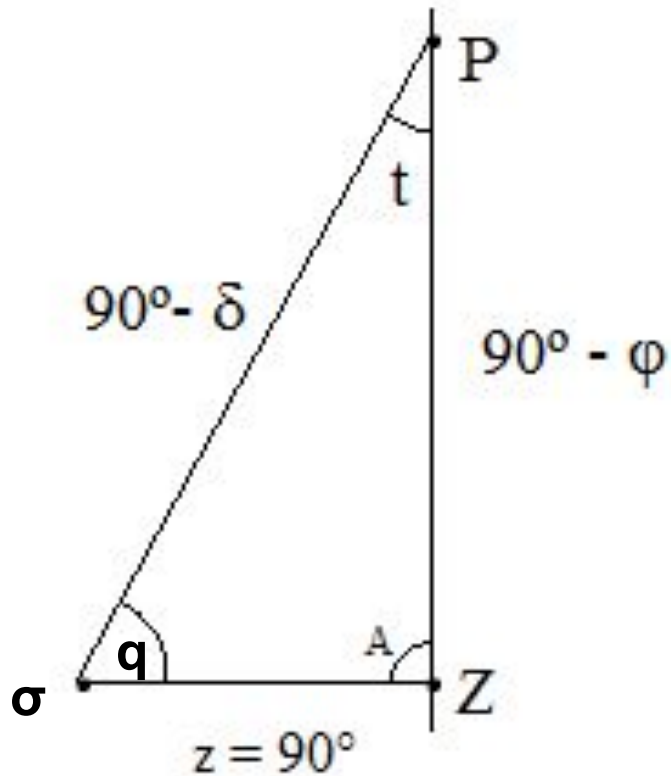


$$S_w = \alpha + t_w; \quad S_E = \alpha + t_E.$$

для $\delta > 0, \varphi > 0$

$$t_w = t, \quad t_E = 24 - t.$$

Восход и заход светил.



Т.к $z = 90^\circ$, то имеем $\cos t = \operatorname{tg} \delta * \operatorname{tg} \varphi$;
 $\cos A = -\sin \varphi / \cos \delta$;

для $\varphi > 0$, $\delta > 0$

$$t_w = 12^h - t;$$

$$t_E = 12^h + t;$$

для $\delta < 0$

$$t_w = t;$$

$$t_E = 24 - t;$$

$$S_w = \alpha + t_w;$$

$$A_w = 180^\circ - A;$$

$$A_E = 180^\circ + A$$

$$A_w = A;$$

$$A_E = 360^\circ - A;$$

$$S_E = \alpha + t_E;$$

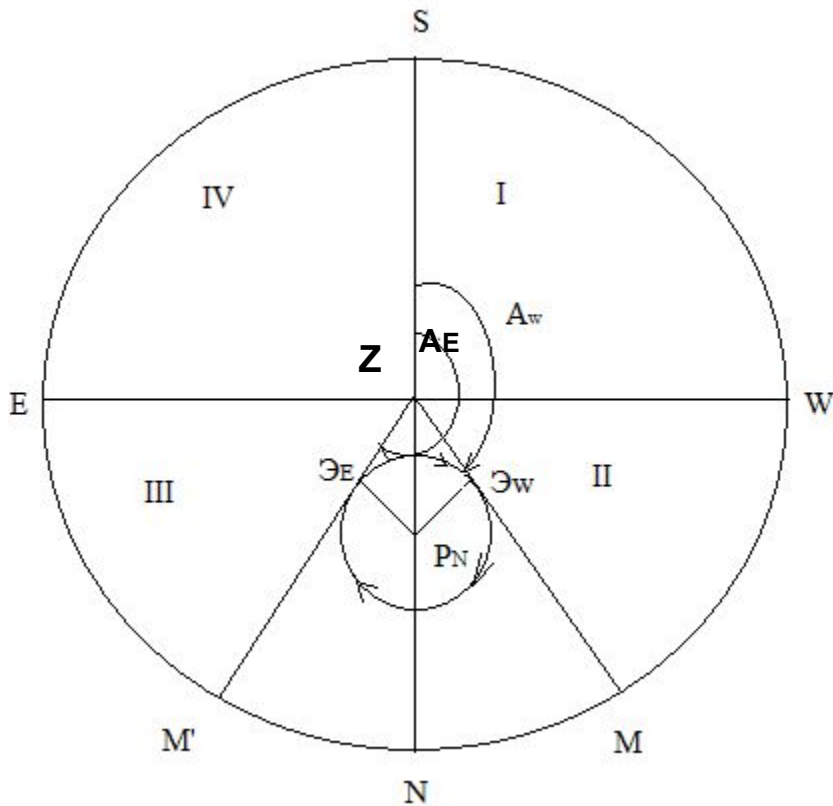
Прохождение светил элонгаций.

Для светил с $\delta > \phi$ моменты наибольшего удаления от меридиана называются Элонгациями. Различают западную \mathcal{E}_w и восточную \mathcal{E}_e элонгации. В элонгациях углы $Z\mathcal{E}P$ равны 90° . Решая их по правилу Непера-Модюи получим:

$$\cos t = \operatorname{tg} \phi / \operatorname{tg} \delta ; \cos Z = \sin \phi / \sin \delta ; \sin A = \cos \delta / \cos \phi .$$

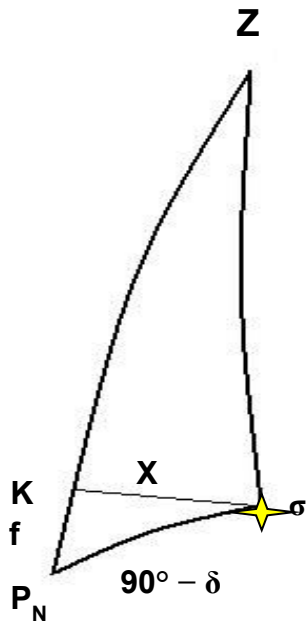
Для западной элонгации: $t_w = t$ и $A_N = -A$, а $S_w = \alpha + t_w$; $A_w = 180^\circ + A$.

Для восточной элонгации: $t_e = -t$ и $A_N = A$, а $S_e = \alpha + t_e$; $A_e = 180^\circ + A$.



РАБОЧАЯ ЭФЕМЕРИДА ПОЛЯРНОЙ ЗВЕЗДЫ

Для многих видов астроопределений необходимо знать рабочую эфемериду Полярной звезды (α – Малой медведицы или α – Ursae Minoris – α UMi) . Это необходимо для ориентировки инструмента, для отыскания звезды в сумерки и т.д.



Для расчет эфемериды используются упрощенные формулы, т.к для этой цели достаточно знать приближенные координаты (точность $\pm 1'$), а треугольник **PZσ** можно рассматривать как узкий из-за малости стороны **Pσ**.

Для вывода формул опустим перпендикуляр из **σ** на сторону **PZ**. Треугольник **PKσ** по малости **Pσ** можно рассматривать, как плоский, где **PZ=90°-φ** . Тогда **PK = f = Δ cos t**; **σK = x = Δ sin t**; где **t = S - α** , а **Δ=90°- δ** .

Из узкого сферического треугольника **ZKσ**

$$\mathbf{ZK = 90^\circ - \varphi - f .}$$

Далее запишем: **x = A_N sin Z = A_N sin (90° - φ - f) ;**

$$\mathbf{A_N = x \sec (\varphi + f) = \Delta \sin t \times \sec (\varphi + f) .}$$