3. КООРДИНАТЫ, ВРЕМЯ, ДВИЖЕНИЕ

3.1. Общие представления о небесной сфере

При изучении спутниковой радионавигации необходимо иметь определенный объем знаний о системах координат, в которых осуществляется движение навигационных спутников и производятся навигационные определения потребителей.

Орбиты спутников связываются с воображаемыми линиями, которые можно провести по поверхности Земли, небесной сферы и через точки на небесной сфере.

Наблюдатель на Земле может представить воображаемую сферу **произвольного** радиуса с центром в глазу наблюдателя, на поверхность которой проецируются изображения небесных тел. Такая условная поверхность называется ***небесной сферой*** (рис. 3.1 - рис. 3.3) [11, 18, 19].

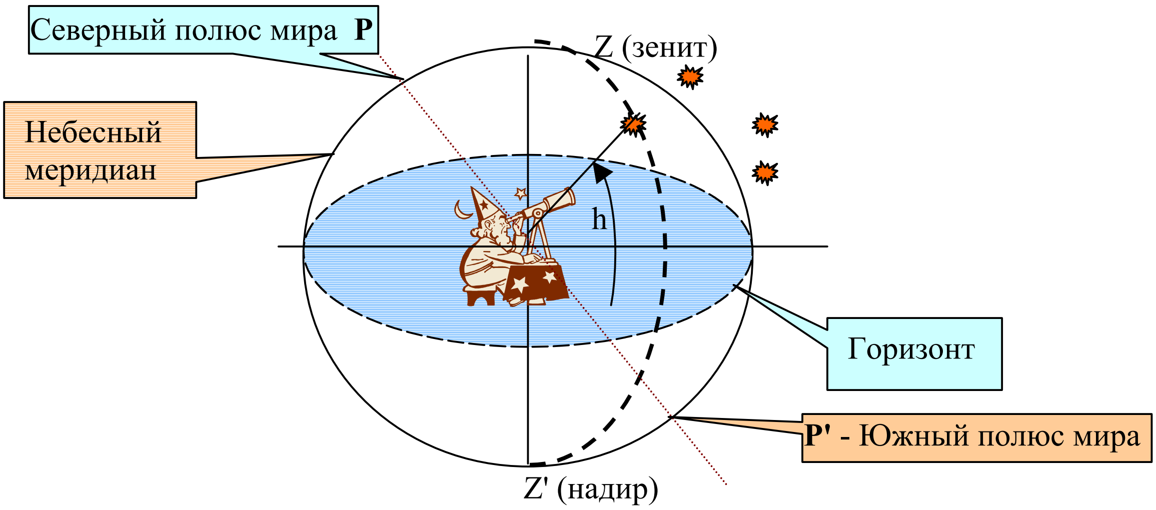

Рис. 3.1. Небесная сфера с точки зрения наблюдателя с Земли

В каждой точке земной поверхности можно определить направления вертикальной линии. Она пересечет небесную сферу в точках Z и Z', которые называются надир и зенит соответственно. Окружность в плоскости, пересекающей небесную сферу и проходящей через ее центр называется истинным или математическим горизонтом. Через центр небесной сферы и Полярную звезду проходит линия называемая осью мира (рис. 3.2). Точка пересечения оси мира с небесной сферой в направлении Полярной звезды называется Северным полюсом мира, а противоположная – Южным полюсом мира (рис. 3.1, рис. 3.2). Окружность, в плоскости которой находится ось мира, называется небесный меридиан, а окружность с центром в центре небесной сферы и перпендикулярная оси мира называется небесный экватор (рис. 3.2). Полуокружности, соединяющие полюсы мира имеют название круги склонения.

Небесный меридиан пересекает математический горизонт в двух точках. Ближайшая к к Северному полюсу мира называется ***точкой севера (N),*** а противоположная – ***точкой юга (S)*** [11]. Небесный свод вращается вокруг оси мира. При этом Северный полюс мира совмещается с Полярной звездой. Таким образом, любая звезда, двигаясь по небесной сфере, в южной части небосвода (справа от полюса ***P***) в какой то момент занимает наивысшее положение над горизонтом. Это положение называется верхней кульминацией звезды (точка "A" на рис. 3.2). Наоборот, на участке небесного меридиана в северной части небосвода (слева от полюса ***P***) звезда, пересекая небесный меридиан, оказывается в наинизшем положении по отношению к горизонту. Это положение называется нижней кульминацией звезды (точка "Q" на рис. 3.2). Кульминацией тела называется его прохождение через небесный меридиан.

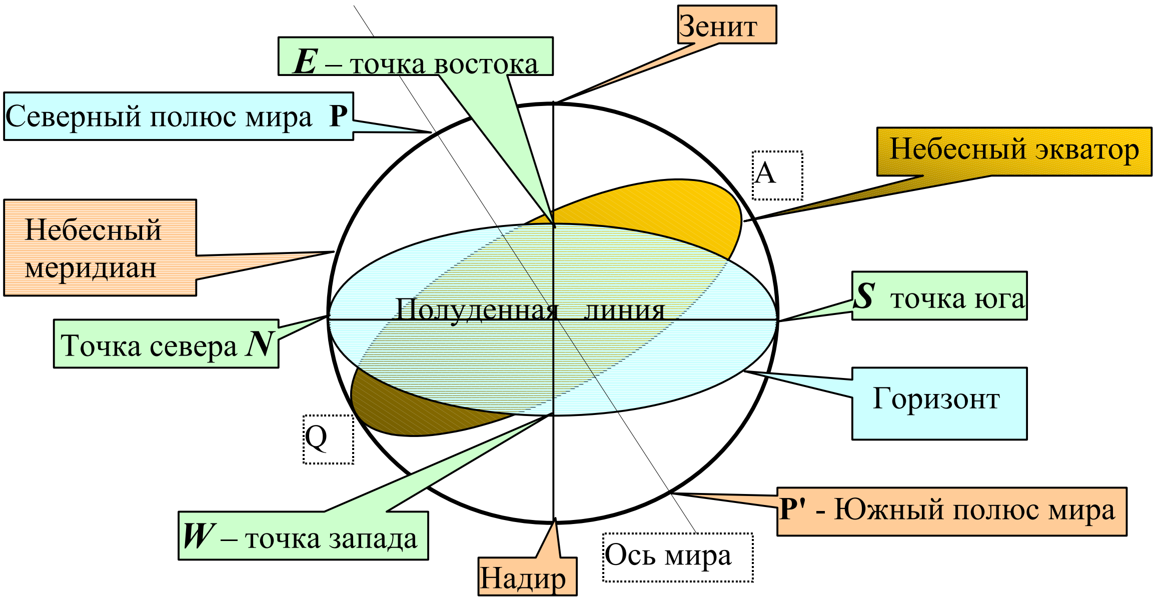

Рис. 3.2. Небесный экватор и небесный меридиан.

В разные моменты года Солнце, при наблюдениях с Земли, проектируется на различные участки звездного неба. Траектория кажущегося перемещения Солнца по небесной сфере называется эклиптикой. Эклиптика представляет собой окружность, пересекающуюся с небесным экватором под углом ε= 23.5° (рис. 3.4) [11] в двух противоположных точках, которые называются:

γ **-** точка весеннего равноденствия и

Ω - точка осеннего равноденствия.

Точки солнцестояний (летнего и зимнего) отстоят по эклиптике от точек равноденствия в обе стороны на 90°.

Полный оборот Солнца по эклиптике совершается за 365.25 суток.

Один полный оборот вокруг своей оси Земля совершает относительно звезд за меньший промежуток времени, а относительно Солнца за больший.

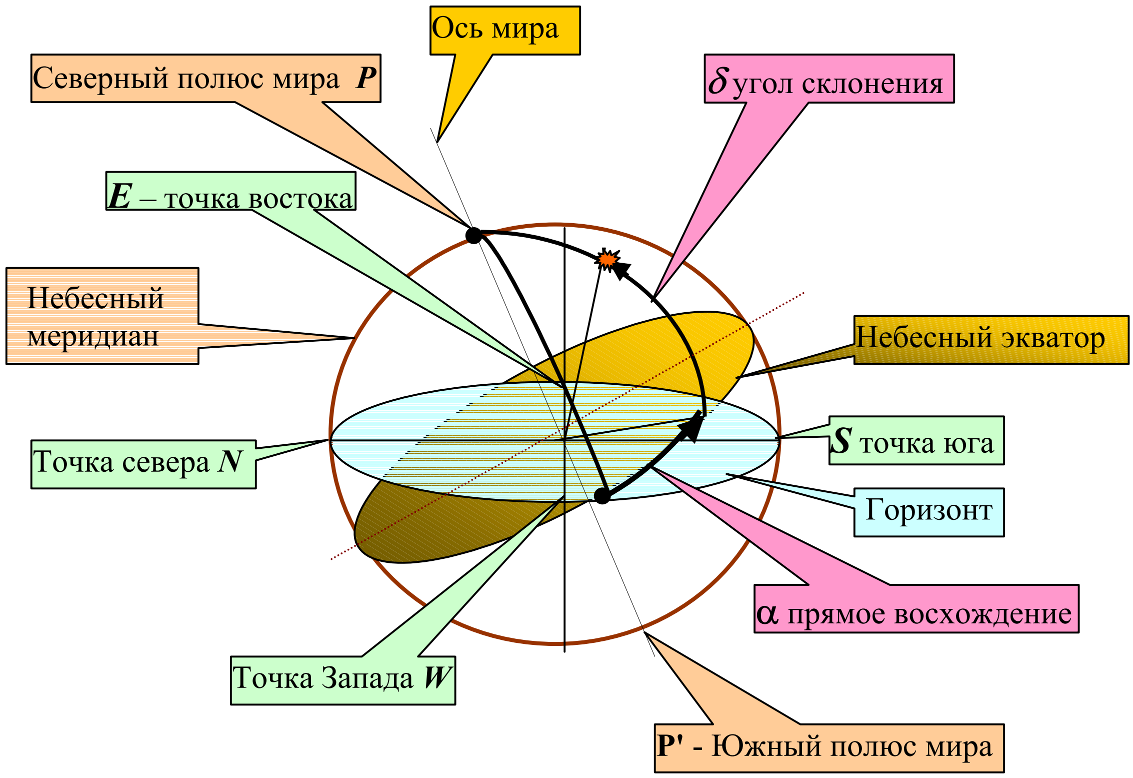

Рис. 3.3. Координаты любой звезды или светила в экваториальной системе координат и название позиционных точек

На звездном небе эклиптика проходит через 12 зодиакальных созвездий: Рыба, Овен, Телец, Близнецы, Рак, Лев, Дева, Весы, Скорпион, Стрелец, Козерог, Змееносец. Созвездие, на которое проектируется Солнце с Земли, наблюдению недоступно, так как восходит и заходит вместе с Солнцем и кульминирует в полдень. Созвездие, противоположное Солнцу видимо и кульминирует в полночь.

В любой точке Земли (рис. 3.5) ось мира параллельна земной оси и поэтому высота полюса мира и географическая широта данного пункта являются углами с взаимно перпендикулярными сторонами. Ось мира всегда перпендикулярна плоскости земного экватора, а радиус Земли, проведенный в пункт наблюдения, перпендикулярен к касательной плоскости [11]. Отсюда следует, что высота Северного полюса мира равна географической широте места.

Звезды при своем видимом суточном движении, вызванном осевым вращением Земли, перемещаются на небесной сфере параллельно небесному экватору. Так как при этом *угловое* расстояние любой звезды от небесного экватора остается постоянным, то положение звезд

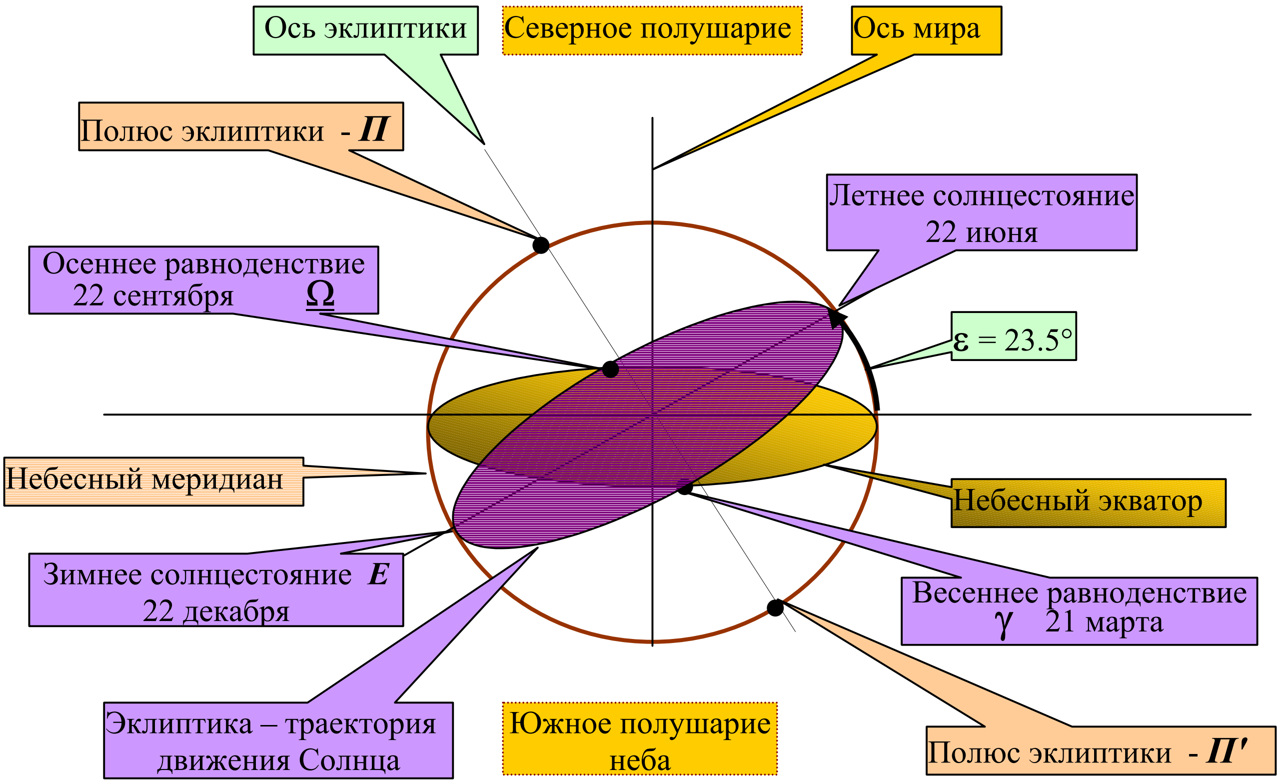

Рис. 3.4. Кажущееся годовое движение Солнца по эклиптике,

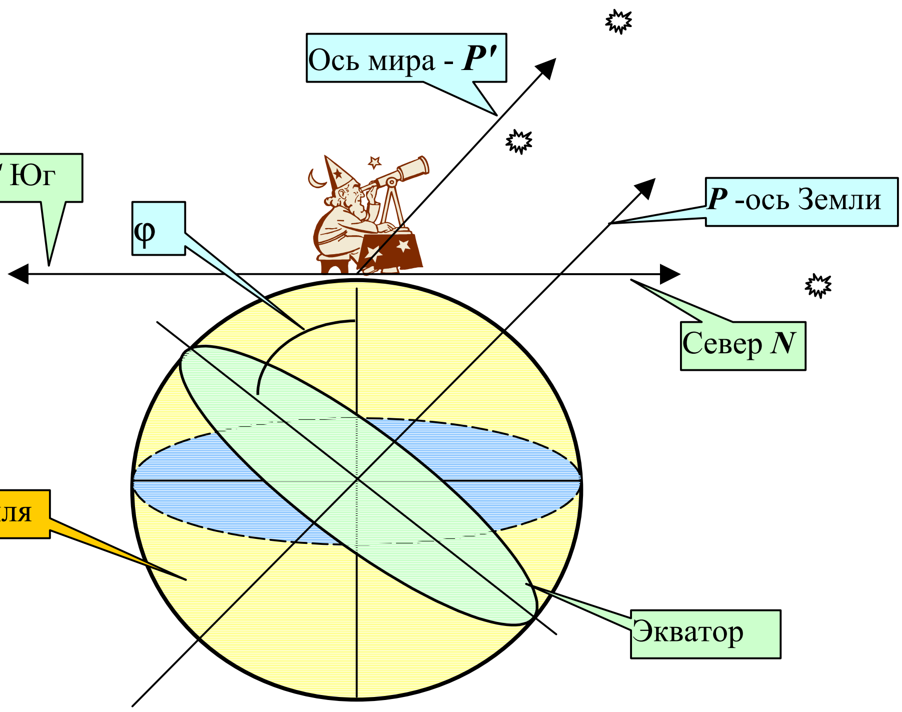

Рис. 3.5. Земной шар

Склонением небесного светила δ ***называется угол между направлением из центра небесной сферы на данное светило и плоскостью небесного экватора***.

Прямое восхождение небесного тела (α) есть угол между направлением из центра небесной сферы на точку весеннего равноденствия и плоскостью круга склонения данного тела, отсчитываемый в направлении против часовой стрелки, если смотреть со стороны северного полюса мира.

Точка весеннего равноденствия (γ) образуется при пересечении небесного экватора и линии горизонта и находится в созвездие Овна. В этой точке Солнце ежегодно бывает в день весеннего равноденствия 21 марта.

3.2. Системы координат

В математике широко применяется следующее понятия прямоугольной системы координат.

Если изобразить три оси координат (рис. 3.6) 0X, 0Y, 0Z и на этих осях отложить три единочных вектора i, j, k, то система координат рис. 3. 6 называется правой, если поворот вектора i, совмещающий его с вектором j, по кратчайшему пути совершается против часовой стрелки для наблюдателя, помещенного в конце оси 0Z. Имеется правило правой руки для запоминания этого факта: большой палец (ось 0Z) направлен вверх, указательный палец (ось 0X) направлен вперед, средний палец (ось 0У) направлен влево.

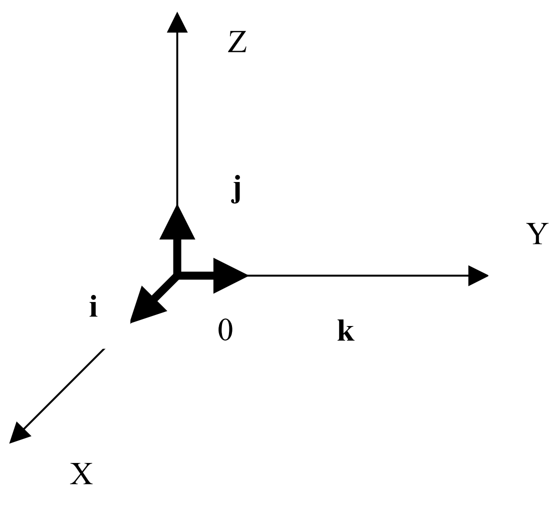

Рис. 3.6. Декартовы координаты

Если вектор i направлен в противоположную сторону, то система координат называется левой. Соответственно работает правило левой руки.

Для описания движения навигационного спутника используется геоцентрическая инерциальная система координат (рис. 3.7). Начало координат О находится в центре масс

Земли. Ось OX_0 лежит в экваториальной плоскости и направлена в точку весеннего равноденствия γ, ось OZ_0 совпадает с осью вращения Земли и направлена на Северный полюс Земли, ось $OУ_0$ дополняет систему до правой.

Второй используемый системой координат является геоцентрическая гринвическая (вращающаяся) прямоугольная система рис. 3 8. Начало координат также находится в центре масс Земли O. Ось OX направлена в точку пересечения Гринвического меридиана с экватором, ось OZ совпадает с осью вращения Земли и направлена на Северный полюс Земли, ось ОУ дополняет систему до правой.

Поскольку Земля вращается, то эта система координат есть также вращающаяся.

Угол между осями OX_0 и OX обозначаемый далее через S соответствует гринвичскому звездному времени.

Вообще, если говорить о системе координат, то можно выделить три понятия: местная, геоцентрическая инерциальная (рис. 3.7) и геоцентрическая гринвичская (вращающаяся) прямоугольная (рис. 3.8).

В местной системе координат, традиционно, национальные топографические службы определяли форму поверхности Земли наиболее точно соответствующую территории государства в качестве базиса для картографии.

Геоцентрические системы координат: инерциальная и гринвическая (вращающаяся) примененяются в спутниковой радинавигации.

Связь между инерциальной и вращающейся системами координат дается соотношениями:

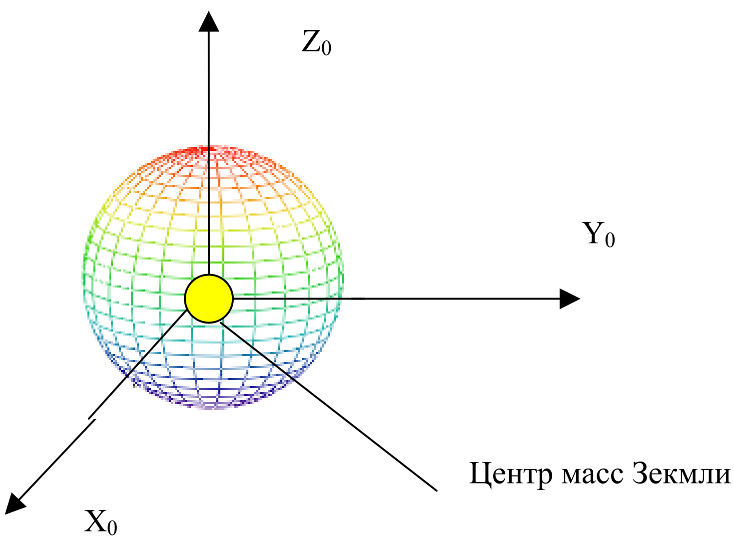

Рис. 3.7

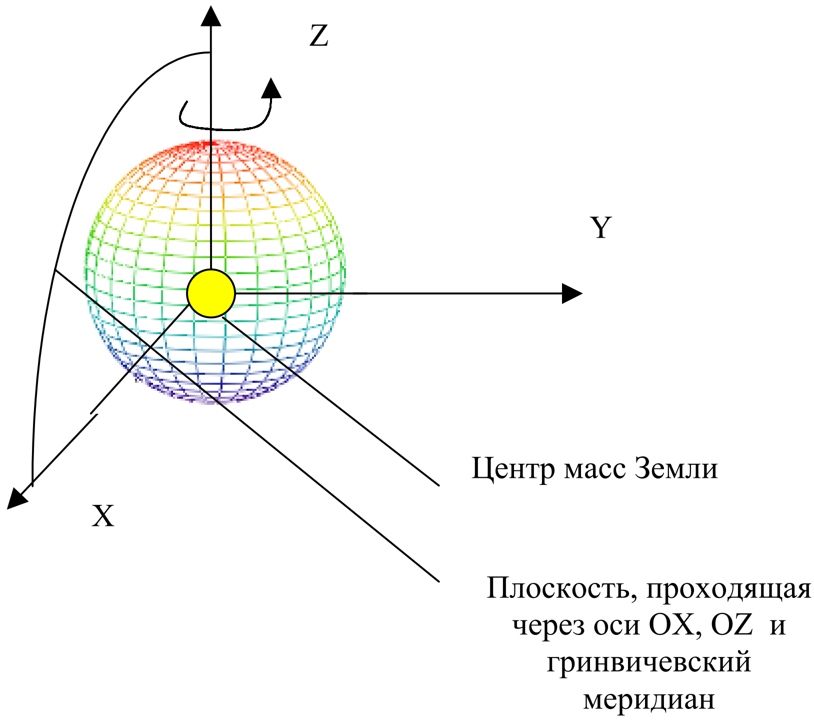

Рис. 3.8

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = [\psi] \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \qquad \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} = [\psi] \times \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} + \omega \cdot \begin{bmatrix} -Y \\ X \\ 0 \end{bmatrix}, \qquad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = [\psi]^{-1} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \qquad \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = [\psi]^{-1} \times \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} + \omega \cdot \begin{bmatrix} y \\ -x \\ 0 \end{bmatrix}, \qquad (3.2)$$

где:

$$[\psi] = \begin{bmatrix} cos(S) & -sin(S) & 0 \\ sin(S) & cos(S) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$S = S_0 + \omega\,(T - t_\lambda)$;

S_0 –гринвическое звездное время;

ω - скорость вращения Земли;

X, Y, Z – координаты инерциальной системы;

x, y, z - координаты гринвической системы;

V_X, V_Y, V_Z – скорости вдоль соответствующих осей в инерциальной системе;

v_x, v_y, v_z - скорости вдоль соответствующих осей в гринвической системе

Рассмотрим понятие геодезической основы.

Международным геодезическим обществом приняты следующие определения:

Геодезическая система отсчета (GRS- Geodetic reference system): концепция привязанной к Земле прямоугольной системы координат (OX, OУ,OZ).

Геодезическая опорная система (GRF- Geodetic reference frame): практическая реализация геодезической системы отсчета, полученная путем наблюдений.

Разница между системой отсчета и опорной системой в том, что первая это теоретическое определение, а вторая практическая реализация первой, полученная с помощью наблюдений и измерений с соответствующими погрешностями.

Понятие глобальной GRS совпадает с определением данным выше.

У местной GRS – начало координат и направления осей достаточно произвольны.

Геодезическая основа тесно связана с формой поверхности Земли.

Как известно на ранней стадии считалось, что Земля имеет форму шара. Позднее в качестве фигуры Земли был принят эллипсоид. Это геометрические приближения. Вообще же форма Земли есть геоид - т.е. динамическая уровненная поверхность эквипотенциальная гравитационному полю Земли. Определение формы геоида является одной из основных задач геодезии. Форма геоида прежде всего важна для определения высоты.

Геоид определятся, как идеализированная поверхность океана, проходящая под материками. Эта поверхность совпадает с двумя третями поверхности Земли.

На практике форму геоида определяют по наблюдениям за «средним уровнем моря». При этом имеет место отклонения от идеализируемого геоида, достигающего до 2 м, связанные с ветрами, изменением состава воды.

Не смотря на то, что Земля как геоид хорошо изучена и продолжает изучаться и исследоваться, поверхность Земли аппроксимируется эллипсоидом. На рис. 3. 9 изображена такая аппроксимация.

Высота над поверхностью геоида называется «ортометрической высотой».

Ортометрическая высота H определяется формулой

$H=h-N$, где

h – высота над эллипсоидом;

N – высота волны геоида.

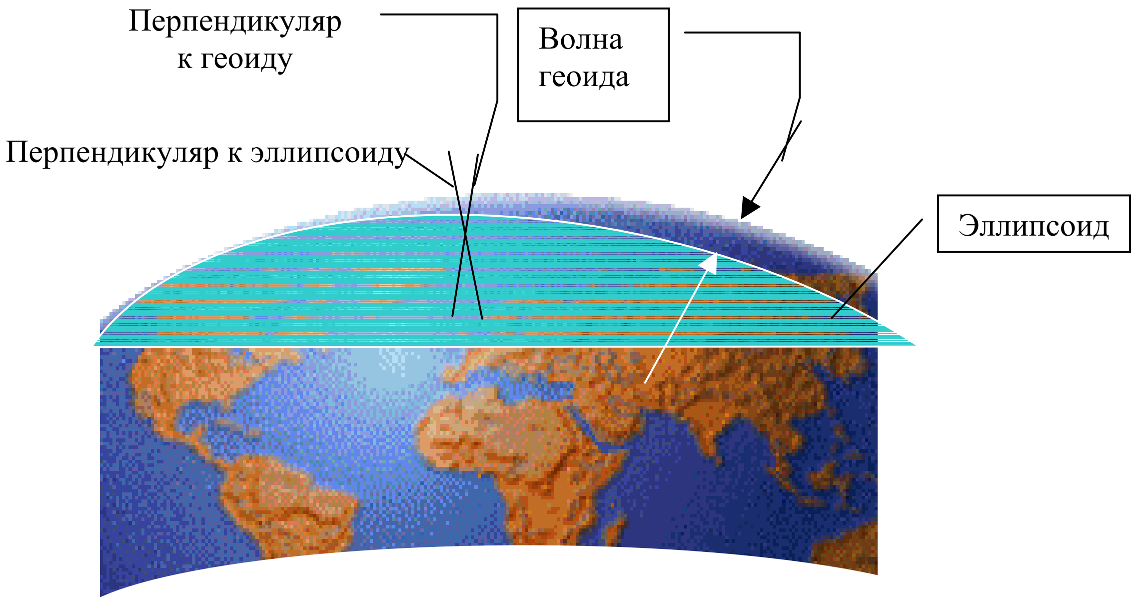

Рис. 3.9.Земля как геоид

Поскольку геоид математически описать достаточно сложно, то поверхность Земли аппроксимируют эллипсоидом. Эллипсоид получают при вращении меридианного эллипса вокруг его малой оси. Форма эллипсоида описывается геометрическими параметрами:

большой полуосью *a*,

малой полуосью *b*,

вместо *b* используют также параметр $f = \dfrac{(a-b)}{a}$, называемый сплюснутостью.

Рассмотрим эллипсоидные географические координаты и пространственную эллипсоидную систему координат.

Эллипсоидальных географические координаты (рис.3. 10) определяют следующим образом: начало системы координат «О» – центр массы Земли; географическая (геодезическая) широта *Ф* - угол в меридианной плоскости между экваториальной плоскостью ХОУ и нормалью к поверхности эллипсоида в точке Р; географическая (геодезическая) долгота λ - угол в экваториальной плоскости между гринвическим меридианом и плоскостью меридиана, проходящий через точку Р.

Пространственная эллипсоидная система координат (рис. 3. 11) характеризуется тем, что эллипсоидная географическая система координат дополняется параметрами, обеспечивающими определение высоты h над эллипсоидом. При этом любая точка в пространстве задается координатами Ф, λ, h и формой эллипсоида (*a, f)*.

Высота h над эллипсоидом измеряется вдоль нормали к его поверхности.

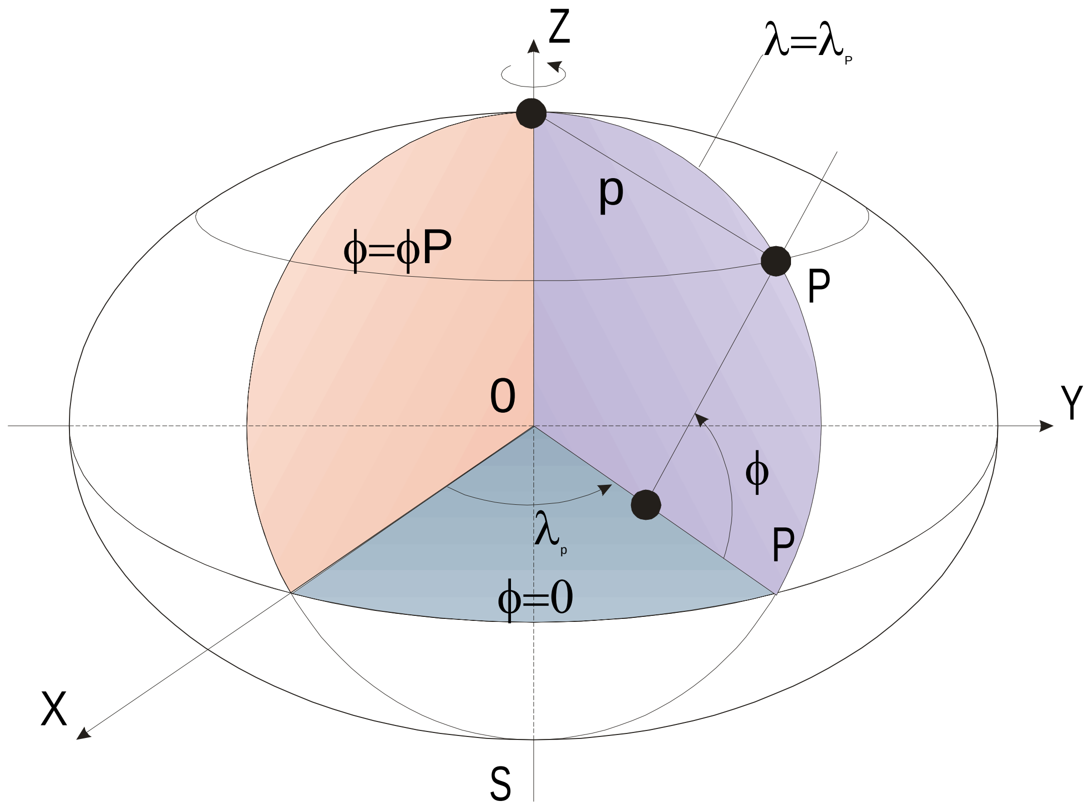

Рис. 3.10.

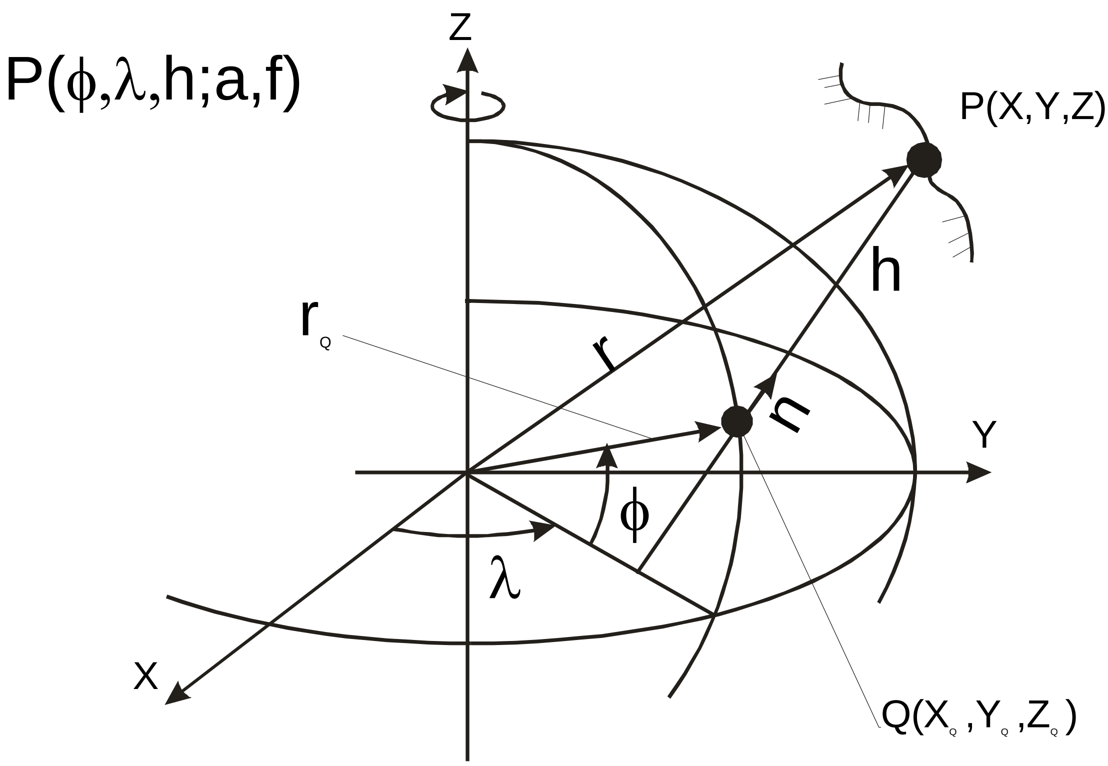

Рис. 3.11.

Таким образом, мы имеем общее представление о системах координат, геодезических основах, опорных геодезических основах.

В мире существует достаточно большое количество опорных геодезических основ. Каждая геодезическая основа была поучена путем подгонки математической модели Земли в конкретном регионе под истинную форму геоида с целью сведения до минимума расхождений между выбранной моделью (эллипсоидом) и геоидом.

Проблемы в области аэронавигации, связанные с применением различных геодезических основ возникли в начале 1970 годов при создании радиолокационных систем слежения для Маастрихтского центра верхнего воздушного пространства.

Данные с радиолокаторов Бельгии, Германии и Нидерландов обрабатывались для получения линии пути воздушных судов. Было установлено, что расхождения между радиолокационными измерениями являются результатами использования несовместимых координат различных геодезических основ.

В таблице 3.1, для примера, приведены расхождения в значениях широты и долготы между координатами национальных систем и всемирной геодезической системой 72 года.

Таблица 3.1

	Широта (секунды)	Долгота (секунды)
Англия	- 1,9	7,4
Германия	5,8	5
Франция	0,2	- 4
Бельгия	4,3	3
Нидерланды	2	- 3,7

Зная, что одна угловая секунда на поверхности Земли соответствует, примерно, 31 метру можно заключить ,что расхождение при применении различных геодезических основ может достигать сотен метров.

Следует отметить также, что у большинства местных геодезических основ центр начала координат не совпадает с центром масс Земли.

Насколько существенным является этот факт при применении спутниковых навигационных систем можно судить потому, что данные выдаваемые этими системами определяются относительно центра масс Земли в силу того, что орбиты спутников также рассчитываются относительно центра тяжести Земли. То же можно сказать и о гироскопических системах.

Все выше изложенное говорит о целесообразности применения единой системы координат. В настоящее время такой системой для гражданской авиации является WGS –84.

31 марта 1989 года на 13 заседании 126 сессии Совет Международной организации гражданской авиации утвердил рекомендацию 3.211 четвертого совещания специального комитета по будущим аэронавигационным системам (FANS/4) в следующей редакции:

ИКАО рекомендует принять в качестве стандартной геодезическую систему WGS – 84 и разработать материал для обеспечения быстрого и повсеместного ее внедрения.

Глобальная система координат WGS – 84 определена следующим образом.

Начало координат *0* расположении в центре массы Земли;

ось *0X* – пересечение плоскости исходного меридиана WGS – 84 и плоскости экватора;

ось 0Z – направлена на Северный полюс Земли;

ось 0У – дополняет систему до правой.

Исходный меридиан WGS – 84 совпадает с нулевым меридианом определенным Международным бюро времени (BIN).

Кроме того, основными параметрами WGS – 84 является данные приведенные в таблице 3.2

Таблица 3.2

Параметры	Обозначения	Значение WGS – 84
Большая полуось эллипсоида	a	6378137 м
Сплюснутость	f	1/298,257223563
Угловая скорость вращения Земли	ω	$7{,}292115 \cdot 10^{-5}$ рад/сек.
Геоцентрическая гравитационная постоянная с учетом массы атмосферы Земли	GM	398600,5 км^3/сек^2
Нормализованный коэффициент второй зональной гармоники гравитационного потенциала	$\overline{C_{20}}$	$- 484{,}16685 \cdot 10^{-6}$

Другие параметры WGS – 84 приводятся в соответствующих разделах.

3.3. Время

В спутниковой радионавигации время играет исключительно важное значение, поскольку основные навигационные определения производятся по формулам, в которых параметр времени присутствует многократно. Это прежде всего время распространения электромагнитного сигнала от навигационного спутника до потребителя, время «включения» часов спутника, время синхронизации данных передаваемых со спутника, время прохождения электромагнитного сигнала через атмосферу, влияние на время релятивистских эффектов, совмещение шкал времени спутника и потребителя и многое другое.

В 1884г. в Вашингтоне была созвана Международная конференция по введению единого поясного времени и единого начального меридиана. Участники конференции условились считать начальным (нулевым) меридиан проходящий через Гринвическую обсерваторию в пригороде Лондона. Местное среднее солнечное время Гринвического меридиана назвали ***всемирным или мировым временем***.. На конференции была установлена и так называемая "***линия перемены даты***", т.е. условная линия, на запад от которой календарная дата для всех часовых поясов восточной долготы будет больше на один день по сравнению со странами, расположенными в часовых поясах западной долготы. "***Линия перемены даты***" начинается у северного полюса на меридиане 180° и тянется до южного полюса той же долготы. Таим образом, нулевой меридиан, проходящий через Гринвическую обсерваторию и, как его продолжение, находящийся на противоположной части земного шара, меридиан 180°, делят земной шар на восточное и западное полушария [13].

За единицу измерения времени удобно принимать сутки – время одного обращения Земли вокруг своей оси. В астрономии существуют две единицы времени под названием сутки: звездные сутки и солнечные сутки. ***Звездные сутки*** определяются интервалом времени между двумя прохождениями нулевого меридиана через точку весеннего равноденствия **γ. *Солнечные сутки*** определяются интервалом времени между двумя прохождениями нулевого меридиана через центр видимого Солнца.

Звездные сутки определяются также периодом обращения Земли вокруг своей оси по отношению к любой звезде [13]. Но так как звезды имеют свое собственное и к тому же очень сложное движение, то условились начало звездных суток $0^ч$ отсчитывать от момента верхней кульминации точки весеннего равноденствия γ, которая находится в созвездии Овна (главная звезда Овна – Хамаль -навигационная). За продолжительность звездных суток принимают промежуток времени между двумя последними верхними кульминациями точки весеннего равноденствия, находящейся на том же меридиане. Вследствие явлений прецессии и нутации взаимное расположение небесного экватора и эклиптики непрерывно изменяется, а, значит, что соответствующим образом меняется и расположение на эклиптике точки весеннего равноденствия. Время от момента верхней кульминации точки весеннего равноденствия до любого другого ее положения, выраженное в долях звездных суток, называется *звездным временем* и для текущего момента t определяется выражением [14]

$S_{зв}=t+\alpha$,

где:

t - текущий момент времени;

α - видимое прямое восхождение небесного тела (угол между направлением из центра небесной сферы на точку весеннего равноденствия и плоскостью круга склонения данного тела, отсчитываемый в направлении против часовой стрелки, если смотреть со стороны северного полюса мира).

В зависимости от выбора точки весеннего равноденствия различают *истинное*, *квазиистинное* и *среднее* звездное время [15]. В первом случае рассматривается *истинная* точка весеннего равноденствия $\gamma_{\text{ист}}$ **,** обладающая прецессионным и нутационным движением. Она смещается в плоскости эклиптики со скоростью 50",25… в год вследствие общей прецессии по долготе и одновременно периодически колеблется из-за нутации. Во втором случае - *квазиистинное* звездное время, из нутации исключена ее короткопериодическая часть, наконец, исключение всей нутации дает точку весеннего равноденствия $\gamma_{\text{сред}}$**,** определяющую *среднее* звездное время. Среднее звездное время отличается от истинного на величину полной нутации по прямому восхождению (N_α), публикуемую в астрономическом ежегоднике [16]:

$$N_\alpha = (\Delta\Psi + d\Psi)\cdot cos(\varepsilon),$$

где:

$\Delta\Psi$ – долгопериодическая часть нутации по долготе;

$d\Psi$ - короткопериодическая часть нутации по долготе;

ε - истинный наклон эклиптики к экватору

Таким образом,

$$S_{ист} = S_{сред} + N_\alpha .$$

Местное звездное время $\boldsymbol{s}$ равно видимому прямому восхождению звезды α в момент ее верхней кульминации

$\boldsymbol{s = \alpha}$ при $\boldsymbol{t=0^h}$;

или в момент нижней кульминации

$\boldsymbol{s = \alpha + 12^h}$ при $\boldsymbol{t=12^h}$ **.**

Звездные сутки подразделяются на 24 звездных часа, каждый из которых содержит 60 звездных минут и 3600 звездных секунд. Таким образом, одни звездные сутки содержат 1440 звездных минут или 86400 звездных секунд. Вследствие неравномерности суточного вращения Земли, продолжительность звездных суток, а значит и звездной секунды неодинакова.

Условились отсчитывать звездное время относительно гринвического меридиана. Местное звездное время гринвического меридиана называется гринвическим звездным временем $S_{Гр}$ или ***всемирным***; тогда местное звездное время s в любой точке поверхности Земли, лежащей под долготой λ от Гринвича, связано соотношением:

$$s=S_{Гр} + \lambda^h \quad , \tag{3.3}$$

или

всемирное время = местное среднее время - λ^h,

гринвическое звездное время = местное звездное время - λ^h,

где долгота места наблюдения λ^h считается положительной к востоку от Гринвича и отрицательной к западу.

Из-за прецессии средние звездные сутки на 0.0084сек короче действительного периода суточного вращения Земли вокруг своей оси а Солнце, двигаясь по эклиптике, попадает в точку весеннего равноденствия раньше, чем оно попадает в ту же самую точку относительно звезд.

В повседневной жизни мы пользуемся солнечным временем [13]. Есть два понятия солнечного времени: истинное и среднее. Истинное солнечное время описывается более сложными соотношениями, чем звездного, так как Солнце не сохраняет неизменного положения относительно звезд. Истинные солнечные сутки длиннее звездных на 3мин 56сек. За точку, определяющую своим движением течение истинного Солнечного времени, принимается центр диска Солнца.

Истинные солнечные сутки есть промежуток времени между двумя последовательными одноименными (верхними или нижними) кульминациями центра диска Солнца на одном и том же меридиане. За начало истинных Солнечных суток на любом меридиане принимают момент нижней кульминации Солнца, т.е. полночь.

Время от момента нижней кульминации истинного Солнца (истинная полночь) до любого другого его положения, выраженное в долях истинных солнечных суток, называется ***истинным солнечным временем*** $m_{\odot}$ [14]

$$m_{\odot} = \boldsymbol{t}_{\odot} + 12^h \quad . \tag{3.4}$$

Воображаемая точка, равномерно движущаяся по небесному экватору так, что в каждый момент $\boldsymbol{T}$ ее прямое восхождение α равно средней астрономической долготе $\boldsymbol{l}_{\odot}$ истинного Солнца, называется *средним экваториальным солнцем* [9].

Разность часовых углов *среднего экваториального солнца* $\boldsymbol{t}_{\text{ср}}$ и истинного Солнца $\boldsymbol{t}_{\odot}$ называется уравнением времени $\boldsymbol{E_{вр.}}$ Приближенно величина уравнения времени (с ошибкой $0^{м}, 1$-$0^{м},2$) вычисляется по формуле:

$$\boldsymbol{E_{вр}} = \boldsymbol{t}_{\text{ср}} - \boldsymbol{t}_{\odot} = 7^{м},7 \sin(\boldsymbol{l}_{\odot} + 78°) - 9^{м},5 \sin(2\, \boldsymbol{l}_{\odot}) \quad . \qquad (3.5)$$

Истинные Солнечные сутки, как и звездные непостоянны. Это объясняется тем, что Солнце движется среди звезд не по небесному экватору, а по эклиптике. Земля, в свою очередь, обращается вокруг Солнца не по кругу, а по эллипсу, поэтому движение Солнца кажется нам с Земли неравномерным. Зимой истинные солнечные сутки больше, чем летом. Например, в конце декабря они равны 24ч 4мин 27сек, а в середине сентября 24ч 3мин 36сек. За среднюю единицу *средних солнечных суток* принято считать $24^{ч}$ $3^{мин}$ $56.55536049^{сек}$ звездного времени [13]. Так как истинные солнечные сутки неодинаковы по длине, то и остальные единицы этого времени также несколько изменяются. Поэтому вместо истинных солнечных суток употребляются сутки, равные средней длине истинных суток в течении года. Такие сутки называются средними солнечными сутками, а время, измеряемое долями этих суток, - средним солнечным временем. ***Среднее солнечное время***, подобно истинному солнечному времени, представляет собой часовой угол некоторой точки. Точка близка к Солнцу, но не совпадает с ним и движется более просто. Такая точка называется средним Солнцем. Воображаемое Солнце совершает по небу полное обращение, как и действительное Солнце, за один тропический год (промежуток времени за который центр истинного Солнца дважды проходит точку весеннего равноденствия), но движется не по эклиптике, а по экватору, и движение его равномерно.

1 средние солнечные сутки = 1,002738 звездных суток =$24^{ч}3^{м}56^{с},5534$ *звездного времени;*

1 звездные сутки = 0.997270 средних солнечных суток = 23ч56м$4^{с},0905$ *среднего солнечного времени;*

1 час среднего солнечного времени = $1^{ч}00^{м}09^{с},8565$ *звездного времени;*

1 час звездного времени = $59^{м}50^{с},1704$ *среднего солнечного времени.*

3.4. Системы всемирного времени

В Астрономическом ежегоднике СССР, начиная с выпуска 1986г., принята стандартная эпоха J2000.0 в соответствии с резолюцией МАС о введении новой стандартной эпохи, в которой рекомендуется:

1. Новой стандартной эпохой (обозначаемой J2000.0) считать дату 2000г., январь 1.5, совпадающую с юлианской датой JD 2 451 545.0; новое стандартное равновесие соответствует этому моменту.
2. Единицей времени, используемой в фундаментальных формулах учета прецессии, считать юлианское столетие в 36525 суток.
3. Эпохи (моменты) начала года должны отличаться от стандартной эпохи на величины, кратные юлианскому году, равному 365.25 суток.

Новая стандартная эпоха отстоит точно на одно юлианское столетие от фундаментальной эпохи 1900г., январь 0,12^h ET, принятой ранее в планетных теориях Ньюкома. Любая эпоха может быть определена в новой системе как

J[2000.0 + (JD – 2 451 545.0)/365.25],

где JD означает заданную юлианскую дату. При необходимости использования прежней, бесселевой системы, основанной на тропическом годе эпохи 1900.0 как единице измерения времени, имеем для той же заданной юлианской даты:

B[1900.0 + (JD – 2 415 020.313 52) / 365.242 198 781],

где единицей измерения служит продолжительность тропического года (365.242198781) в эпоху B1900.0 (2 415 020.313 52).

Всемирное время – это среднее солнечное время на *гринвическом* меридиане.

Основные определения[16]:

1. *Всемирное время* (среднее гринвическое время) измеряется часовым углом среднего Солнца относительно гринвического меридиана, увеличенным на 12^h.
2. *Земное динамическое время* измеряется часовым углом динамического среднего Солнца относительно эфемеридного меридиана, увеличенным на 12^h.
3. *Местное среднее время* измеряется часовым углом среднего Солнца относительно местного меридиана, увеличенным на 12^h.
4. *Гринвическое звездное время* измеряется часовым углом точки весеннего равноденствия относительно гринвического меридиана.
5. *Динамическое звездное время* измеряется часовым углом точки весеннего равноденствия относительно эфемеридного меридиана.

6. *Местное звездное время* измеряется часовым углом точки весеннего равноденствия относительно местного меридиана.

Соответствующая система измерения времени – система всемирного времени – обозначается UT (Universal Time).

В каталогах указывают гринвическое среднее звездное время в *0^h всемирного времени*.

В настоящее время различают следующие системы *всемирного времени*:

UT0 – всемирное время, непосредственно получаемое из астрономических наблюдений суточных движений звезд, т.е. время на мгновенном гринвическом меридиане, положение которого определено мгновенным положением полюсов Земли;

UT1 - всемирное время *среднего* гринвического меридиана, определяемого *средними* положениями полюсов Земли. Оно получается исправлением значений UT0 при помощи поправки $\Delta\lambda$ из-за движения географических полюсов:

$$UT1 = UT0 + \Delta\lambda \quad ; \tag{3.6}$$

Поправка $\Delta\lambda$ зависит от координат мгновенного полюса x_p, y_p, отсчитываемых относительно общепринятого Международного условного начала (CIO, МУН), и имеет вид:

$$\Delta\lambda = -(x_p \cdot sin\,\lambda + y_p \cdot cos\,\lambda) \cdot tg\varphi \quad , \tag{3.7}$$

где:

λ и φ - координаты места наблюдения.

UT2, UT1 - всемирное время *среднего* гринвического меридиана, освобожденное от влияния части сезонных периодических вариаций угловой скорости вращения Земли прибавлением к значениям UT1 соответствующей сезонной поправки ΔT_s,

$$UT2 = UT1 + \Delta T_s = UT0 + \Delta\lambda + \Delta T_s \tag{3.8}$$

3.5. Алгоритм р**асчета звездного времени в 0^h всемирного времени [x7]**

Гринвическое среднее звездное время S_0^m. Звездное время и всемирное (солнечное) время совпадает только 1 раз в году – в день осеннего солнцестояния, когда траектория движения Солнца пересекает небесный экватор (*1 звездные сутки = 0.997270 средних солнечных суток).* Это происходит 22 сентября. До Нового года еще должен пройти 101 день. За среднюю единицу *средних солнечных суток* принято считать $24^ч\ 3^{мин}\ 56.55536049^{сек}$

звездного времени. [13]. То есть *средние солнечные сутки на* $3^{мин}$ $56.55536049^{сек}$ длиннее звездных суток.

Переведем в секунды: $3^{мин}$ $56.555\,367\,908^{сек} = 236.555\,367\,908^{сек}$.

Соответственно, *юлианское столетие (36525 суток)* больше звездного на

$236.555\,367\,908^{сек} \bullet 36525 = 8\,640\,184^{s}.812\,866^{\,сек}$

За 102 дня накопится $6^{h}42^{m}08^{s}.64676998$, а с учетом поправок получается первый коэффициент в формулах (3. 7, 3. 8).

В соответствии с резолюциями XVII и XVIII Генеральных ассамблей МАС (Монреаль, 1979 г., Патры, 1982 г.) ***гринвическое среднее звездное время*** $\boldsymbol{S_0^m}$ ***в*** $\boldsymbol{0^h}$ ***UT1*** определяется следующей формулой:

$$S_0^m = 6^h41^m50^s.548\,41 + 236.555\,367\,908\,\boldsymbol{d} + 0^s.093\,104\,\boldsymbol{T^2} - 6^s.2 \cdot 10^{-6}\,\boldsymbol{T^3}, \qquad (3.9)$$

где:

d - число суток, протекших от эпохи J2000.0=JD2451544.0 , январь 1, 12h UT1 до гринической полуночи рассматриваемой даты;

T = d / 36525 – промежуток времени ***d***, выраженный в юлианских столетиях по 36525 суток в системе всемирного времени UT1 от эпохи 2000, январь 1, 12h UT1 (JD 2 451 544.0);

$6^h41^m50^s.548\,41$ следует понимать как 6 часов, 41 минута, 50.548 41 секунд.

Следует учитывать, что звездные сутки равны 24 часа, а средние солнечные сутки на 236.555 367 908 сек. длиннее звездных суток. Звездные сутки определяются периодом вращения Земли вкруг своей оси по отношению к точке весеннего равноденствия – звезде Хамаль в созвездии Овен. За начало звездных суток (0 часов) принят момент верхней кульминации точки весеннего равноденствия на гриническом меридиане. А за протяженность звездных суток принимают промежуток времени между двумя последовательными верхними кульминациями точки весеннего равноденствия на гриническом меридиане.

Выражение (3. 9), исключая ***d***, можно записать в таком виде:

$$S_0^m = 6^h41^m50^s.548\,41 + 8\,640\,184^s.812\,866\,\boldsymbol{T} + 0^s.093\,104\,\boldsymbol{T^2} - 6^s.2 \cdot 10^{-6}\,\boldsymbol{T^3} \quad . \qquad 3.10)$$

Гриническое ***истинное звездное время*** $\boldsymbol{S_0}$ в 0^h всемирного времени UT1:

$$\boldsymbol{S_0 = S_0^m} + \textit{нутация в прямом восхождении} \quad . \qquad (3.11)$$

В соответствии с установившейся практикой вся совокупность нутационных членов делится на долгопериодическую часть $\boldsymbol{\Delta\Psi}$, $\Delta\varepsilon$, не зависящую от долготы Луны (таблица 3. 3), и короткопериодическую часть $d\Psi$, $d\varepsilon$ (таблица 3. 4). К короткопериодической части $d\Psi$, $d\varepsilon$ относятся все члены, периоды аргументов которых не превосходят 35 суток.

Нутация в прямом восхождении (Nu), называемая также ***уравнением равноденствий***, вычисляется на основе Теории нутаций МАС (1980г.) (МАС – международный астрономический союз 1980г.. USNO Circ. N 163. Washington, 1981, p. A4-A6). ([16], стр. 636) путем умножения нутации по долготе на $\cos(\varepsilon)/15$:

$$Nu = (\Delta\Psi + d\Psi)\cdot\cos(\varepsilon)/15 \quad , \qquad (3.12)$$

где:

$\Delta\Psi$. –долгопериодическая часть нутации по долготе;

$d\Psi$ -короткопериодическая часть нутации по долготе.

ε - наклон эклиптики к экватору.

Следует отметить, что в [17] приведено уточненное ***уравнение равноденствий*** *(нутация в прямом восхождении)****:***

$$Nu = (\Delta\Psi + d\Psi)\cdot\cos(\varepsilon_o) + 0.^s00264\cdot\sin(\Omega) + 0.^s000063\cdot\sin(2\Omega) \quad , (3.13)$$

где:

ε_o - средний наклон эклиптики к экватору;

Ω - средняя долгота восходящего узла орбиты Луны на эклиптике.

В справочниках [16, 17] приведены значения истинного и среднего звездного времени на $\mathbf{0^h}$ всемирного времени каждых суток, а также нутация в прямом восхождении, которая состоит из долгопериодической нутации в прямом восхождении, при вычислении которой учитываются члены, не зависящие от долготы Луны, и короткопериодической нутации в прямом восхождении, объединяющая члены, зависящие от долготы Луны. Главный член первой группы имеет период около 18 лет, тогда как период главного члена второй группы – около 15 суток. Величина долгопериодической нутации колеблется в пределах $\pm 1^s.2$, а короткопериодической нутации - в пределах $\pm 0^s.020$.

Так как гелиоцентрическая орбита Земли отличается от круговой ([15], стр 87), то расстояние Земли от Солнца периодически изменяется и, следовательно, меняется влияние Солнца на движения среднего полюса мира и среднего экватора. Аналогичное влияние обусловлено эллиптичностью геоцентрической орбиты Луны. Таким образом, на общую прецессию среднего полюса мира налагается квазипериодическое движение, называемое астрономической нутацией по долготе, $\Delta\Psi$.

Главный член астрономической нутации обусловлен несовпадением плоскости орбиты Луны с плоскостью эклиптики и возвратном движением линии узлов лунной орбиты на эклиптике. Поэтому наблюдаются периодические изменения наклона эклиптики к экватору, в совокупности называемые нутацией наклона $\Delta\varepsilon$.

Разложения нутации по долготе $\Delta\Psi$ и в наклоне $\Delta\varepsilon$, используемые при вычислении истинного звездного времени, основаны на теории вращения Земли, разработанной в 50-х годах Э. Вулардом и изложены в книге [18].

Для вычисления нутации по долготе $\Delta\Psi$ и в наклоне $\Delta\varepsilon$ принят метод разложения в ряд на основе теории нутаций МАС. Сумма всех членов ряда с ***sin*** дает нутацию по долготе $\Delta\Psi$, а с ***cos*** - нутацию. в наклоне $\Delta\varepsilon$.

В таблицах 3. 3 и 3. 4 приводятся значения коэффициентов, используемых в формулах расчета нутации [11-14].

Сумма всех членов соответствующих столбцов таблицы 3. 3 долгопериодической нутации дает нутацию по долготе $\Delta\Psi$:

$$\Delta\Psi = \sum_{№=1}^{№=30}((A+B\cdot T)\cdot sin(i\cdot l+i'\cdot l'+j\cdot F+k\cdot D+n\cdot\Omega) \quad . \qquad (3.14)$$

Сумма всех членов соответствующих столбцов таблицы 3. 4 долгопериодической нутации дает нутацию наклона эклиптики $\Delta\varepsilon$**:**

$$\Delta\varepsilon = \sum_{№=1}^{№=30}((A+B\cdot T)\cdot cos(i\cdot l+i'\cdot l'+j\cdot F+k\cdot D+n\cdot\Omega) \quad . \qquad (3.15)$$

Сумма всех членов соответствующих столбцов таблицы 3. 4 короткопериодической нутации дает нутацию по долготе $d\Psi$:

$$d\Psi = \sum_{№=31}^{№=106}((A+B\cdot T)\cdot sin(i\cdot l+i'\cdot l'+j\cdot F+k\cdot D+n\cdot\Omega) \quad . \qquad (3.16)$$

Сумма всех членов соответствующих столбцов таблицы 3. 4 короткопериодической нутации дает нутацию наклона эклиптики $d\varepsilon$**:**

$$d\varepsilon = \sum_{№=31}^{№=106}((A+B\cdot T)\cdot \cos(i\cdot l+i'\cdot l'+j\cdot F+k\cdot D+n\cdot\Omega) \quad . \qquad (3.17)$$

Нутация по долготе:

$$Nu(\psi) = (\Delta\psi + d\psi) \quad . \qquad (3.18)$$

Нутация наклона эклиптики:

$$Nu(\varepsilon) = (\Delta\varepsilon + d\varepsilon) \quad , \qquad (3.19)$$

где:

№ - соответствует номеру строки в таблицах 1 и 2 разложения долгопериодической и короткопериодической нутации;

A, ***B***– числовые коэффициенты в секундах дуги взяты из таблиц 1 и 2 [16, стр. 637, 638];

i, i', j, k, n целые числа, взяты из таблиц 1 и 2[16, стр. 637, 638];

T – время, отсчитывается от стандартной эпохи 2000 г. в юлианских столетиях по 36525 суток;

l, l', F, D, Ω - фундаментальные аргументы теории движения Луны, построенной Брауном, которые зависят от параметров движения Луны и Солнца [14, 16].

Заметим, что при расчетах полученные по вышеприведенным формулам суммы необходимо преобразовать из минут в радианы, для чего умножить на коэффициент:

$$koef = \pi / (180*3600):$$

$$\cos((i\cdot l + i'\cdot l' + j\cdot F + k\cdot D + n\cdot \Omega)\cdot \pi / (180*3600)) \quad ; \qquad (3.20)$$

Разложения фундаментальных аргументов ***L, L', F, D, Ω*** имеют следующий вид (USNO Circ. N 163. Washington, 1981, p. A3). ([16], стр. 637):

$$\left.\begin{aligned}
l &= 485\,866''.733 + (1325r + 715\,922''.633)\cdot T + 31''.310\cdot T^2 + 0''.064\cdot T^3 \\
l' &= 1\,287\,099''.804 + (99r + 1\,292\,581''.224)\cdot T - 0''.577\cdot T^2 - 0''.012\cdot T^3 \\
F &= 335\,778''.877 + (1342r + 295\,263''.137)\cdot T - 13''.257\cdot T^2 + 0''.011\cdot T^3 \\
D &= 1\,072\,261''.307 + (1236r + 1\,105\,601''.328)\cdot T - 6''.891\cdot T^2 + 0''.019\cdot T^3 \\
\Omega &= 450\,160''.280 - (5r + 482\,890''.539)\cdot T + 7''.455\cdot T^2 + 0''.008\cdot T^3
\end{aligned}\right\} \qquad (3.21)$$

где:

$r = 1\ 296\ 000''(360°)$;

$l = (□ - Г')$ – средняя аномалия луны;

$l' = (L - Г)$ - средняя аномалия Солнца;

$F = (□ - \Omega)$ - средний аргумент широты Луны;

$D = (□ - L)$ – средняя элонгация (разность средних долгот) Луны и Солнца;

Ω - средняя долгота восходящего узла орбиты Луны на эклиптике;

Средняя долгота Луны:

$□ = 758\ 939''.157 + (1336r + 1108\ 372''.598)\cdot T - 5''.802T^2 + 0.''019T^3$;

Средняя долгота перигея:

$Г' = 300\ 072''.424 + (11r + 392\ 449''.965)T - 37''.112\ T^2 - 0''.045T^3$;

Средняя долгота узла:

$\Omega = 450\ 160''.280 - (5r + 482\ 890''.539)\cdot T + 7''.455\cdot T^2 + 0''.008\cdot T^3$;

Средняя долгота Солнца:

$L = 1\ 009\ 677''.850 + (100r + 2771''.270)T + 1''.089\ T^2$;

Средняя долгота Солнечного перигея:

$Г = 1\ 018\ 578''.046 + 6\ 190''.046T + 1''.666T^2 + 0''.012T^3$;

Средний наклон эклиптики к экватору задан разложением:

$\varepsilon_0 = 84\ 381''.448 - 46''.8150T - 0''.000\ 59T^2 + 0''.001\ 813T^3$.

Таблица 3.3. **Долгопериодическая нутация** (разложение фундаментальных аргументов) [16]

№	Нутация по долготе ΔΨ. Коэффициенты при ***sin*** аргумента *10^4		Нутация наклона эклиптики Δε Коэффициенты при ***cos*** аргумента *10^4		Аргументы					Период (в сутках)	№
	A	*B*	*A*	*B*	*i*	*i'*	*j*	*k*	*n*		
1	-171996	-174.2*T	92025	8.9*T	0	0	0	0	1	6798.4	1
2	2062	0.2*T	-895	0.5*T	0	0	0	0	2	3399.2	2
3	46	0.0*T	-24	0.0*T	-2	0	2	0	1	1305.5	3
4	11	0.0*T	0	0.0*T	2	0	-2	0	0	1095.2	4
5	-3	0.0*T	1	0.0*T	-2	0	2	0	2	1615.7	5
6	-3	0.0*T	0	0.0*T	1	-1	0	-1	0	3232.9	6
7	-2	0.0*T	1	0.0*T	0	-2	2	-2	1	6786.3	7
8	1	0.0*T	0	0.0*T	2	0	-2	0	1	943.2	8
9	-13187	-1.6*T	5736	-3.1*T	0	0	2	-2	2	182.6	9
10	1426	-3.4*T	54	-0.1*T	0	1	0	0	0	365.3	10
11	-517	1.2*T	224	-0.6*T	0	1	2	-2	2	121.7	11
12	217	-0.5*T	-95	0.3*T	0	-1	2	-2	2	365.2	12
13	129	0.1*T	-70	0.0*T	0	0	2	-2	1	177.8	13
14	48	0.0*T	1	0.0*T	2	0	0	-2	0	205.9	14
15	-22	0.0*T	0	0.0*T	0	0	2	-2	0	173.3	15
16	17	-0.1*T	0	0.0*T	0	2	0	0	0	182.6	16
17	-15	0.0*T	9	0.0*T	0	1	0	0	1	386.0	17
18	-16	0.1*T	7	0.0*T	0	2	2	-2	2	91.3	18
19	-12	0.0*T	6	0.0*T	0	-1	0	0	1	346.6	19
20	-6	0.0*T	3	0.0*T	-2	0	0	2	1	199.8	20
21	-5	0.0*T	3	0.0*T	0	-1	2	-2	1	346.6	21
22	4	0.0*T	-2	0.0*T	2	0	0	-2	1	212.3	22
23	4	0.0*T	-2	0.0*T	0	1	2	-2	1	119.6	23
24	-4	0.0*T	0	0.0*T	1	0	0	-1	0	411.8	24
25	1	0.0*T	0	0.0*T	2	1	0	-2	0	131.7	25
26	1	0.0*T	0	0.0*T	0	0	-2	2	1	169.0	26
27	-1	0.0*T	0	0.0*T	0	1	-2	2	0	329.8	27
28	1	0.0*T	0	0.0*T	0	1	0	0	2	409.2	28
29	1	0.0*T	0	0.0*T	-1	0	0	1	1	388.3	29
30	-1	0.0*T	0	0.0*T	0	1	2	-2	0	117.5	30

Таблица 3.4.**Короткопериодическая нутация** (разложение фундаментальных аргументов) [16]

№	Нутация по долготе $d\Psi$. Коэффициенты при *sin* аргумента *10^4		Нутация наклона эклиптики $d\varepsilon$ Коэффициенты при *cos* аргумента *10^4		Аргументы					Период (в сутках)	№
	A	*B*	*A*	*B*	*i*	*i'*	*j*	*k*	*n*		
31	-2274	-0.2	977	-0.5	0	0	2	0	2	13.7	31
32	712	0.1	-7	0.0	1	0	0	0	0	27.6	32
33	-386	-0.4	200	0.0	0	0	2	0	1	13.6	33
34	-301	0.0	129	-0.1	1	0	2	0	2	9.1	34
35	-158	0.0	-1	0	1	0	0	-2	0	31.8	35
36	123	0.0	-53	0	-1	0	2	0	2	27.1	36
37	63	0.0	-2	0	0	0	0	2	0	14.8	37
38	63	0.1	-33	0	1	0	0	0	1	27.7	38
39	-58	-0.1	32	0	-1	0	0	0	1	27.4	39
40	-59	0.0	26	0	-1	0	2	2	2	9.6	40
41	-51	0.0	27	0	1	0	2	0	1	9.1	41
42	-38	0.0	16	0	0	0	2	2	2	7.1	42
43	29	0.0	-1	0	2	0	0	0	0	13.8	43
44	29	0.0	-12	0	1	0	2	-2	2	23.9	44
45	-31	0.0	13	0	2	0	2	0	2	6.9	45
46	26	0.0	-1	0	0	0	2	0	0	13.6	46
47	21	0.0	-10	0	-1	0	2	0	1	27.0	47
48	16	0.0	-8	0	-1	0	0	2	1	32.0	48
49	-13	0.0	7	0	1	0	0	-2	1	31.7	49
50	-10	0.0	5	0	-1	0	2	2	1	9.5	50
51	-7	0.0	0	0	1	1	0	-2	0	34.8	51
52	7	0.0	-3	0	0	1	2	0	2	13.2	52
53	-7	0.0	3	0	0	-1	2	0	2	14.2	53
54	-8	0.0	3	0	1	0	2	2	2	5.6	54
55	6	0.0	0	0	1	0	0	2	0	9.6	55
56	6	0.0	-3	0	2	0	2	-2	2	12.8	56
57	-6	0.0	3	0	0	0	0	2	1	14.8	57
58	-7	0.0	3	0	0	0	2	2	1	7.1	58
59	6	0.0	-3	0	1	0	2	-2	1	23.9	59
60	-5	0.0	3	0	0	0	0	-2	1	14.7	60
61	5	0.0	0	0	1	-1	0	0	0	29.8	61
62	-5	0.0	3	0	2	0	2	0	1	6.9	62
63	-4	0.0	0	0	0	1	0	-2	0	15.4	63
64	4	0.0	0	0	1	0	-2	0	0	26.9	64
65	-4	0.0	0	0	0	0	0	1	0	29.5	65
66	-3	0.0	0	0	1	1	0	0	0	25.6	66
67	3	0.0	0	0	1	0	2	0	0	9.1	67
68	-3	0.0	1	0	1	-1	2	0	2	9.4	68
69	-3	0.0	1	0	-1	-1	2	2	2	9.8	69
70	-2	0.0	1	0	-2	0	0	0	1	13.7	70

№	Нутация по долготе $d\Psi$. Коэффициенты при $\boldsymbol{sin}$ аргумента *10^4		Нутация наклона эклиптики $d\varepsilon$ Коэффициенты при $\boldsymbol{cos}$ аргумента *10^4		Аргументы					Период (в сутках)	№
	A	*B*	*A*	*B*	*i*	*i′*	*j*	*k*	*n*		
71	-3	0.0	1	0	3	0	2	0	2	5.5	71
72	-3	0.0	1	0	0	-1	2	2	2	7.2	72
73	2	0.0	-1	0	1	1	2	0	2	8.9	73
74	-2	0.0	1	0	-1	0	2	-2	1	32.6	74
75	2	0.0	-1	0	2	0	0	0	1	13.8	75
76	-2	0.0	1	0	1	0	0	0	2	27.8	76
77	2	0.0	0	0	3	0	0	0	0	9.2	77
78	2	0.0	-1	0	0	0	2	1	2	9.3	78
79	1	0.0	-1	0	-1	0	0	0	2	27.3	79
80	-1	0.0	0	0	1	0	0	-4	0	10.1	80
81	1	0.0	-1	0	-2	0	2	2	2	14.6	81
82	-2	0.0	1	0	-1	0	2	4	2	5.8	82
83	-1	0.0	0	0	2	0	0	-4	0	15.9	83
84	1	0.0	-1	0	1	1	2	-2	2	22.5	84
85	-1	0.0	1	0	1	0	2	2	1	5.6	85
86	-1	0.0	1	0	-2	0	2	4	2	7.3	86
87	1	0.0	0	0	-1	0	4	0	2	9.1	87
88	1	0.0	0	0	1	-1	0	-2	0	29.3	88
89	1	0.0	-1	0	2	0	2	-2	1	12.8	89
90	-1	0.0	0	0	2	0	2	2	2	4.7	90
91	-1	0.0	0	0	1	0	0	2	1	9.6	91
92	1	0.0	0	0	0	0	4	-2	2	12.7	92
93	1	0.0	0	0	3	0	2	-2	2	8.7	93
94	-1	0.0	0	0	1	0	2	-2	0	23.8	94
95	1	0.0	0	0	0	1	2	0	1	13.1	95
96	1	0.0	0	0	-1	-1	0	2	1	35.0	96
97	-1	0.0	0	0	0	0	-2	0	1	13.6	97
98	-1	0.0	0	0	0	0	2	-1	2	25.4	98
99	-1	0.0	0	0	0	1	0	2	0	14.2	99
100	-1	0.0	0	0	1	0	-2	-2	0	9.5	100
101	-1	0.0	0	0	0	-1	2	0	1	14.2	101
102	-1	0.0	0	0	1	1	0	-2	1	34.7	102
103	-1	0.0	0	0	1	0	-2	2	0	32.8	103
104	1	0.0	0	0	2	0	0	2	0	7.1	104
105	-1	0.0	0	0	0	0	2	4	2	4.8	105
106	1	0.0	0	00	0	1	0	1	0	27.3	106

3.6 Движение навигационного спутника по орбите

Движение планет и искусственных спутников в пространстве осуществляется по законам небесной механики.

Движение искусственных спутников можно оценивать и рассматривать как возмущенное, так и невозмущенное.

Невозмущенным движением называется движение под действием сил одного притягивающего центра.

Под возмущенным движением понимают движение спутника, на который помимо силы притяжения Земли, действуют другие возмущающие силы: воздушные поля, притяжения Земли из-за не сферичности и различной плотности, влияния центра масс других планет, сопротивление окружающей среды и прочее.

При невозмущенном движении навигационного спутника его траектория, называемая орбитой описывается уравнением в полярной системе координат r, γ

$$\mathrm{r} = \frac{p}{1 + e \cdot \cos\gamma}; \tag{3.22}$$

где:

r – радиус вектора,

e - эксцентриситет,

γ - полярный угол,

p - фокальный параметр.

Уравнение (3. 22) при

e = 0 есть окружность;

e при e =1-парабола;

e>1- гипербола;

e при 0<e<1- эллипс.

Навигационные спутники движутся по эллиптическим орбитам т.е. в (1) 0<e<1

Рассмотрим рис. 3. 12. На рисунке изображена эллиптическая траектория навигационного спутника. Траектория лежит в плоскости, проходящей через центр Земли. Центр масс Земли является одним из фокусов эллипса. Плоскость, в которой расположен эллипс называется орбитальной.

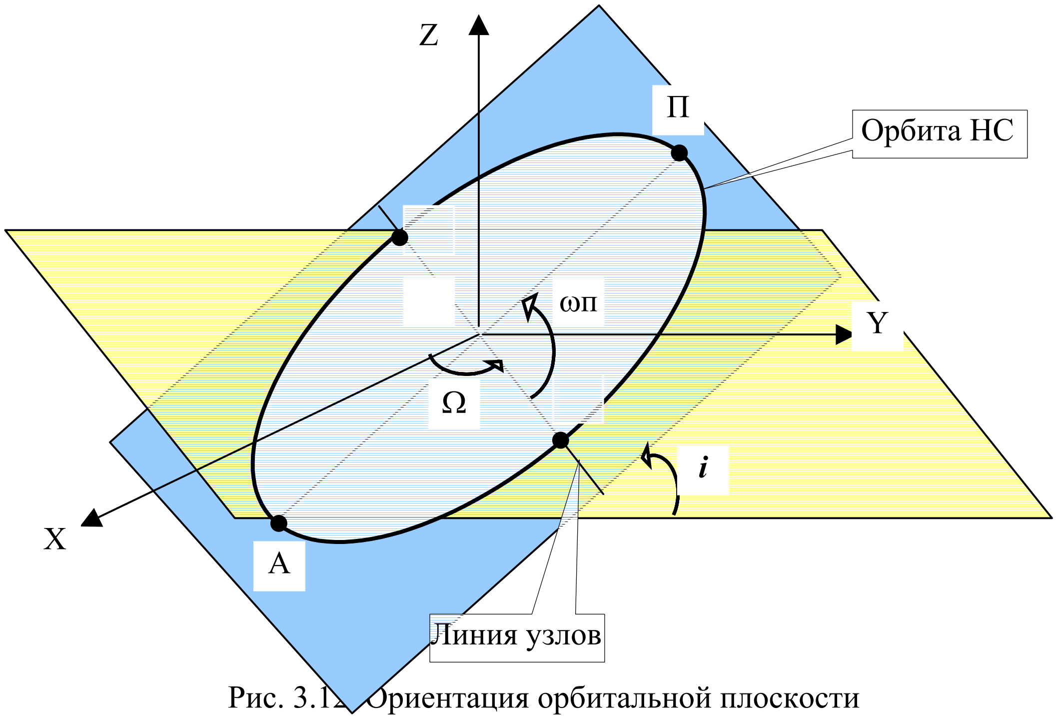

Рис. 3.12 Ориентация орбитальной плоскости

Ориентация орбитальной плоскости характеризуется ее расположением относительно плоскости экватора, восходящим и нисходящим узлами; долготой восходящего узла и наклонением орбиты.

Прямую, пересечения обеих плоскостей называют линией узлов. Узлами орбиты являются две точки ее пересечения с плоскостью экватора (U и D ссответственно). Точка U – восходящий узел, характеризует пересечение плоскости экватора при движении спутника из южной полусферы в северную; точка D - нисходящий узел, характеризует пересечение плоскостей экватора при движении спутника из северной полусферы в южную.

Долгота восходящего узла Ώ – отсчитывается в плоскости экватора от оси ОХ до линии (Ώ лежит в пределах 0,….360˚). Наклонение орбиты ί – двухгранный угол между экваториальной и орбитальной плоскостями (ί лежит в пределах 0,….180˚), отсчитываемый против часовой стрелки для наблюдателя , находящегося в точке восходящего узла.

Орбиту называю полярной при ί = 90˚ ; экваториальный при ί = 0˚; наклонной при 0< ί < 90˚.

Рассмотрим элементы орбиты спутника в орбитальной плоскости (рис. 3. 13).

В одном из фокусов эллипса (точка О) находится центр масс Земли. Прямая, проходящая через фокусы эллипса называется линией апсид. Точки пересечения линии апсид с эллипсом называют апсидами. Ближайшая апсида к центру масс Земли (точка П) называется перигей, удаленная- (А) апогей. Угол между линией узлов и линией направлений в сторону перигея называется углом перигея ($\omega_П$).

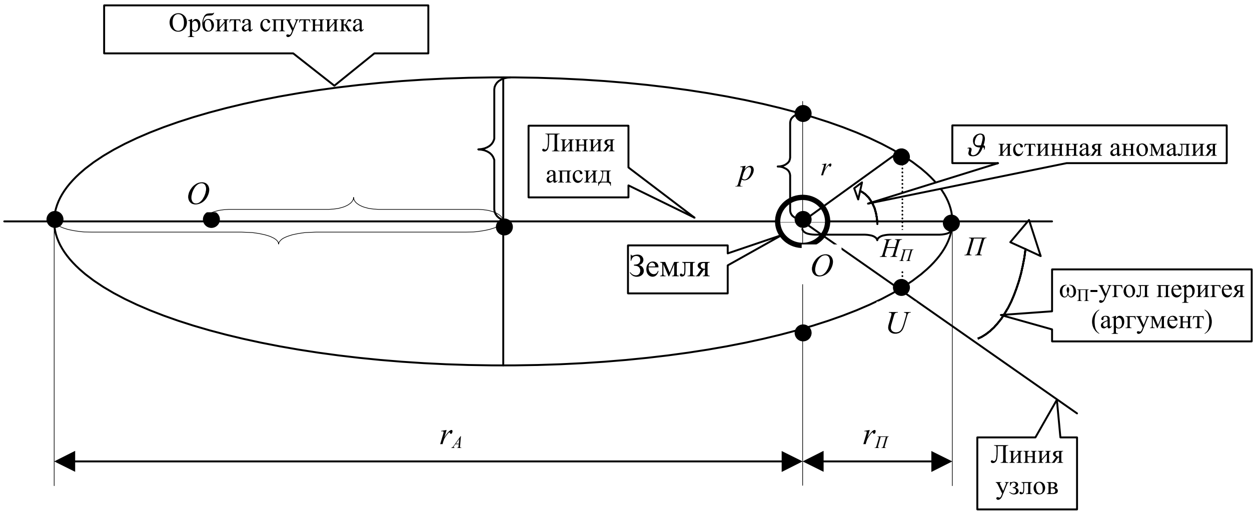

Рис. 3.13. Эллиптическая орбита спутника

Кроме того, эллиптические орбиты характеризуются следующими параметрами:

большой полуосью а;

высотой апогея r_A ;

высотой перигея $r_П$;

временем прохождения через перигей (t_n)

Приведенные выше понятия и определения будут использованы в дальнейшем при определении эфемерид и альманаха навигационных спутников.

Навигационные спутники движутся по эллиптическим орбитам.

Для прогнозирования местоположения спутника на орбите, а это является одной из основных предпосылок при проведении навигационных определений, потребителем имеется специальный математический аппарат. Основы расчета орбиты спутника , а точнее эфемериды рассматриваются в следующем параграфе.