



Дисциплина:
«Системы позиционирования подвижных объектов»
(СППО)

Система позиционирования – любая техническая система, решающая задачи позиционирования.

Позиционирование (*positio (лат.) – положение, расположение, установка*) - **процесс определения позиции** материального подвижного объекта (ПО).

Определение позиции ПО заключается в **определении местоположения (координат) точечного ПО** в заданной системе координат (СК).

В некоторых СППО кроме определения координат может определяться **угловая ориентация ПО**, как пространственно-распределенного объекта, а также **характеристики его движения** (скорость, ускорение и др.).

Подвижный объект – любой материальный движущийся объект (автомобиль, самолет, космический корабль, речное или морское судно, человек и пр.), в отношении которого решаются задачи позиционирования.

В настоящее время в качестве наиболее эффективных глобальных, региональных и местных технических систем позиционирования выступают **навигационные системы**.

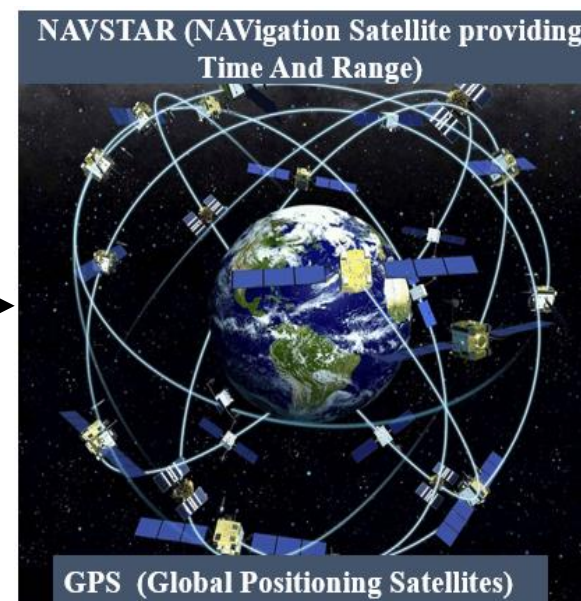
Замечание: В качестве локальных систем позиционирования, функционирующих на расстояниях от долей метров до единиц километров, могут применяться технологии позиционирования с использованием сотовых систем связи, WiFi - позиционирование, инфракрасное и ультразвуковое позиционирование и ряд других. В большинстве случаев подобные системы также реализуют навигационные методы местоопределения, поэтому могут использоваться в качестве функционального дополнения к навигационным системам.

Поэтому далее основное внимание в дисциплине «СППО» будет уделено рассмотрению **теории и принципам построения навигационных систем различного класса**.

Пример современной глобальной СППО:

GPS (*Global Positioning System*) — *система глобального позиционирования* является спутниковой системой навигации.

Её второе название: **NAVSTAR** (*NAVigation Satellites providing Time And Range*) - *обеспечивающие измерение времени и расстояния навигационные спутники*.



Основным потребителем координатной и другой информации, получаемой с помощью СППО является **сам подвижный (или временно неподвижный) объект**.

Тема №1. Общие сведения о системах позиционирования подвижных объектов.

Занятие №1. Основные понятия и термины теории навигации.

Вопросы занятия:

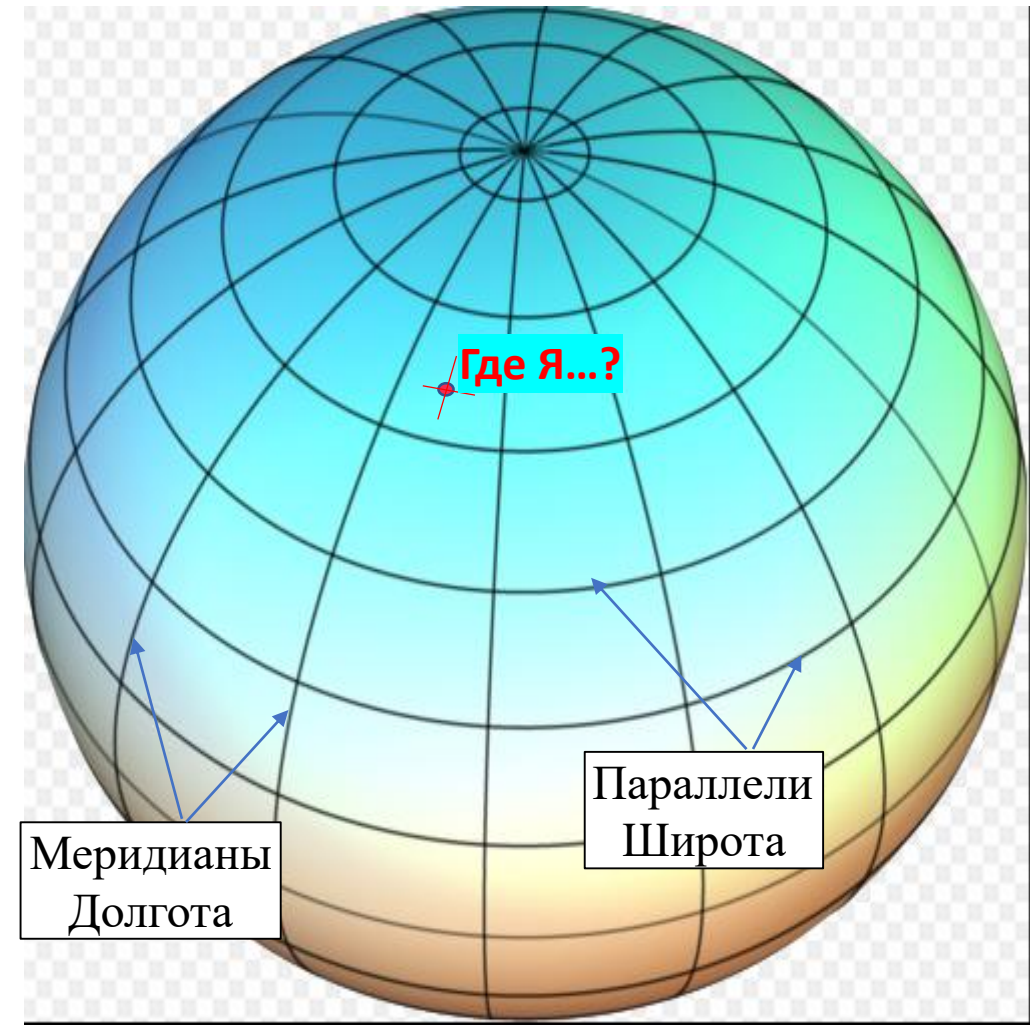
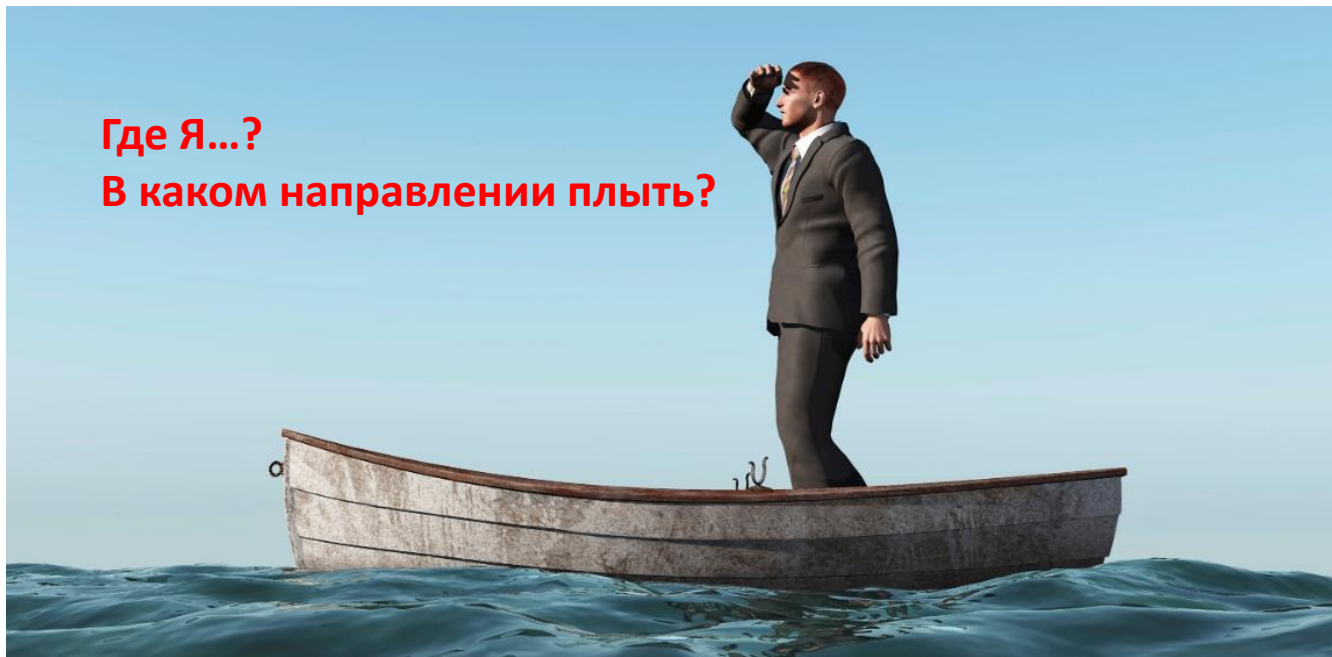
1. Понятие навигации, виды и методы навигации.
2. Системы координат и исчисления времени, применяемые в задачах навигации.

Литература:

1. Авиационная радионавигация: Справочник./А. А. Сосновский, И. А. Хаймович, Э. А. Лутин, И. Б. Максимов; Под ред. А. А. Сосновского.—М.: Транспорт, 1990.
2. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. - М.: Радиотехника, 2010.

1. Понятие навигации. Виды и методы навигации

Где Я...?
В каком направлении плыть?



Навигация ([лат. navigatio](#), от [лат. navigo](#) — «плыть на судне») – наука о методах и средствах получения информации о местоположении и параметрах движения ПО и об их вождении из одной точки пространства в другую.

Навигационные задачи, связаны с получением *навигационных данных* и решаются с помощью *навигационных средств*: устройств, приборов, комплексов, систем.

Секстант



Хронометр



Область навигации включает четыре основные категории:

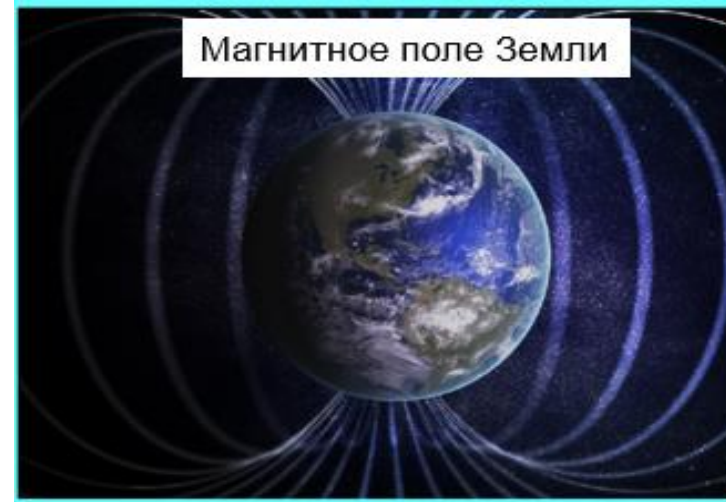
наземная навигация, морская навигация, воздушная навигация и космическая навигация.

Основные задачи навигации:

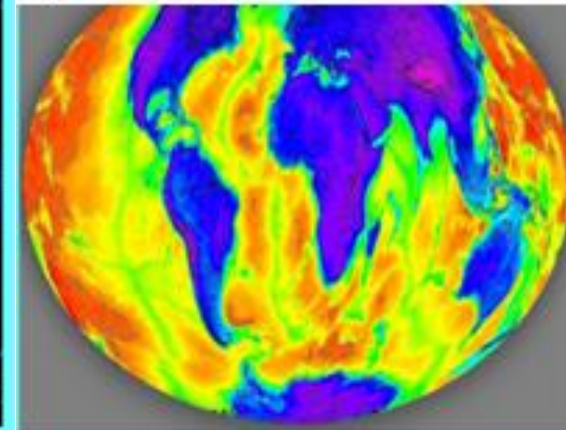
- определение местоположения ПО в заданной системе координат;
- определение составляющих вектора скорости движения ПО;
- определение угловой ориентации ПО в координатном пространстве;
- определение оптимального маршрута движения ПО.

1. По разновидностям используемых физических явлений:

- радионавигация;
- оптическая;
- инерциальная навигация;
- акустическая навигация;
- астрономическая навигация;
- навигация на основе измерения статических геофизических полей (магнитометрическая, барометрическая, гравитационнометрическая и др.).



Гравитационное поле Земли



2. По признаку использования внебортовых навигационных средств:

- *автономная навигация* (все навигационные средства находятся на ПО);
- *неавтономная навигация* (навигационные средства находятся как на ПО, так и вне его).

3. По возможности первоначального самостоятельного определения местоположения ПО:

- *позиционная навигация;*
- *непозиционная навигация.*

На практике часто применяется *комбинированная* по видам и методам навигация, при этом наибольшее распространение получили: *позиционный неавтономный и непозиционный автономный виды.*

Методы навигации:

По принципу определения текущего местоположения ПО методы навигации разделяются на три группы:

- 1. *Позиционные методы*** основаны на нахождении ПО как точки пересечения *геометрических линий или поверхностей положения*, относительно ряда *опорных навигационных (или радионавигационных) точек* (НТ или РНТ).
- 2. *Методы счисления пути*** основаны на измерении и интегрировании по времени составляющих вектора скорости или ускорения ПО.
- 3. *Обзорно-сравнительный методы*** основаны на сравнении некоторых наблюдаемых с помощью бортовых датчиков физических параметров, характеризующих пространство вокруг ПО, с эталонными параметрами, хранящимися в памяти навигационной системы.

Под **местоположением (МП)** объекта понимается точка координатного пространства, в которой в данный момент времени находится центр его масс.

Навигационная точка (НТ) – пункт (маяк, ориентир), являющийся точечным объектом с известными координатами относительно которого определяется местоположение ПО.

Навигационные параметры (НП) — измеряемые данной навигационной системой геометрические и механические скалярные величины или их производные, характеризующие местоположение ПО и другие навигационные данные: углы (пеленги), расстояния, разности расстояний, скорости, ускорения и др.

Линией положения (ЛП) называется геометрическое место точек на поверхности, соответствующих *какому-то одному* значению навигационного параметра.

В трехмерном пространстве *постоянному значению измеряемого навигационного параметра* будет соответствовать **поверхность положения**.

Примеры линий положения - *ортодромия, локсодромия, прямая, окружность, гипербола*.

Примеры поверхностей положения - *плоскость, сфера, гиперболоид*.

ЛП может быть определена как геометрическое место точек пересечения двух поверхностей положения.

Для определения местоположения объекта на плоскости достаточно определить координаты точки пересечения двух ЛП.

Местоположение объекта в трехмерном пространстве задается пересечением трех поверхностей положения или одной поверхности и линии положения.

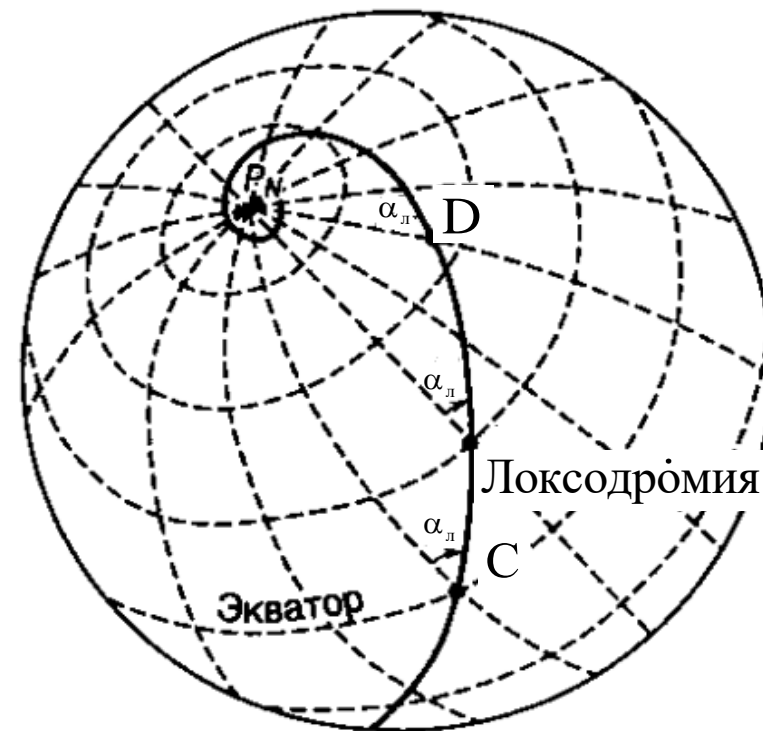
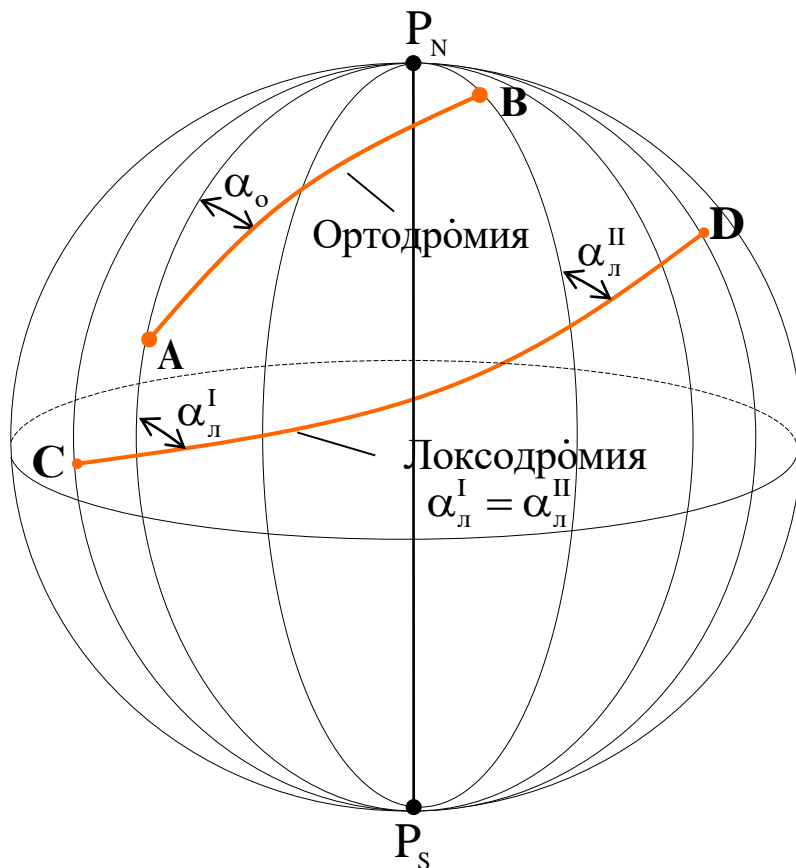
С помощью линий и поверхностей положения осуществляется переход от измеряемых навигационных параметров к координатам объекта (например, географическим).

Примеры линий положения, используемых в навигации

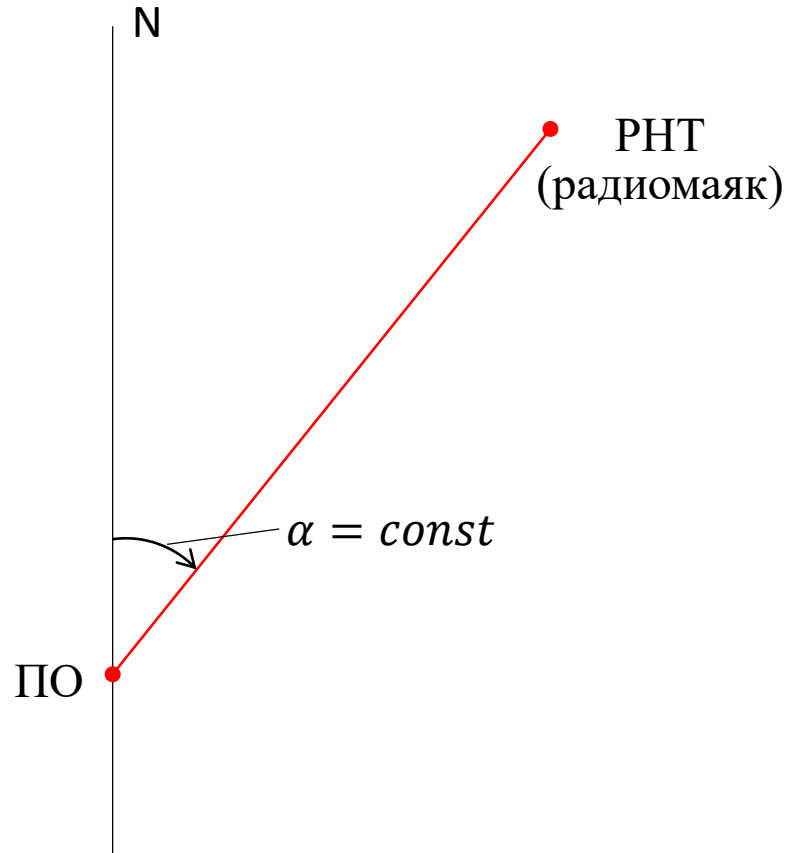
Линии положения на поверхности Земли - *ортодромия* и *локсодромия*

1. На земном шаре *линией кратчайшего расстояния* является дуга большого круга, которую называют *ортодромией* (греч. *ортос* — прямой, *дромос* — проход, бег.).

2. В практике мореплавания весьма удобна *линия пути, которая пересекает все меридианы под одним и тем же углом*. Она называется *локсодромией* (греч. *локсос* — косой, *дромос* - проход, бег.).

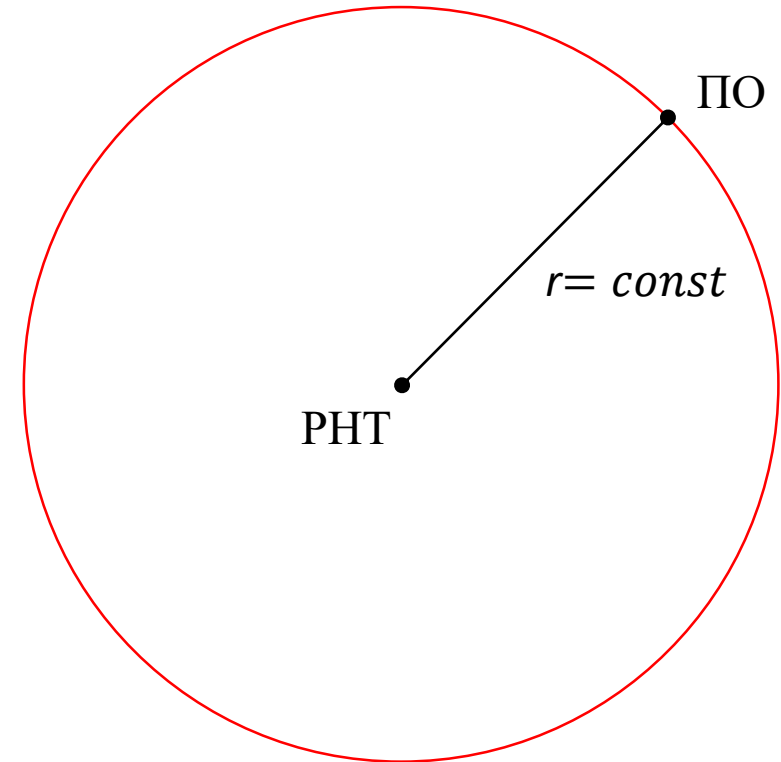


Линия положения - **прямая**
(линия постоянного пеленга)



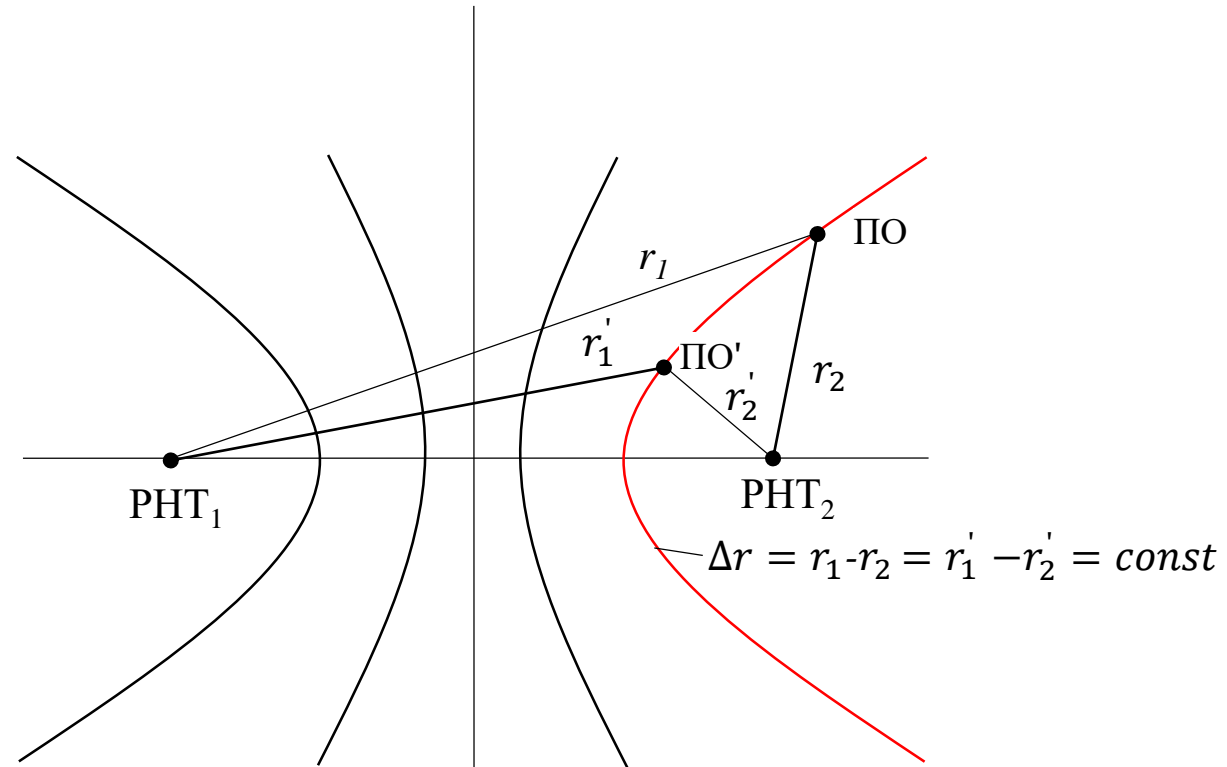
Навигационный параметр - **пеленг** $\alpha = const$.
В пространстве поверхность положения – **плоскость**.

Линия положения - **круг**
(линия постоянной дальности)



Навигационный параметр - **дальность** $r = const$.
В пространстве поверхность положения – **сфера**.

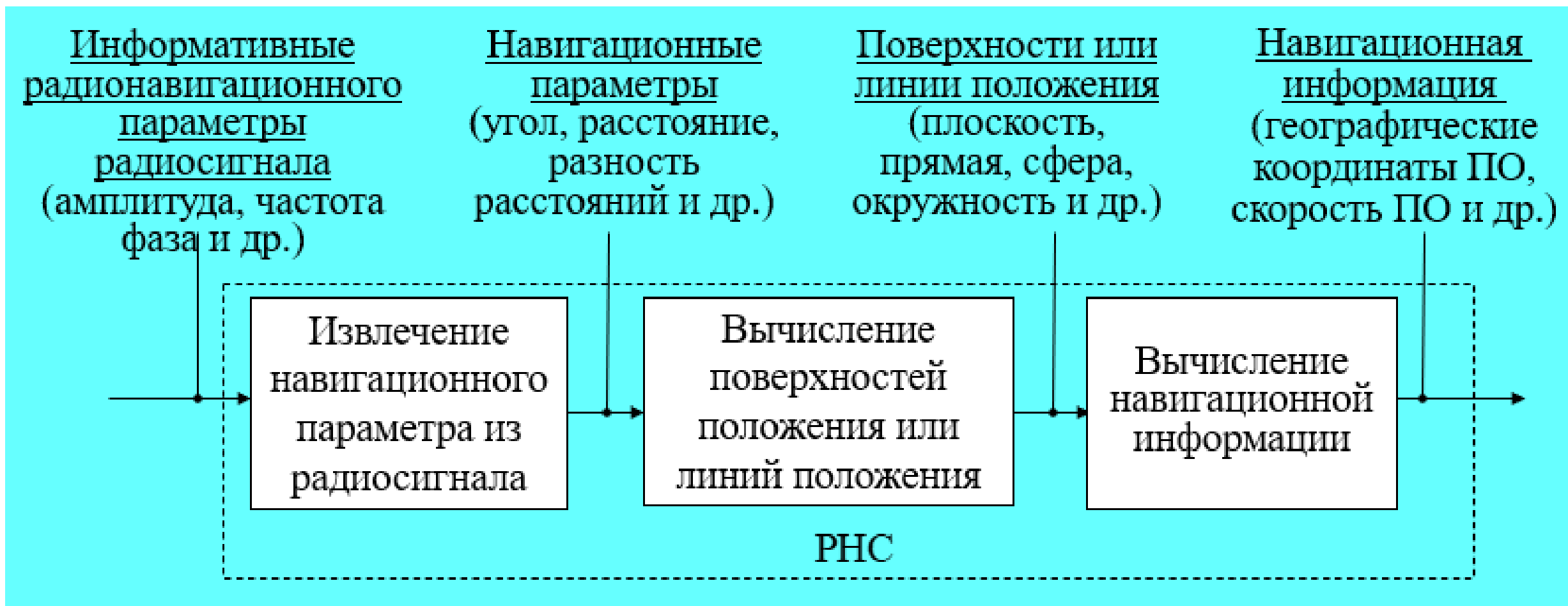
Линия положения - **гипербола**
(линия постоянной разности дальностей)



Навигационный параметр – **разность дальностей**
 $\Delta r = const$

Поверхность положения – **гиперболоид вращения**

Процесс получения навигационной информации на примере радионавигационной системы (РНС)



Пример определения местоположения объекта в спутниковой РНС

Измеряемый РНП – время задержки радиосигнала.

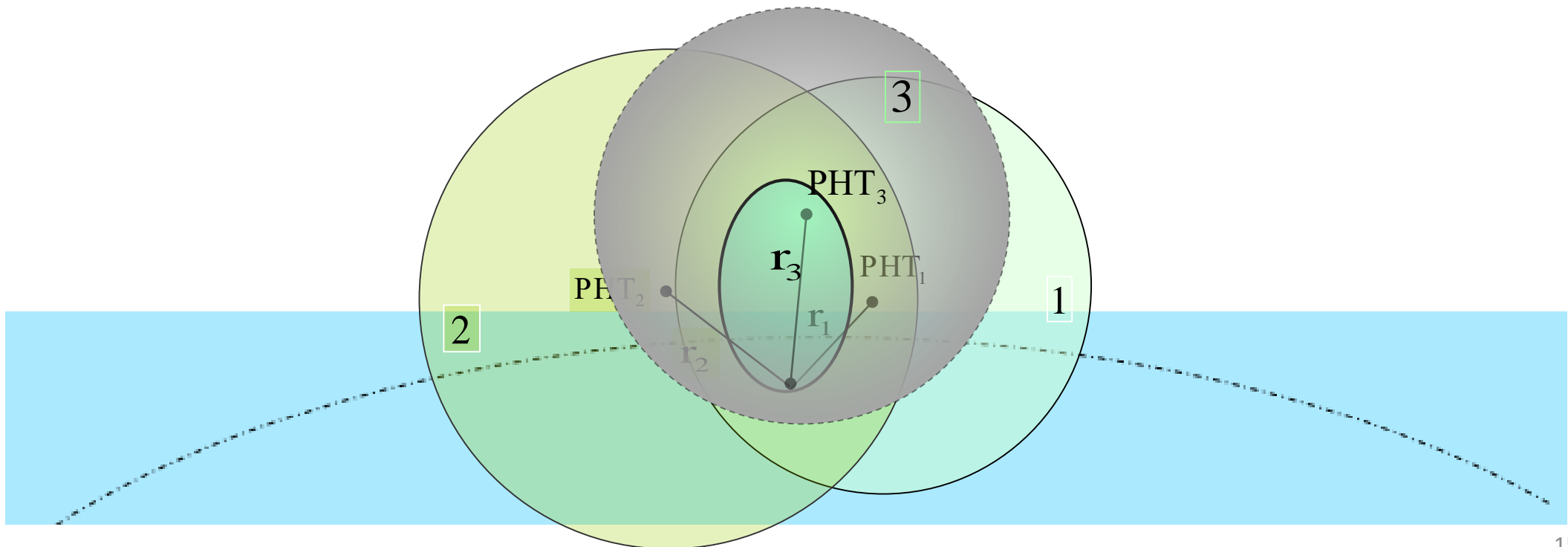
Измеряемый НП - расстояние от РНТ до ПО.

При постоянном расстоянии от РНТ до ПО поверхность положения – сфера.

Пересечение 2-х сфер в пространстве дает линию положения – окружность.

Пересечение с третьей сферой дает точку местоположения объекта.

РНП	НП	Поверхность положения	Линия положения	Точка пересечения нескольких ПП (ЛП)
время задержки радиосигнала	расстояние r	сфера	окружность	местоположение ПО



2. Системы координат и исчисления времени, применяемые в задачах навигации

2.1. Системы координат

Положение любого материального объекта в пространстве, может быть определено или задано с помощью упорядоченного значения чисел, называемых *координатами*. Набор математических правил, описывающих то, как координаты должны быть соотнесены с точками пространства, составляет *систему координат* или *систему отсчета*.

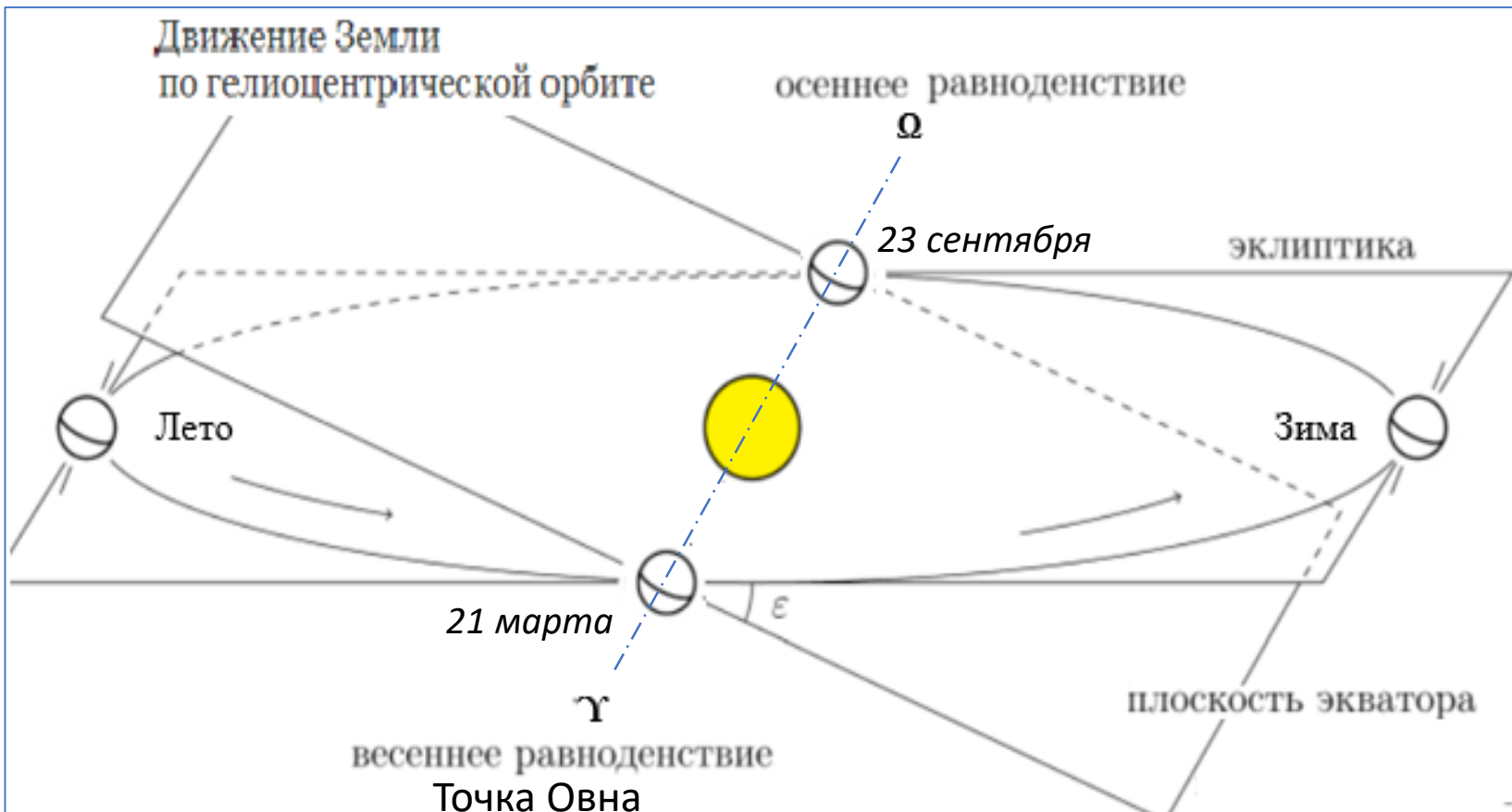
Системы координат (СК), используемые при позиционировании ПО, различаются по положению начала отсчета, по ориентации координатных осей и плоскостей отсчета, по геометрическим свойствам и другим признакам. Они должны наилучшим образом соответствовать методам получения координатной информации в технической системе позиционирования и задачам, возлагаемым на неё со стороны потребителей.

Системы координат широко используемые в задачах навигации:

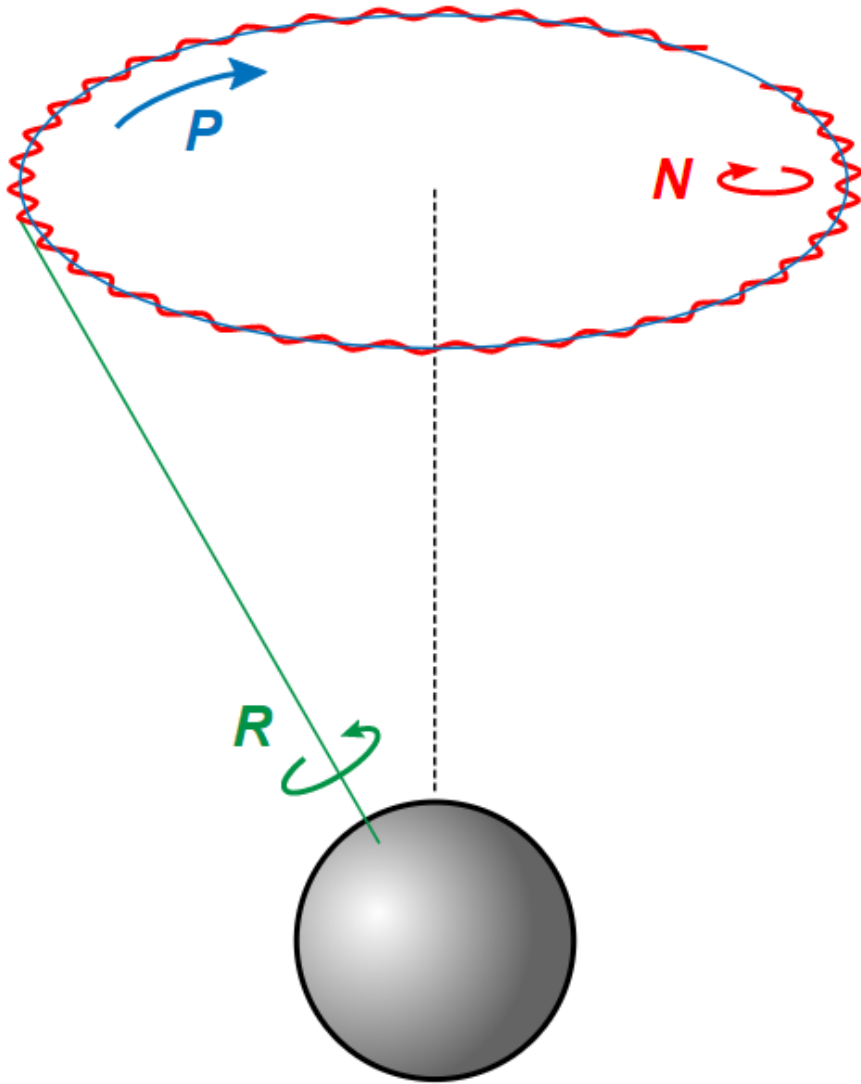
1. Геоцентрическая инерциальная декартова СК.
2. Общеземная геоцентрическая декартова СК.
3. Геодезическая система координат СК.
4. Декартова и сферическая топоцентрические системы координат.
5. Связанная система координат.
6. Скоростная система координат.

К вопросу о выборе опорного направления для инерциальной СК (OX):

Две точки, в которых эклиптика пересекается с небесным экватором, называются **точками равноденствия**. В **точке весеннего равноденствия** Солнце в своём годовом движении переходит из южного полушария небесной сферы в северное (пересекает экватор); в **точке осеннего равноденствия** — из северного полушария в южное. Прямая, проходящая через эти две точки, называется **линией равноденствий**. Символ Υ обозначает направление весеннего равноденствия (точка Овна).



Прецессия и нутация



При задании опорных осей координат, связанных с осью вращения земли необходимо учитывать, что направление изменения земной оси непостоянно и подвержено **прецессии** и **нутации**.

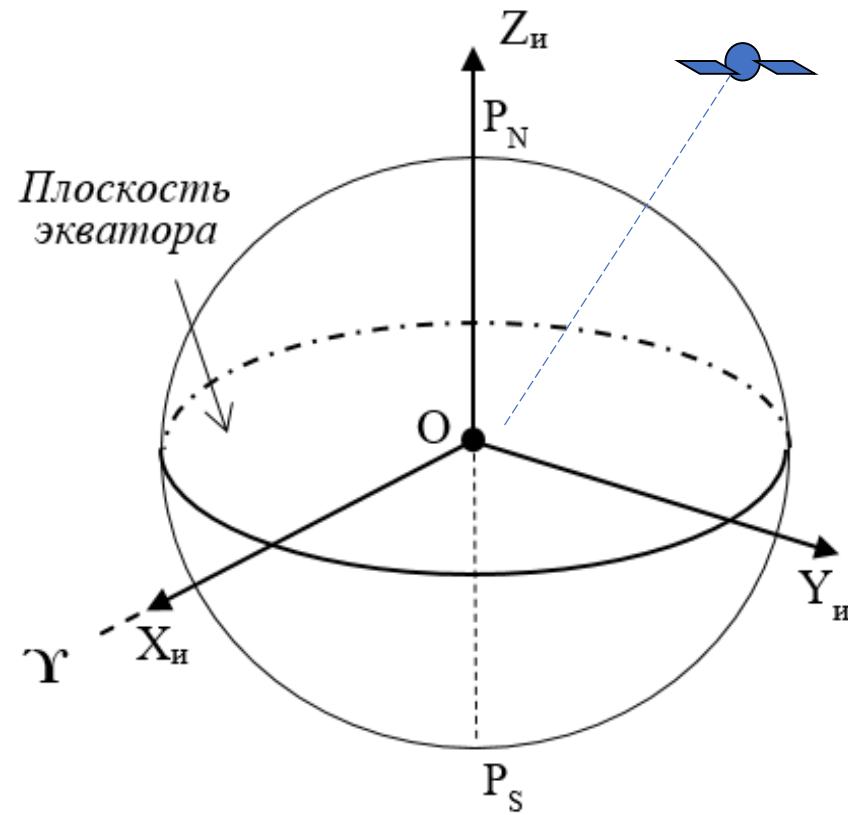
Прецессия (P) - периодическое изменение направления земной оси под влиянием притяжения [Луны](#) и [Солнца](#). В результате прецессии земная ось описывает в пространстве конус. Поворот земной оси смещает и связанную с Землёй инерциальную систему координат относительно удалённых, практически неподвижных на небесной сфере звёзд.

На [небесной сфере](#) ось описывает [окружность](#) так называемого малого круга небесной сферы с угловым радиусом примерно **23,5 градуса**. Полный оборот по этой окружности происходит с периодом (по современным данным), составляющим примерно 25 800 лет.

Существуют и другие причины смещения земной оси, в первую очередь — **нутация (N)**, периодическое, быстрое относительно периода прецессии, «покачивание полюсов». Период нутации земной оси равен 18,61 года, и её средняя амплитуда составляет около **17"** ([угловых секунд](#)).

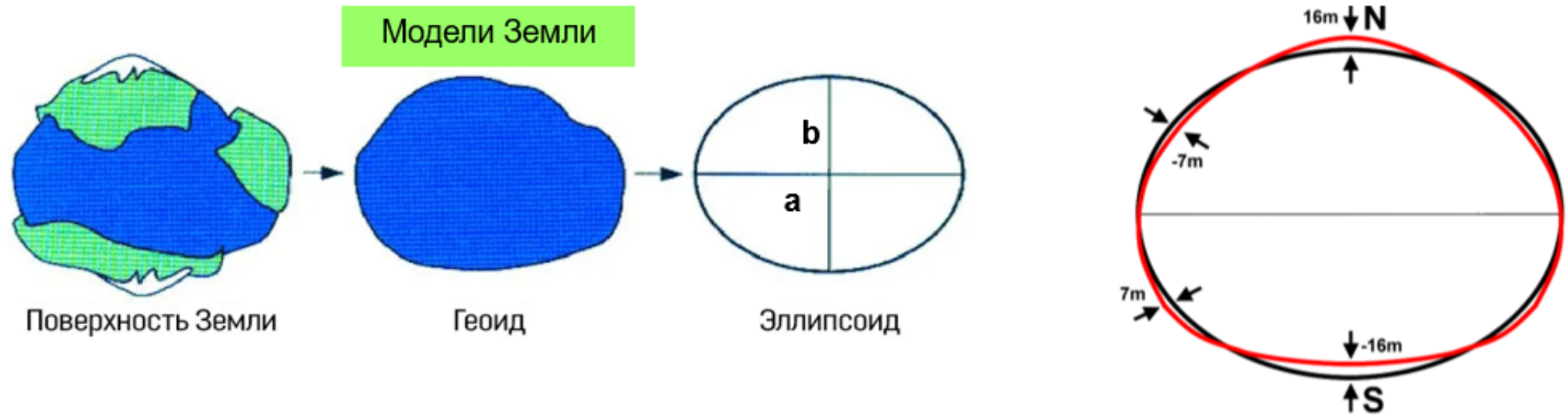
Текущие значения P и N учитываются при преобразованиях, связанные с переходом между ИСК и вращающейся ГСК, связанной с Землей.

2.1.1. Геоцентрическая инерциальная декартова СК $\{O, X_{и}, Y_{и}, Z_{и}\}$



2.1.2. Общеземная геоцентрическая декартова СК $\{O, X, Y, Z\}$

В качестве модели Земли выбирается *общеземной* или *референčný эллипсоид*.

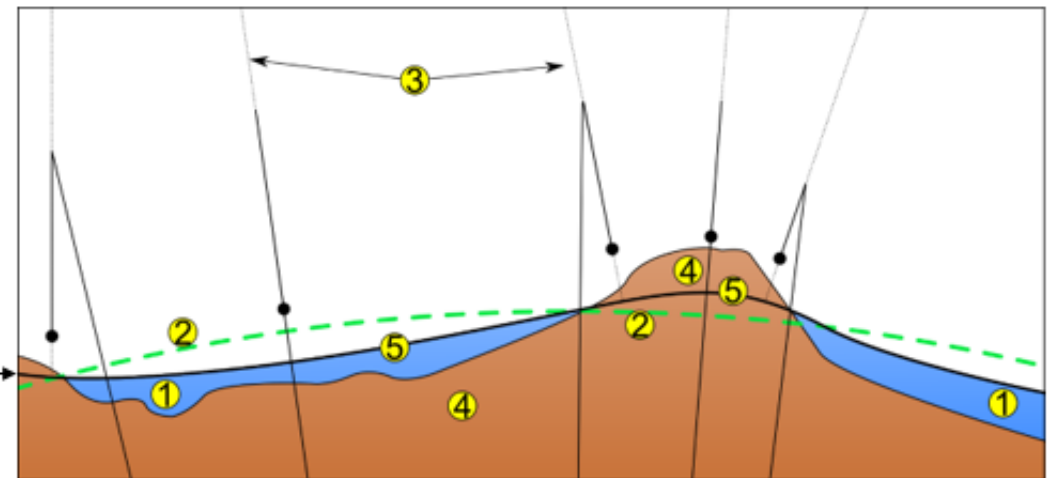


Геоид: экипотенциальная поверхность земного поля тяжести (уровенная поверхность), приблизительно совпадающая со средним уровнем вод Мирового океана в невозмущённом состоянии и условно продолженная под материками.

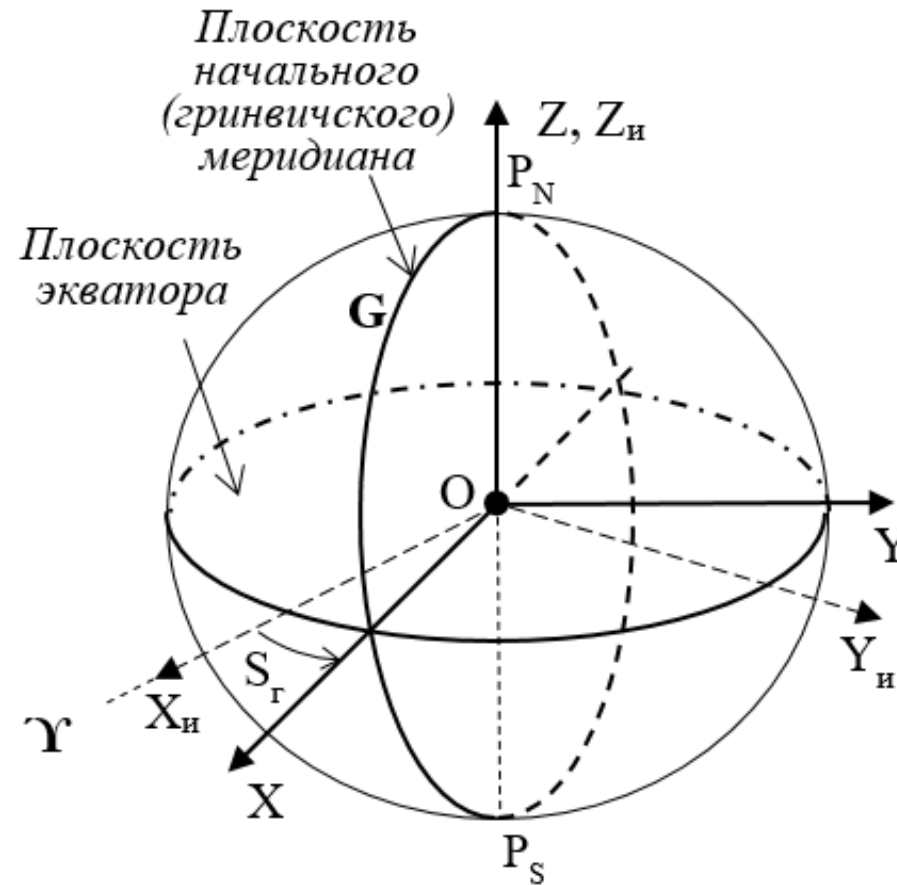
Общеземной эллипсоид: Эллипсоид вращения, который характеризует фигуру и размеры Земли и применяется для обработки геодезических измерений на всей поверхности Земли в общеземной (геоцентрической) системе координат.

Схема, демонстрирующая различия между понятиями «геоид» и «эллипсоид вращения»

1. Мировой океан
2. Земной эллипсоид
3. Отвесные линии
4. Суша
5. Геоид



2.1.2. Общеземная геоцентрическая декартова СК $\{O, X, Y, Z\}$



В СРНС ГЛОНАСС ОГДСК определена как ПЗ-90.11, а в СРНС GPS как WGS-84.

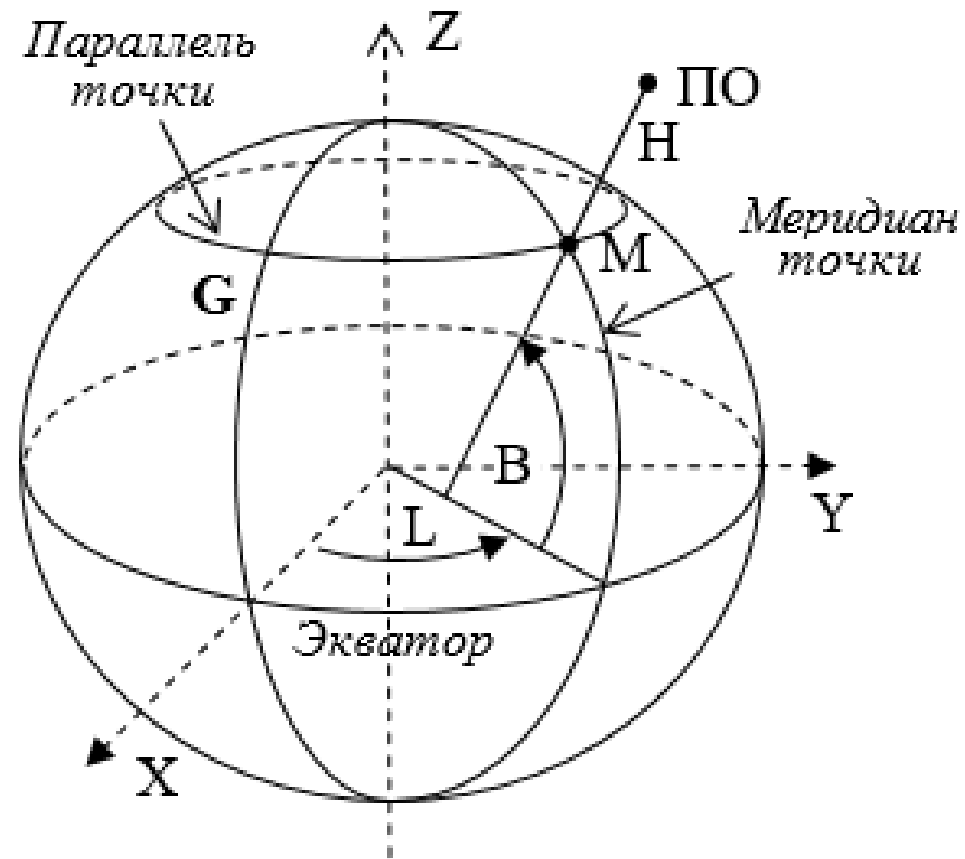
Параметры этих систем координат совпадают в пределах точности их определения.

Для системы ПЗ – 90.11 принята поверхность земного эллипсоида с параметрами: большая полуось $a = 6\,378\,136$ м, полярное сжатие $\alpha = 1 : 298, 257\,839$.

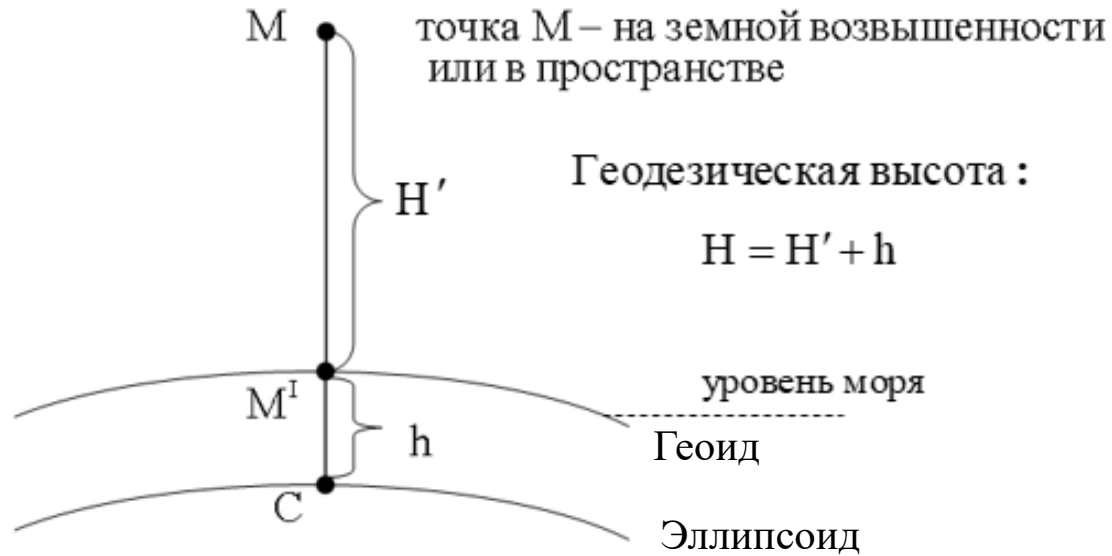
В системе WGS – 84 – соответственно: $a = 6\,378\,137$ м, $\alpha = 1 : 298, 257\,224$

2.1.3. Геодезическая система координат (ГСК) {B, L, H}

В качестве модели Земли выбирается *общеземной* или *референčný эллипсоид*.



Геодезическая высота H



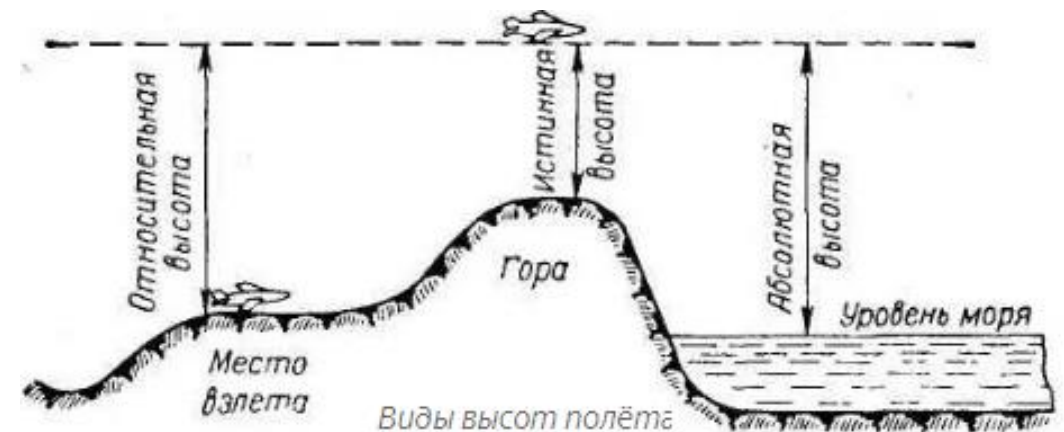
Высота точки М над поверхностью эллипсоида



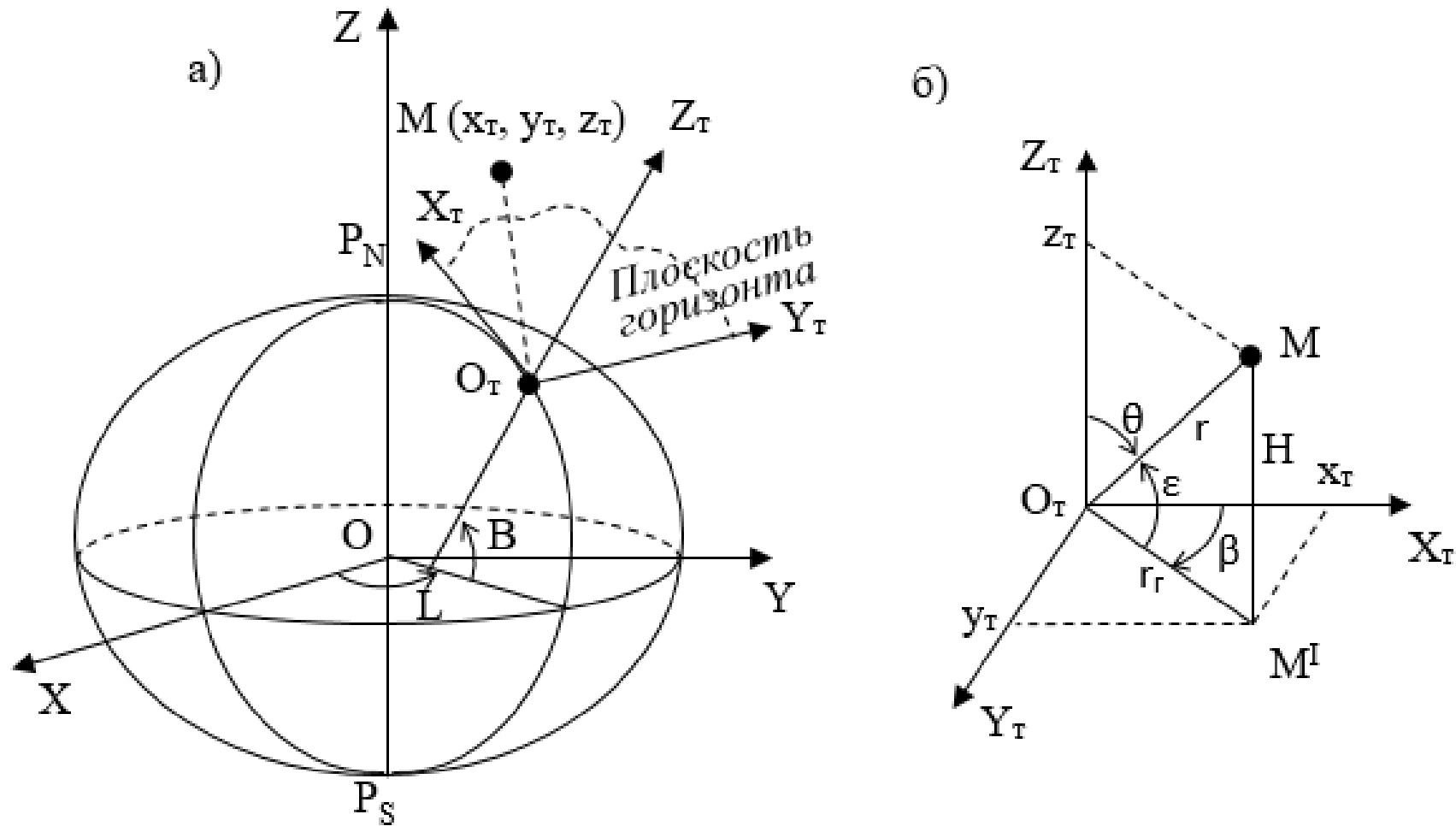
Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 ноября 2016 года № 1240 установлено что: – в качестве государственной системы высот используется Балтийская система высот 1977 года, отсчет нормальных высот которой ведется от нуля Кронштадтского футштока, являющегося горизонтальной чертой на медной пластине, укрепленной в устье моста через обводной канал в городе Кронштадте;

Для летательного аппарата дополнительно определяются высоты:

- АБСОЛЮТНАЯ – относительно Балтийского моря;
- ИСТИННАЯ – относительно ближайшей точки земной поверхности;
- ОТНОСИТЕЛЬНАЯ – относительно высоты аэродрома.

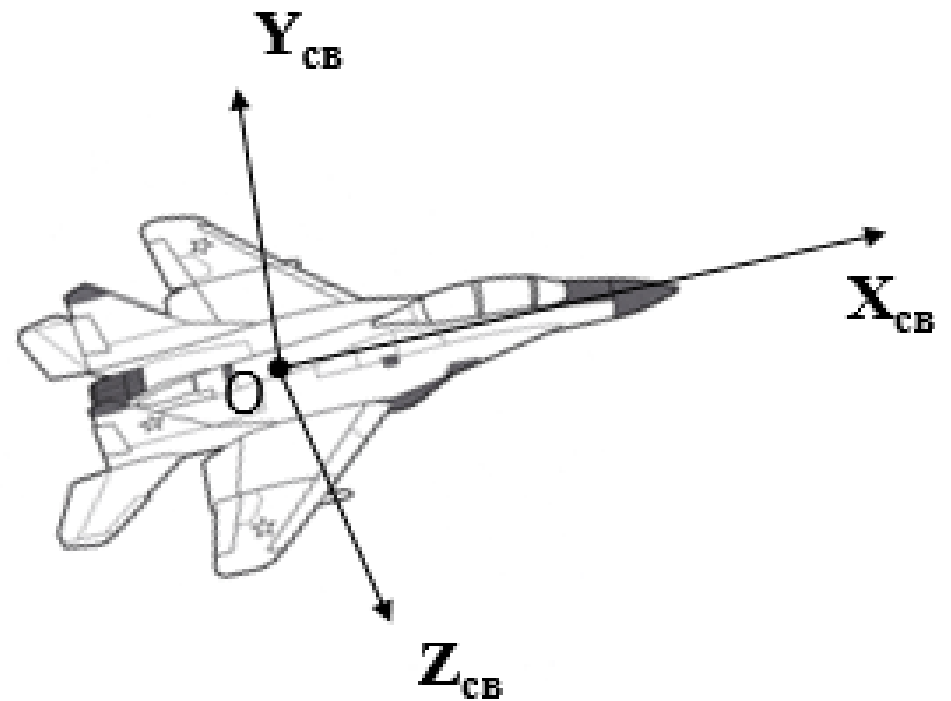
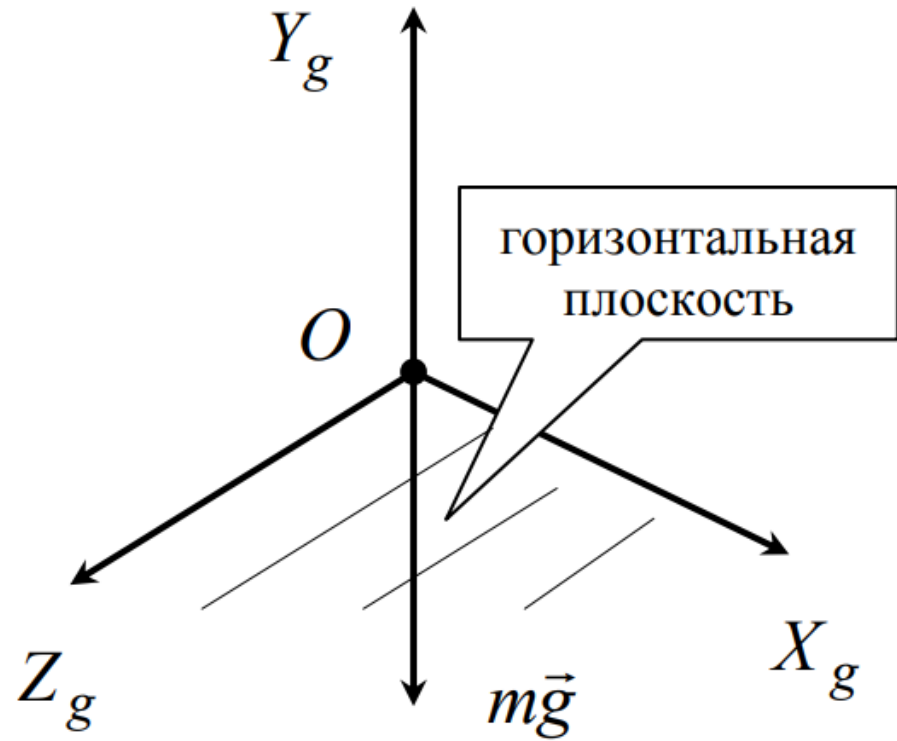


2.1.4. Декартова и сферическая топоцентрические системы координат (ДТСК и СТСК)

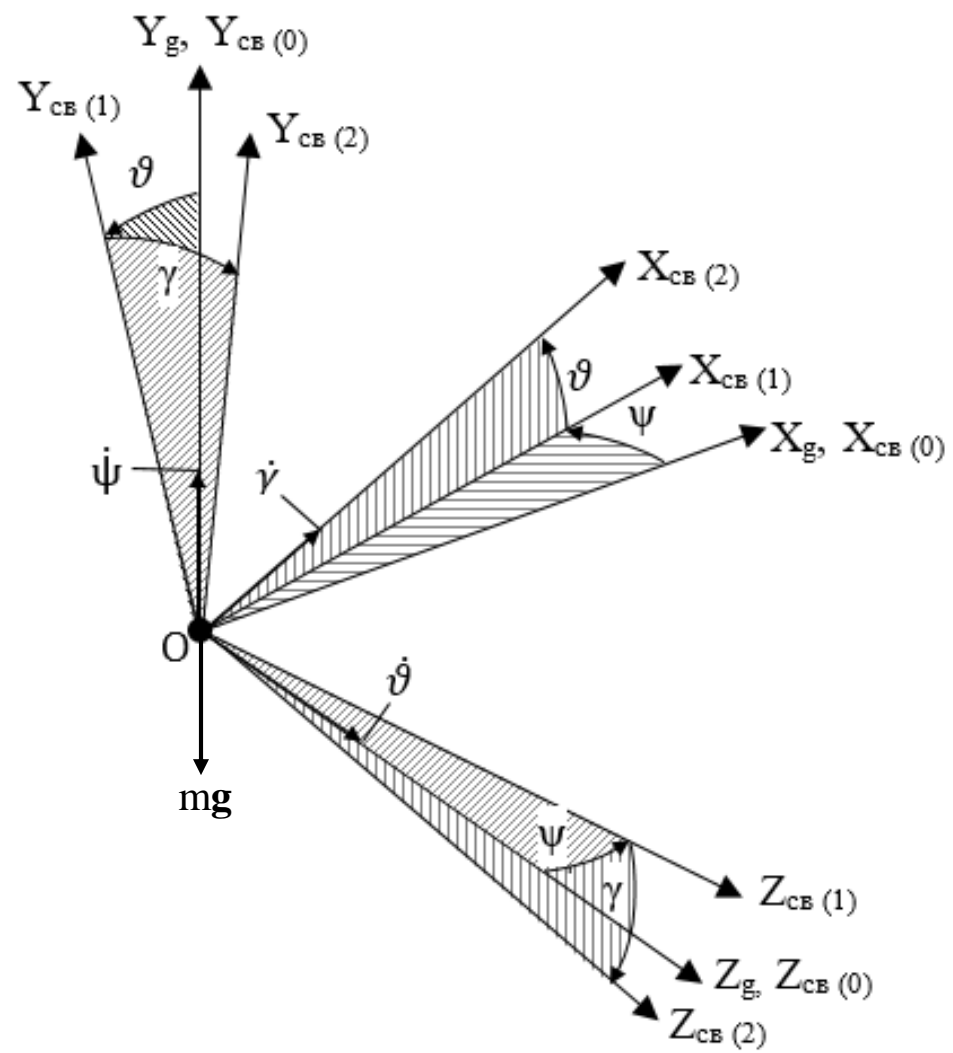


Примечание: обозначения осей в плоскостях могут меняться местами.

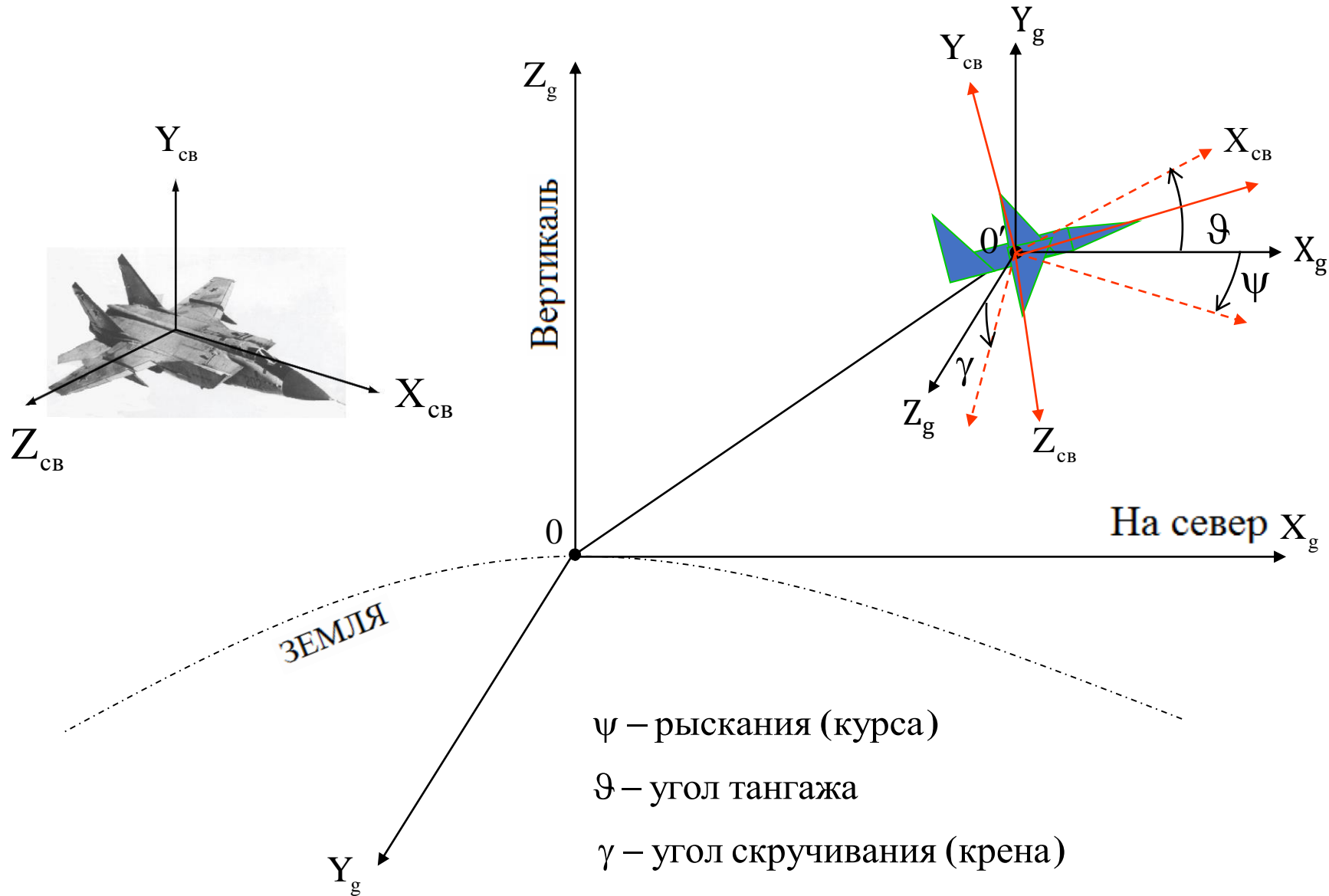
2.1.5. Нормальная земная и связанная декартова системы координат (НЗСК и Св.СК)



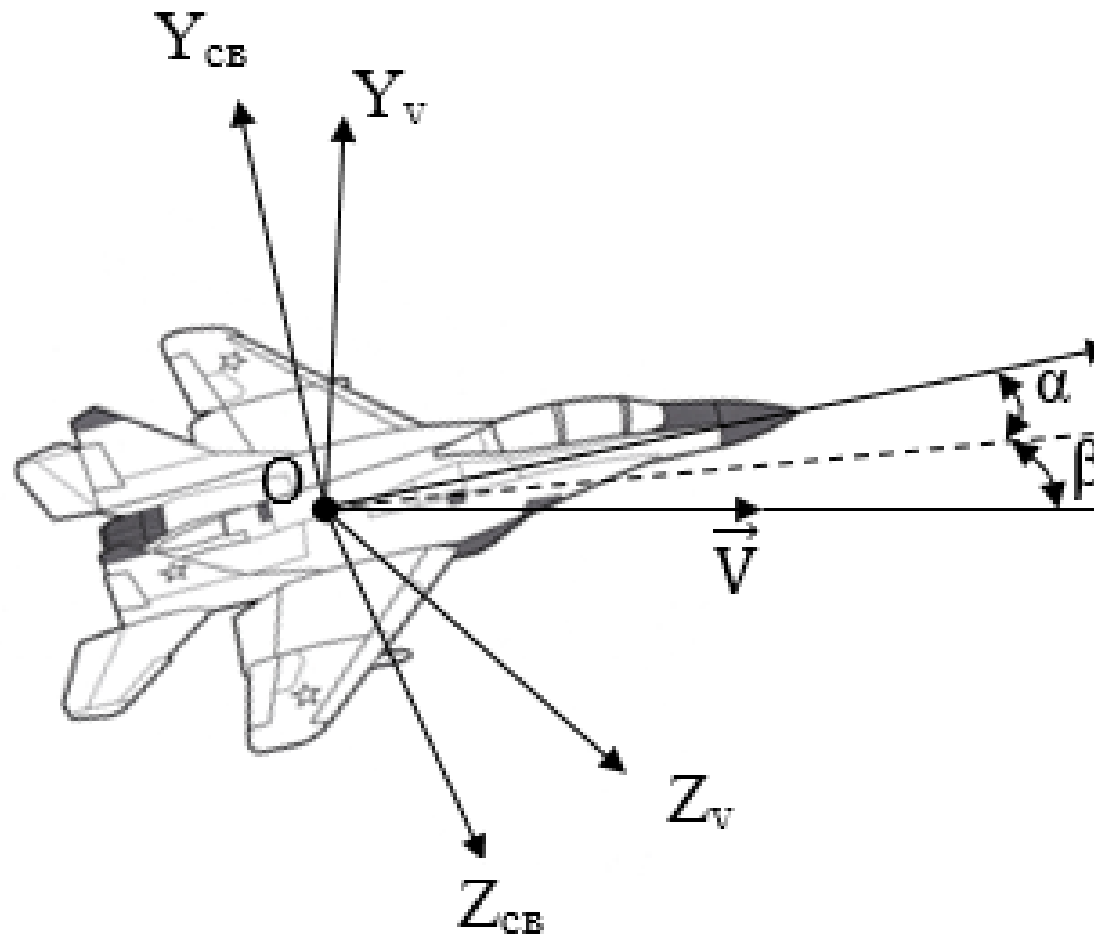
2.1.6. Связанная декартова система координат и угловое положение ЛА относительно НЗСК



Связанная декартова система координат и угловое положение летательного аппарата



2.1.7. Скоростная система координат летательного аппарата



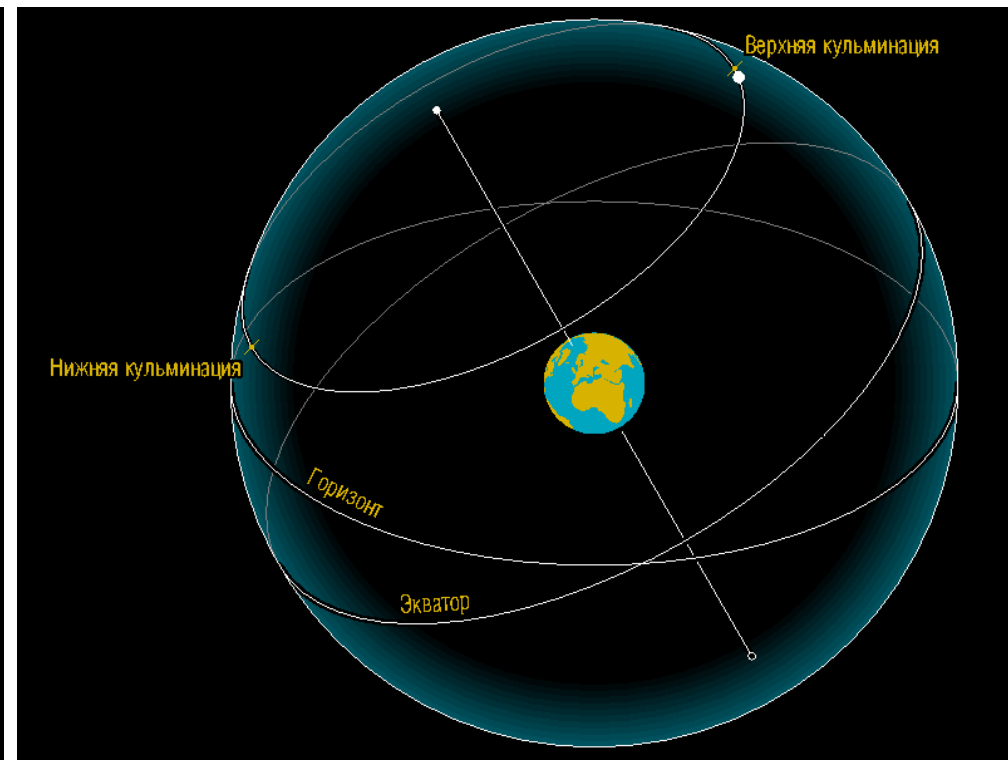
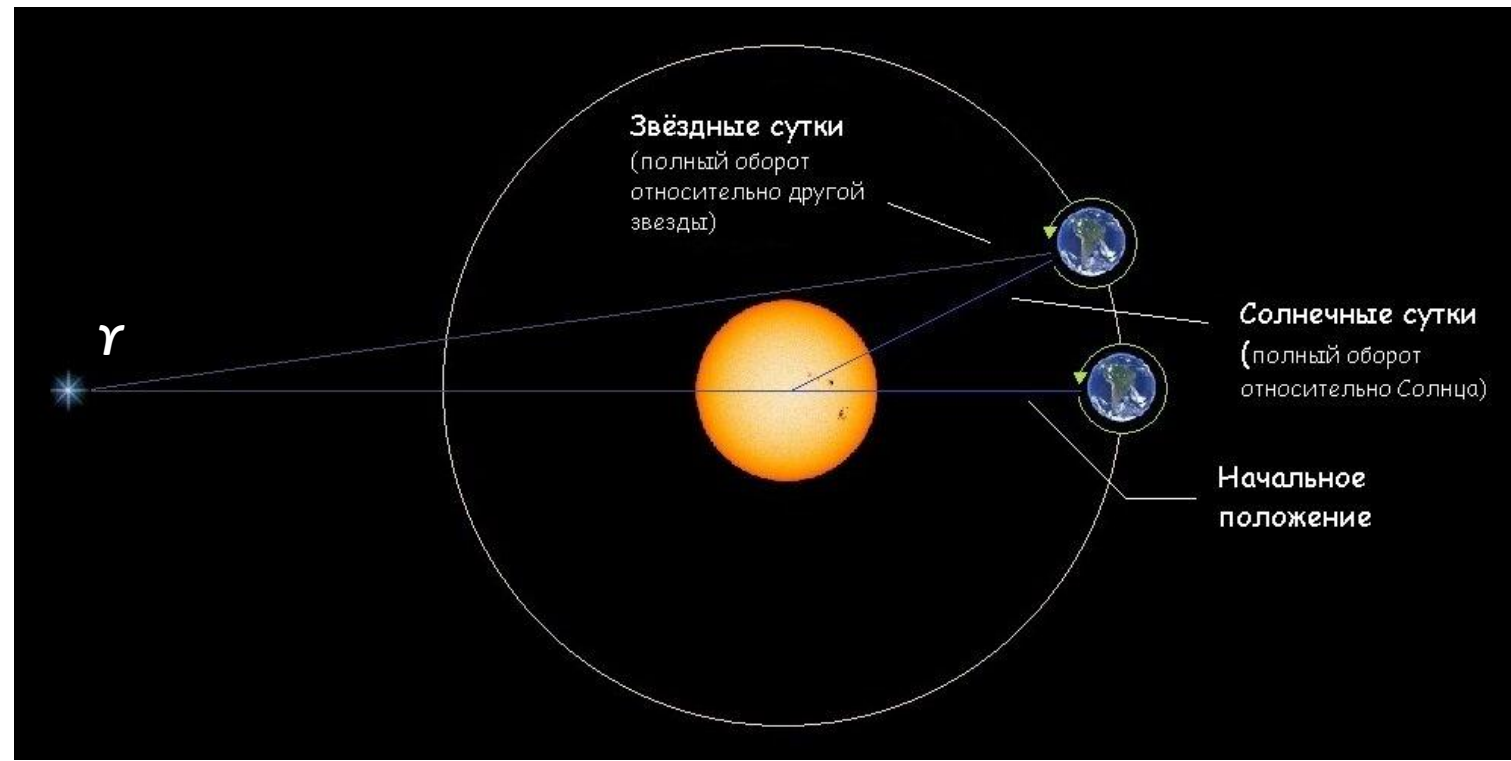
2.2. Шкалы времени, используемые в навигационных системах

Применяются две группы единиц отсчета времени: *астрономические* и *неастрономические*.

1. Астрономическое время связано с движением планет и может быть *звездное* и *солнечное*.

Звездное - звездные сутки (86400 с) один оборот Земли вокруг оси относительно верхней кульминации точки Овна (Υ) (далекой звезды). С учетом прецессии - **среднее звездное время**, с учетом нутации **истинное звездное время**.

Солнечное - солнечные сутки (86400 с) один оборот Земли вокруг оси относительно нижней кульминации среднего солнца (полночи). 24 часа звездного времени = 23 ч 56 мин 4,091 среднего солнечного времени. Звездное время удобно для навигации спутников, солнечное - для обыденной жизни человека.



Эфемеридное время (ЕТ) – в 1952г. Введена эфемеридная (рассчитанная) секунда: $1/86400$ суток для определенного дня 1900 г. ЕТ не зависит от скорости вращения Земли.

2. Неастрономическое время – атомная секунда (введена с 1967г.) – интервал времени, в течение которого совершается 9 192 631 770 колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода для атома цезия-133, излучающего ЭМВ. Она близка к эфемеридной секунде.

В связи с появлением атомного стандарта частоты (времени) в настоящее время в повседневной жизни применяется **всемирное координированное время UTC (Coordinated Universal Time)**.

Сигналы точного времени передаются по радио, телевидению, и через Интернет в системе UTC.

Дополнительная секунда при необходимости добавляется 30 июня или 31 декабря после 23:59:59.

В спутниковых РНС применяется своя шкала атомного времени, которая также периодически координируется.

Всемирное — среднее солнечное время начального меридиана. За начальный меридиан условно принимается меридиан обсерватории в Гринвиче (Великобритания).

Местное — определяется для данного места на Земле, зависит от географической долготы места и одинаково для всех точек на одном меридиане.

Поясное — среднее солнечное время, определяемое для 24 основных географических меридианов, отстоящих на 15° по долготе. Поверхность Земли разделена на 24 часовых пояса, в пределах каждого из которых поясное время совпадает со временем проходящего через них основного меридиана.

Шкалы времени (дополнительные сведения)

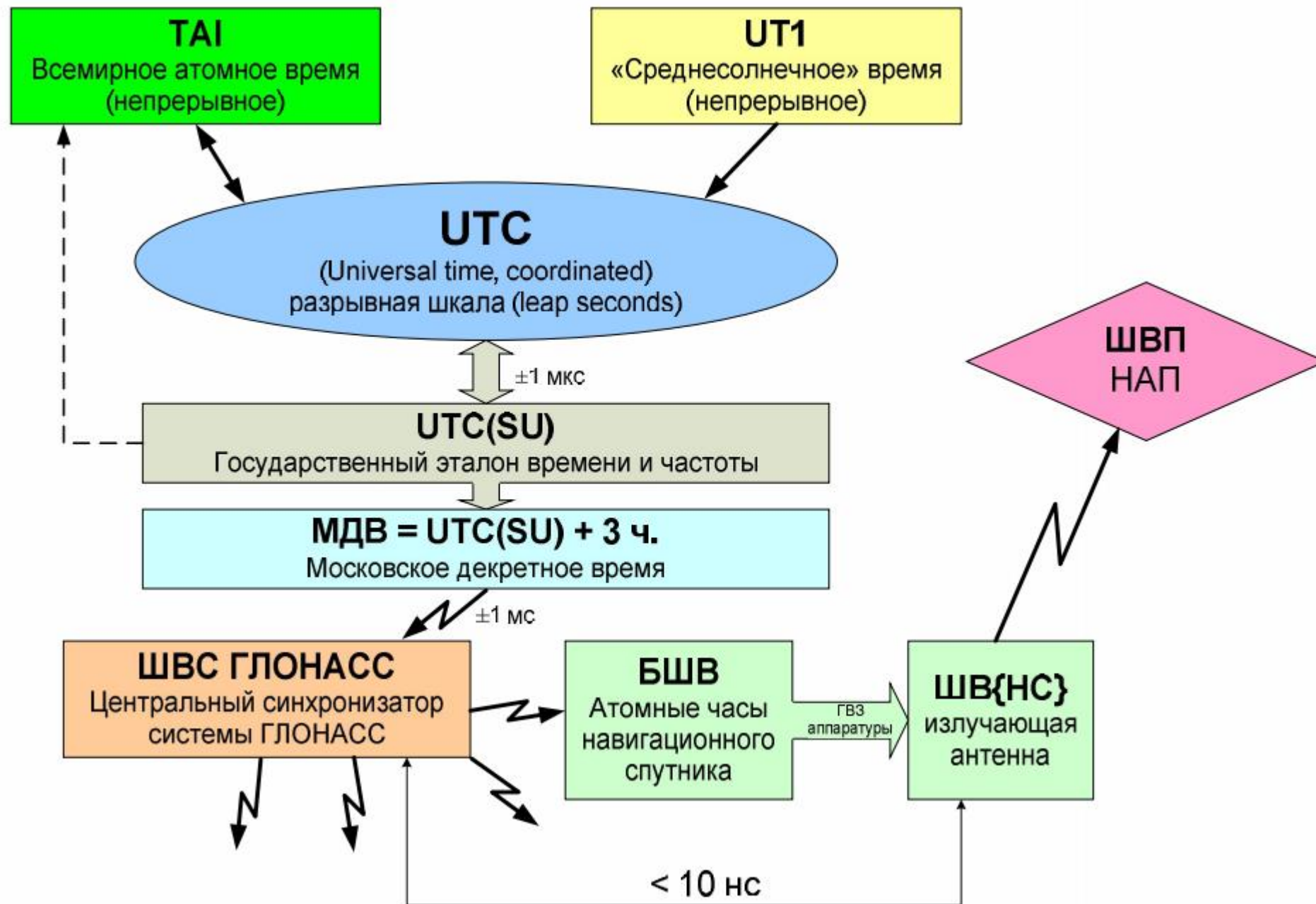
Временное обеспечение радионавигации в России строится на основе шкалы координированного времени UTC (SU), задаваемой существующей эталонной базой РФ. С целью трансляции сигналов точного времени Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли Российской Федерации использует разветвленную сеть средств передачи эталонных сигналов, которая включает в себя: – радиостанции длинноволнового диапазона (ДВ); – коротковолновую (КВ) радиостанцию; – сверхдлинноволновые (СДВ) и ДВ навигационные радиостанции Государственной системы единого времени и эталонных частот; – ГНСС ГЛОНАСС; – средства передачи ЭСЧВ совместно с сигналами телевидения; – средства передачи точного времени через глобальную сеть Интернет. ГНСС ГЛОНАСС передает потребителям сигналы с информацией о шкале времени UTC (SU) и шкале времени системы ГЛОНАСС.

В качестве вспомогательной шкалы времени при использовании сигналов ГНСС GPS может применяться шкала координированного времени США — 67 UTC (USNO), поддерживаемая Военно-морской обсерваторией США, а также шкала времени GPS — GPST (см. рисунок).

Время ГНСС БЭЙДОУ (BDT) связано и синхронизировано с координированным всемирным временем UTC. По заявлению создателей системы, предусмотрена совместимость BDT со временем ГНСС GPS/ГАЛИЛЕО.

В бортовую шкалу времени каждого из спутников вводится пересчётный коэффициент, зависящий от высоты орбиты и учитывающий два релятивистских эффекта: движение спутника относительно наземных часов (эффект релятивистского замедления времени) и разность гравитационных потенциалов на орбите и на поверхности Земли (эффект гравитационного красного смещения). Так, для системы ГЛОНАСС он равен $1 - 4,36 \cdot 10^{-10}$ (релятивистская поправка $4,36 \cdot 10^{-10}$, то есть 37,7 мкс в сутки).

Привязка времени в ГЛОНАСС



Контрольные вопросы:

1. Какую информацию о местоположении объекта содержит линия положения и откуда берутся исходные данные для её построения?
2. В каком направлении первоначально должен лететь самолет, вылетевший из Москвы во Владивосток и почему?
3. Для чего и каким образом использовали секстант и хронометр мореплаватели прошлого?
4. По какой причине солнечные сутки больше звездных?
5. Почему местная система координат ограничена по дальности применения в отношении околоземных объектов, например дальнемагистральных аэробусов.