

2. Элементы сферической астрономии

2.1 Небесная сфера и системы координат

Небесная сфера

Небесная сфера – воображаемая сфера единичного радиуса с центром в точке наблюдения, на которую проецируются изображения светил.



Глоссарий

Центр небесной сферы

на поверхности Земли

в центре масс Земли

в центре масс Солнца

в центре масс Солн.системы

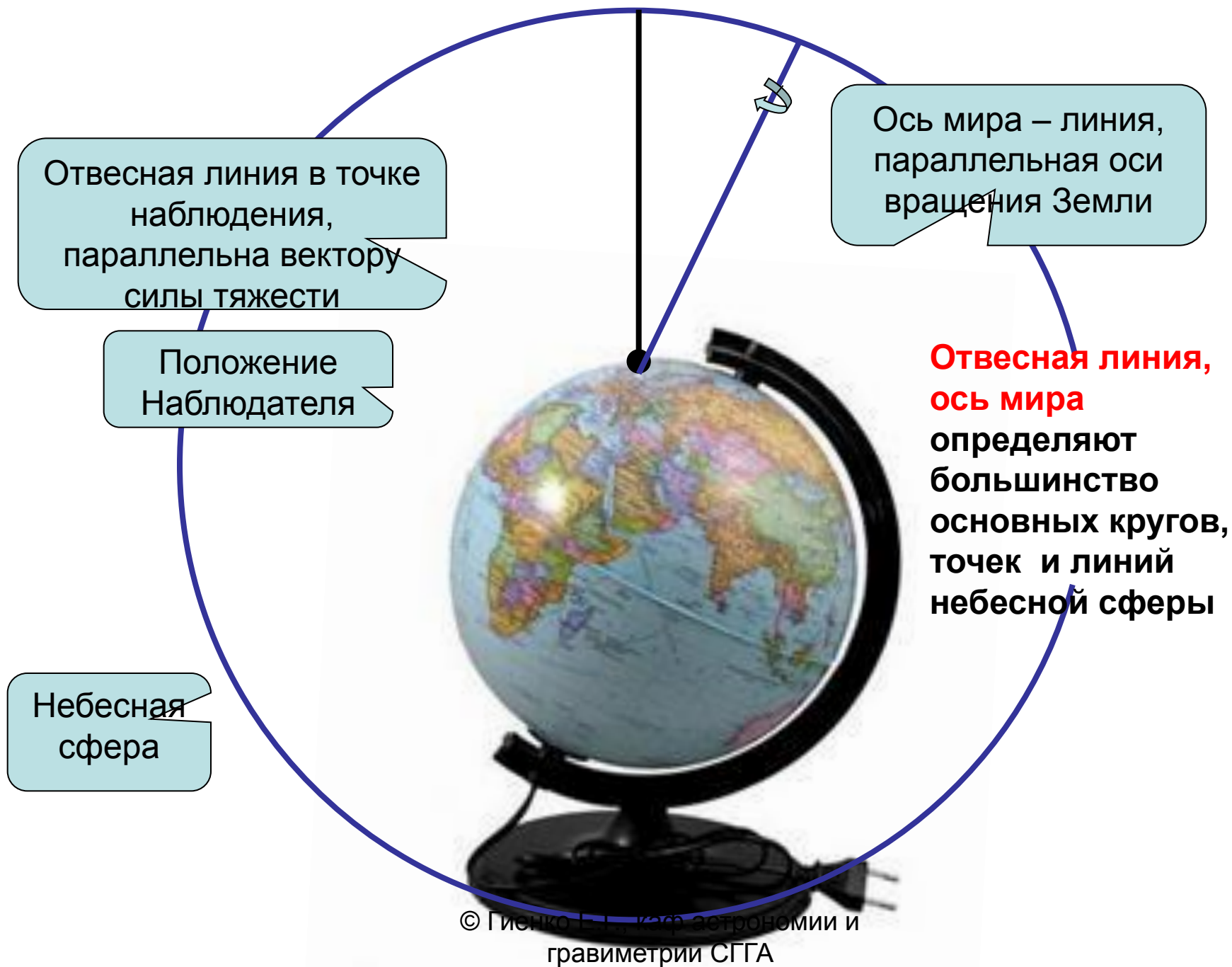
Название

топоцентрическая

геоцентрическая

гелиоцентрическая

барицентрическая

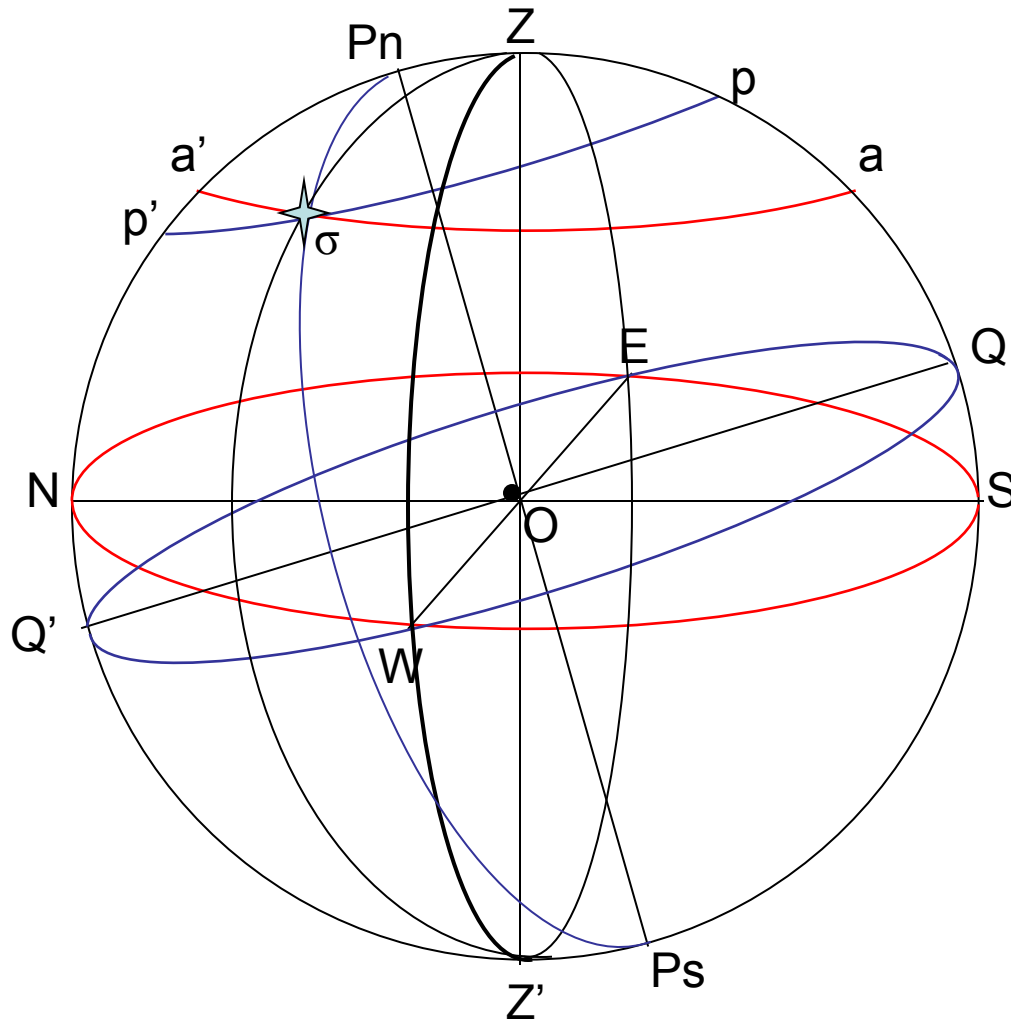




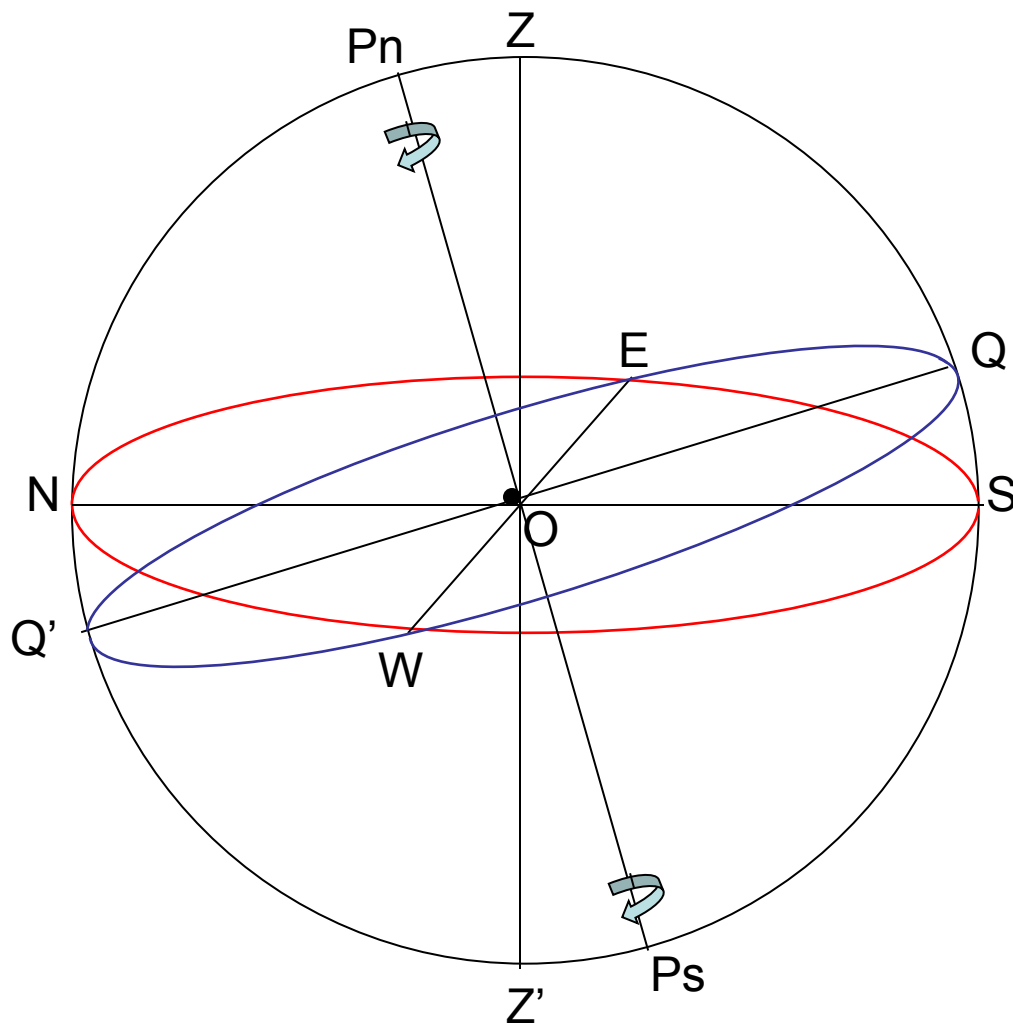
Глоссарий

- **Отвесная линия** - параллельна вектору силы тяжести в точке наблюдения. Пересекает небесную сферу в точках Зенит и Надир.
- **Ось мира** – параллельна оси вращения Земли.

Основные точки, линии и круги небесной сферы



Основные точки, линии и круги небесной сферы



ZZ' – **отвесная линия**,
параллельна вектору
силы тяжести в данной точке
 Z – зенит, Z' – надир

Круг $NWSE$ – **небесный**
(математический) **горизонт** –
перпендикулярен отвесной линии

N, S, W, E – **точки Севера, Юга,**
Запада и Востока

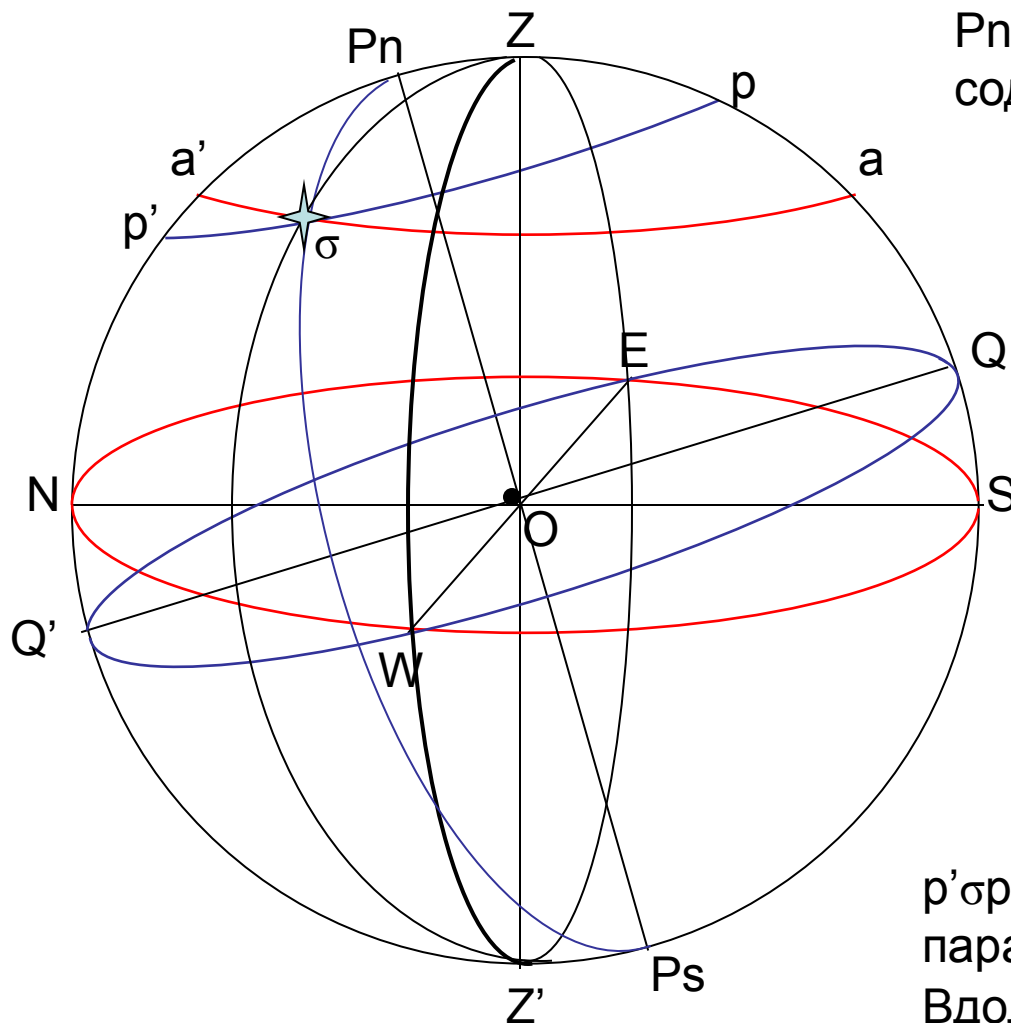
PnP_s – **ось мира**, параллельна
оси вращения Земли

P_n, P_s – **северный и южный**
полюсы мира

$Q'WQE$ – **небесный экватор**,
перпендикулярен оси мира,
параллелен экватору Земли

Q, Q' – **верхняя, нижняя точки экватора**

Основные точки, линии и круги небесной сферы



$P_n Z P_s Z'$ – **небесный меридиан**,
содержит отвесную линию и ось мира
параллелен земному меридиану
в точке наблюдения

$Z W Z' E$ – **первый вертикал**,
перпендикулярен небесному
меридиану

★ σ – светило

4 круга, проходящие через светило:

$Z \sigma Z'$ – **вертикал светила**

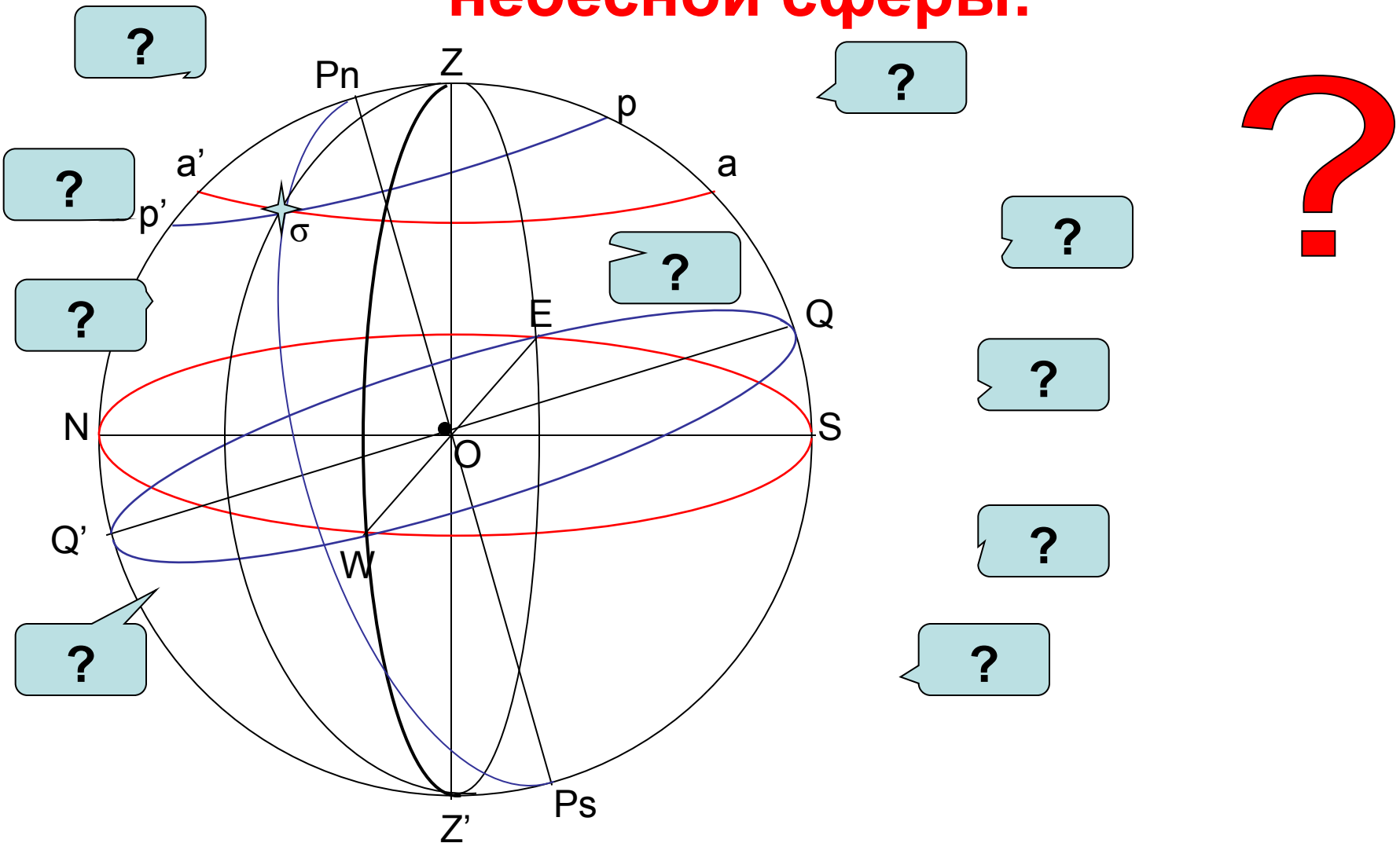
$P_n \sigma P_s$ – **круг склонений**

$a' \sigma a$ – **круг равных высот**,
параллелен небесному горизонту

$p' \sigma p$ – **суточная параллель**,
параллельна небесному экватору

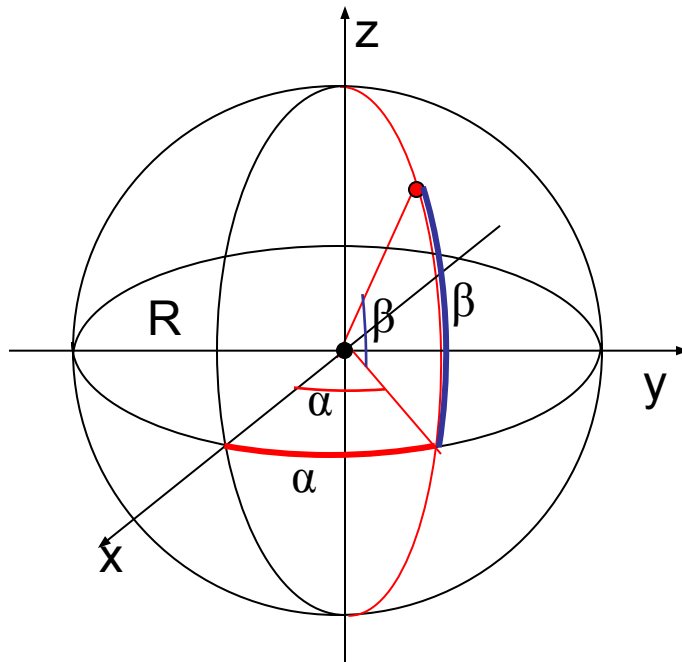
Вдоль суточных параллелей
происходит видимое суточное
движение светил

Назовите основные круги и линии небесной сферы:



Системы координат

Общие принципы задания
сферической системы координат:



$$x = R \cos\alpha \cos\beta$$

$$y = R \sin\alpha \cos\beta$$

$$z = R \sin\beta$$

Если $R=1$, то

$$x = \cos\alpha \cos\beta$$

$$y = \sin\alpha \cos\beta$$

$$z = \sin\beta$$

**Положение точки на сфере единичного радиуса
однозначно определяется двумя углами**

Географическая (сферическая) система координат



© Гиенко Е.Г., каф астрономии и
гравиметрии СГГА

Географическая (сферическая) система координат

Положение точки на Земле (широта, долгота) определяется в **географических системах координат**

Если Земля – сфера (глобус):

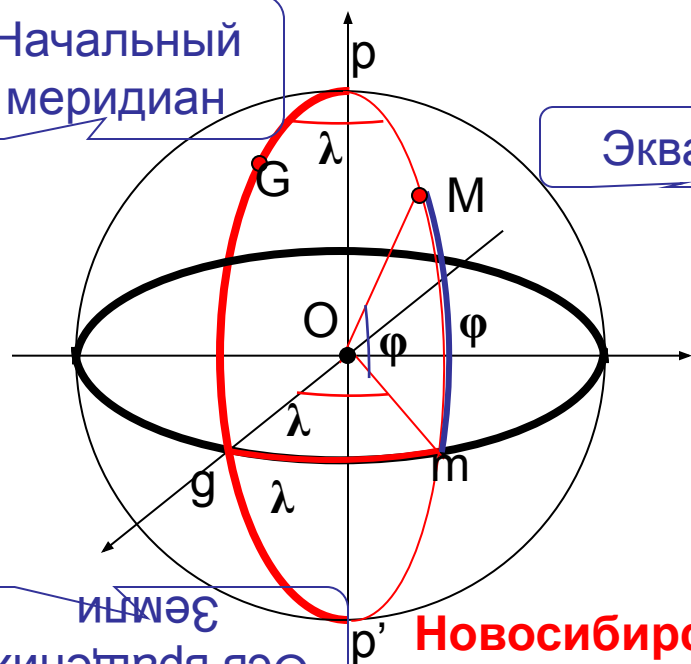
pp' – ось вращения Земли, G – Гринвич, M – пункт на поверхности Земли

pGr' – начальный (гринвичский) меридиан, pMr' – меридиан пункта M ,

MO – отвесная линия

Начальный
меридиан

Экватор



Ось вращения
Земли

Географическая широта φ – угол между плоскостью экватора и отвесной линией в пункте ($\angle mOM$), или дуга меридиана от экватора до пункта ($^U mM$).

Северное полушарие: $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ с.ш.

Южное полушарие: $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ ю.ш.

Географическая долгота λ – двугранный угол между плоскостями начального и текущего меридианов ($\angle gOM$), или дуга экватора от начального до текущего меридиана ($^U gm$).

Восточное полушарие: $0^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$ в.д.

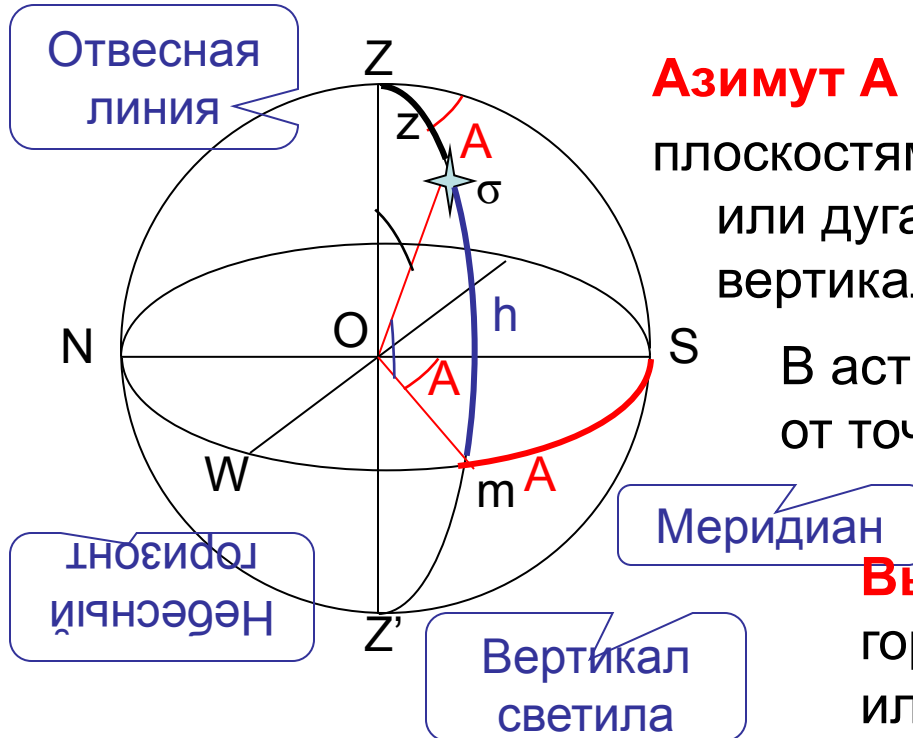
Западное полушарие: $0^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$ з.д.

Новосибирск:

$\varphi \approx 55^\circ$ с.ш., $\lambda \approx 83^\circ$ в.д.

© Гичев В.Г., кафедра геодезии и геофизики
гравиметрии СГГА

Горизонтальная система координат



Азимут A – двугранный угол между плоскостями меридиана и вертикала светила, или дуга небесного горизонта от точки Юга до вертикала светила:

$$A = \cup Sm = \angle SOm$$

В астрономии азимут отсчитывается от точки Юга S ,

$$0^0 \leq A < 360^0$$

Высота h – угол между плоскостью горизонта и направлением на светило, или дуга вертикала светила от горизонта до светила:

$$h = \angle mO\sigma$$

$$-90^0 \leq h \leq +90^0 = \cup m\sigma$$

Зенитное расстояние z – угол между отвесной линией и направлением на светило, или дуга вертикала светила от зенита до светила:

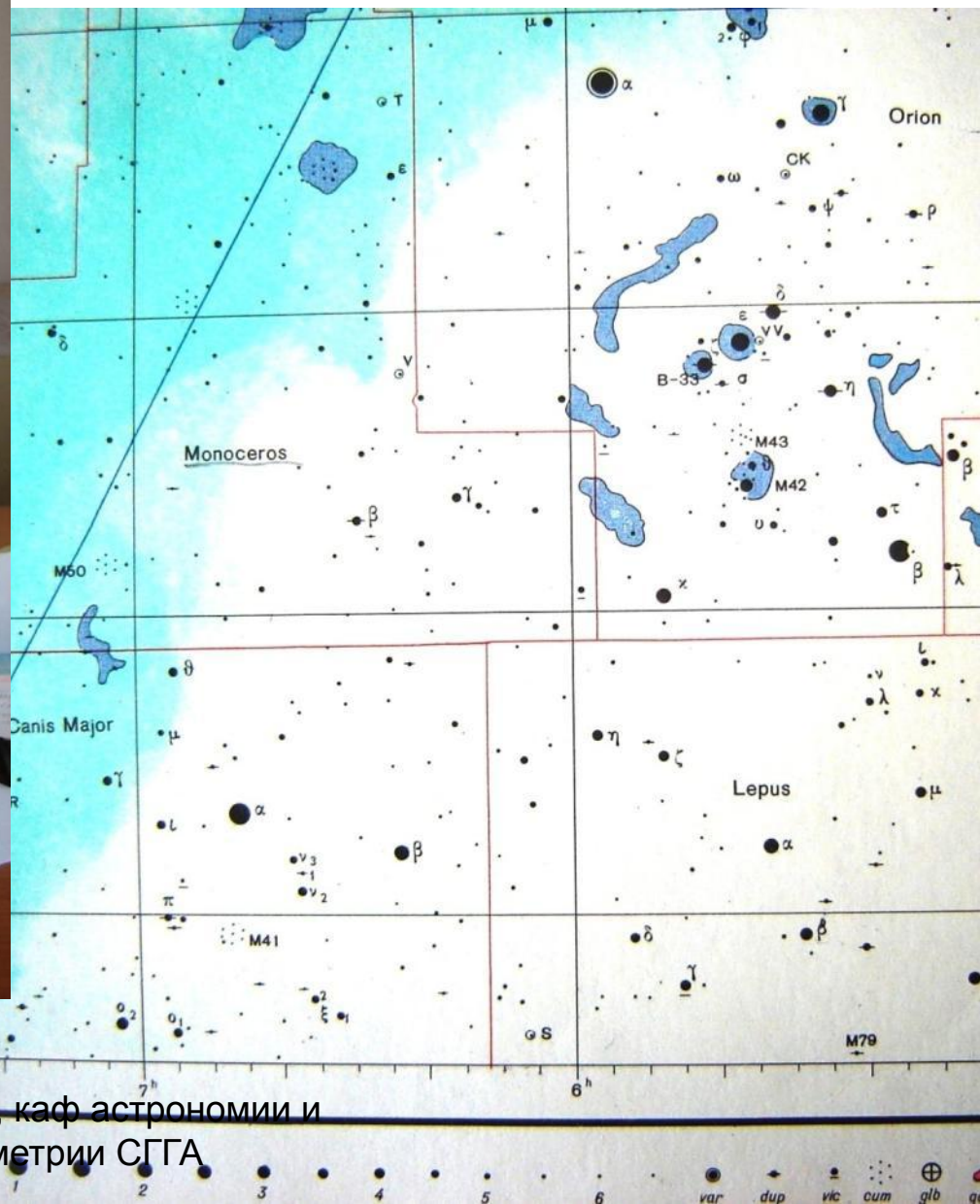
$$z = \angle ZO\sigma$$

$$0^0 \leq z \leq 180^0$$

$$z = \cup Z\sigma = 90^0 - h$$

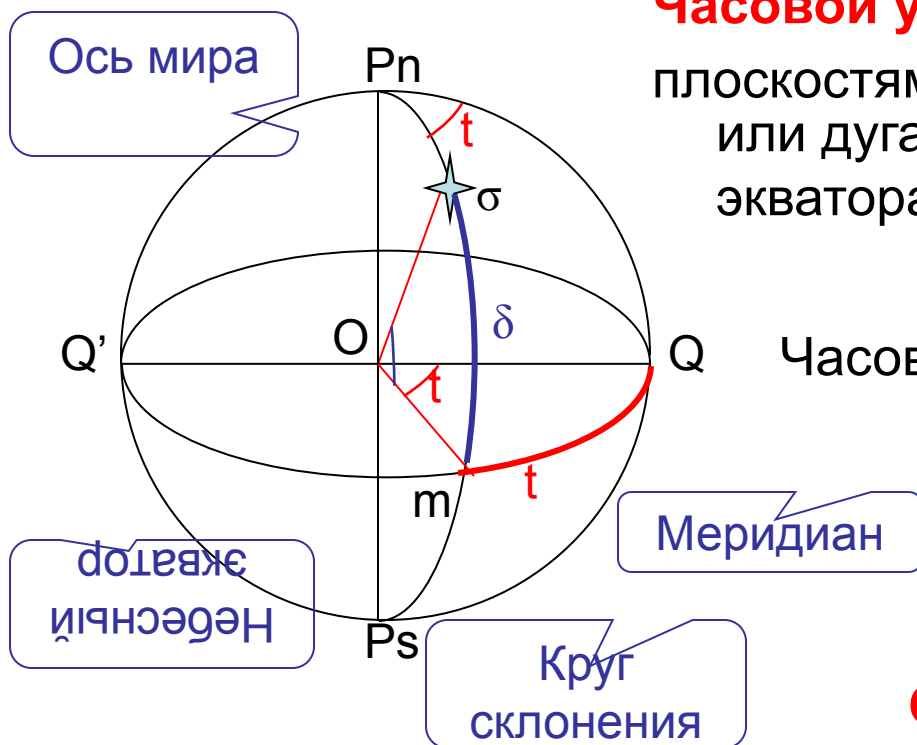
В горизонтальной системе координат устанавливаются геодезические инструменты и выполняются измерения.

Из-за суточного движения небесной сферы $A, h(z)$ светил непрерывно изменяются



© Гиенко Е.Г., каф астрономии и
гравиметрии СГГА

Первая экваториальная система координат



Часовой угол t – двугранный угол между плоскостями меридиана и круга склонения, или дуга небесного экватора от верхней точки экватора до круга склонения светила:

$$t = {}^U Qm = \angle QOm$$

Часовой угол измеряется в часовой мере:

$$0^h \leq t < 24^h$$

$$24^h = 360^0, \quad 1^h (\text{час}) = 15^0, \\ 1^m (\text{мин}) = 15', \quad 1^s (\text{сек}) = 15''$$

Первая экваториальная система координат используется при астр. наблюдениях и установлении астр. шкал времени

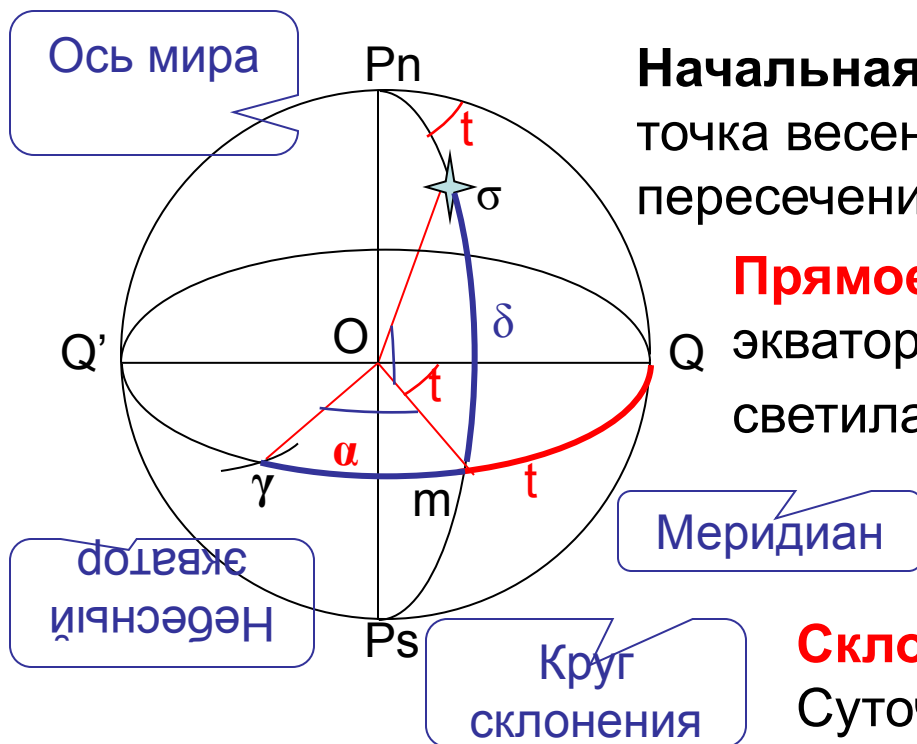
Суточное движение небесной сферы:

δ не меняется, t изменяется от 0 до 24^h в течение суток

Склонение δ – угол между плоскостью экватора и направлением на светило, или дуга круга склонения от экватора до светила: $\delta = \angle mO\sigma$

$$= {}^U m\sigma \\ -90^0 \leq \delta \leq +90^0$$

Вторая экваториальная система координат



Начальная точка – точка гамма (γ),
точка весеннего равноденствия –
пересечение небесного экватора с эклиптической

Прямое восхождение α – дуга небесного
экватора от точки гамма до круга склонения
светила

$$\alpha = \overset{U}{\gamma m} = \angle \gamma O m$$

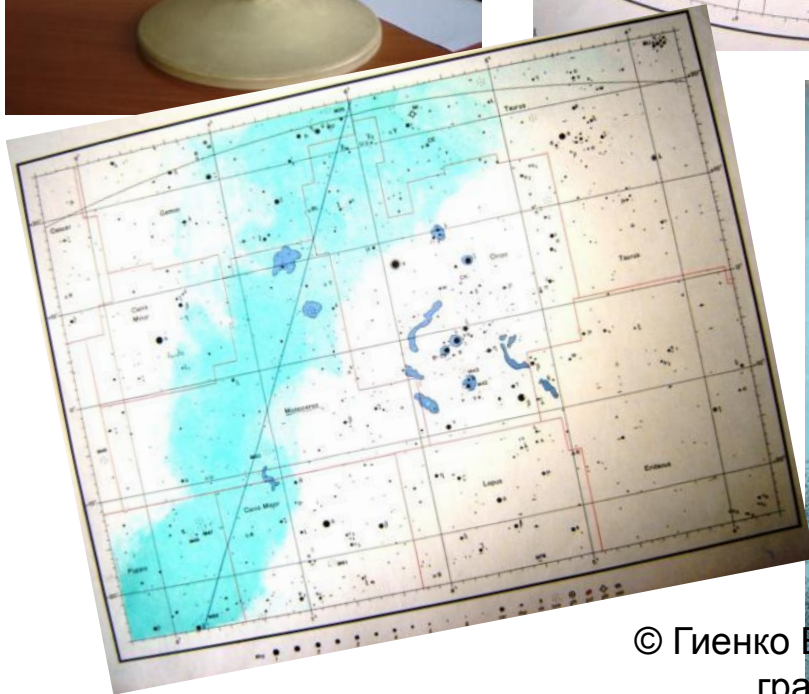
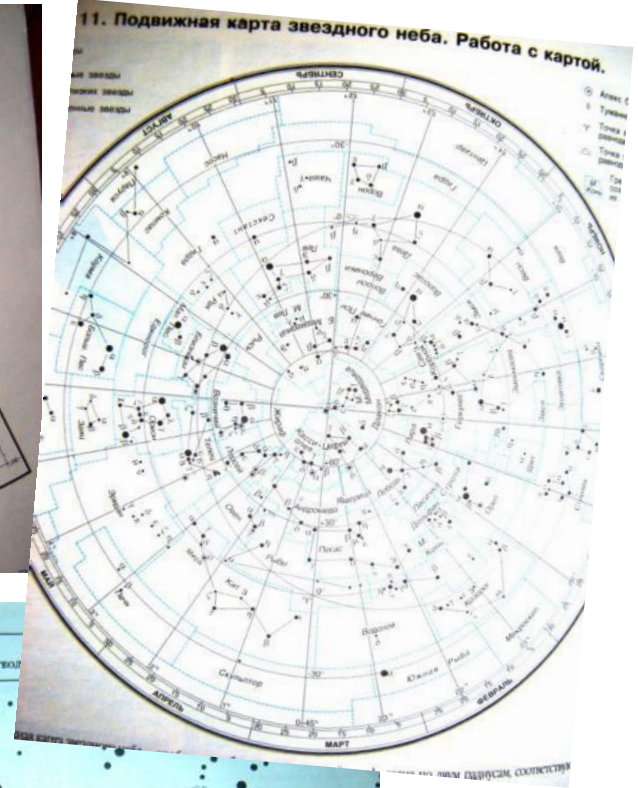
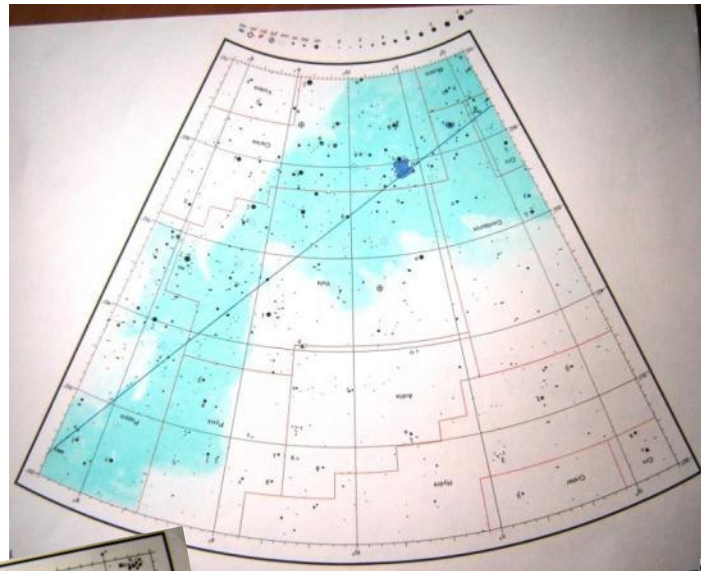
$$0^h \leq \alpha < 24^h$$

Склонение δ

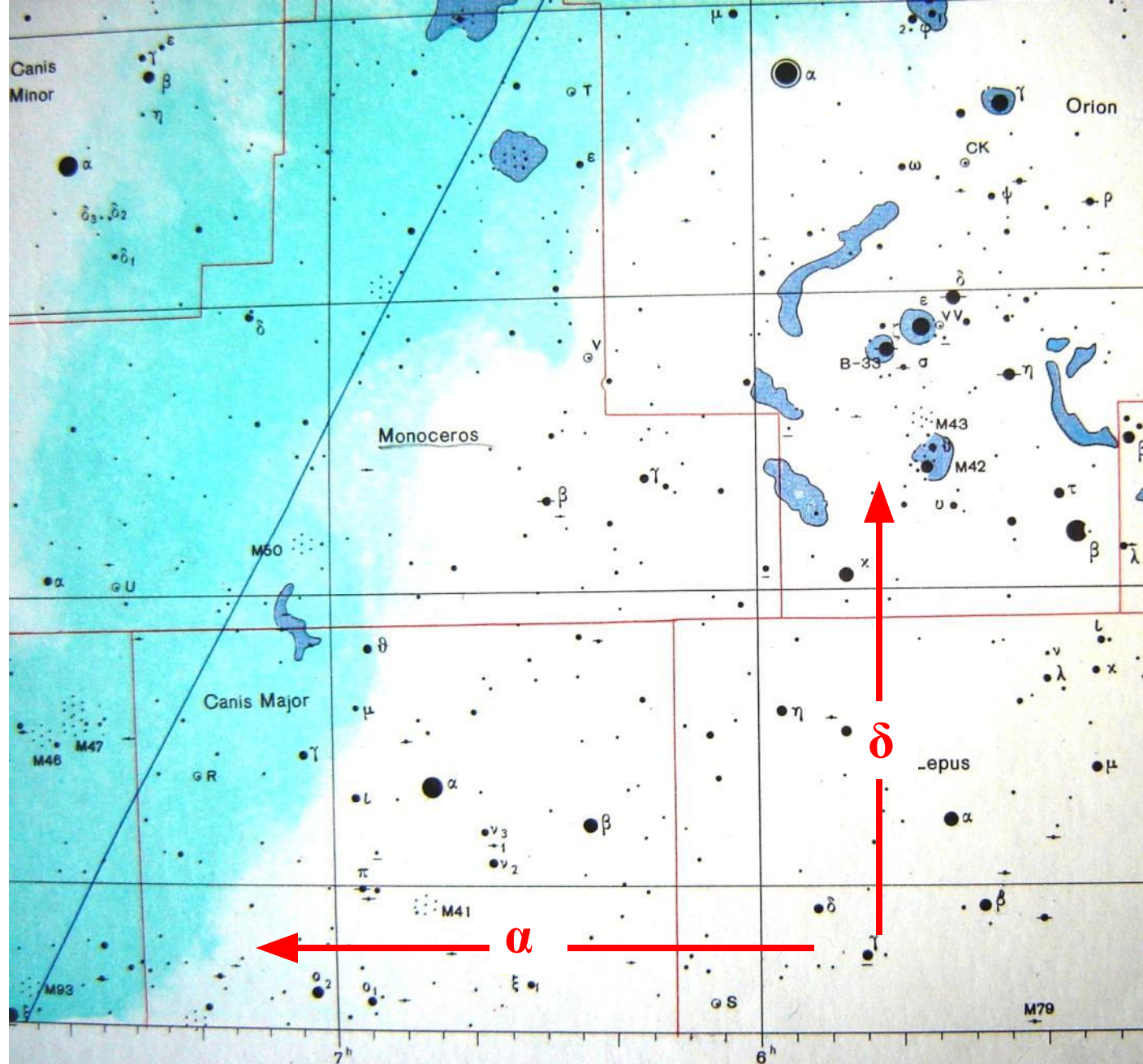
Суточное движение небесной сферы
не изменяет координаты (α, δ)

Вторая экваториальная система координат
используется при составлении каталогов звезд,
создании звездных карт, глобусов.

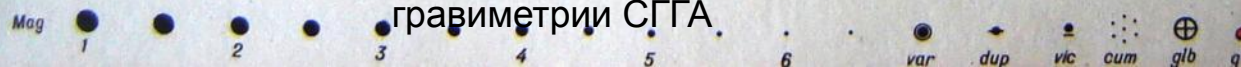
Звездные глобусы, карты, атласы: координаты объектов во II экв. системе – **склонение δ , прямое восхождение α**



© Гиенко Е.Г., каф астрономии и
гравиметрии СГГА



© Гиенко Е.Г., каф астрономии и
гравиметрии СГГА



В какой системе координат:

- публикуются каталоги звезд;
- устанавливаются геодезические инструменты;
- определяется положение пунктов на поверхности Земли;
- устанавливаются астрономические шкалы времени.



2.2 Связь между системами координат

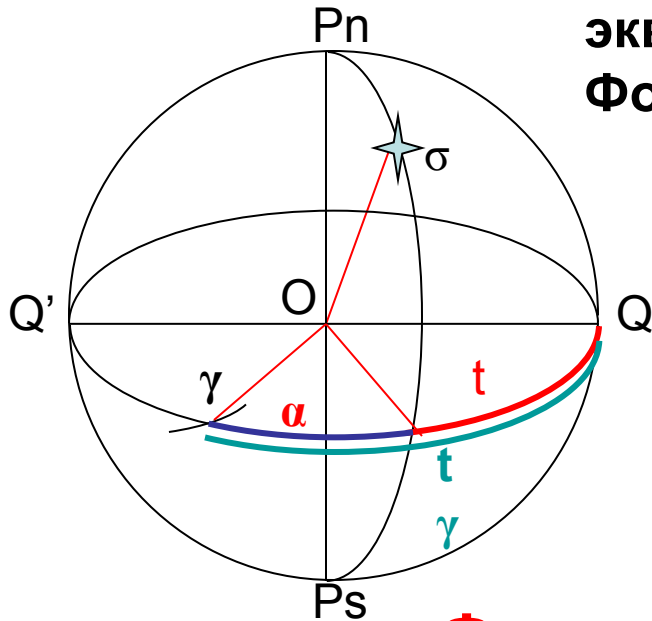
1. Связь между первой и второй экваториальными системами координат.
Формула звездного времени.

Из рисунка видно, что для любого светила

$$t + \alpha = t\gamma,$$

где $t\gamma$ – часовой угол точки гамма,

$t\gamma = s$ – звездное время.



Формула звездного времени:

для любого светила сумма часового угла и прямого восхождения равна звездному времени,

$$\alpha + t = s$$

2. Теорема о высоте полюса мира

Высота полюса мира над горизонтом равна склонению зенита и широте места наблюдения:

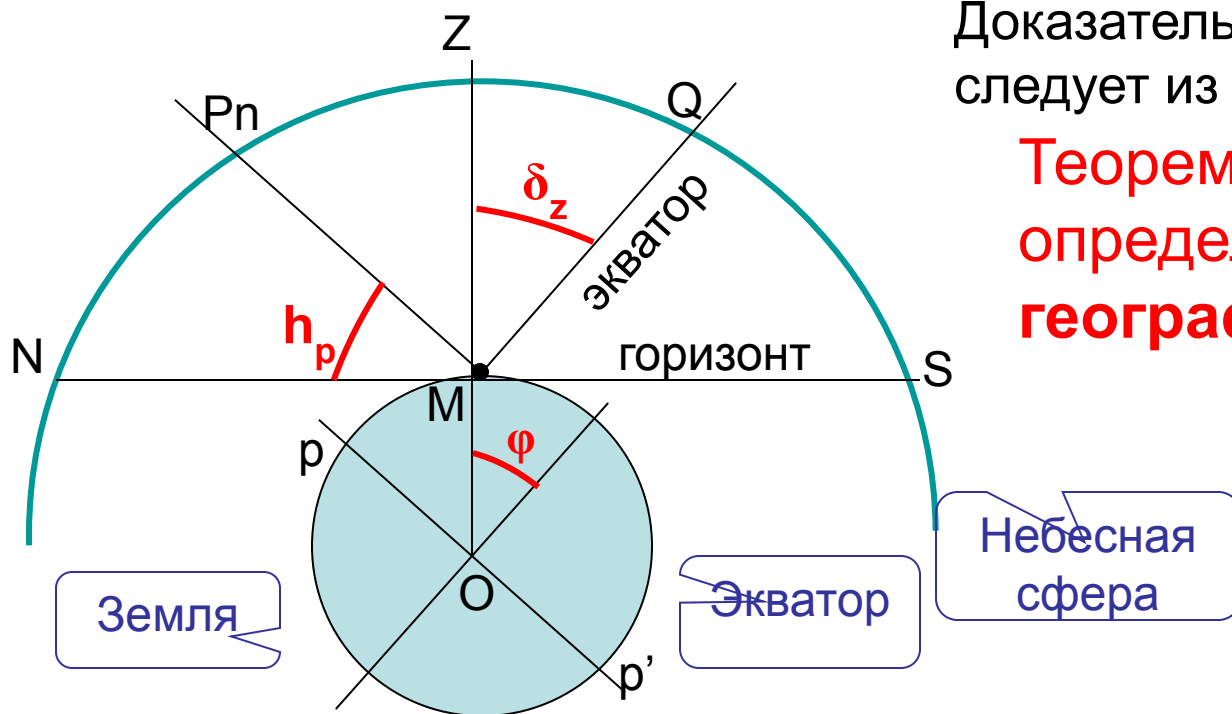
$$h_p = \delta_z = \varphi$$

Доказательство теоремы
следует из рисунка

Теорема – в основе
определения
географических широт:

$\varphi = h_p$ – измерение
высоты Полярной,

$\varphi = \delta_z$ – измерение
высот звезд в
меридиане



2. Теорема о разности часовых углов светила

**Разность часовых углов светила,
измеренная в двух пунктах в один и тот же
физический момент времени,
равна разности долгот этих пунктов:**

$$t_A - t_B = \lambda_A - \lambda_B \quad (*)$$

Доказательство.

Разность долгот двух пунктов равна двугранному углу между плоскостями меридианов этих пунктов;
разность часовых углов светила – двугранному углу между плоскостями небесных меридианов;
в силу параллельности небесного и земного меридианов соотношение (*) верно.

Теорема – в основе определения долгот двух пунктов

Чему равна широта пункта, в котором Вега (склонение $+38^0$) проходит через зенит?



На какой высоте наблюдается Полярная в г.Новосибирске (широта 55^0)?

Чему равен часовой угол точки гамма?

Какая теорема положена в основу определения широт пунктов?

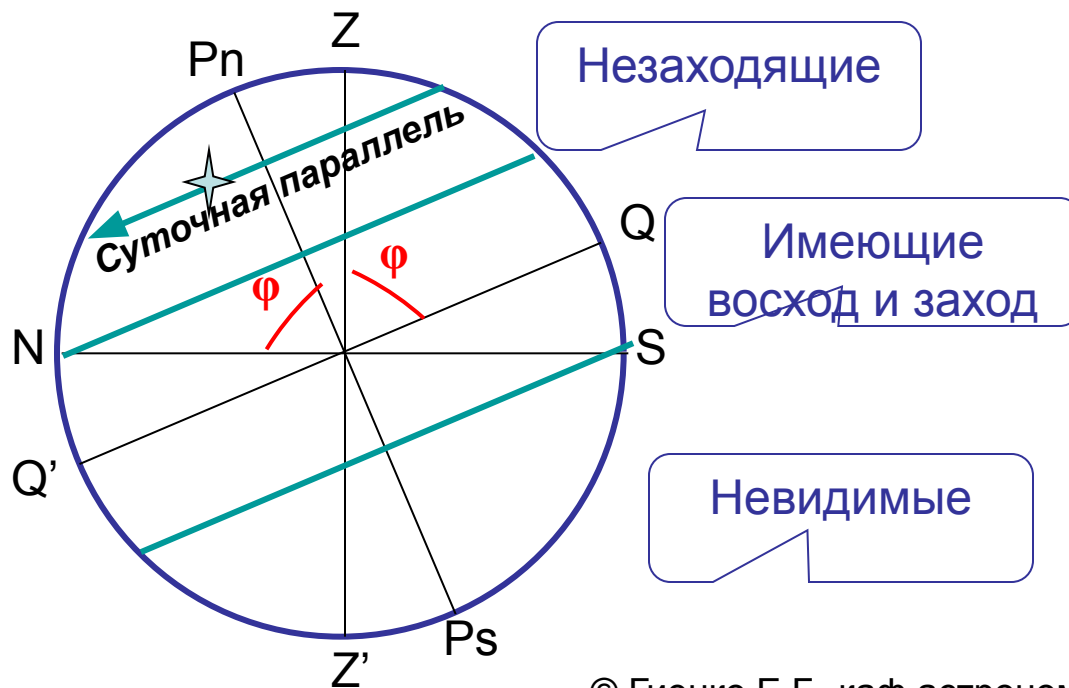
Какая теорема лежит в основе определения долгот пунктов?

2.3 Видимое суточное движение небесной сферы

С востока на запад,
происходит из-за действительного вращения Земли
вокруг оси с запада на восток.

Звезды перемещаются по суточным параллелям.

Виды звезд по суточному движению: Условия деления звезд:



1. Незаходящие

$$\delta > \delta_N, \quad \delta > 90^\circ - \varphi$$

2. Невидимые

$$\delta < \delta_S, \quad \delta < -(90^\circ - \varphi)$$

3. Имеющие восход и заход

$$\delta_S \leq \delta \leq \delta_N, \\ -(90^\circ - \varphi) \leq \delta \leq 90^\circ - \varphi$$

Кульминации

Кульминация – прохождение звезды через меридиан.

Положение звезды относительно горизонта:

- самое низкое - **нижняя кульминация** (НК);
- наивысшее - **верхняя кульминация** (ВК).

Дано:

(α, δ) – экваториальные координаты звезды из каталога,
 φ – широта пункта наблюдения.

Требуется найти:

s – звездное время,

(A, z) – горизонтальные координаты светила в ВК и НК.

Рабочие формулы:

Кульминации

$$t_{\text{БК}} = 0^{\text{h}}, \quad t_{\text{НК}} = 12^{\text{h}},$$

$$s = \alpha + t,$$

$$s_{\text{БК}} = \alpha,$$

$$s_{\text{НК}} = \alpha \pm 12^{\text{h}}$$

Верхняя кульминация:

а) светило кульминирует к северу от зенита (случай 1), $\delta > \varphi$,

$$z = \delta - \varphi, \quad A = 180^0$$

б) светило кульминирует к югу от зенита (случай 2,3), $\delta \leq \varphi$,

$$z = \varphi - \delta, \quad A = 0^0$$

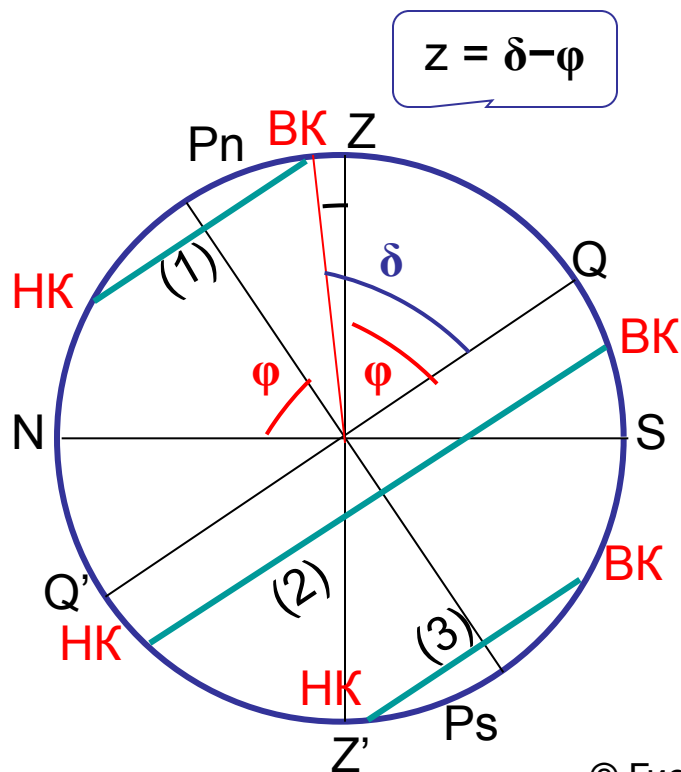
Нижняя кульминация:

а) светило кульминирует к северу от надира (случай 1,2), $\delta > -\varphi$,

$$z = 180^0 - (\varphi + \delta), \quad A = 180^0$$

б) светило кульминирует к югу от надира (случай 3), $\delta \leq -\varphi$,

$$z = 180^0 + (\varphi + \delta), \quad A = 0^0$$



- Почему происходит видимое суточное вращение небесной сферы?
- Будет ли заходить за горизонт Вега (склонение $+38^0$) в г.Новосибирске (широта 55^0)?
- Что такое кульминации?
- Чему равен азимут звезды, кульминирующей к северу от зенита?
- Чему равен часовой угол звезды в верхней (нижней) кульминации?
- В каких случаях при ясной погоде человек на улице не отбрасывает тень?



2.4. Астрономические программы-планетарии

<http://www.astro.websib.ru/sprav/program>

- Справочный материал на сайте «Астрономия», Максименко А.В. – список программ.
- **StarCalc** – компактная программа
- **Stellarium**
- «планетарии» на смартфонах
- И.т.д.

Основные настройки астрономической программы

1. Место наблюдателя: широта, долгота
Новосибирск:
55 градусов С.Ш.,
83 градуса В.Д.
2. **Время**: разница с UTC (Всемирное
координированное время, Гринвич)
Новосибирск: UTC+7 часов
3. **Дата, время наблюдения.**
4. **Координатные сетки** (горизонтальная или
экваториальная)
5. ...

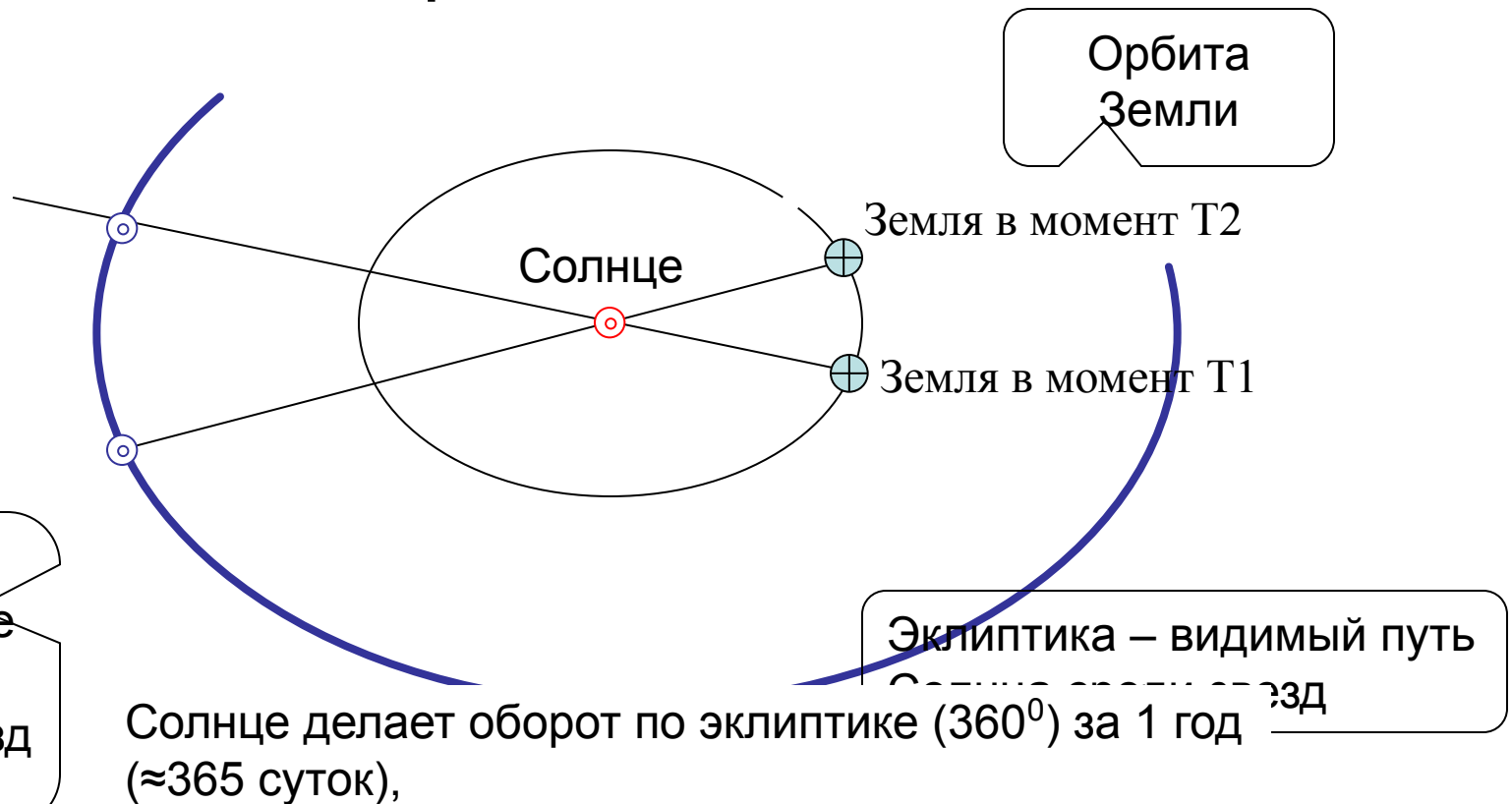
Расчет лунного затмения 27.07.18

27 июля 2018 г.в 20:22 по Гринвичу.
Новосибирское время?

3:22, 28 июля 2018 г.

2.5 Видимое годовое движение Солнца

Эклиптика – путь видимого движения Солнца среди звезд в течение года, или плоскость орбиты Земли.



Солнце делает оборот по эклиптике (360°) за 1 год (≈365 суток),

или за сутки перемещается примерно на 1 градус



Зодиак — пояс созвездий, расположенных вдоль эклиптики.

В настоящее время эклиптика
пересекает 13 созвездий.

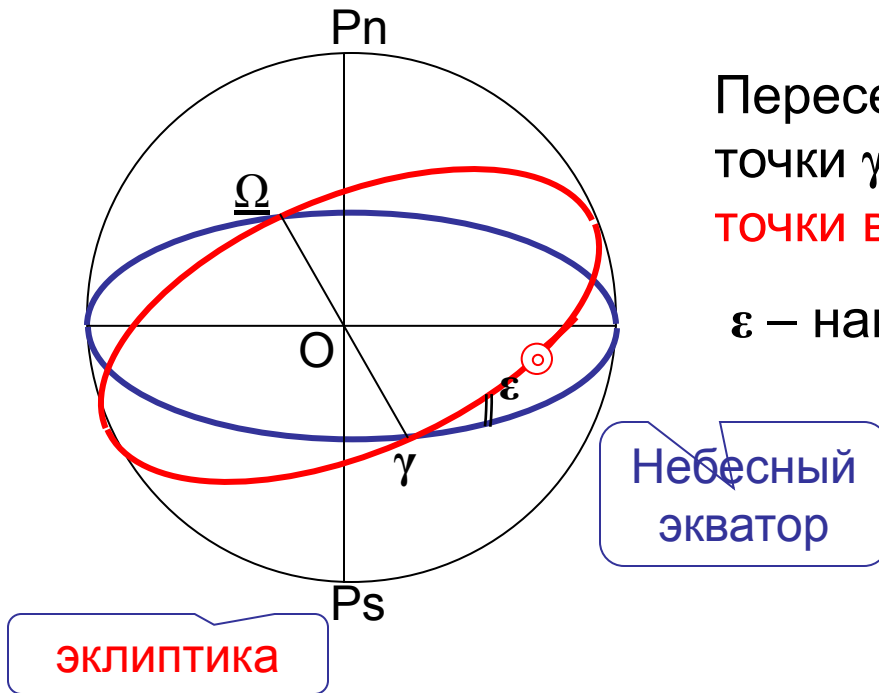
Видимое движение планет и
Луны происходит рядом с
эклиптикой по зодиакальным
созвездиям.



Зодиакальные созвездия были определены и названы в
древнем Вавилоне во II тысячелетии до н.э.

- Можно ли увидеть на ночном небе созвездие Близнецов в июне?
 - Можно ли наблюдать Луну и планеты в созвездии Ориона?
 - Сколько созвездий пересекает эклиптика?
- 

Видимое годичное движение Солнца



Пересечение эклиптики с экватором:
точки γ , Ω –

точки весеннего и осеннего равноденствий

ϵ – наклон эклиптики к экватору;

в настоящее время $\epsilon \approx 23,5^0$

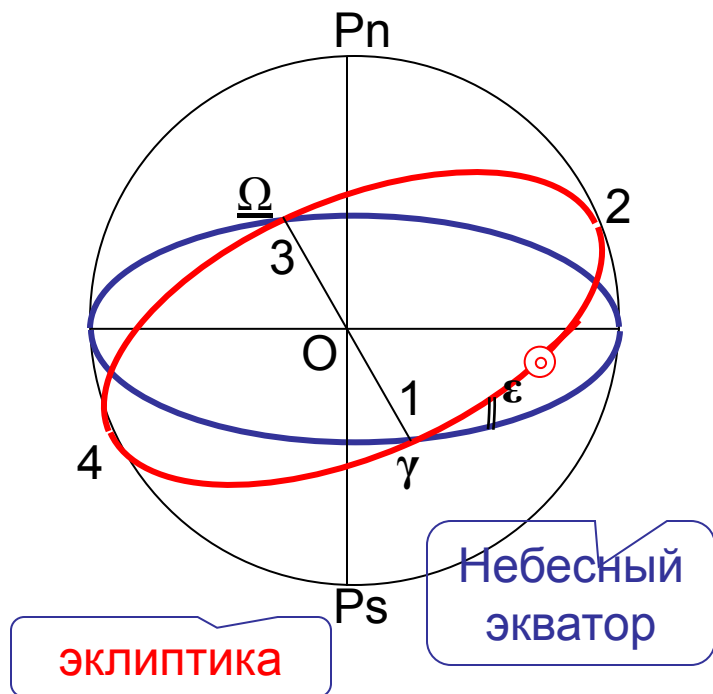
Смена времен года



Происходит из-за того, что ось вращения Земли наклонена к плоскости эклиптики (орбиты Земли),

и ЭТОТ наклон постоянен в течение года

Дни солнцестояний и равноденствий



1. День весеннего равноденствия 21-22 марта

Начало астрономической весны.
Солнце пересекает небесный экватор,

$$\alpha = 0^h, \delta = 0^\circ$$

Продолжительности дня и ночи равны для
всей Земли.

Солнце проходит через зенит на широте
 $\varphi = 0^\circ$ (экватор)

2. День летнего солнцестояния 21-22 июня

Начало астрономического лета.
Склонение Солнца δ наибольшее,

$$\alpha = 6^h, \delta = +23.5^\circ$$

В северном полушарии продолжительность
дня максимальна, ночи – минимальна.

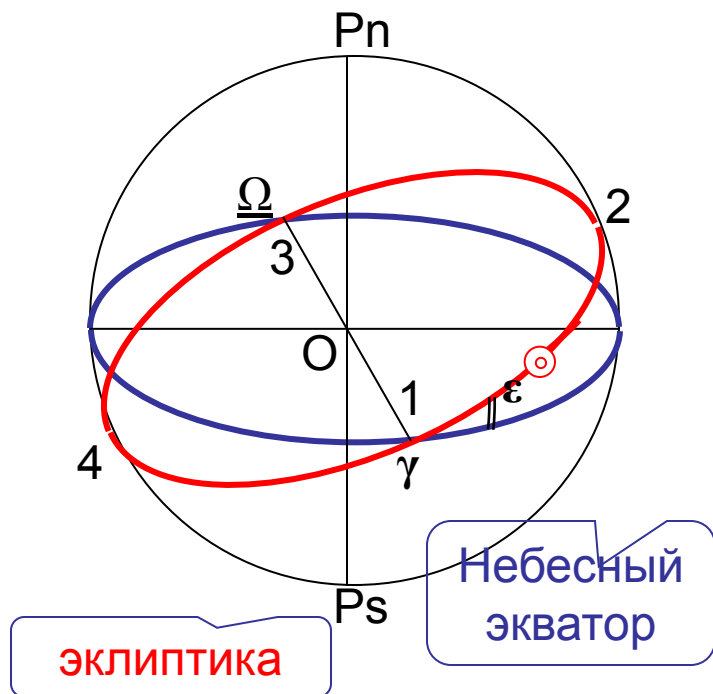
В южном полушарии – наоборот.

Солнце проходит через зенит на широте

© Гиенко Е.Г., каф астрономии и
гравиметрии СГГА

$\varphi = 23.5^\circ$ с.ш. (тропик Рака)

Дни солнцестояний и равноденствий



3. День осеннего равноденствия 22-23 сентября

Начало астрономической осени.

Солнце пересекает небесный экватор,

$$\alpha = 12^h, \delta = 0^0$$

Продолжительности дня и ночи равны для всей Земли.

Солнце проходит через зенит на широте $\varphi = 0^0$ (экватор)

4. День зимнего солнцестояния 22-23 декабря

Начало астрономической зимы.

Склонение Солнца δ наименьшее,

$$\alpha = 18^h, \delta = -23.5^0$$

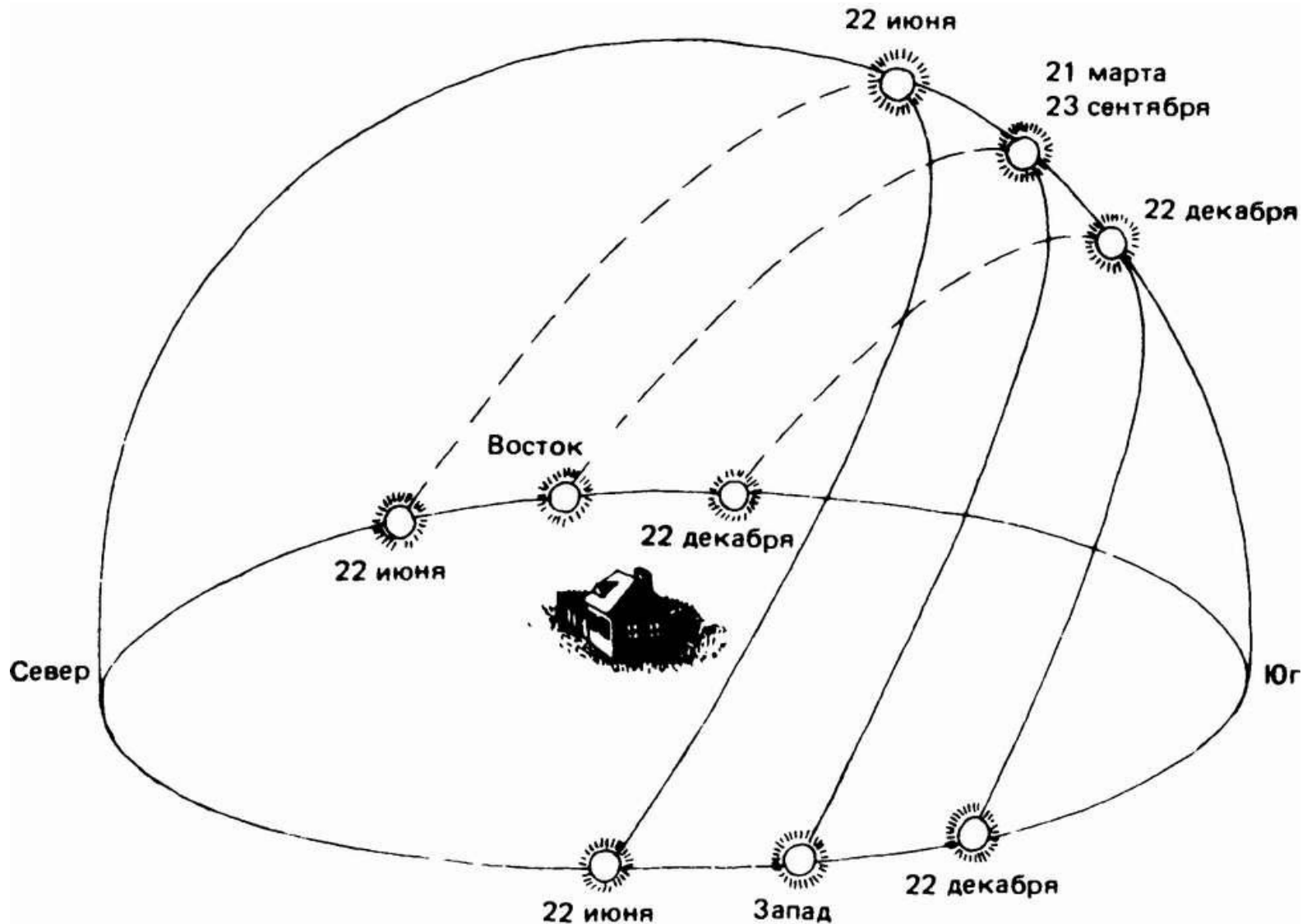
В северном полушарии продолжительность дня минимальна, ночи – максимальна.

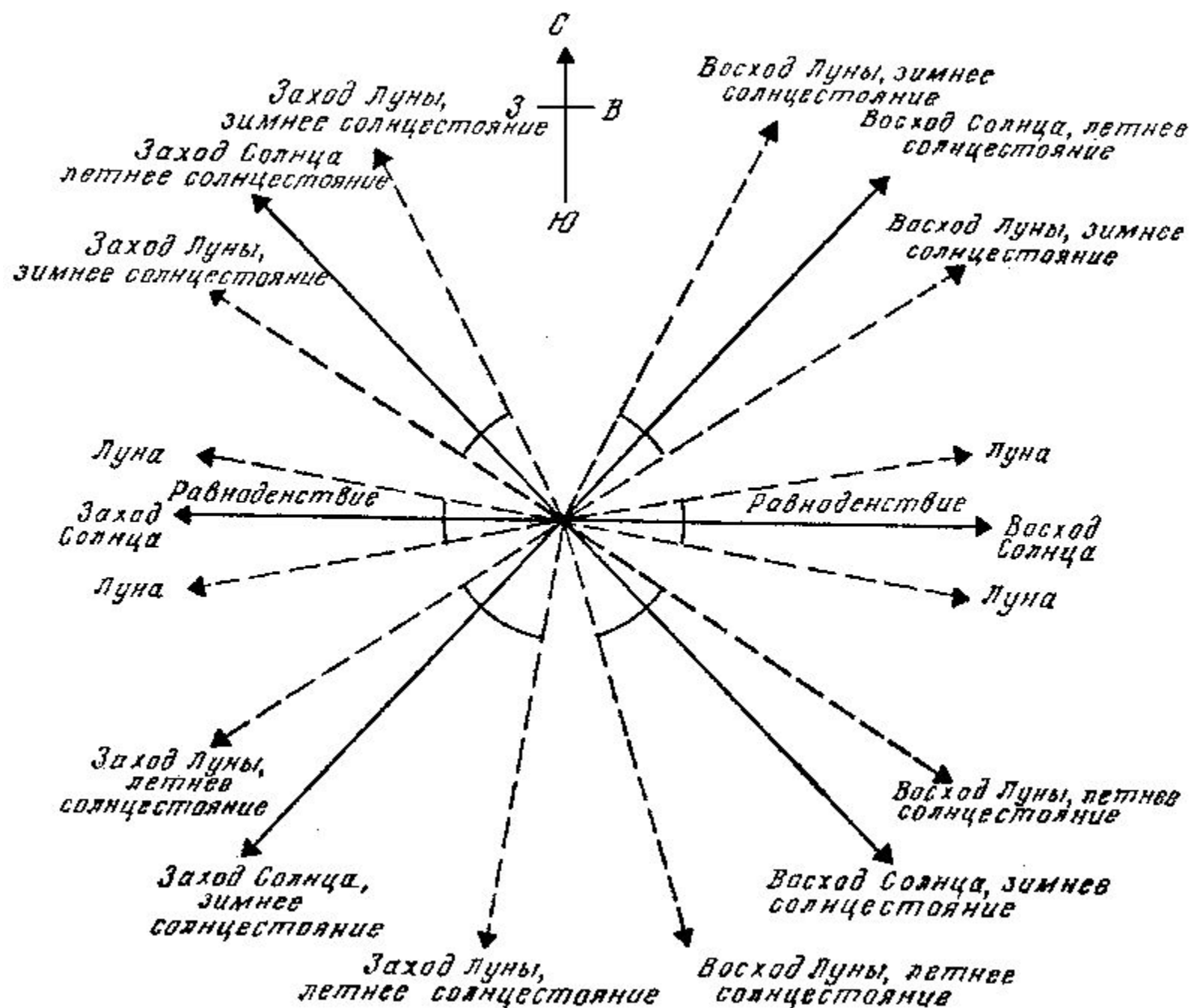
В южном полушарии – наоборот.

Солнце проходит через зенит на широте

$$\varphi = 23.5^0 \text{ ю.ш. (тропик Козерога)}$$

Наблюдения восходов-заходов Солнца и Луны в солнцестояния и равноденствия





2019 год

Начало сезонов года

(по данным US Naval Observatory - время всемирное)

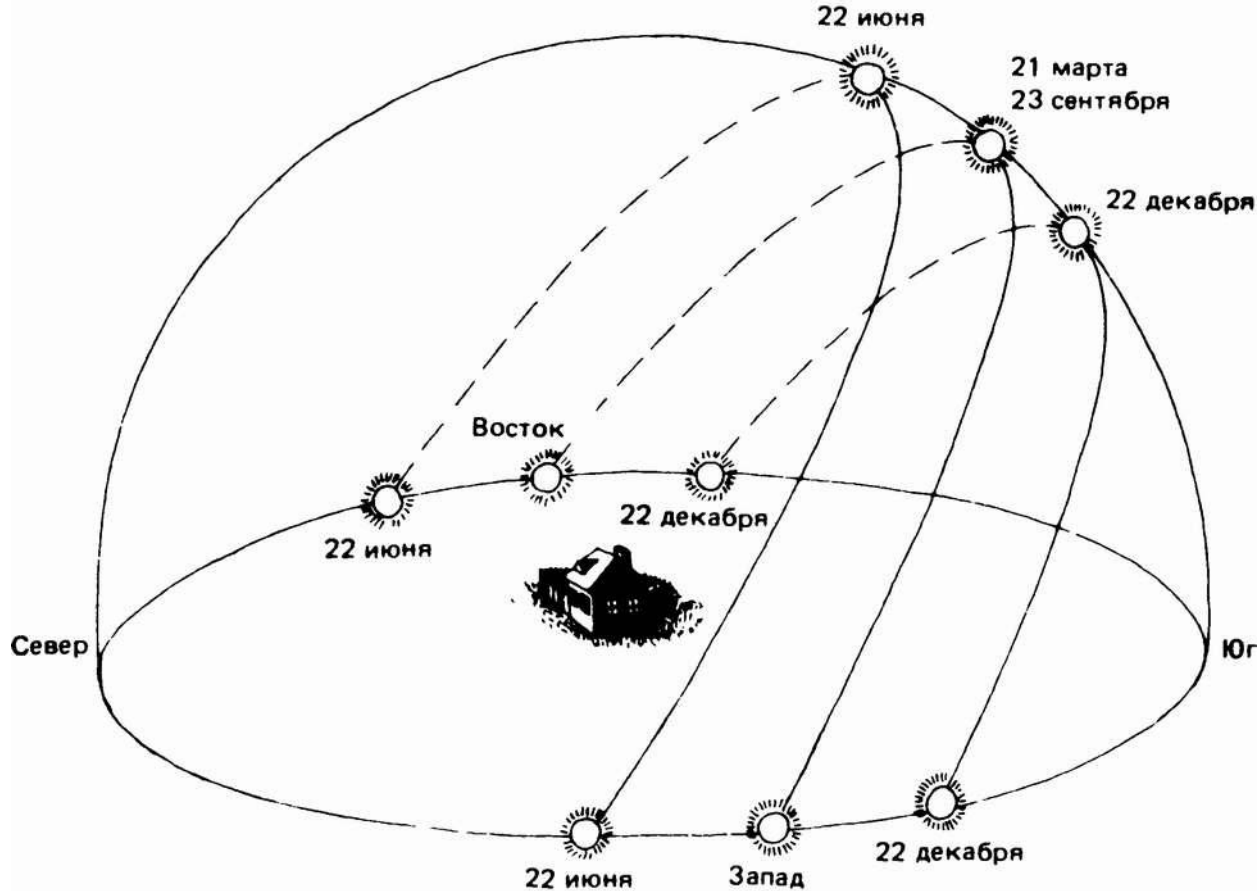
Весна - 20 марта, 21 ч 58 м **Лето** - 21 июня, 15 ч 54 м
Осень - 23 сентября, 07 ч 50 м **Зима** - 22 декабря, 04 ч 19 м

Земля в перигелии - 3 января 05 ч 20 м - 0,9833012 а.е.

Земля в афелии - 4 июля 22 ч 11 м - 1,0167543 а.е.

ТАБЕЛЬ-КАЛЕНДАРЬ

январь пн вт ср чт пт сб вс 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 6:● 14:● 21:○ 28:●	февраль пн вт ср чт пт сб вс 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 5:● 13:● 19:○ 26:●	март пн вт ср чт пт сб вс 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 6:● 14:● 21:○ 28:●
апрель пн вт ср чт пт сб вс 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 5:● 12:● 19:○ 27:●	май пн вт ср чт пт сб вс 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 5:● 12:● 19:○ 26:●	июнь пн вт ср чт пт сб вс 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 3:● 10:● 17:○ 25:●
июль пн вт ср чт пт сб вс 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 2:● 9:● 17:○ 25:●	август пн вт ср чт пт сб вс 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 1:● 7:● 15:○ 23:● 30:●	сентябрь пн вт ср чт пт сб вс 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 6:● 14:○ 22:● 28:●
октябрь пн вт ср чт пт сб вс	ноябрь пн вт ср чт пт сб вс	декабрь пн вт ср чт пт сб вс



- На какой высоте Солнце в истинный полдень в день летнего/зимнего солнцестояния в Новосибирске? Широта 55 градусов.

Календарь каменного века - Стоунхендж



© Гиенко Е.Г., каф астрономии и
гравиметрии СГГА

Восход Солнца в день летнего солнцестояния в Стоунхендже



- Чему равен наклон эклиптики к экватору?
 - Когда продолжительность дня в Новосибирске минимальна?
 - Когда продолжительность ночи в Австралии максимальна?
 - В какие дни продолжительности дня и ночи равны?
 - Почему происходит смена времен года?
- 