

**СПУТНИКОВЫЕ МЕТОДЫ  
ИЗМЕРЕНИЙ  
В ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ  
РАБОТАХ**

# План:

1. Глобальные системы определения местоположения ГЛОНАСС и NAVSTAR GPS
2. Системы отсчета времени и координат
3. Орбитальное движение спутников. Эфемериды
4. Измерения, выполняемые спутниковыми приемниками
5. Поправки, вводимые в результаты измерений
6. Режимы наблюдений
7. Преобразование координат

Бурное развитие науки и техники в последние десятилетия позволило создать принципиально новый метод определения координат и приращений координат — *спутниковый*. В этом методе вместо привычных геодезистам неподвижных пунктов геодезической сети с известными координатами используются подвижные спутники, координаты которых можно вычислить на любой интересующий геодезиста момент времени.

В настоящее время используются две спутниковые системы определения координат: **российская система ГЛОНАСС** (это является аббревиатурой более длинного и точного названия: ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система) и **американская система NAVSTAR GPS** (NAVigation System with Time And Ranging Global Positioning System — навигационная система определения расстояний и времени, глобальная система позиционирования).

В данном случае под словом «позиционирование» подразумевается определение координат. Обе системы создавались для решения военных задач, но в последние годы нашли широкое применение в геодезии, обеспечивая исключительно высокие точности определения приращений координат со средней квадратической погрешностью 5 мм, координаты одиночного приемника могут быть определены со средней квадратической погрешностью от 10 до 100 м.

**Всю навигационную спутниковую систему определения местоположения принято делить на три сегмента: космический сегмент, сегмент контроля и управления, сегмент пользователей (приемники спутниковых сигналов).**

Современные системы NAVSTAR GPS и ГЛОНАСС в полной комплектации должны состоять из 21 действующего спутника и трех запасных. Орбиты спутников практически круговые, расположены в трех орбитальных плоскостях и в шести орбитальных плоскостях (рис.1). Спутники оснащены солнечными батареями, которые обеспечивают энергией все системы, в том числе и во время прохождения спутника в тени Земли.

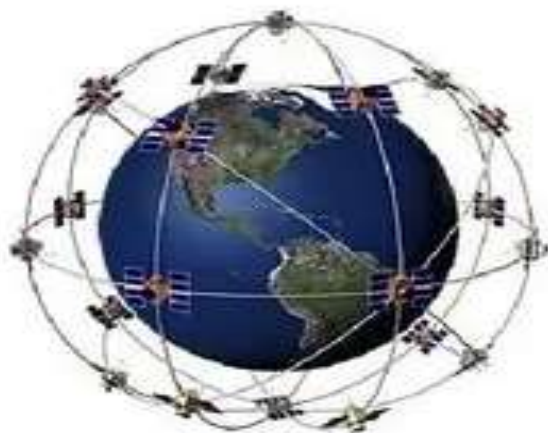
Орбиты спутников расположены на геодезической высоте, равной 20 180 км, и на расстоянии 26600 км от центра Земли.

Такое число спутников и их расположение обеспечивают одновременный прием сигналов, как минимум, от четырех спутников в любой части Земли.

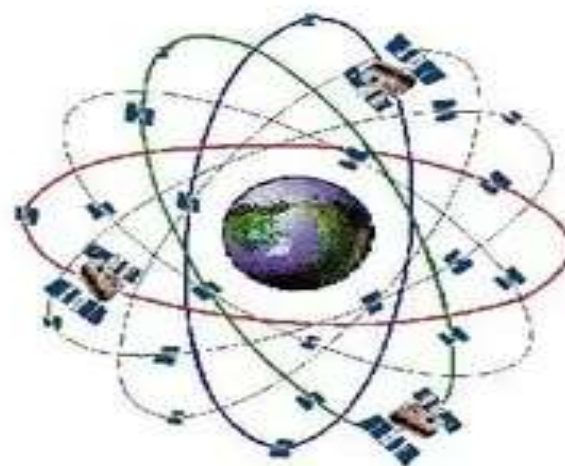
# Рисунок 1

## Глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС)

ГЛОНАСС



GPS



**Рис.2 Навигационный спутник Глонасс**



**Рис.3 Навигационный спутник GPS**



Все спутники равномерно расположены в шести орбитальных плоскостях.

Период обращения спутников составляет 12 ч звездного времени, в связи с чем каждый спутник появляется в том же месте ежедневно на 4 мин раньше вчерашнего положения.

Электроэнергией спутники (рис. 2,3) обеспечивают две солнечные батареи площадью 7,2 м<sup>2</sup> каждая, заряжая также аккумуляторы для обеспечения работоспособности спутника во время его полета в тени Земли.

Каждый спутник снабжен кварцевым стандартом частоты, двумя цезиевыми и двумя рубидиевыми стандартами частоты, которые поддерживают стабильность часов спутника. Цезиевые и рубидиевые стандарты частоты координируют и управляют основной частотой — кварцевым стандартом частоты, генерирующим 10,23 МГц. Из основной частоты формируют две частоты L-диапазона, МГц:  $L_1 = 10,23 - 154 = 1575,42$  (длина волны 19,05 см);

$L_2 = 10,23 - 120 = 1227,60$  (длина волны 24,45 см).

Эти две частоты (**называемые несущими**) через модуляторы поступают на антенну и передают на Землю информацию. Информация накладывается на несущую частоту методом импульсно-фазовой модуляции.

*Модуляция сигнала* — это изменение какого-либо параметра электрического сигнала (при амплитудной модуляции изменяется амплитуда сигнала, а при частотной — частота сигнала). При импульсно-фазовой модуляции фаза сигнала скачком изменяется на  $180^\circ$ . На частотах Lx и B2 передаются навигационные сигналы (коды), а также другая навигационная и системная информация.

В системе NAVSTAR GPS все спутники излучают на двух одинаковых частотах L-диапазона (L<sub>1</sub> и L<sub>2</sub>) но каждый спутник излучает свой личный код (индивидуальная последовательность переключения фазы на 180°), по которому ведется распознавание спутников. В российской системе ГЛОНАСС спутник излучает на своей частоте, а код общий для всех спутников.

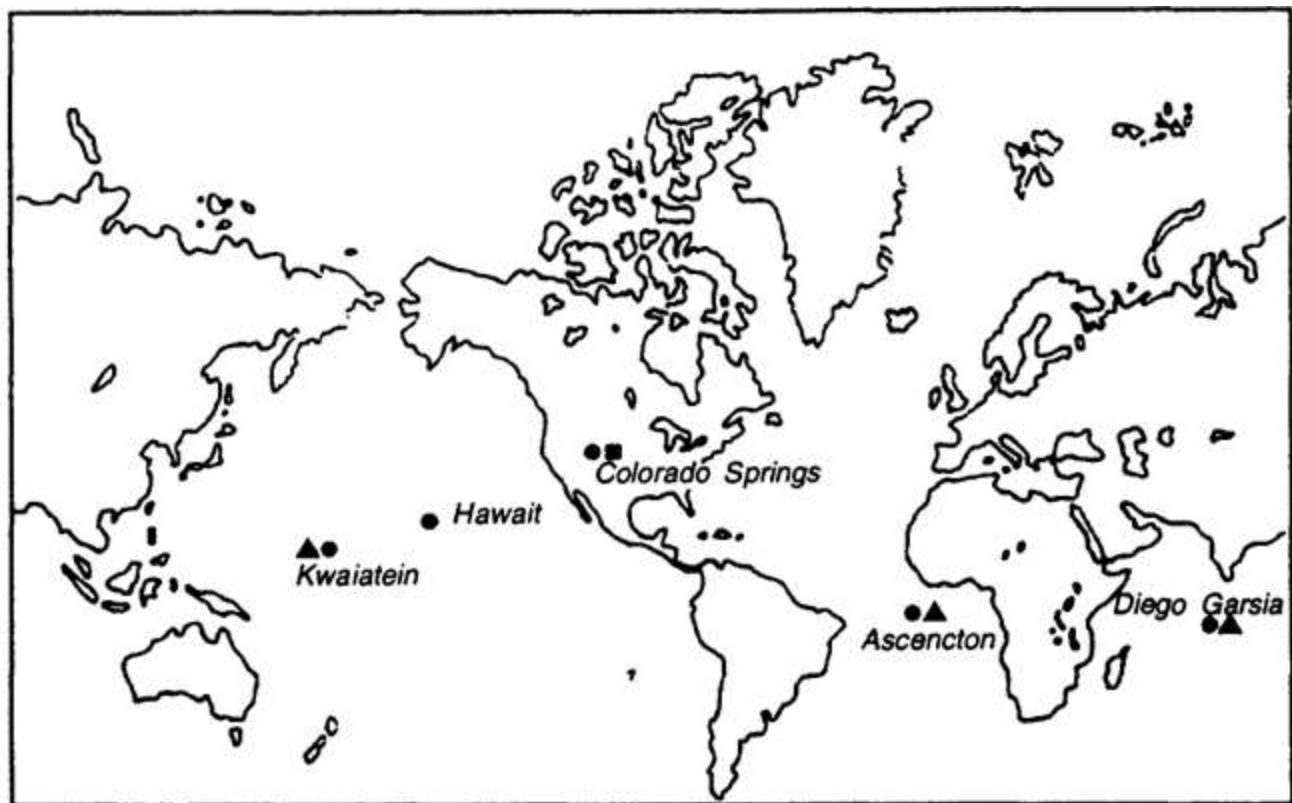
## Наземный сегмент контроля и управления навигационными спутниками системы ГЛОНАСС



Для обеспечения работ системы ГЛОНАСС используются контрольные станции, рассредоточенные по всей территории России. Размещение сети контрольных станций выбрано с учетом существующей инфраструктуры управления и из условий надежного решения задач траекторных измерений для всей орбитальной группировки. Такая сеть обеспечивает закладку на спутники высокоточных эфемерид и временных поправок 1 раз в сутки.

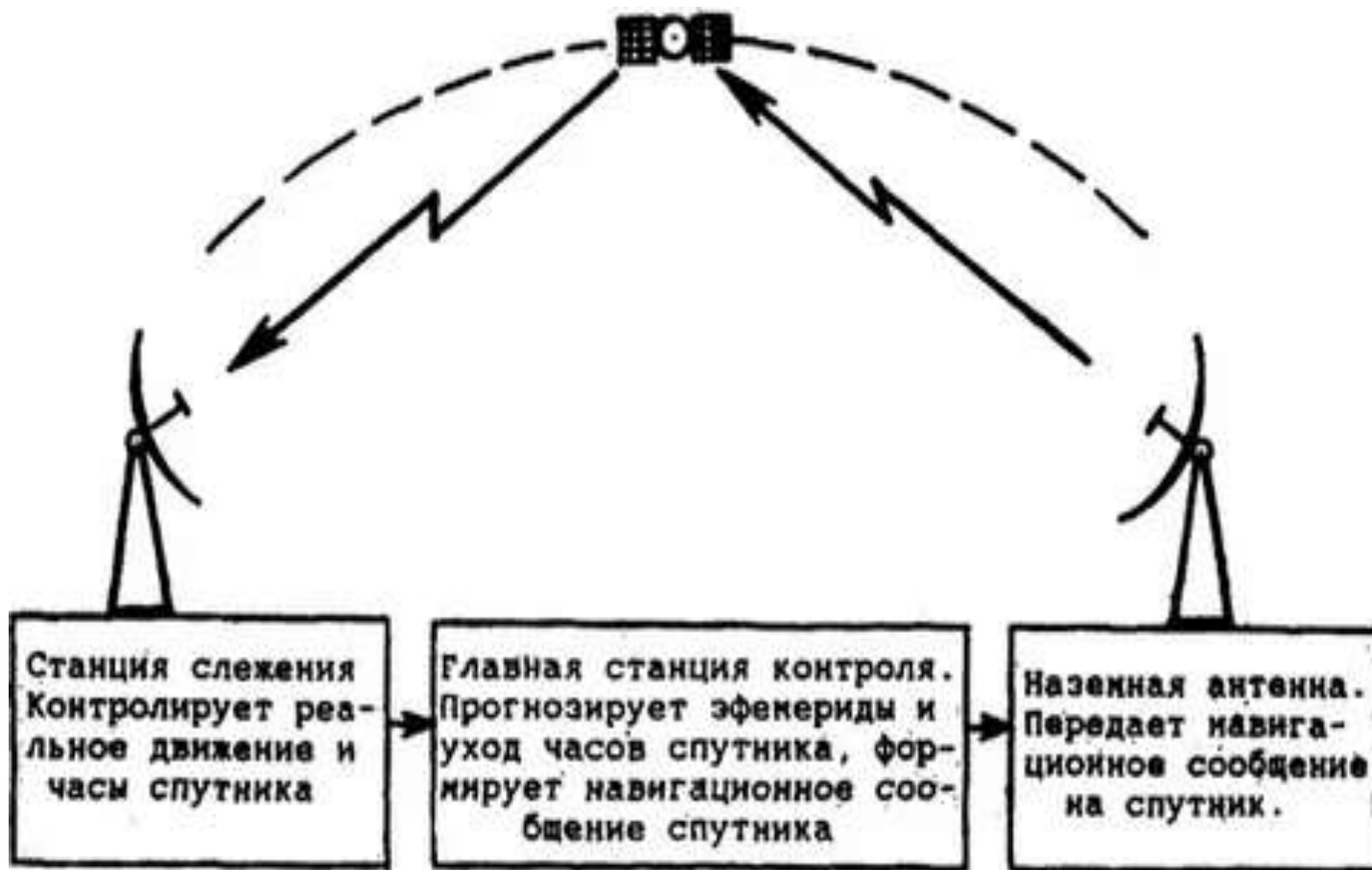
**Наземный сегмент системы ГЛОНАСС состоит из следующих взаимосвязанных стационарных элементов: центр управления системой (ЦУС), контрольные станции (КС), командная станция слежения (КСС), квантово-оптические станции и другие станции слежения за работой бортовых устройств спутников.**

# Размещение станций контроля и управления системой NAVSTAR GPS:



- Станции слежения
- Главные станции слежения
- ▲ Наземные антенны

## Измерение, прогнозирование и обновление эфемерид спутника



Станции слежения принимают все сигналы с проходящих над ними спутников, вычисляют расстояния до спутников, измеряют местные метеорологические параметры и передают информацию на главную станцию контроля.

На главной станции контроля обрабатывают всю поступающую информацию, вычисляют и прогнозируют эфемериды и поправки в часы спутников, формируют навигационные сообщения.

Наземные антенны передают на спутник навигационное сообщение, сформированное на главной станции слежения. Наземные передающие антенны расположены так, что каждый спутник ежедневно имеет по крайней мере три сеанса связи с системой слежения.

## 2. Системы отсчета времени и координат

Основной астрономической единицей измерения времени являются *сутки* (86400 с) — интервал времени, за который Земля делает один полный оборот вокруг своей оси относительно какой-либо точки на небесной сфере. Звездные сутки отсчитываются между двумя последовательными верхними положениями точки весеннего равноденствия. Для точного расчета времени приходится учитывать, что ось вращения Земли совершает медленное периодическое колебательное движение, состоящее из прецессии (движение по конусу) и нутации (колебания оси). Кроме этого суточное вращение Земли и длительность суток нестабильны.

В связи с этим в 1967 г. решением XIII Генеральной конференции по мерам и весам принято понятие атомной секунды как более стабильной единицы времени. Атомная секунда равна интервалу времени, в течение которого совершается 9192631770 колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями атома цезия-133 при отсутствии внешних воздействий. Атомная секунда принята в настоящее время за единицу времени в системе СИ. Осреднение показаний различных атомных эталонов времени позволило создать шкалу международного атомного времени.

Каждый навигационный спутник оснащен своими собственными часами наиболее совершенной конструкции, достигнутой в наше время.

Часы могут «отстать» или «спешить» всего на 0,000003 с за год. Но и эта величина погрешности считается слишком большой, и часы на спутнике постоянно контролируются с Земли и сравниваются с эталонными часами на Земле, для которых создают наиболее стабильные условия. Эта операция называется *синхронизацией часов*.

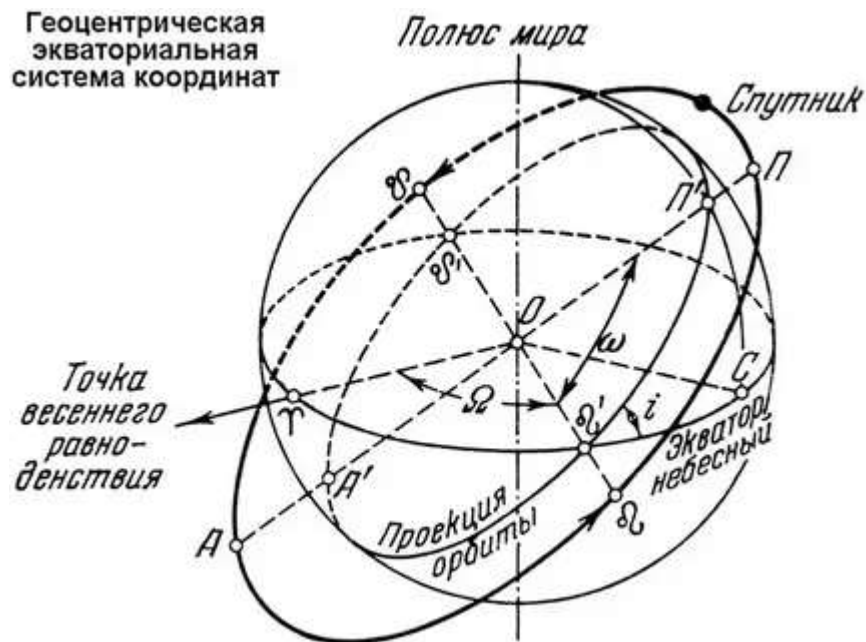
Эталонные часы на Земле являются основными опорными часами, которые создают свою шкалу времени для спутниковой навигационной системы.

В приемниках, которые используют геодезисты для координатных определений, тоже используются достаточно стабильные часы.

Но в связи с тем, что геодезический приемник должен быть компактным, легким и дешевым, часы в приемнике примерно в 1000000 раз менее стабильны часов, установленных на спутнике. В связи с этим при каждом сеансе измерений производится синхронизация часов приемника с часами навигационной спутниковой системы.

Движение искусственных спутников Земли происходит по законам небесной механики под действием сил инерции и сил притяжения Земли. Для описания такого движения используется геоцентрическая инерциальная система координат  $XOY_0Z_0$  (рис. 4.). Начало координат расположено в центре массы Земли, ось  $XO$  лежит в плоскости экватора и направлена в точку весеннего равноденствия (точку Весны), ось  $Z_0$  направлена вдоль оси вращения Земли в сторону Северного полюса  $PN$ , ось  $Y_0$  дополняет прямоугольную систему координат до полной (правой). Кроме этого используется геоцентрическая подвижная система координат  $XYZ$ . В навигационной системе координат ГЛОНАСС ее называют ПЗ-90, а в NAVSTAR GPS — WGS-84.

# Рис.4 Геоцентрическая инерциальная система координат



### **3. Орбитальное движение спутников. Эфемериды**

**Орбитальное движение спутников** заключается в том, что в каждый момент времени спутник движется по эллиптической орбите, но форма и ориентация этого эллипса в инерциальном пространстве со временем изменяются. Основным возмущающим фактором является сжатие Земли.

**Эфемериды** — это параметры орбиты и ухода часов конкретного спутника, позволяющие определить его местоположение в зависимости от времени.

**Существует два типа эфемерид:**

**Переданные (бортовые).** Передаются непосредственно от GPS-спутников и содержат информацию об элементах кеплеровской орбиты. Точность переданных эфемерид порядка 1–3 м.

**Точные эфемериды.** Основаны на результатах реальных наблюдений за спутником и последующей постобработки данных. Точность таких эфемерид выше — 0,05–0,2 м, но получить их можно только спустя некоторое время.

Для расчёта орбитального движения спутников используют, например, программу GMAT (General Mission Analysis Tool). Она предназначена для моделирования, анализа и оптимизации траекторий космических аппаратов в различных режимах полёта.

## **Измерения, выполняемые спутниковыми приемниками**

Отметим, что основное назначение системы GPS — военное.

Для исключения несанкционированного использования системы в эфемериды спутников умышленно вносятся искажения, а также искажаются показания часов спутников и несущая частота [так называемый режим Selective Availabilng (SA)].

Исключить эти искажения может лишь приемник, имеющий доступ к P-коду (только военный приемник). В этом случае предельная погрешность определения абсолютных координат составляет 10...20м.

В настоящее время режим SA выключен. Обычный приемник, работающий лишь по C/A коду, может определить абсолютные координаты с предельной погрешностью 150...200м. В систему ГЛОНАСС искажения не вносятся, и любой пользователь может определить координаты своего местоположения с предельной ошибкой 20 м.

Приведем некоторые возможные классификации современных приемников.

Приемники, способные принимать:

C/A код;

C/A код + фазовые измерения на частоте L1 ;

C/A код + фазовые измерения на частотах L1 и L2

C/A код + P-код + фазовые измерения на частотах L1 и L2.

В геодезии широкое применение нашли приемники, занимающие 2-ю и 3-ю позиции в приведенной выше классификации.

Кроме того, по области применения приемники подразделяют на геодезические, навигационные, военные и приемники времени.

В геодезических работах в основном используют приемники, способные производить фазовые измерения на частоте L1 или двух частотах L1 и L2. Однако для определения поправок в часы приемника и обеспечения синхронной работы нескольких одновременно работающих приемников параллельно с фазовыми измерениями производят кодовые измерения с использованием C/A кода. По кодовым измерениям микропроцессор приемника автоматически вычисляет поправку и корректирует часы приемника с точностью  $1 \text{ мс} = 0,001 \text{ с}$ . Следовательно, несинхронность работы приемников, производящих измерения на различных пунктах, не превышает 2 мс.

## **Структурная схема приёмника навигационной системы:**

1. Антенна с предусилителем.
2. Идентификатор сигналов и распределение частот по каналам.
3. Микропроцессор для управления работой приёмника.
4. Расшифровка принятой информации, вычисление абсолютных координат и поправок в часы приёмника, выполнение фазовых измерений.
5. Стабильный кварцевый генератор.
6. Дисплей и панель управления.
7. Блок памяти для записи и хранения информации.
8. Блок питания

## Структурная схема приёмника навигационной системы:



Примечание:

УВЧ - усилитель высокой частоты

УПЧ - усилитель промежуточной частоты

УНЧ - усилитель низкой частоты

## **4. Поправки, вводимые в результаты измерений**

**Поправки, вводимые в результаты измерений спутниковой системой навигации, представляют собой корректирующую информацию, которая передаётся от базовой станции к подвижному приёмнику для уточнения его координат.**

**Базовая станция** отслеживает все спутники в поле зрения и измеряет их псевдодальность. Затем она генерирует список поправок, необходимых для того, чтобы сделать измеренные значения псевдодальностей точными для всех видимых спутников, и передаёт информацию о поправках на передвижной приёмник.

**Поправки могут передаваться при постобработке или в реальном масштабе времени.** В первом случае после выполнения наблюдений файлы с результатами измерений переводятся на один компьютер, где и происходит их обработка специальным программным обеспечением. Во втором случае поправки от базовой станции передаются полевому приёмнику через радиомодем или другими способами беспроводной связи.

Для оперативной передачи данных применяется формат **RTCM 104**, разработанный Специальным комитетом 104 Радиотехнической комиссии по мореплаванию США. Версия формата 2.2 позволяет передавать данные как по спутникам GPS, так и ГЛОНАСС.

## Поправка за вращение Земли

**Поправка за вращение Земли в результатах измерений спутниковой системой навигации необходима для приведения координат спутника или приёмника к единому моменту времени.**

Это связано с тем, что за время распространения сигнала от спутника до приёмника вследствие вращения Земли приёмник переместится на некоторую величину. Например, если время распространения сигнала составляет приблизительно 0,07–0,08 с, а Земля за это время повернётся на угол  $1,5^\circ$ , то приёмник переместится на 40–50 м.

Если общеземные координаты применяются без этой поправки, то координаты определяемой станции будут смещены примерно на 1 по долготе.

Таким образом, поправка за вращение Земли позволяет учитывать смещение приёмника и корректировать результаты измерений для получения более точных координат.

## **Влияние ионосферы и тропосферы**

**Влияние ионосферы и тропосферы на результаты измерений спутниковой системы навигации** заключается в изменении скорости и направления распространения сигналов на пути от спутника к приёмнику.

**Влияние ионосферы** существенно больше. Фазовая скорость распространения радиоволн в ионосфере выше, чем их скорость в вакууме. Это приводит к тому, что расстояние от спутников, расположенных вблизи горизонта, до приёмников может быть уменьшено до 200 м. В средних широтах искажения днём могут достигать десятков метров, ночью — на порядок меньше.

**Влияние тропосферы** проявляется в тропосферной рефракции, которая не зависит от частоты. Задержка достигает 2,0–2,5 м в зенитном направлении и увеличивается примерно пропорционально косекансу угла высоты, достигая 20–28 м на высоте 5°. Задержка зависит от температуры, влажности и давления, изменяется с высотой пользователя и с типом местности под траекторией сигнала.

**Однако влияние тропосферы и ионосферы на точность определения разностей координат незначительно.** Это связано с тем, что спутники располагаются на больших высотах и электромагнитные волны более 95% пути распространяются в вакууме.

Для учёта влияния этих факторов при обработке результатов измерений спутниковым приёмником используют математические модели и программное обеспечение, которые позволяют вносить поправки в данные.

## 6. Режимы наблюдений

Режимы наблюдений спутниковыми приемниками подразделяют на **абсолютные и относительные**. При абсолютных наблюдениях, используя кодовые измерения, определяют координаты пунктов, а при относительных — приращения координат (иногда их называют вектором базы между пунктами).

В геодезической практике часто используются **относительные измерения** как наиболее точные. Существуют несколько режимов относительных наблюдений, которые, в свою очередь, подразделяются на две группы: **статические и кинематические**. При любом режиме относительных измерений один из приемников находится на пункте с известными координатами, а другие — на определяемых пунктах.

**Статика.** Статический режим наблюдений как наиболее точный является основным методом при создании сетей, однако он требует наибольших временных затрат. Время измерения одного пункта колеблется от 40 мин до нескольких часов (в зависимости от требуемой точности измерений, числа и расположения наблюдаемых спутников, состояния ионосферы и т.п.).

**Быстрая статика.** Быстрая статика — это разновидность статического режима измерений, при котором время наблюдений может быть сокращено до 10... 15 мин. Информацию о необходимом времени наблюдений оператор получает от приемника, когда получен достаточный объем информации. Чтобы избежать неоднозначности при обработке результатов наблюдений, практикуют возврат приемника на ранее определенный пункт или меняют местами антенны.

**Кинематика.** При кинематическом режиме измерений передвижной приемник, который иногда называют *роверным* (от англ. *rover* – скиталец), устанавливают в определенных пунктах на короткое время. Такой метод называют «stop and go» («стой и иди»).

Кинематический режим измерений начинают с инициализации, т.е. с начальных измерений, при которых выполняется разрешение неоднозначности. Для инициализации оба приемника устанавливают в нескольких метрах друг от друга, и время измерений составляет примерно 15 мин; если роверный приемник устанавливают вдалеке от опорного, то время инициализации увеличивается и может достичь 1 ч.

После завершения инициализации роверный приемник переключают в режим кинематики и перемещают к следующему определяемому пункту. При перемещении роверный приемник должен оставаться в рабочем режиме и обеспечивать прием сигналов от не менее четырех одних и тех же спутников. На крытой местности и особенно под мостами могут возникать срывы непрерывных измерений, о чем приемник информирует наблюдателя звуковым сигналом и записью на дисплее.

В таком случае необходимо вернуться на один из ранее определенных пунктов или перейти в режим статики и повторить инициализацию приемников. При установке роверного приемника на определяемом пункте оператор записывает его название (или номер), определяет высоту приемника над пунктом и вводит эти данные в приемник.

# Преобразование координат

Для отображения пространственного положения пункта или любой точки в геодезии используют две системы координат:

- пространственную геоцентрическую систему криволинейных координат (широта  $B$  и долгота  $L$ ), которые определяют положение нормали к референц-эллипсоиду Красовского;
- нормальную высоту  $H$  — расстояние от точки до квазигеоида по нормали к эллипсоиду.

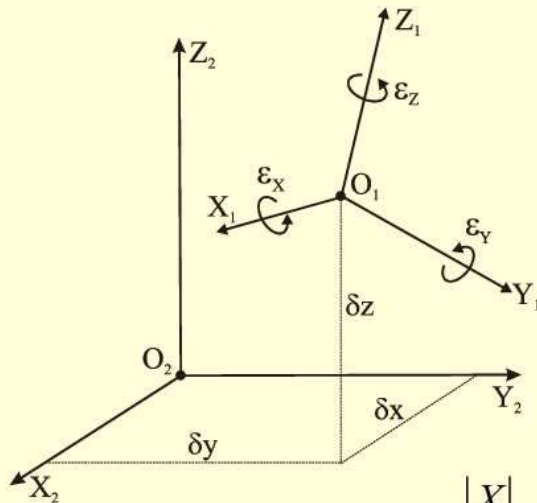
Спутниковые системы определяют прямоугольные координаты в общеземных системах GPS — в системе координат WGS-84, ГЛОНАСС — в ПЗ-90.

В связи с этим возникает задача пересчета (преобразования, или трансформирования) координат в систему координат СК-42 или СК-65, которые используют в нашей стране, или в местную систему координат, которую часто используют в инженерной геодезии.

**К параметрам преобразования координат относятся:**

- координаты смещения начал двух систем координат ( $\Delta X_0$ ,  $\Delta Y_0$ ,  $\Delta Z_0$ );
- углы разворота осей координат ( $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$ );
- масштабный коэффициент (используется лишь в тех случаях, когда точность определения масштабного коэффициента достаточно высока — при большом количестве избыточных измерений).

## Преобразование координат с использованием точно определенных параметров перехода



- 1) 3 смещения начал координат  $\delta X, \delta Y, \delta Z$ ;
- 2) 3 угла поворота  $\epsilon_X, \epsilon_Y, \epsilon_Z$ ;
- 3) масштабный коэффициент  $m$ .

$$\begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix}_2 = \begin{vmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{vmatrix}_{1,2} + (1+m) \begin{vmatrix} 1 & \epsilon_z & -\epsilon_Y \\ -\epsilon_z & 1 & \epsilon_X \\ \epsilon_Y & -\epsilon_X & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix}_1$$

**Пересчёт координат из одной системы координат в другую в контексте ГЛОНАСС производится с использованием определённых формул и параметров преобразования.**

**Например, для преобразования геодезических координат в прямоугольные пространственные координаты по ГОСТ 32453-2017 используются формулы:**

**$X = (N + H)\cos B\cos L$ .** Здесь  $X, Y, Z$  — прямоугольные пространственные координаты точки,  $B, L$  — геодезические широта и долгота точки соответственно (в радианах),  $H$  — геодезическая высота точки (в метрах),  $N$  — радиус кривизны первого вертикала (в метрах),  $e$  — эксцентриситет эллипсоида.

**Для пересчёта результатов определений в требуемую систему координат по данным ГЛОНАСС в техническом проекте «Центр-П» предлагается использовать матрицы трансформирования с учётом модели движения тектонических плит ITRF2014 Plate Motion Model.**

**Также для пересчёта координат ГЛОНАСС в значения  $X$  и  $Y$  в проекции Меркатора можно применить формулу прямоугольной проекции Меркатора:**

**$X = R * (\lambda - \lambda_0)$ .** Здесь  $\varphi$  — широта точки в радианах,  $\lambda$  — долгота точки в радианах,  $\lambda_0$  — меридиан отсчёта в радианах (обычно принимают за меридиан Гринвича, то есть  $\lambda_0 = 0$ ),  $R$  — радиус Земли в метрах (обычно принимают равным 6 371 000 м).