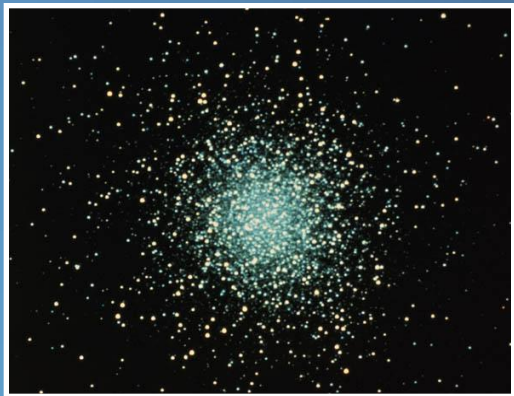


КУРС ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ



3.Астрономические факторы



РЕФРАКЦИЯ

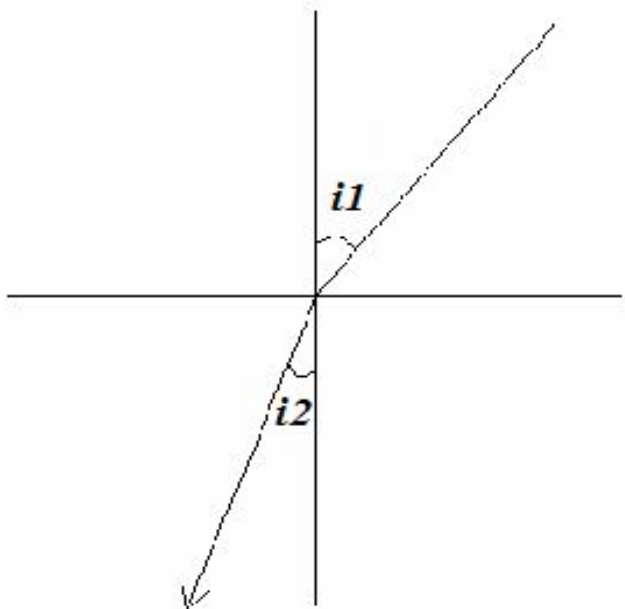
Из физики известно, что свет распространяется прямолинейно только в вакууме и однородной среде, а при переходе границы двух материальных сред с различной плотностью он преломляется. Это явление называется рефракцией.

В основе теории рефракции лежат законы преломления света:

1-ый закон. *Луч падающий, луч преломленный и нормаль, проведенная в точке падения к границе двух сред, лежат в одной плоскости.*

2-ой закон (Снеллиуса). *Отношение синуса угла падения i_1 к синусу угла преломления i_2 для данных двух сред, есть величина постоянная μ_{12} и называется коэффициентом преломления или относительным показателем преломления.*

$$\mu_{12} = \frac{\sin i_1}{\sin i_2}$$



Показатель преломления также равен отношению скоростей света в 1-ой и 2-ой средах.

Если луч переходит границы среды из вакуума, то тогда показатель

$$\mu_1 = \frac{\sin i}{\sin i_1}$$

называется абсолютным показателем преломления среды (абсолютный показатель преломления вакуума $\mu_{\text{вакуум}} = 1$).

Если у нас есть абсолютные показатели преломления двух сред 1 и 2, то тогда

$$\mu_{12} = \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{\mu_2}{\mu_1}, \quad \text{отсюда} \quad \mu_1 \sin i_1 = \mu_2 \sin i_2.$$

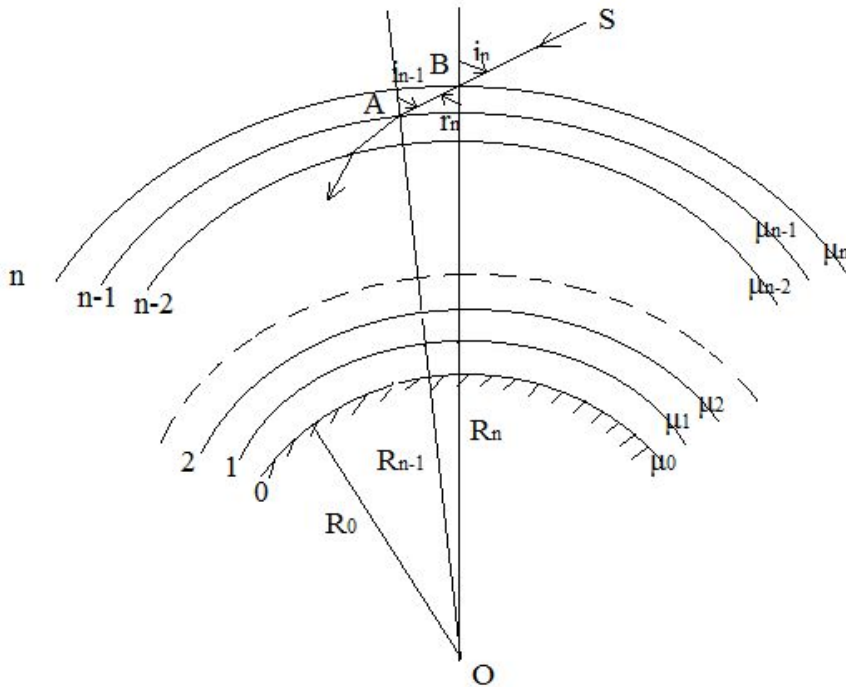
Если $\mu_{1,2} > 1$, то среда 2 плотнее среды 1, значит и $\frac{\sin i_1}{\sin i_2} > 1$,

т.е. при переходе из менее плотной среды в более плотную луч приближается к нормали.

Теперь рассмотрим с этих позиций прохождение луча света от светила через Земную атмосферу. Земную атмосферу можно рассматривать как оптически прозрачную среду состоящую из слоев возрастающей плотности от верхней границы к поверхности Земли, а следовательно луч света проходя через нее будет преломляться.

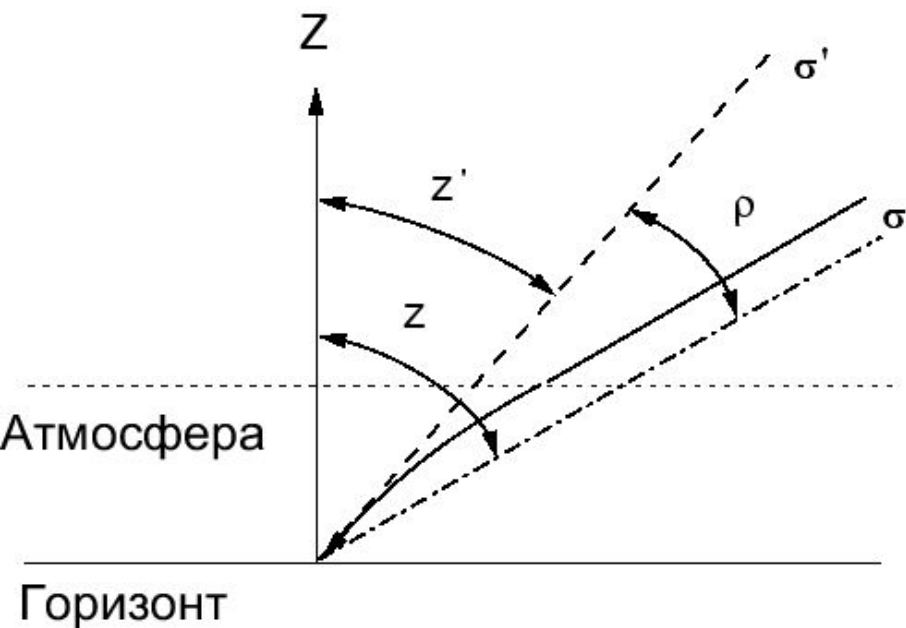
Определение: Как само явление преломления в земной атмосфере лучей света, исходящих от небесных светил, так и угол ρ , на который отклоняется луч в атмосфере, называется **момической рефракцией.**

альная земная атмосфера по форме близка к
 е рефракции при этом выполняется методом
 ие было пролучено Ньютоном), что является
 непростой задачей, поэтому точное значение
 ют из таблиц. Самые известные таблицы
 е таблицы, но для многих случаев можно
 использовать приближённую формулу рефракции.



Вывод приближенной формулы рефракции

Если представить атмосферу Земли в виде слоя однородной плотности, то переходя через границу вакуум-атмосфера луч света должен преломляться, приближаясь при этом к нормали.



где z – расстояние для границы вакуум-атмосфера, а z' – для поверхности Земли z' , то астрономическая рефракция ρ равна $\rho = z - z'$ и

астрономическая рефракция ρ равна разности рефракции μ_0 и $\mu_{\text{вакуум}}=1$ в направлении зенитного расстояния светила.

В вакуумном пространстве показатель преломления равен единице ($\mu_{\text{вакуум}}=1$), следовательно по закону Снеллиуса $\sin z = \mu_0 \cdot \sin z'$ или $\sin(z' + \rho) = \mu_0 \cdot \sin z'$.

При образовании и, учитывая малость ρ , запишем $\sin(z' + \rho) \approx \sin z' + \rho \cdot \cos z' = \mu_0 \cdot \sin z'$, следовательно

$$\rho = (\mu_0 - 1) \cdot \text{tg } z' . \quad (3.1)$$

Более строгое доказательство для атмосферы, состоящей из плоско-параллельных слоёв приводит к такому же выражению т.к.доказывается, что астрономическая рефракция зависит только от показателя преломления приземного слоя.

Известно, что $\mu - 1 = c \cdot \delta$, где $c = \text{const}$, а δ – плотность воздуха определяемая по закону Бойля-Мариотта и Гей-Люсака.

$$(3.2)$$

$$\delta = D \frac{B}{760} \cdot \frac{273}{273 + t}$$

где D – нормальная плотность воздуха при $B = 760$ мм.рт.ст. и 0° температуры по С ($D = 0,0012928$);
 t° - температура. Подставим (2) в (1) получим

$$\rho = c \cdot \delta \cdot \text{tgz}' = CD \frac{B}{760} \cdot \frac{273}{273 + t} \text{tgz}' = 21.67'' \cdot \frac{B \cdot \text{tgz}'}{273 + t} \quad (3.3)$$

Величина $C \cdot D = 60'',3$ получена из опыта (лучше определять из астрономических определений). Если не учитывать температуру и давление, то получим выражение для средней рефракции, которое используется для обработки приближенных определений

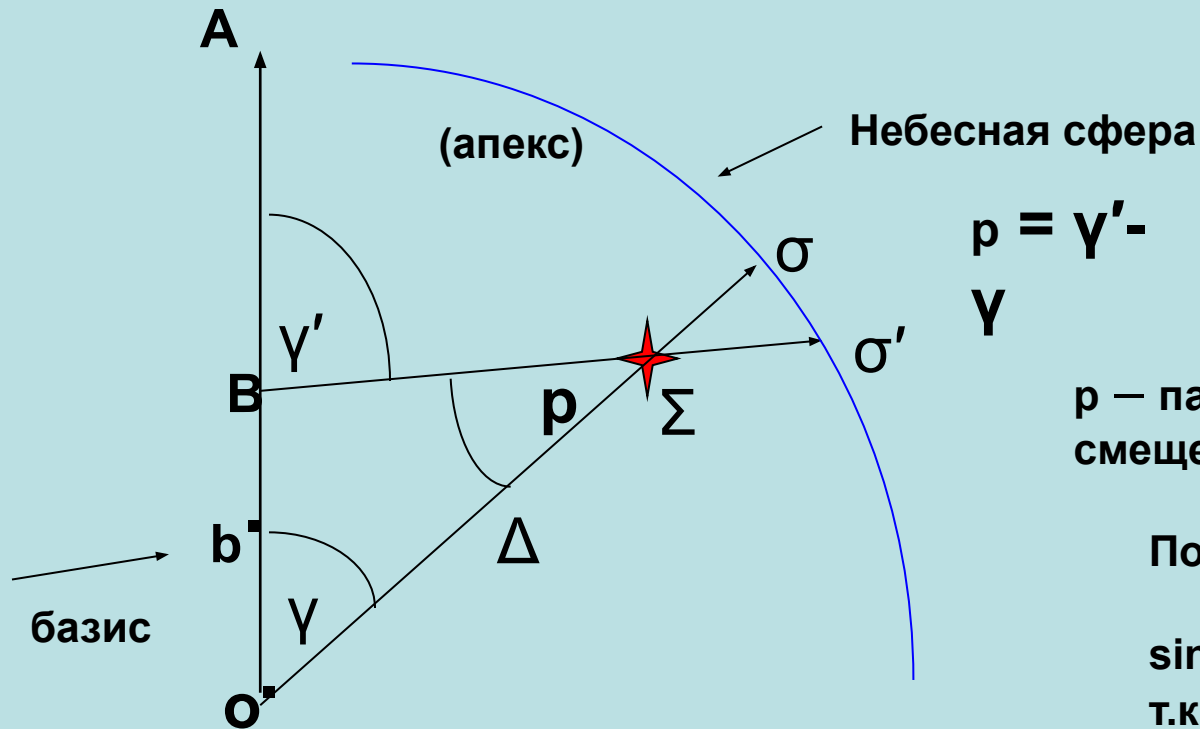
$$\rho = 60'',3 \cdot \text{tgz}'. \quad (3.4)$$

Окончательно:

Выражение (3) называется приближенной формулой для рефракции, которая применяется для $z \leq 60^\circ$ ÷ 70° (для $z \leq 60^\circ$ ошибка вычисления $\rho \leq 0.1''$) более точные значения ρ получают учитывая сферичность слоев атмосферы и используя таблицы рефракции.

Параллакс

Параллаксом называется изменение направления на объект при наблюдении его из разных точек пространства



$$p = \gamma' - \gamma$$

p — параллактическое смещение светила

По теореме синусов из Δ -ка $OB\Sigma$

$$\sin p = (b/\Delta) \sin \gamma' = (b/\Delta) \sin \gamma,$$

т.к. $\gamma' \approx \gamma$

Или по малости p

$$p = 206264.8'' \times (b/\Delta) \sin \gamma.$$

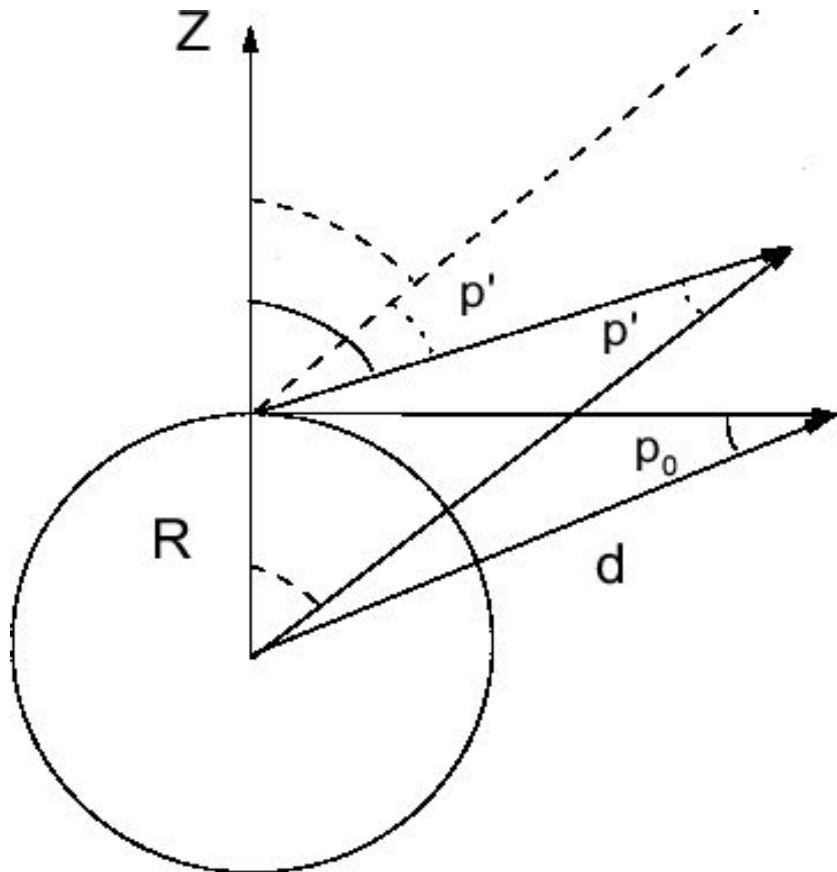
Законы параллактического смещения

1. Параллактическое смещение происходит по большому кругу;
2. Параллактическим смещением светило удаляется от апекса.
3. Синус параллактического смещения светила пропорционален синусу углового расстояния светила от апекса перемещения наблюдателя.

Суточный параллакс.

Горизонтальный параллакс.

Параллактическое смещение светила, возникающее вследствие суточного вращения Земли вокруг оси или возникающее при наблюдении светила из различных пунктов земной поверхности, называется **суточным**. Иначе можно сказать, что суточным Параллаксом называется угол p' под которым виден радиус Земли в месте наблюдения. Если светило находится в горизонте, то суточный параллакс имеет максимальное значение и называется **горизонтальным параллаксом**.



где p' – суточный параллакс в Т;
 p_0 – горизонтальный параллакс в Т
 z' - измеренное и исправленное за рефракцию z в Т; z_c – геоцентрическое z .
Апекс для Т в надире, поэтому параллактическое смещение происходит в вертикале светила и азимут не изменяется.

$$\sin p' = (R_0 / d) \sin z'$$

$$\sin p' = \sin p_0 \sin z'$$

или по малости p

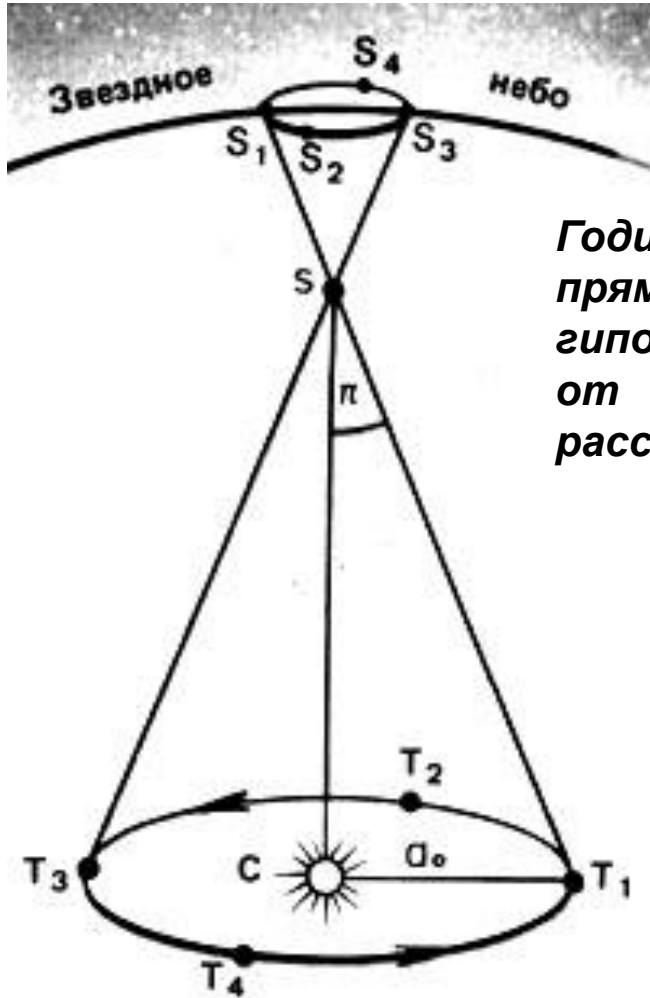
$$p' = p_0 \sin z \quad (3.5)$$

$$p_0 = z - p_0 \sin z \quad (3.6)$$

$$\sin p_0 = \frac{R_0}{d}$$

$$d = \frac{206265'' R_0}{p_0''}$$

Годичный параллакс

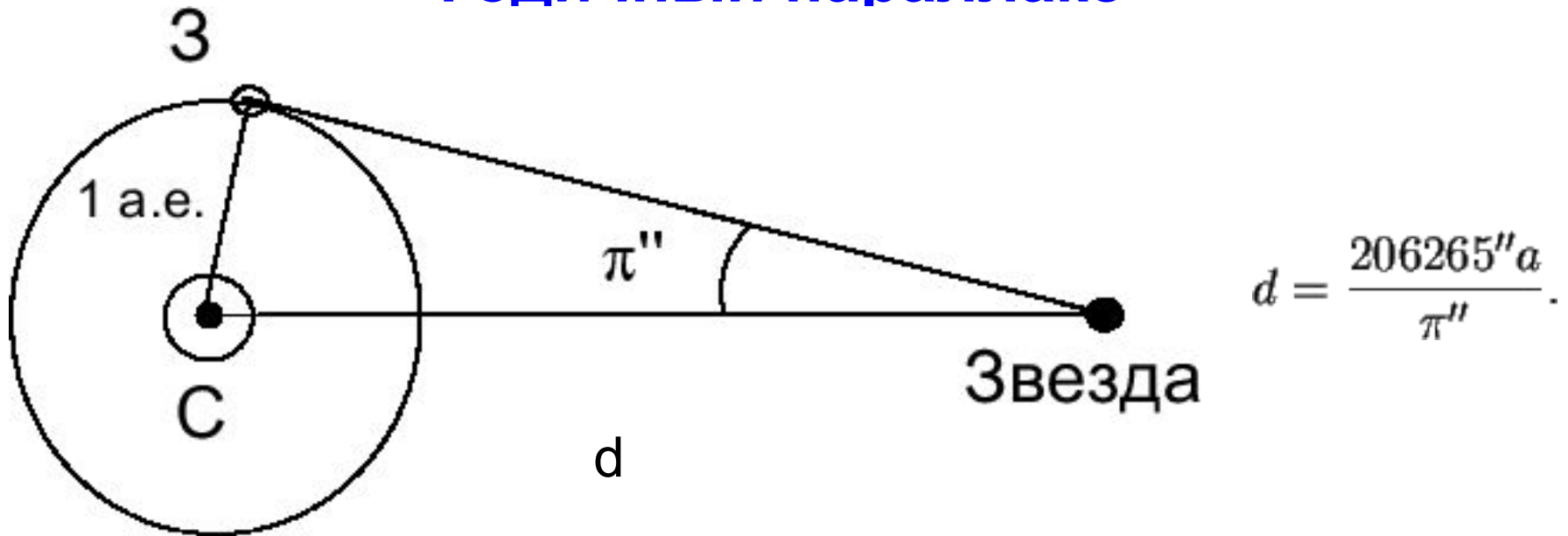


Годичный параллакс светила есть малый угол в прямоугольном треугольнике, в котором гипотенузой служит среднее расстояние от Солнца до светила, а малым катетом — расстояние между Землей и Солнцем.

$$r = \frac{a}{\sin \pi}; \sin \pi = \frac{\pi}{206265''};$$

$$r = \frac{206265'' a}{\pi} = \frac{206265''}{\pi} a.e.;$$

• Годичный параллакс



Учёт годичного параллакса в экваториальных координатах

$$\left. \begin{aligned} \alpha - \alpha_0 &= \pi \cos \delta \sin(\alpha - \alpha_0) \sec \delta_0; \\ \delta - \delta_0 &= \pi [\sin \delta \cos \delta_0 - \cos \delta \sin \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)] \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

где α, δ - геоцентрические координаты светила;
 α_0, δ_0 - гелиоцентрические координаты светила

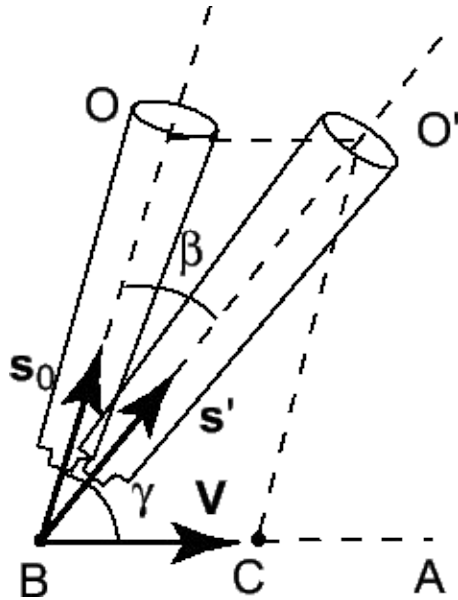
Учёт годичного параллакса в прямоугольных координатах

$$\Delta \delta = \pi (X \sin \delta \cos \alpha + Y \sin \delta \sin \alpha - Z \cos \delta), \quad \Delta \alpha \cos \delta = \pi (X \sin \alpha - Y \cos \alpha).$$

Где X и Y прямоугольные барицентрические координаты Земли на данный момент

Аберрация

- Аберрацией называют явление отклонения светового луча от действительного направления на светило, происходящее в результате сложения скорости света с относительной скоростью движения пункта наблюдения.
- Наблюдения светил ведутся с движущейся Земли, следовательно должно наблюдаться влияние этого фактора на координаты звёзд.
- Аберрация была объяснена Джеймсом Брадлеем в 1728г. С 1725 г. он проводил наблюдения ряда звезд, в частности γ Дракона. После учета необходимых поправок Брадлей обнаружил, что эта звезда, находящаяся в зените, совершает кажущееся движение по почти круговой траектории с диаметром $\approx 40.5''$. Для других звезд он наблюдал эллиптическое движение.
- Аберрацию проще всего можно объяснить, проведя аналогию между распространением света и падением дождевых капель. При безветренной погоде капли падают вертикально, и человек не промокнет, если будет стоять неподвижно под зонтиком. Если же он побежит, то, чтобы не промокнуть, он должен наклонить зонт в сторону движения. Относительно движущегося человека дождевые капли уже не падают вертикально, а имеют горизонтальную составляющую скорости $-V$, если V - скорость человека относительно земли. Если c - вертикальная скорость движения капель, то угол β , на который нужно наклонить зонт, определяется уравнением $\text{tg}\beta = V/c$.



$$\sin \beta = \frac{BC}{CO'} \sin(\gamma - \beta).$$

$$\text{tg} \beta \approx \frac{V}{c} \sin \gamma.$$

по малости β можно записать:

$$\beta = \frac{v}{c} 206264'', 8 \cdot \sin \gamma, \quad (3.8)$$

Где $k = \frac{v}{c} 206264'', 8$ — коэффициент аберрации

Аберрационное смещение светила на небесной сфере подчинено трем основным положениям:

1. Аберрационное смещение пропорционально синусу углового расстояния между направлениями на светило и апекс движения наблюдателя.
2. Аберрационное смещение светила на небесной сфере происходит по большому кругу, проведенному через апекс движения наблюдателя и светило.
3. Аберрационным смещением светило приближается к апексу движения наблюдателя.

В соответствии с тремя видами движения Земли различают три вида аберрации: *суточную аберрацию, годовую аберрацию и вековую аберрацию.*

Вековая аберрация возникает вследствие движения всей Солнечной системы в пространстве. Скорость движения Солнечной системы и ее направление в течение очень длительного времени остаются постоянными. Поэтому изменение, которое это движение вносит в координаты звезд, не меняется по величине и его можно не учитывать. Вековую аберрацию, поскольку она не меняется для каждого светила, обнаружить непосредственно из наблюдений нельзя.

Годичная аберрация

Если подставить в выражение для k значения скорости Земли по орбите и скорости света, то коэффициент годичной аберрации будет равен $20",496$, а само значение будет:

$$\beta = 20",496 \times \sin \gamma.$$

При вычислении годичной аберрации принимается, что Земля движется вокруг Солнца по эллипсу и вектор ее скорости v лежит в плоскости эклиптики. Широта апекса равна 0° , а долгота L_A меньше долготы Солнца L_\odot примерно на 90° .

Смещение светил, вызванное годичной абберацией, всегда направлено в сторону движения Земли, поэтому в течение года видимое место (искаженное годичной абберацией) описывает на небесной сфере около истинного места эллипс, большая полуось которого равна k и расположена параллельно эклиптике, а малая полуось равна $k \sin \gamma$. Если звезда находится в полюсе эклиптики, то для нее эллипс превращается в круг с радиусом k ; если же звезда находится на эклиптике, то для нее эллипс превращается в дугу. Влияние годичной абберации на координаты светил можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \alpha' - \alpha &= -k (\sin \alpha \sin L_{\odot} + \cos \alpha \cos L_{\odot} \cos \varepsilon) \sec \delta + k e (\sin \alpha \sin L_p + \cos \alpha \cos L_p \cos \varepsilon) \sec \delta; \\ \delta' - \delta &= -k \sin L_{\odot} \cos \alpha \sin \delta - k \cos L_{\odot} \cos \varepsilon (\operatorname{tg} \varepsilon \cos \delta - \sin \alpha \sin \delta) - k e [\sin L_p \cos \alpha \sin \delta + \\ &+ \cos L_p \cos \varepsilon (\operatorname{tg} \varepsilon \cos \delta - \sin \alpha \sin \delta)]. \end{aligned} \right\} (3.9)$$

В этих формулах k — постоянная годичной абберации, принятое значение которой 20."496, L_p — долгота перигелия, L_{\odot} — долгота Солнца, e — эксцентриситет орбиты Земли, координаты α и δ свободные от влияния годичной абберации, а α' и δ' — видимые координаты светил. Введя обозначения

$$C = -k \cos \varepsilon \cos L_{\odot}, \quad D = -k \sin L_{\odot}, \quad c = \cos \alpha \sec \delta, \quad c' = \operatorname{tg} \varepsilon \cos \delta - \sin \alpha \sin \delta, \quad d = \sin \alpha \sec \delta$$

$$d' = \cos \alpha \sin \delta$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Запишем} \\ \alpha' - \alpha &= Cc + Dd, \\ \delta' - \delta &= Cc' + Dd'. \end{aligned} \right\} (3.10)$$

Суточная аберрация

Скорость вращения Земли на геоцентрической широте φ' равна:
 $V_0 = 0,464 \cos \varphi'$ км/сек, поэтому выражение для *суточной аберрации* запишем:

$\beta'' = 0'',319 \cos \varphi \sin \gamma$, где $0'',319$ – коэффициент суточной аберрации k_0 .

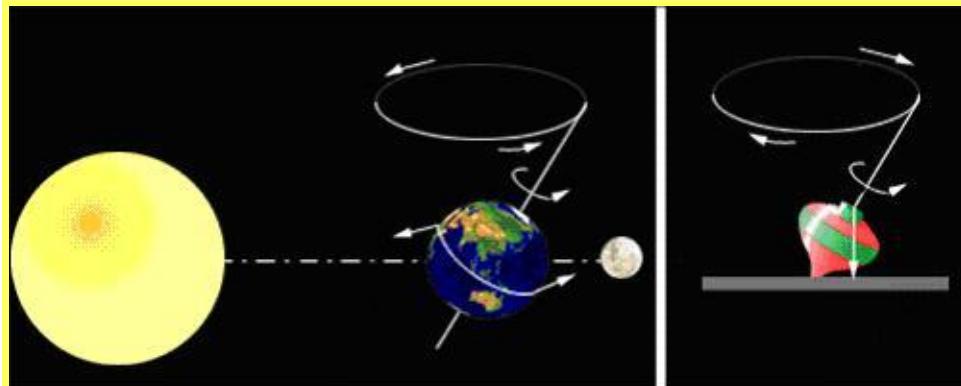
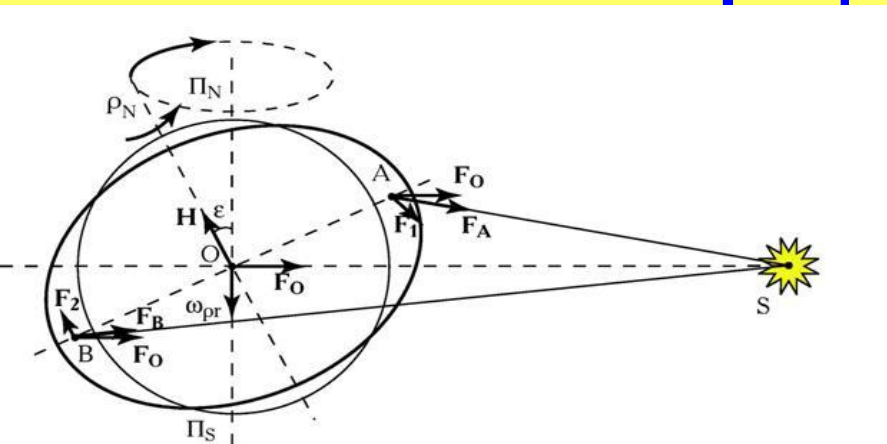
Суточная аберрация учитывается в горизонтальных координатах светил:

$$A = A' + k_0 \cos \varphi \operatorname{cosec} z \cos A,$$
$$z = z' + k_0 \cos \varphi \cos z \sin A.$$

Поправку за суточную аберрацию удобнее вводить в средние отсчёты времени аберрацию

$$\Delta T_{аб} = -0,021^s \cos Z .$$

Прецессия



Греческий астроном Гиппарх (123 г. до н.э.) определяя координаты звёзд и сравнивая их с аналогичными наблюдениями Аристиллы и Тимохариса, произведенными на 100 лет раньше нашел, что широты звезд остались неизменными, а склонения заметно изменились. Это указывало на смещение экватора относительно эклиптики и следовательно смещение точки весеннего равноденствия (ТВР, ♈) навстречу движения Солнца по эклиптике. Явление это на латыни получило название **прецессия**, что можно перевести как **предварение равноденствия**.

Сущность этого явления объяснил Ньютон. **Причиной прецессии являются следующие факторы:**

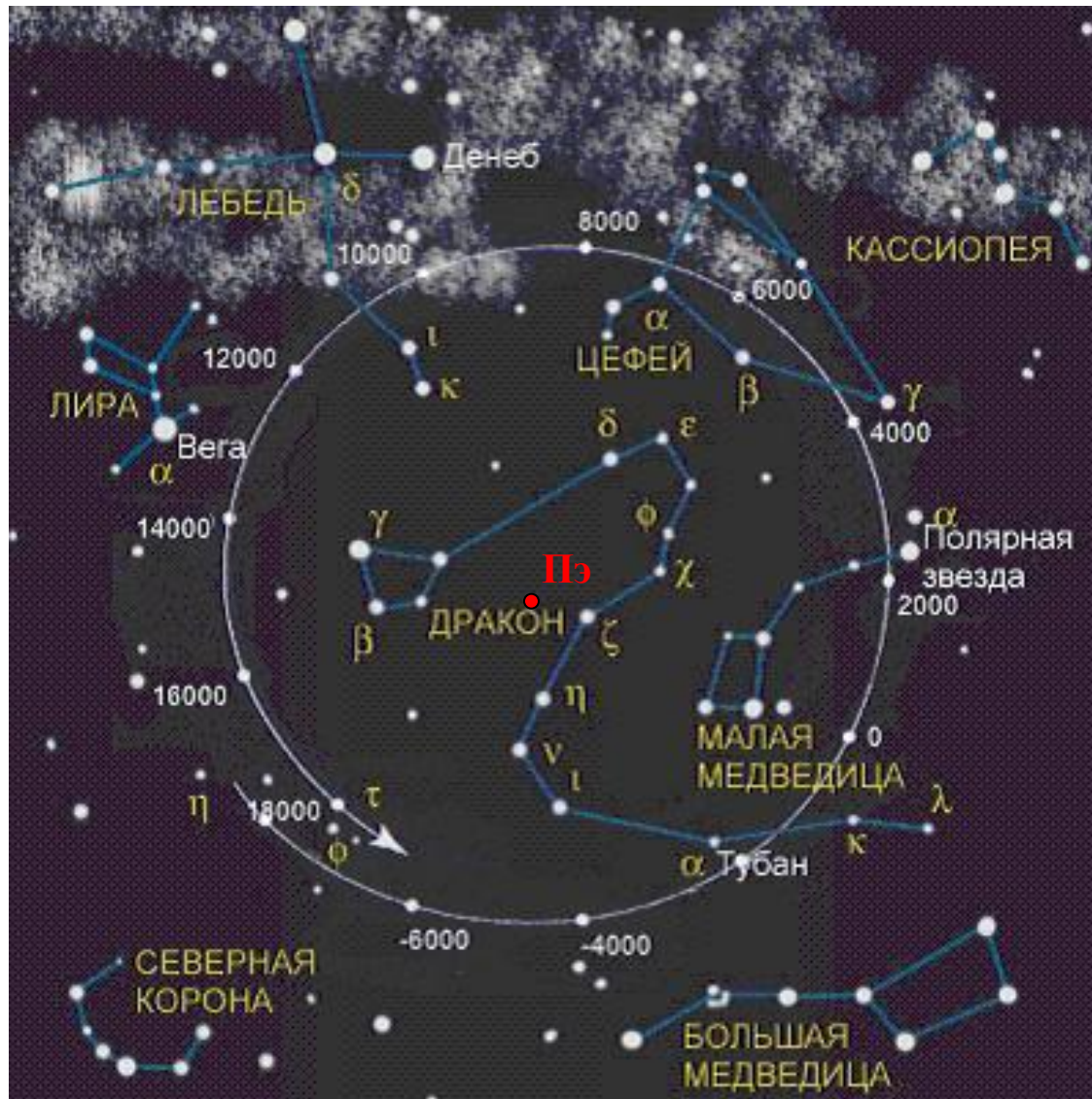
-гравитационное влияние Солнца, Луны и планет;

- полярное сжатие Земли и неравномерное распределение масс в её теле;

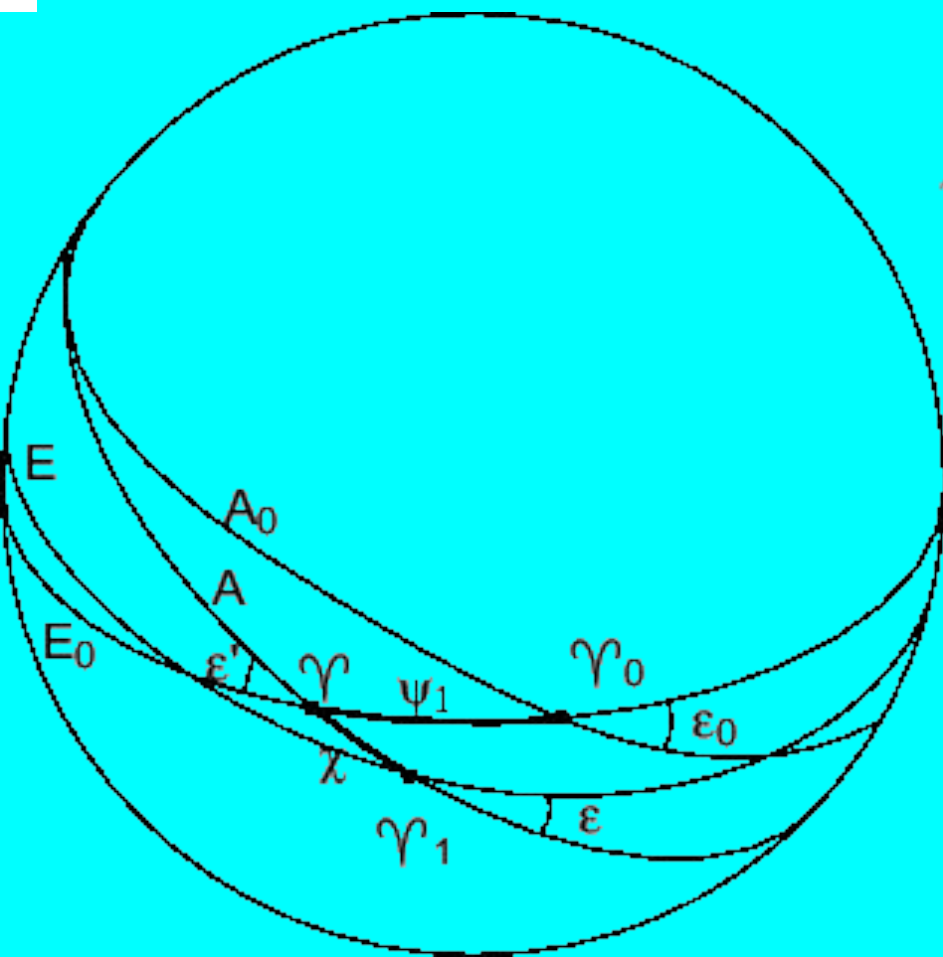
- наклон оси вращения Земли к плоскости её орбиты.

Полярное сжатие и наклон оси вращения приводит к тому, что экваториальные избытки притягиваются Луной и Солнцем с разной силой, что вызывает появления момента стремящегося изменить наклон оси вращения, а это ведёт к возникновению вращательного момента. В результате ось вращения Земли описывает окружность вокруг оси эклиптики с периодом примерно 25700 лет. Это явление называется лунно-солнечной прецессией и в результате ТВР смещается по эклиптике за год на $50,^{\circ}39$. Влияние планет приводит к вращению плоскости эклиптики вокруг оси, лежащей в плоскости эклиптики с эклиптической долготой $\lambda=174.^{\circ}85$. В результате ТВР смещается за год на $0,^{\circ}10$ вдоль эклиптики в направлении движения Солнца, а наклон эклиптики к экватору уменьшается за год на $0,^{\circ}47$.

Смещение полюса мира из-за лунно-солнечной прецессии



Лунно-Солнечная прецессия и прецессия от планет. Прецессионные параметры.



$$\psi_1 = 5038''.7784t - 1''.07259t^2 - 0''.001147t^3,$$

$$\chi = 10''.5526t - 2''.38064t^2 - 0''.001125t^3,$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - 46''.8150t - 0''.0059t^2 + 0''.00181t^3,$$

$$\varepsilon' = \varepsilon_0 + 0''.05127t^2 - 0''.007726t^3,$$

$$t = \frac{\text{JD(TCB)} - 2451545,0}{36525}.$$

Определение прецессионных параметров

- Положение экваториальной системы относительно эклиптической системы может быть задано тремя углами Эйлера: $\psi_1, \chi, \varepsilon$
- Угол ψ_1 равен дуге эклиптики γ_0 и называется лунно-солнечной прецессией за промежуток времени $t = T - T_0$. В результате лунно-солнечной прецессии средняя мгновенная точка весеннего равноденствия γ смещается на запад по эклиптике из-за прецессионного движения экватора. Угол χ равен дуге $\gamma\gamma_1$ среднего мгновенного экватора (**A**) и называется прецессией от планет. В результате прецессии от планет средняя мгновенная точка весеннего равноденствия γ_1 смещается вдоль среднего мгновенного экватора.
- Наклон мгновенной эклиптики **E** к экватору **A** равен ε эклиптики **E**₀ на начальную эпоху к экватору **A'** равен ε' .

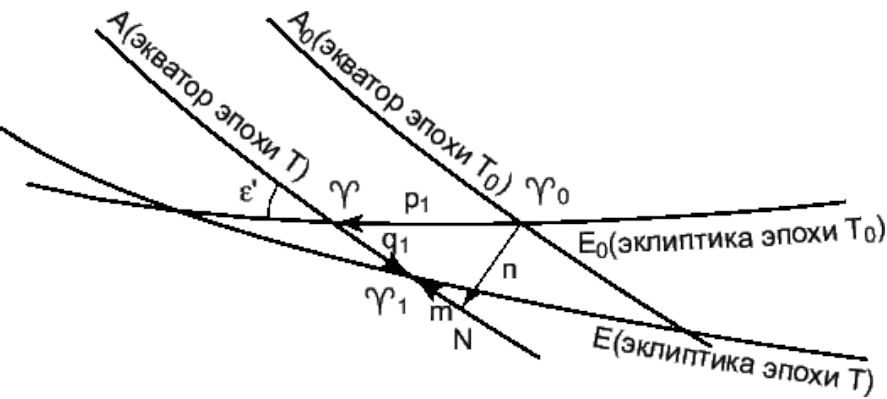
Прецессия

Лунно-солнечная прецессия

$$p_1 = \frac{1}{100} \frac{d\psi_1}{dt} = 50'';387784 - 0'';021452t - 0'';000034t^2,$$

Прецессия от планет

$$q_1 = \frac{1}{100} \frac{d\chi}{dt} = 0'';105526 - 0'';047613t - 0'';000034t^2,$$



Из прямоугольного треугольника $\gamma \gamma_0 N$ получим:

$$\left. \begin{aligned} m &= p_1 \cos \epsilon' - q_1, & \text{(прецессия по прямому восхождению)} \\ n &= p_1 \sin \epsilon'. & \text{(прецессия по склонению)} \end{aligned} \right\} (3.11)$$

$$m_0 = 4612'';4362/100 \text{ лет} \quad n_0 = 2004'';3109/100 \text{ лет} \quad \text{(значения для эпохи 2000.0)}$$

Изменение экваториальных координат вследствие прецессии можно представить в виде рядов Тейлора:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \alpha_0 + (t-t_0) \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)_0 + \frac{1}{2} (t-t_0)^2 \left(\frac{d^2\alpha}{dt^2} \right)_0 + \frac{1}{6} (t-t_0)^3 \left(\frac{d^3\alpha}{dt^3} \right)_0 + \dots, \\ \delta &= \delta_0 + (t-t_0) \left(\frac{d\delta}{dt} \right)_0 + \frac{1}{2} (t-t_0)^2 \left(\frac{d^2\delta}{dt^2} \right)_0 + \frac{1}{6} (t-t_0)^3 \left(\frac{d^3\delta}{dt^3} \right)_0 + \dots \end{aligned} \right\} (3.12)$$

Для геодезической астрономии и промежутков времени в десятки лет достаточно разложения до 3-го порядка, а для промежутка меньше года можно ограничиться первой производной.

Значения годичной прецессии для светил Поправки в экваториальные координаты за годичную прецессию

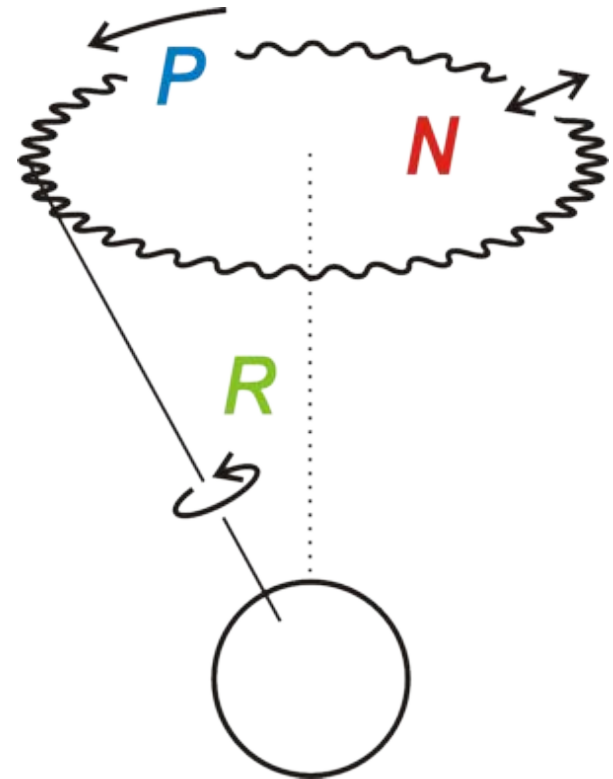
$$\left. \begin{aligned} \frac{d\alpha}{dt} &= m + n \times \sin \alpha \times \operatorname{tg} \delta ; \\ \Delta \delta &= (n \times \cos \alpha) \times (T - T_0) \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} \Delta \alpha &= (m + n \times \sin \alpha \times \operatorname{tg} \delta) \times (T - T_0) / 15; \\ & \text{(3.13)} \end{aligned} \right\} \frac{d\delta}{dt} = n \times \cos \alpha. \quad (3.14)$$

Нутация

Нута́ция (от лат. *nūtāre* — колебаться) — слабое нерегулярное движение вращающегося твёрдого тела, совершающего прецессию. Напоминает «подрагивание» оси вращения и заключается в слабом изменении так называемого *угла нутации* между осями собственного и прецессионного вращения тела.

В астрономии нутацией называют небольшие колебания земной оси, накладывающиеся на прецессионное движение. Это явление открыто в 1737 году Джеймсом Брадлеем. Вследствие нутации изменяются наклон эклиптики к экватору, а также экваториальные координаты

Главная нутационная гармоника, имеющая период, равный 18,61 года, определяется поворотом плоскости лунной орбиты. Меньшие петли периодом в год, полгода, 27,32 суток, 13,66 суток и т.д вызваны эллиптичностью орбит Луны и Земли, наклоном орбиты Луны к эклиптике и рядом других причин.



Нутация, средний и истинный полюс

Прецессия и полярная нутация

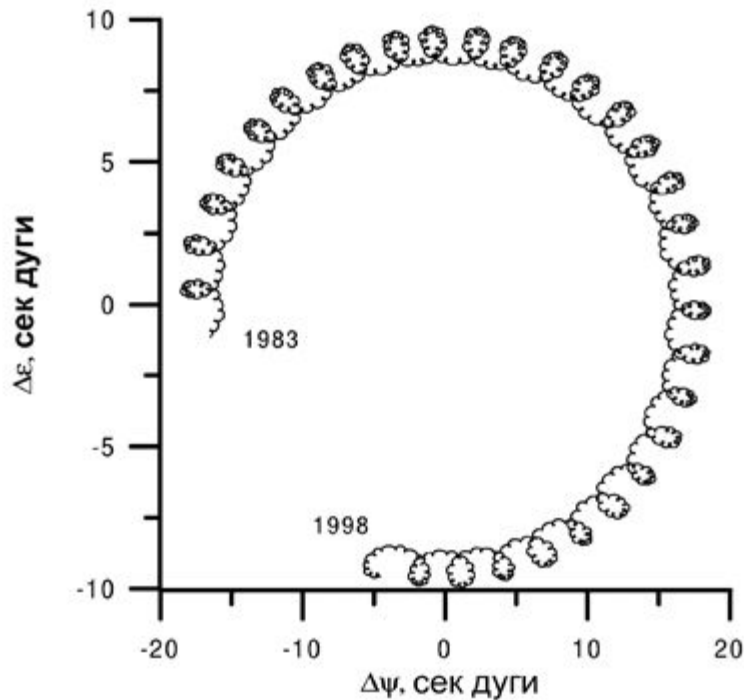


Экваториальная нутация



Полюс мира,двигающийся только в результате прецессии называется **средним полюсом P_c** , положение полюса с учётом влияния нутации называется **истинным полюсом P** . Этим полюсам соответствуют **средний экватор** и **истинный экватор**. Главное нутационное движение полюса мира можно представить в виде эллипса с полуосями, равными в дуговой мере $9,2''$ и $6,9''$.

Нутация в долготе и наклоне



Нутационное движение разлагается на две главные компоненты:

$\Delta\psi = -17.2'' \times \sin\Omega$ – нутацию в долготе и

$\Delta\varepsilon = 9.2'' \times \cos\Omega$ – нутацию в наклоне, где $\Delta\psi$ - нутация по долготе; $\Delta\varepsilon$ - нутация в наклоне; Ω - долгота восходящего узла лунной орбиты.

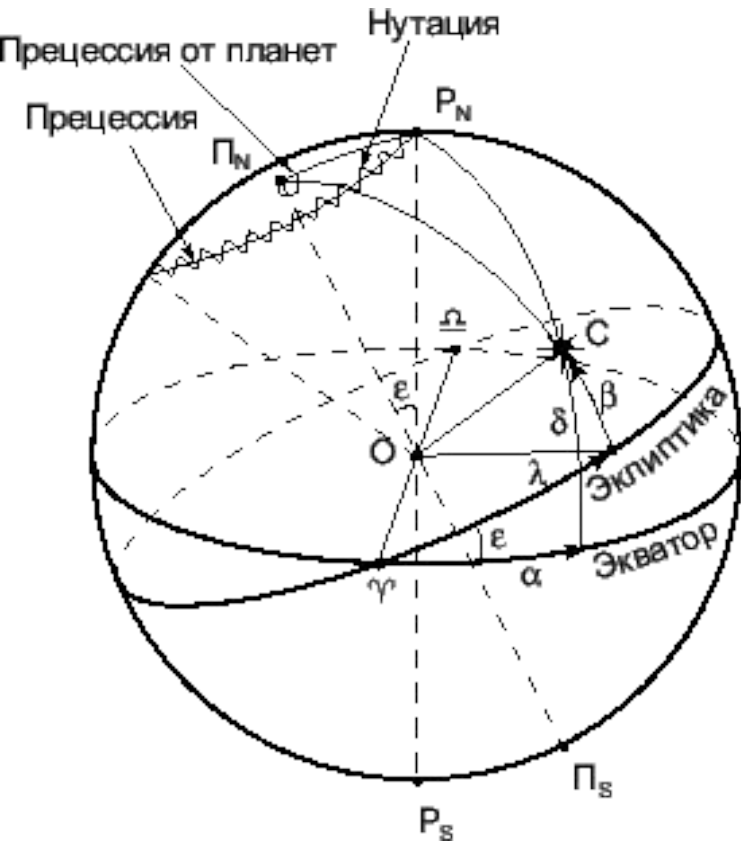
Теория нутации Земли МАС1980 включает 106 гармоник нутационного движения; новая теория нутации МАС2000 почти 1500 гармоник с периодами от 2 суток до 18,6 лет.

Нутация

Нутацию разделяют на долгопериодическую $\Delta\psi$; $\Delta\varepsilon$ и короткопериодическую $d\psi$; $d\varepsilon$.

Суммарное влияние обозначается:

$$[\Delta\psi] = \Delta\psi + d\psi \text{ и } [\Delta\varepsilon] = \Delta\varepsilon + d\varepsilon .$$



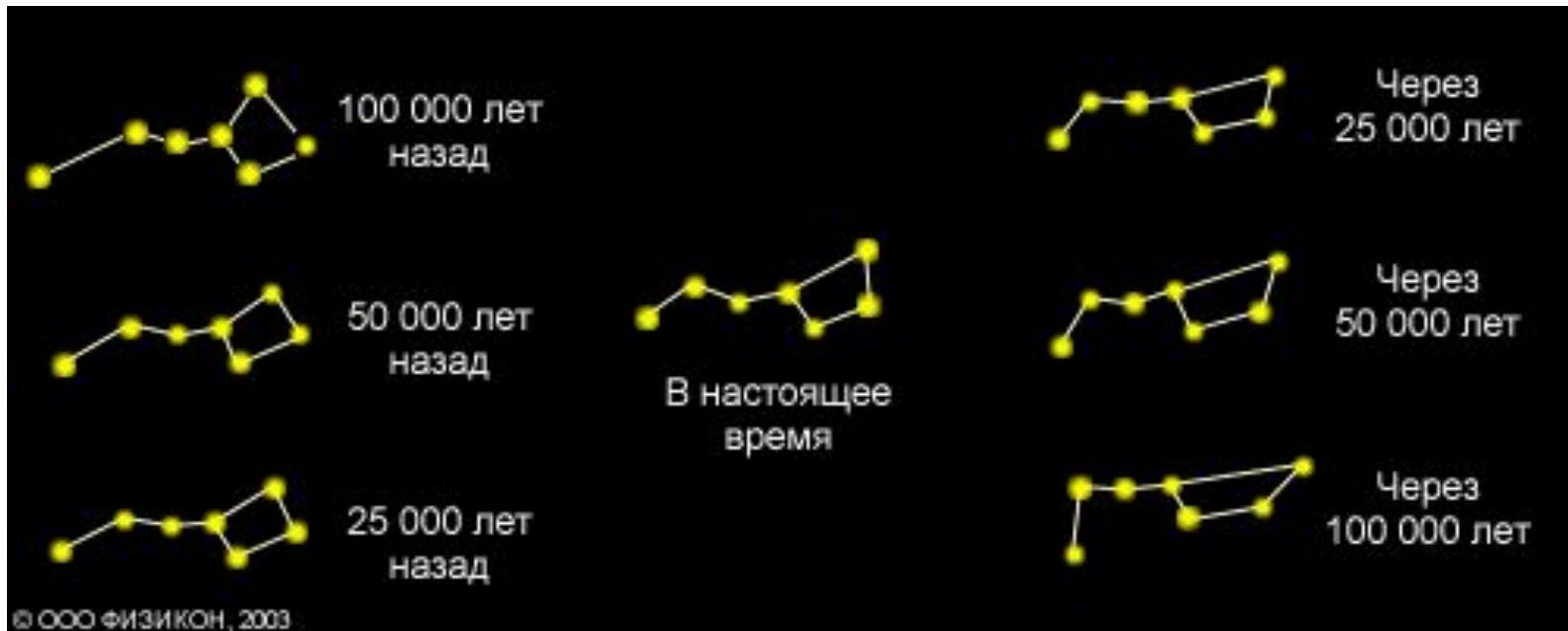
Влияние нутации на экваториальные координаты можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \alpha - \alpha_0 &= [\Delta\psi](\cos\varepsilon + \sin\varepsilon \sin\alpha_0 \operatorname{tg}\delta_0) - [\Delta\varepsilon] \cos\alpha_0 \operatorname{tg}\delta_0 \\ \delta - \delta_0 &= [\Delta\psi] \sin\varepsilon \cos\alpha_0 + [\Delta\varepsilon] \sin\alpha_0 \end{aligned} \right\} (3.15)$$

Совместный точный учёт прецессии и нутации в экваториальных координатах от среднего равноденствия $r_{\text{ср}}$ к истинному $r_{\text{ист}}$ производится по формуле $r_{\text{ист}} = NPr_{\text{ср}}$, где N – матрица нутации, P – матрица прецессии.

Собственное движение звезд

- Звезды движутся с разными скоростями и удалены от наблюдателя на различные расстояния. Вследствие этого взаимное расположение звезд меняется с течением времени. В течение одной человеческой жизни обнаружить изменения контура созвездия практически невозможно. Если проследить эти изменения в течение тысячелетий, то они становятся вполне заметными

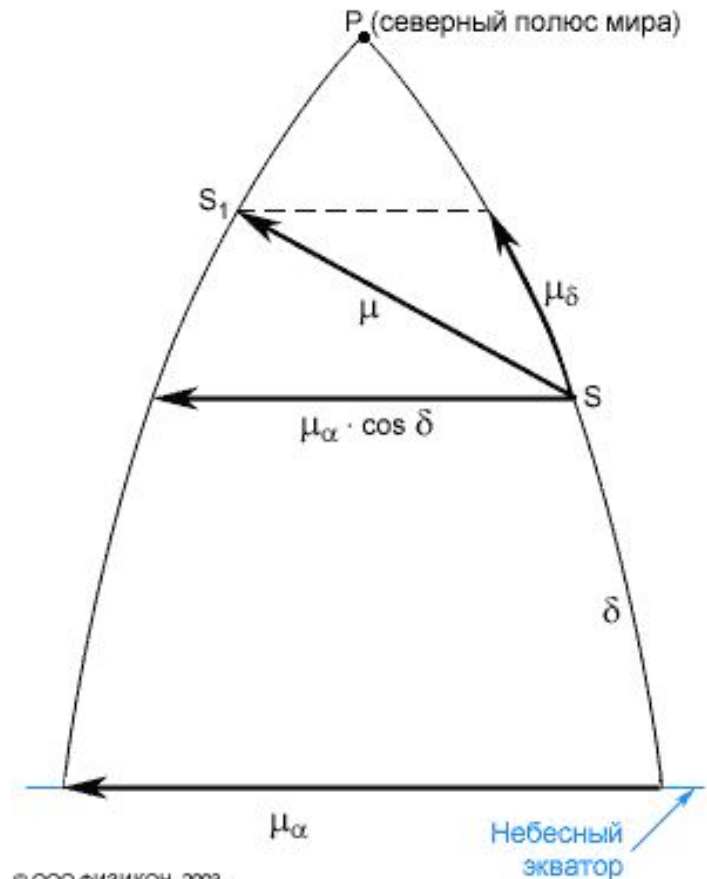


Собственное движение звёзд

- Собственное движение звезды также характеризуется двумя числами:
- μ_α – собственное движение по прямому восхождению,
- μ_δ – собственное движение по склонению,
- μ – полное собственное движение звезды
- выражается в секундах дуги в год
- и вычисляется по формуле:

$$\mu = \sqrt{(\mu_\alpha \cos \delta)^2 + \mu_\delta^2}$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \alpha_0 + \mu_\alpha t, \\ \delta &= \delta_0 + \mu_\delta t. \end{aligned} \right\} (3.16)$$



Движение географических полюсов. Мгновенная ось вращения Земли не сохраняет в теле Земли неизменного направления, вследствие чего происходит перемещение **географических Полюсов** по земной поверхности; это явление называется движением полюсов Земли. Сведения о движении полюсов имеют важное значение в астрономии и геодезии, т.к. оно вызывает непрерывные изменения координат точек поверхности Земли и азимутов земных предметов, что сказывается на результатах астрономических и геодезических измерений. Для получения этих сведений в 1899 была создана Международная [служба широты](#), переименованная в 1961 в Международную службу движения полюсов Земли (см. [Служба движения полюса международная](#)). В её состав входят 5 станций, ведущих наблюдения изменений широт, и Центральное бюро, которое на основе этих наблюдений вычисляет координаты **Полюсы**

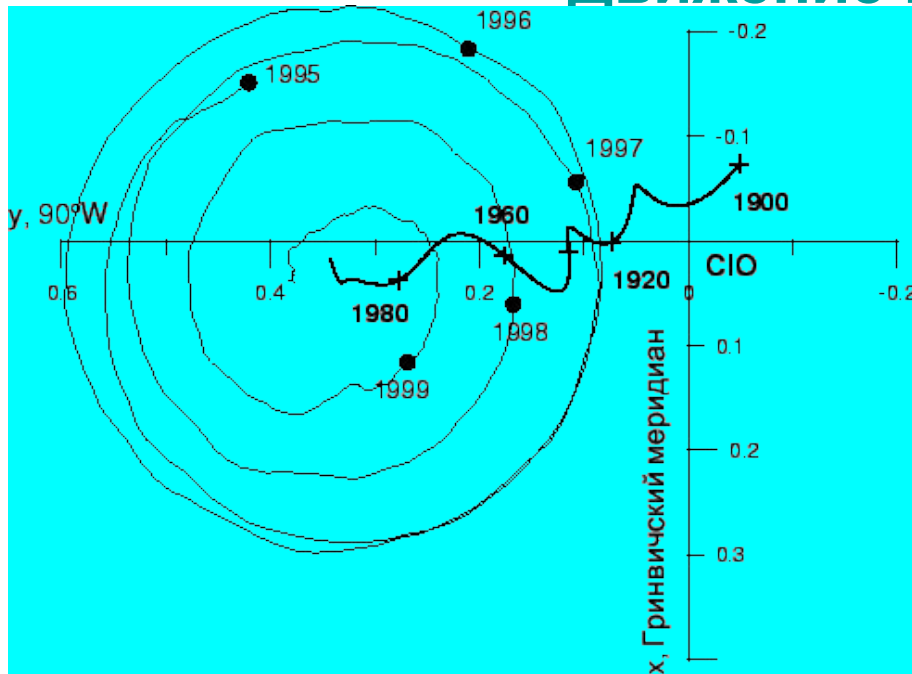
географические Станции расположены на одной географической параллели $39^{\circ} 8'$ с. ш. и снабжены однотипными инструментами. В число их входят станции: Мидзусава (Япония), Китаб (СССР), Карлофорте (Италия), Гейтерсберг (США), Юкайа (США). В СССР наблюдения для службы движения полюсов Земли ведутся также в Пулковке, Москве, Полтаве, Казани, Горьком, Иркутске, Благовещенске.

Движение полюсов Земли изучается относительно т. н. условного международного начала координат Сев. полюса Земли (ему соответствует «условный» экватор), положение которого установлено решением 13-й Генеральной ассамблеи Международного астрономического союза в 1967. В этой точке проводится плоскость K , касательная к поверхности земного сфероида. По результатам астрономических наблюдений широты j на станциях определяется плоскость мгновенного экватора Земли. Перпендикуляр CP к этой плоскости практически совпадает с мгновенной осью вращения Земли, а точка P , в которой он пересекает плоскость K , — с мгновенным полюсом Земли. В плоскости K вводят координатную систему: ось OX проводят в направлении меридиана Гринвича, OY — под углом 90° к Z . от него. Координаты точки P в этой системе называется координатами мгновенного полюса Земли. Они связаны с широтой пункта наблюдений формулой, предложенной в 1893 С. К. [Костинским](#):

$$x \cos l + y \sin l = j - j_0, \quad \text{где } l \text{ — долгота пункта наблюдения.}$$

Данные о движении **Полюсы географические** показывают, что полюс P движется по поверхности Земли в направлении её суточного вращения вокруг полюса инерции I , в которой наименьшая ось эллипсоида инерции Земли пересекает плоскость K и при этом описывает неправильную спиралевидную кривую — полодию, витки которой постепенно смещаются относительно условного международного начала O в сторону Гренландии. Полодия Южного полюса имеет такую же форму, как и Северного.

Движение полюса



- Движение полюса на интервале 1900-2000 г. (вековой ход - жирная линия) и на интервале 1995-2000 г. Отсчет координат ведется от Условного Международного Начала (МУН) или (CIO). Координаты мгновенного полюса x и y вычисляются международным бюро времени (МБВ), а также национальными службами времени
- на основании спутниковых измерений, лазерной локации Луны, РСДБ-измерений и публикуются в специальных бюллетенях.
- Поправки за приведение мгновенных координат и азимутов к среднему полюсу вычисляют по формулам:

$$\begin{aligned}
 & \Delta\phi = y \times \sin\lambda - x \times \cos\lambda ; \\
 & \Delta\lambda = -(x \times \sin\lambda + y \times \cos\lambda) \operatorname{tg}\phi / 15 ; \\
 & \Delta a = -(x \times \sin\lambda + y \times \cos\lambda) \operatorname{sec}\phi,
 \end{aligned}
 \quad (3.17)$$

- а исправленные значения координат и азимута равны:

$$\begin{aligned}
 & \phi_{\text{МУН}} = \phi_{\text{набл}} + \Delta\phi_r ; \\
 & \lambda_{\text{МУН}} = \lambda_{\text{набл}} + \Delta\lambda_r ; \\
 & a_{\text{МУН}} = a_{\text{набл}} + \Delta a_r
 \end{aligned}
 \quad (3.18)$$

Совместный учёт редукций

- Если требуется преобразовать измеренные координаты звезды или планеты к экватору и равноденствию стандартной эпохи, то классический метод обработки оптических астрометрических наблюдений заключается в следующем.
- Из наблюдаемых зенитных расстояний вычитаются поправки за рефракцию и находятся прямые восхождения и склонения небесных тел для точки на поверхности Земли, лишенной атмосферы.
- Учитывая поправки, связанные с суточной абберацией, находятся координаты, которые отнесены к невращающейся Земле (*видимые координаты*).
- Учет суточного параллакса приводит к переносу начала отсчета в центр Земли.
- Учет годичной абберации (для близких небесных тел - планетной абберации) приводит к переносу начала системы отсчета в барицентр солнечной системы. В результате выполненной редукции координаты небесных тел определяются относительно истинного экватора и равноденствия даты в барицентрической системе отсчета (*истинные координаты*).
- Учет нутации позволяет определить координаты, отнесенные к среднему экватору и равноденствию даты.
- Исправляя координаты за прецессию и собственное движение, получим координаты небесных тел, отнесенные к среднему экватору и равноденствию стандартной эпохи (эпохи каталога звёздных положений). Положение небесных тел в этой системе координат является средним стандартным местом

Приведение на видимое место

В геодезической астрономии при обработке астрономических определений используют видимые геоцентрические экваториальные координаты светил. Наблюденное на пункте направление на светило приводится к видимому, отнесённому к центру Земли путём введения поправок за рефракцию, сточную аберрацию и суточный параллакс (последняя поправка только для тел солнечной системы).

Переход от средних координат эпохи каталога t_0 к видимым координатам момента наблюдения выполняется в два этапа. На первом этапе учитывая влияние прецессии и собственных движений переходят к средним координатам года наблюдения (середину года, эпоха наблюдения t). Такой переход выполняется по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \alpha_0 + \mu_\alpha (t - t_0) + (t - t_0) \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)_0 + \frac{1}{2} (t - t_0)^2 \left(\frac{d^2\alpha}{dt^2} \right)_0 + \frac{1}{6} (t - t_0)^3 \left(\frac{d^3\alpha}{dt^3} \right)_0 + \dots, \\ \delta &= \delta_0 + \mu_\delta (t - t_0) + (t - t_0) \left(\frac{d\delta}{dt} \right)_0 + \frac{1}{2} (t - t_0)^2 \left(\frac{d^2\delta}{dt^2} \right)_0 + \frac{1}{6} (t - t_0)^3 \left(\frac{d^3\delta}{dt^3} \right)_0 + \dots \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

На втором этапе переходят от средних координат эпохи наблюдения t к видимым координатам момента наблюдения. Этот промежуток не превышает половины года и обозначается через τ . Первоначально также учитываем влияние прецессии и собственных движений светил:

$$\left. \begin{aligned} \alpha' &= \alpha + (m + n \sin \alpha \operatorname{tg} \delta) \tau + \mu_\alpha \tau \\ \delta' &= \delta + n \cos \alpha \tau + \mu_\delta \tau \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

где τ выражается в долях года от середины года t .

Далее, учитывая нутацию по формулам (3.15), перейдём к истинным координатам на момент наблюдения.

Совместное влияние прецессии, нутации и собственного движения, сохраняя за суммами долгопериодических членов обозначения $\Delta\psi$ и $\Delta\varepsilon$ и, обозначая суммы короткопериодических членов через $d\psi$ и $d\varepsilon$, приводит к формулам:

$$\left. \begin{aligned} \alpha' &= \alpha + (m + n \sin \alpha \operatorname{tg} \delta) \tau + (\Delta\psi + d\psi)(\sin \varepsilon \sin \alpha \operatorname{tg} \delta + \cos \varepsilon) - (\Delta\varepsilon + d\varepsilon) \cos \alpha \operatorname{tg} \delta + \mu_\alpha \tau, \\ \delta' &= \delta + n \tau \cos \alpha + (\Delta\psi + d\psi) \sin \varepsilon \cos \alpha + (\Delta\varepsilon + d\varepsilon) \sin \alpha + \mu_\delta \tau \end{aligned} \right\} (3.21)$$

После ряда преобразований, введя обозначения, которые называются большие и малые бesselевы бук

$$A = n\tau + \Delta\psi \sin \varepsilon, \quad A' = d\psi \sin \varepsilon \quad B = -\Delta\varepsilon, \quad B' = -d\varepsilon \quad E = \frac{q_1}{p_1} (\Delta\psi + d\psi),$$

$$a = \frac{m}{n} + \operatorname{tg} \delta_0 \sin \alpha_0 \quad a' = \cos \alpha_0 \quad b = \operatorname{tg} \delta_0 \cos \alpha_0, \quad b' = -\sin \alpha_0$$

запишем окончательно:

$$\alpha = \alpha + (A + A')a + (B + B')b + E + Cc + Dd + \mu_\alpha \tau.$$

$$\delta = \delta + (A + A')a' + (B + B')b' + Cc' + Dd' + \mu_\delta \tau.$$

где Cc, Dd, Cc', Dd' - учитывают влияние годичной аберрации (3.10).

Видимые места звёзд в астрономическом ежегоднике (АЕ)

- В АЕ для 779 ярких звёзд приведены видимые места для верхней кульминации в Гриниче . Из них для 47 близполюсных ($\delta > 80^\circ$) на каждые сутки года и для 732 ($\delta < 80^\circ$) через 10 суток.
- Для промежуточных моментов видимые места находят с помощью линейной интерполяции.

Фундаментальные каталоги

- **Фундаментальный каталог (The Catalogue of Fundamental Stars)** —
- серия из шести звёздных каталогов, созданных в разное время для
- фиксации на небе стандартной системы координат — Международной небесной системы координат.

- *FK4* — каталог, опубликованный в 1963 году и содержащий данные о 1535 звёздах.
- *FK4S* — дополнение к каталогу *FK4*.

- *FK5* опубликован в 1988 году и содержит обновлённые данные о 1535 звездах. и на тот момент являлся оптической реализацией *Международной небесной системы координат*. Все вышеназванные каталоги содержат данные, полученные только из наземных наблюдений.

- *FK6* — последний Фундаментальный каталог, является комбинацией результатов наземных наблюдений и космического астрометрического проекта Hipparcos. Каталог состоит из трёх частей. Первая часть содержит 878 так называемых *фундаментальных звёзд*, то есть звёзд, которые с большой вероятностью не являются двойными. Двойственность звезды вносит неопределённость в собственное движение, что снижает точность астрометрических измерений. Средняя ошибка собственных движений почти в два раза меньше, чем у *Hipparcos* и составляет $0,35 \text{ mas/год}$. Третья часть содержит 3272 звезды. Введён разрешением МАС, принятой в 1997 году. В АЕ положения и собственные движения звёзд на его основе публикуются с 2004 года. *FK6* – оптическая реализация системы ICRS.

- **Международная небесная система координат**
- **International Celestial Reference System (ICRS, Международная небесная система координат или Международная система астрономических координат)** — на данный момент стандартная небесная [система координат](#), принятая на 23-м съезде [МАС](#) в [1997](#) году. Началом отсчета является [барицентр Солнечной системы](#). Система основана на кинематическом принципе, то есть оси жёстко зафиксированы в пространстве относительно самых удаленных объектов наблюдаемой вселенной. ICRS — набор договоренностей и основополагающих принципов построения небесной системы координат.
- **International Celestial Reference Frame (ICRF, Международный набор реперов системы астрономических координат)** — реализация небесной системы координат ICRS. По своей сути это каталог, содержащий координаты опорных бесконечно удаленных объектов. В каталог входят 212 внегалактических радиоисточников ([квazarов](#)), координаты которых измерены с точностью до 1 mas (миллисекунды дуги) с помощью [РСДБ](#) наблюдений. В каталог также включены дополнительно 396 объектов, координаты которых измерены с меньшей точностью. Оптической реализацией является принятый фундаментальный каталог, сейчас это FK6.

-
- Космический телескоп «Hipparcos») или *Гиппарх* . **Hipparcos** (акроним от *High Precision Parallax Collecting Satellite* — искусственный спутник для сбора высокоточных параллаксов, созвучно с именем древнегреческого астронома Гиппарха, составителя первого в Европе звёздного каталога) — космический телескоп Европейского космического агентства, предназначенный для астрометрических задач: измерения координат, расстояний и собственных движений светил. Спутник был запущен в 1989 году и за 37 месяцев работы собрал информацию более чем о миллионе звёзд.^[1] Точность измерений составила *1 mas* (миллисекунда дуги). *Hipparcos* — первый и на данный момент единственный завершивший свою работу космический астрометрический проект. Успех программы позволил увеличить точность на порядок и тем самым совершить настоящий прорыв.

- Аппарат был запущен 8 августа 1989 года. Параметры:
- Диаметр апертуры: 290 мм; Фокусное расстояние: 1400 мм; Масса аппарата: 500 кг;
- Максимальная точность: 1 mas.
- Помимо *Hipparcos experiment* на аппарате был проведён *Tycho experiment*, задачей которого было проведение двухцветной фотометрии 400 000 звёзд.
- **Каталоги**
- Обработка наблюдений привела к созданию двух каталогов *Hipparcos* и *Tycho*, опубликованных Европейским космическим агентством в 1996 году. Каталог был выпущен в печатном и электронном виде. Печатная версия содержала 16 томов: непосредственно каталог *Hipparcos* и документацию, описывающую содержание обоих каталогов, характеристики спутника, алгоритмы обработки данных. Электронная версия находилась на 6 шести компакт-дисках, собранных в виде 17-го тома.
- Основные характеристики каталогов
- **Каталог HIPPARCOS** Система каталога HICRSICRS. Средняя эпоха наблюдений 1991,25 Число звёзд 118 218 Предельная звёздная величина 12,4m. Точность положений < 1 mas Точность собственных движений < 1 mas/год — Точность параллаксов ≈ 1 mas — Средняя точность фотометрии ≈ 0,002 m.
- **Каталог Tycho** Система каталога HICRSICRS. Средняя эпоха наблюдений 1991,25 Число звёзд 1 058 332 Предельная звёздная величина 11,5m Точность положений 7-25 mas mas/Средняя точность фотометрии ≈ 0,06m — 0,1m .