



Девятая международная Школа-семинар
«Спутниковые методы и системы исследования Земли»

Таруса, представительство «Интеркосмос»

12–16 апреля 2018 г.

Глобальные навигационные спутниковые системы.

История создания и основы построения

к.ф.-м.н. Р.И. Краснопёров

План лекции

1. Понятие навигации. История современной навигации
2. Спутниковые радионавигационные системы
3. Системы координат. Время
4. Принципы построения ГНСС
5. Навигационные сигналы
6. Перспективы развития



Понятие навигации

Навигация (лат. *navigare* «плавать на корабле, править кораблем» от *navis* «корабль» и *agere* «управлять») — определение **местоположения, скорости и ориентации** движущихся объектов.

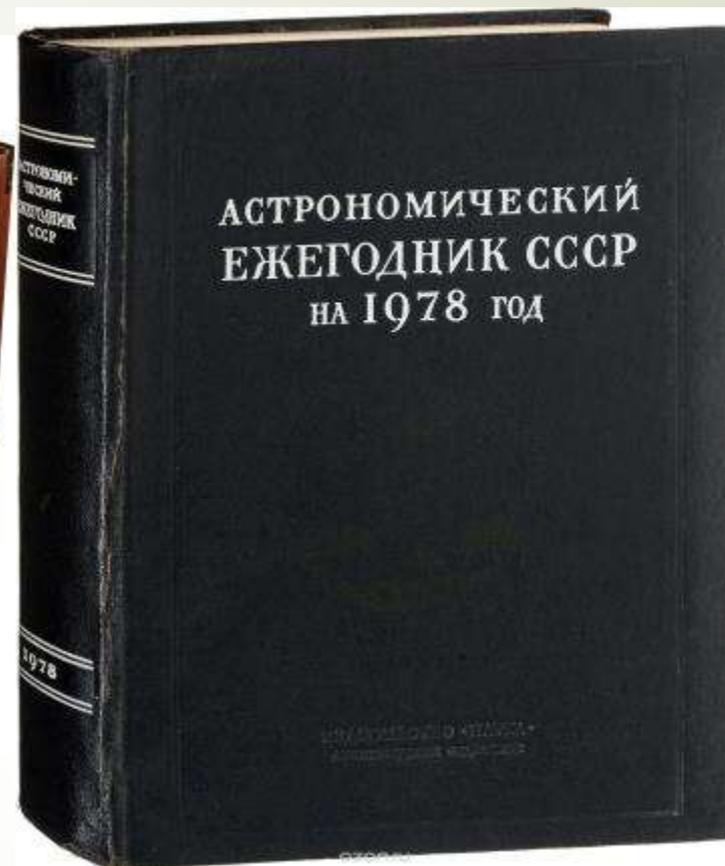
Назначение навигационных систем:

- определение положения в принятой системе координат
- определение скорости
- распространение принятой шкалы времени

Positioning — позиционирование, местоопределение, определение местоположения.



Астрономические наблюдения



Наземная радионавигация (1940-е)

LORAN (LOng RANge Navigation) — Радионавигационная система наземного базирования.

- Принцип работы: импульсно-фазовый
- Погрешность определения положения: 50—150 м



Передатчик LORAN в заливе
Кембридж Бэй, Канада



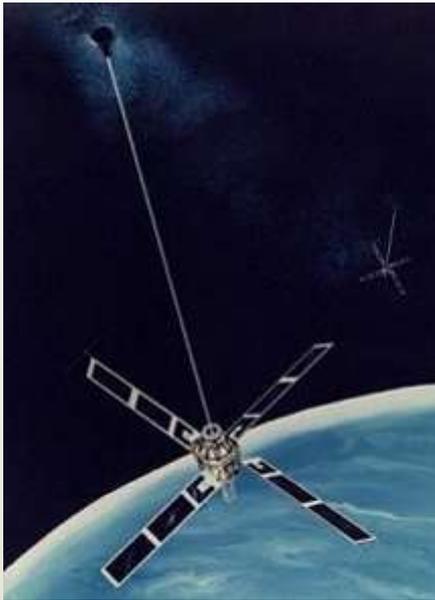
Приемник системы LORAN, 1960-е гг.

<https://en.wikipedia.org/>

Спутниковые радионавигационные системы первого поколения (1960-е)

Transit, Timation (США); «Циклон» («Цикада») (СССР)

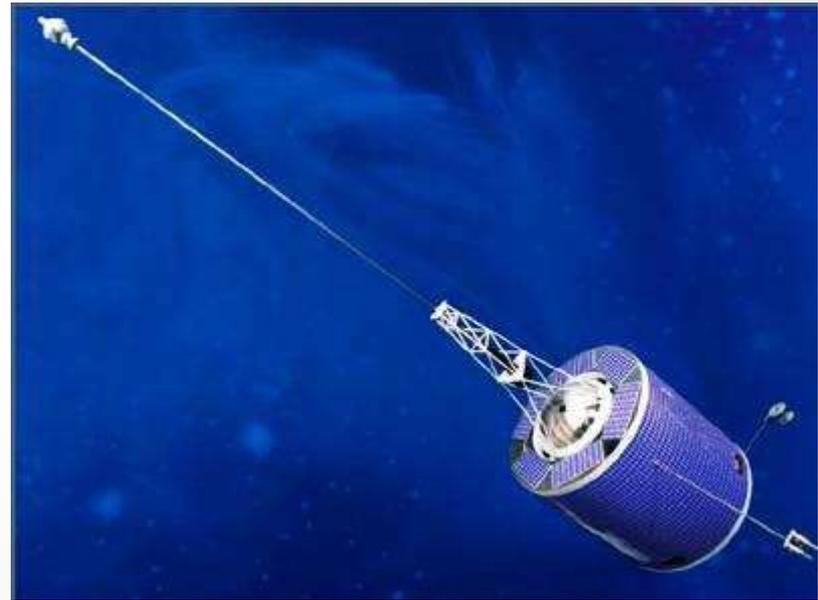
- Принцип работы: эффект Доплера
- Погрешность определения положения: 80—100 м



КА системы Transit

<https://en.wikipedia.org/>

14.04.2018



КА системы «Циклон»

<https://aboutspacejournal.net/>

12—16 апреля 2018 г., Таруса

Спутниковые радионавигационные системы второго поколения (ГНСС) (1970-е—1980-е)



NAVSTAR GPS
(США)



ГЛОНАСС
(СССР/Россия)



Galileo (EC)



Beidou (Китай)



QZSS (Япония)



NavIC (Индия)

Координаты и время

ICRS — Международная небесная система координат (International Celestial Reference System)

ICRF — Международная небесная отсчетная основа (International Celestial Reference Frame), реализация ICRS

ITRS — Международная земная система координат (International Terrestrial Reference System)

ITRF — Международная небесная отсчетная основа (International Terrestrial Reference Frame), реализация ITRS

UT — Всемирное время (Universal Time)

TAI — Всемирное атомное время (International Atomic Time)

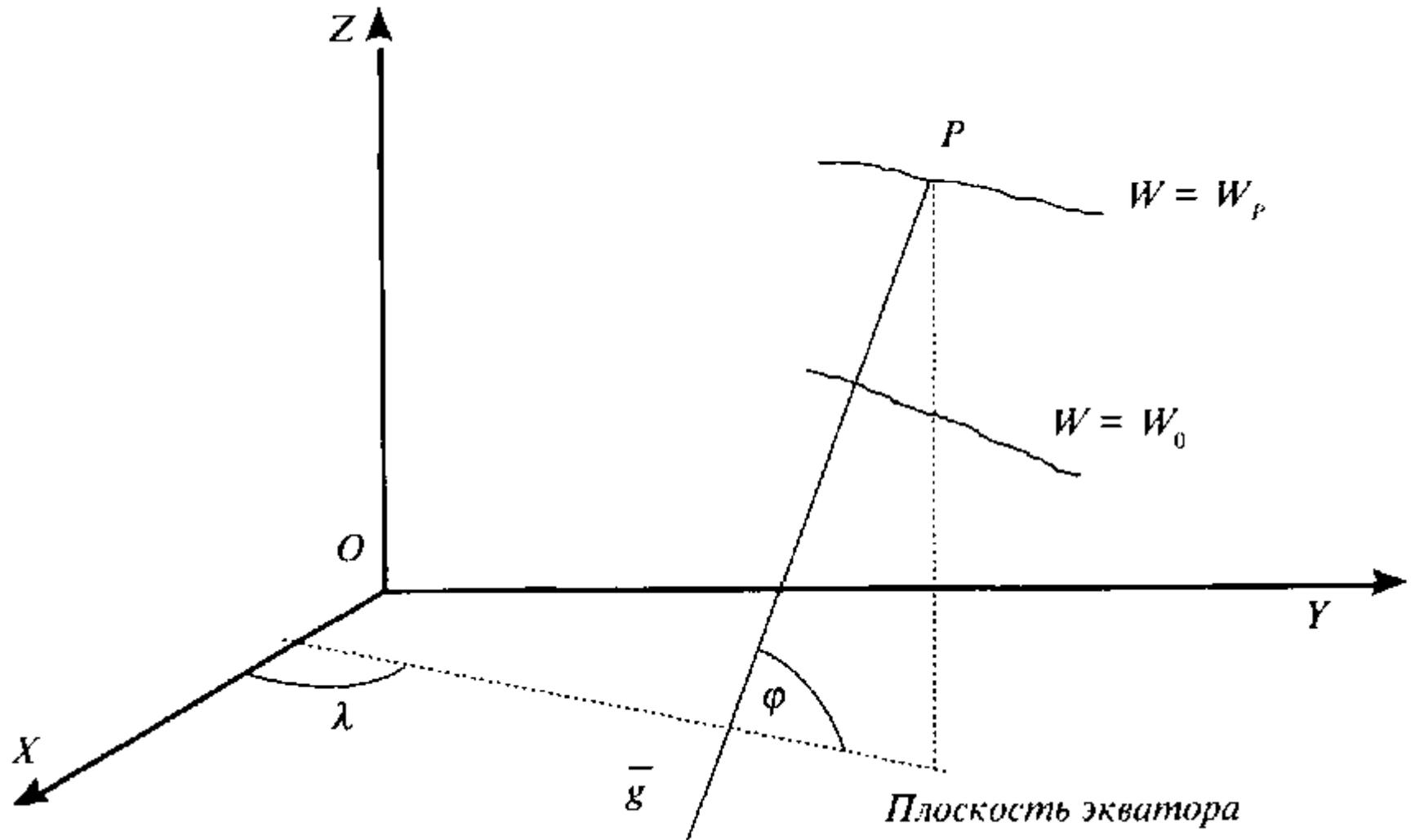
UTC — Всемирное координированное время (Universal Time Coordinated)

TCB — Барицентрическое координатное время (Barycentric Coordinated Time)

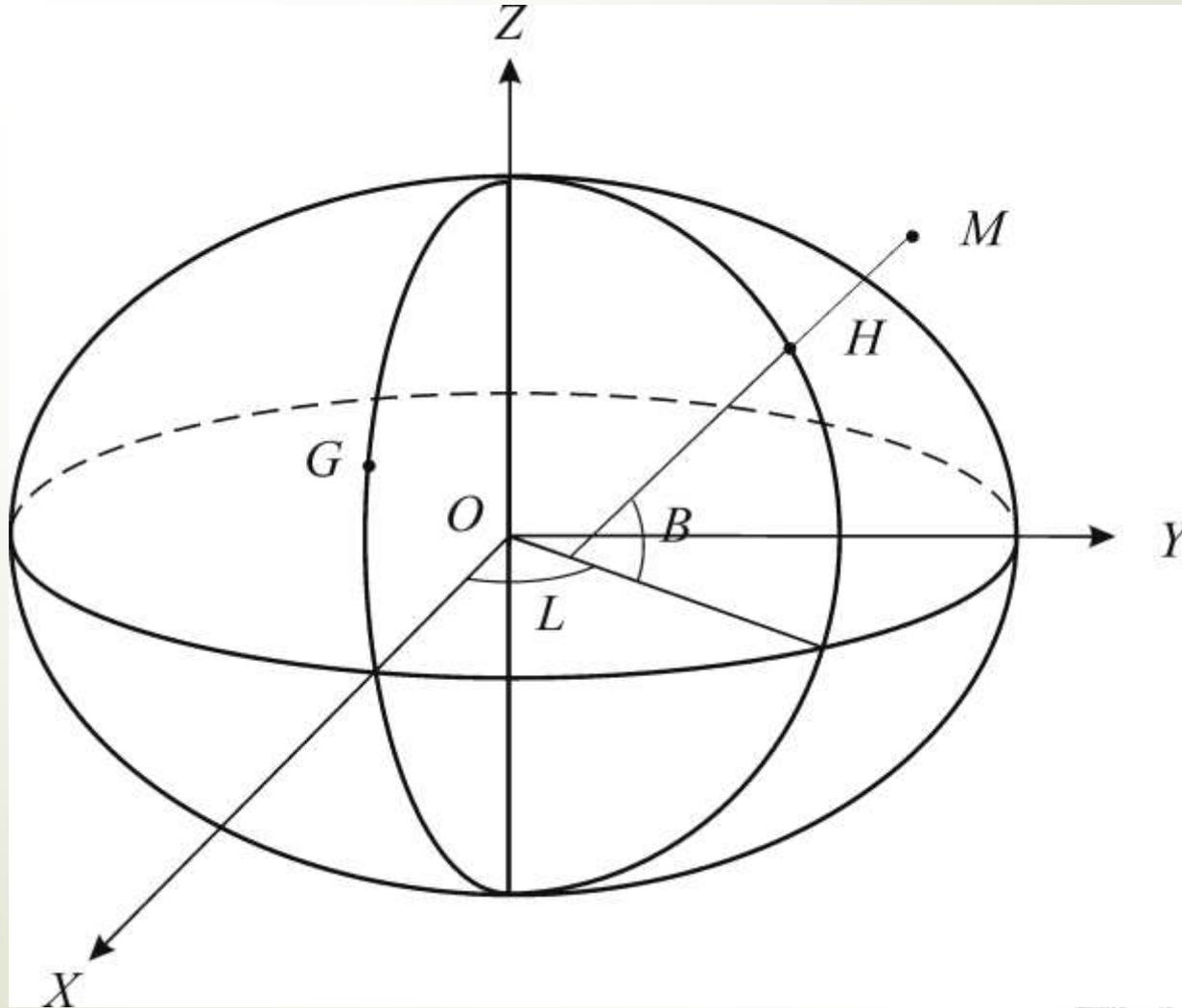
TCG — Геоцентрическое координатное время (Geocentric Coordinated Time)



Земные системы координат: натуральная система координат



Земные системы координат: геодезическая система координат



Системы координат ГНСС

| Навигационная система | Система координат |
|-----------------------|--|
| NAVSTAR GPS (США) | ПЗ-90 (Параметры Земли 1990 года) |
| ГЛОНАСС (СССР/Россия) | WGS-84 (World Geodetic System) |
| Galileo (ЕС) | GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame) |
| Beidou (Китай) | CGCS2000 (China Geodetic Coordinate System 2000) |
| QZSS (Япония) | JGS (Japanese geodetic system) |
| NavIC (Индия) | WGS-84 (World Geodetic System) |



<https://www.glonass-iac.ru/>

Системы NAVSTAR GPS и ГЛОНАСС

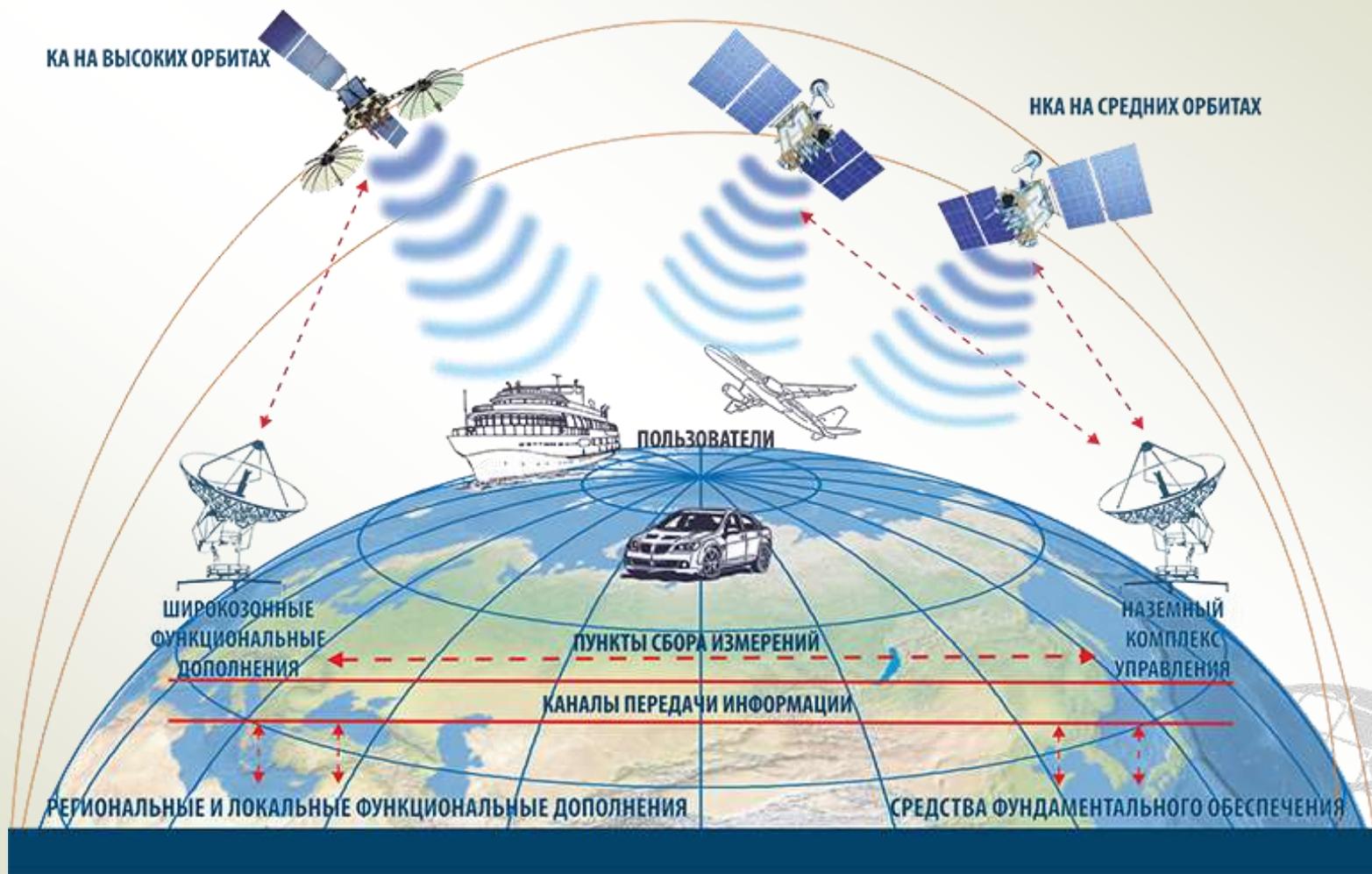
NAVSTAR GPS (США) **NAV**igation **S**ystem with **T**ime **A**nd **R**anging – **G**lobal **P**ositioning **S**ystem

ГЛОНАСС (СССР/Россия) **Г**ЛОбальная **Н**Авигационная **С**путниковая **С**истема

| Параметры | NAVSTAR GPS | ГЛОНАСС |
|-----------------------------------|---|---------------------------------|
| Первый запуск | февраль 1978 г. | октябрь 1982 г. |
| Штатная эксплуатация системы | с 1994 г. | с 1995 г. |
| Количество штатных КА | 24(32) | 24 |
| Количество орбитальных плоскостей | 6 | 3 |
| Средняя высота орбиты | 20 183 км | 19 100 км |
| Наклонение орбиты | 55° | 64,8° |
| Период обращения | 11 ^h 58 ^m | 11 ^h 15 ^m |
| Представление эфемеридных данных | кеплеровы элементы | 3 коорд., 3 скор., 3 ускор., |
| Шкала времени | UTC (US) непрерывная шкала с 06.01.1980 | UTC (SU) |



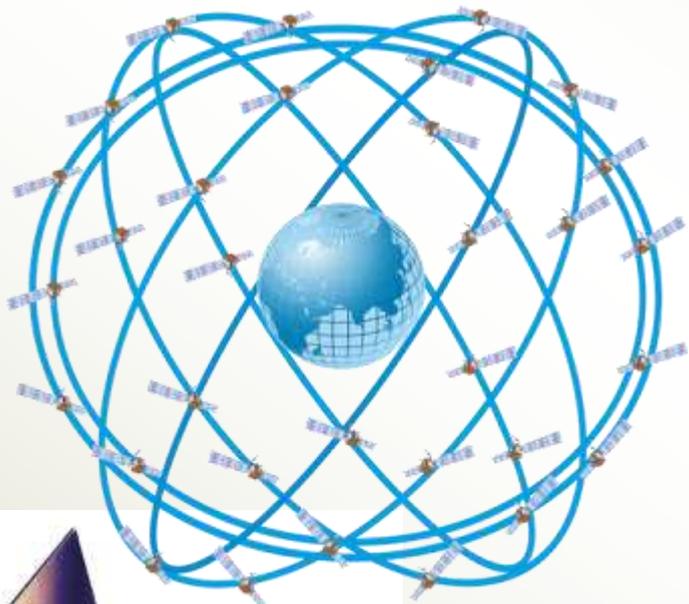
Структура ГНСС



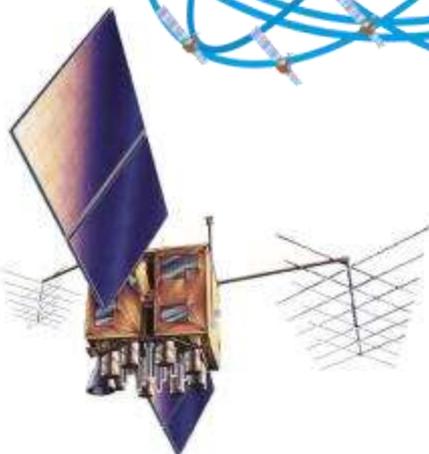
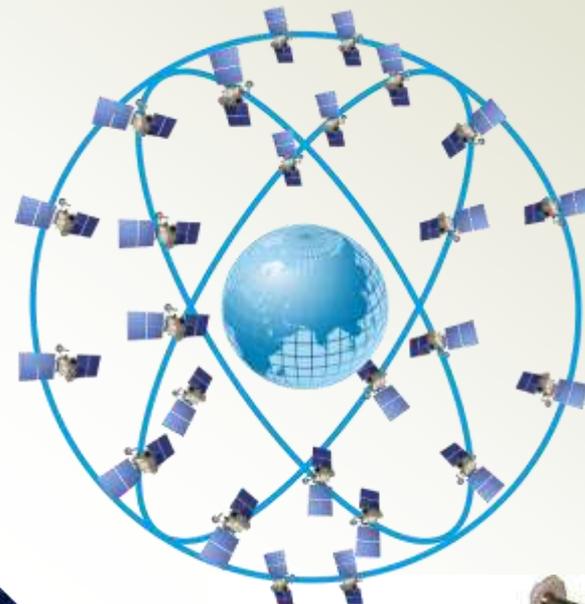
<https://www.glonass-iac.ru/>

Космический сегмент (Space Segment)

NAVSTAR GPS



ГЛОНАСС



<https://www.glonass-iac.ru/>

Состав группировки ГЛОНАСС на 13.04.2018

| Всего в составе ОГ ГЛОНАСС | 25 КА |
|--------------------------------------|--------------|
| Используются по целевому назначению | 23 КА |
| На этапе ввода в систему | - |
| Временно выведены на техобслуживание | 1 КА |
| Орбитальный резерв | - |
| На этапе летных испытаний | 1 КА |



<https://www.glonass-iac.ru/>

Состав группировки NAVSTAR GPS на 13.04.2018

| Всего в составе ОГ ГЛОНАСС | 32 КА |
|--------------------------------------|--------------|
| Используются по целевому назначению | 31 КА |
| На этапе ввода в систему | - |
| Временно выведены на техобслуживание | 1 КА |
| Орбитальный резерв | - |
| На этапе летных испытаний | - |



<https://www.glonass-iac.ru/>

Наземный сегмент управления (Control Segment) NAVSTAR GPS



<https://www.glonass-iac.ru/>

Наземный сегмент управления (Control Segment) ГЛОНАСС

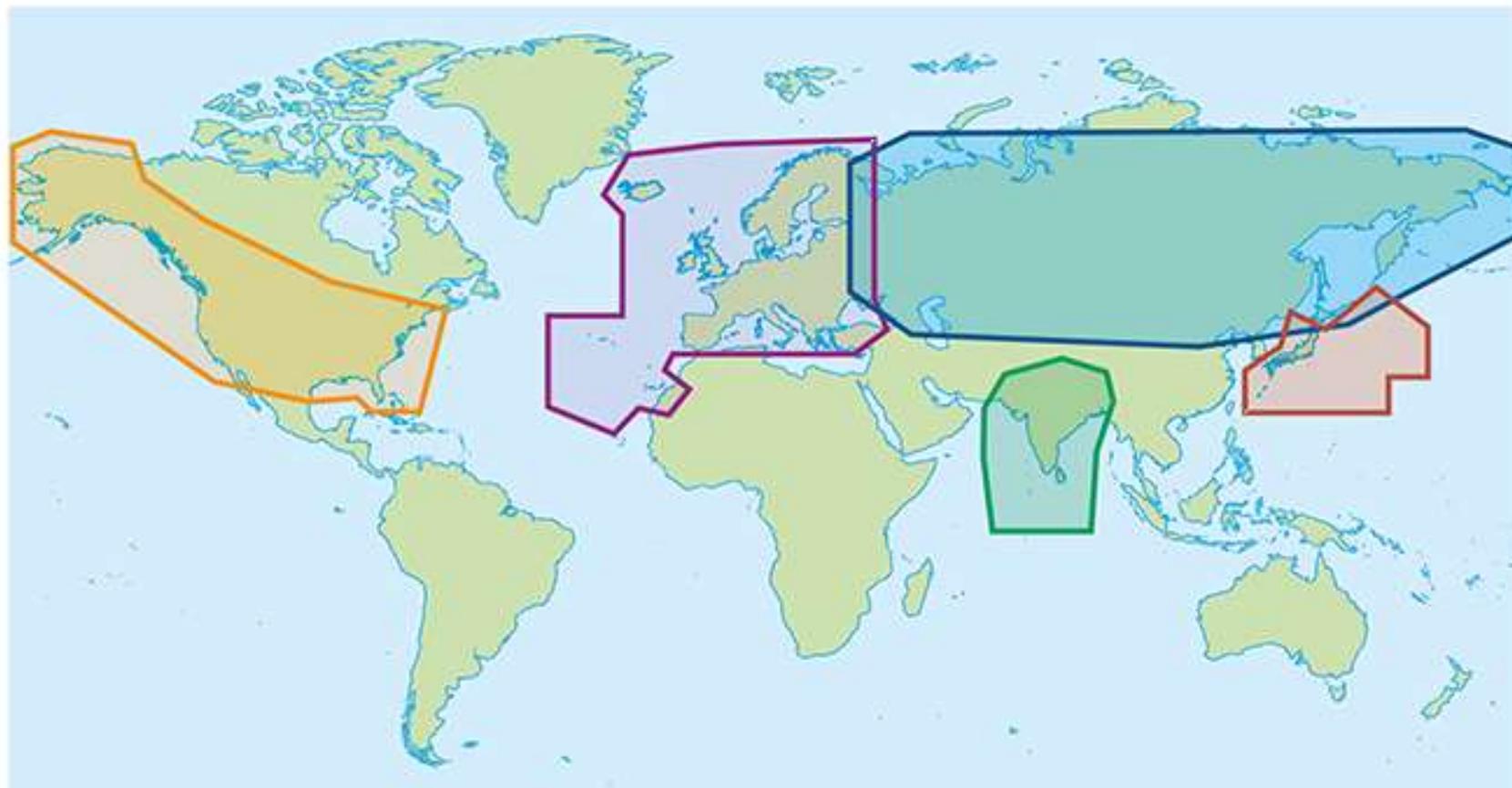


<https://www.glonass-iac.ru/>

Пользовательский сегмент (User Segment)



Функциональные дополнения



WAAS



EGNOS



CDKM



GAGAN



MSAS

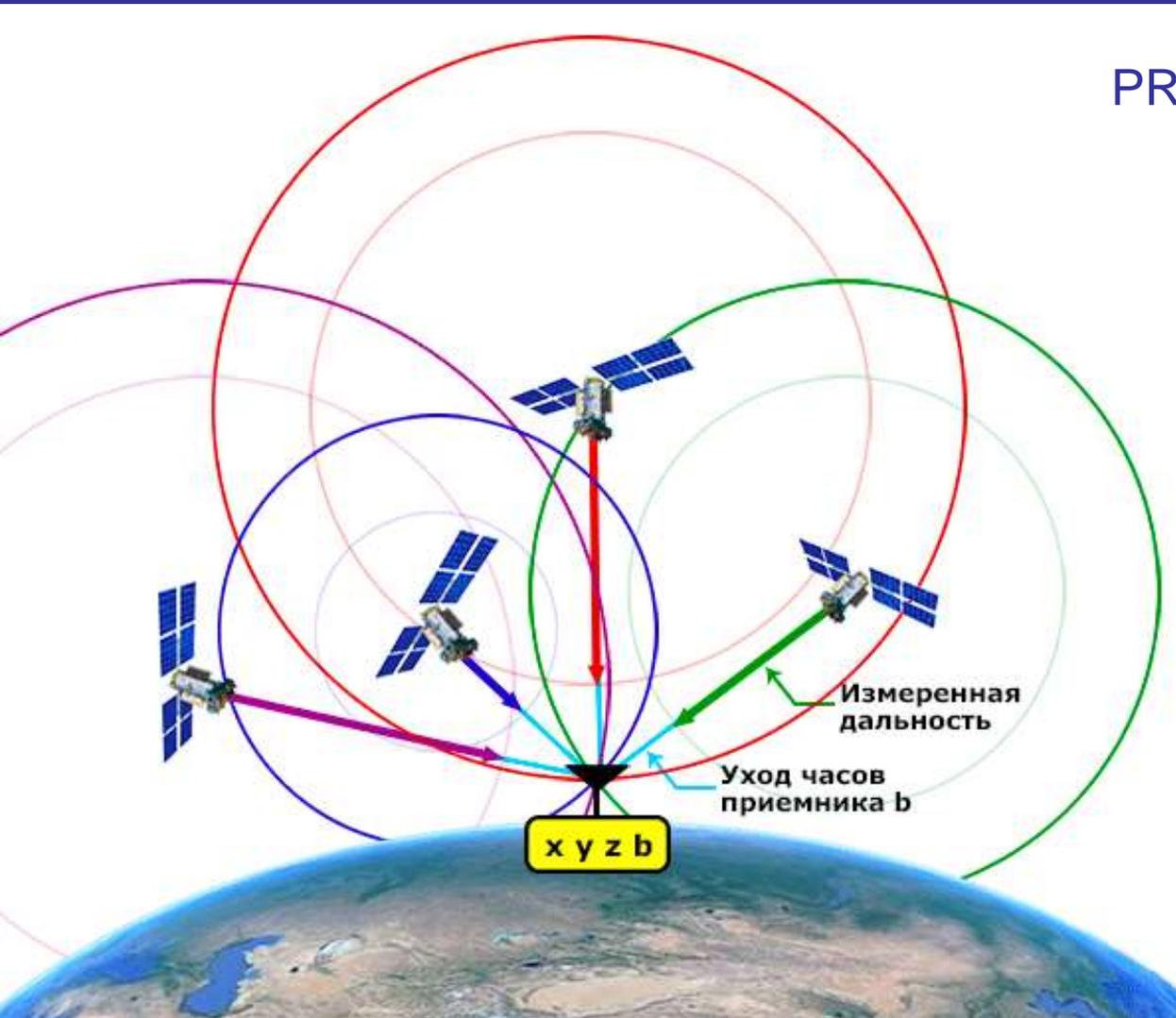
<https://www.glonass-iac.ru/>

Функциональные дополнения

| | | |
|--|-------|--------|
| Широкозонная система дифференциальной коррекции и мониторинга | СДКМ | РОССИЯ |
| Широкозонная система функциональных дополнений (Wide Area Augmentation System) | WAAS | США |
| Европейская геостационарная навигационная служба (European Geostationary Navigation Overlay Service) | EGNOS | ЕС |
| Геостационарное навигационное дополнение системы GPS | GAGAN | ИНДИЯ |
| Космическая система функционального дополнения (глобальных навигационных спутниковых систем) на космических аппаратах MTSAT (Multiple weather-observation and air Traffic control SATellite (MTSAT) Satellite Augmentation System) | MSAS | ЯПОНИЯ |



Псевдодальномерные измерения



$$PR = R + c \times (\delta t_{CR} - \delta t_{CS} + \delta t_R)$$

Факторы снижения точности ГНСС-измерений:

- Системные погрешности, вносимые аппаратурой КА
- Погрешности, возникающие на трассе распространения сигнала от космического аппарата до потребителя
- Погрешности, возникающие в аппаратуре потребителя

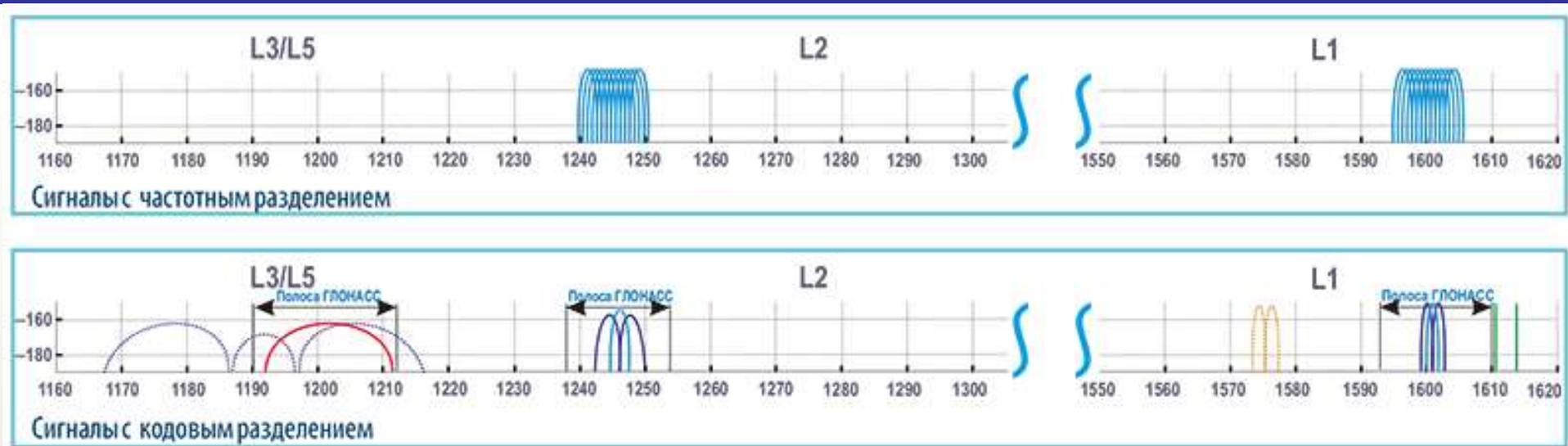
Навигационные сигналы NAVSTAR GPS

| Диапазон | Несущая частота, МГц | Сигнал |
|----------|----------------------|---------------|
| L1 | 1 575,42 | C/A P M |
| L2 | 1 227,6 | L2C P M |
| L5 | 1 176,45 | I5 Q5 |



<https://www.glonass-iac.ru/>

Спектр навигационных сигналов ГЛОНАСС



Выведенный на орбиту в 2011 году для лётных испытаний космический аппарат модификации «ГЛОНАСС-К» 1-го этапа наряду с радиосигналами L1 и L2 с частотным разделением, полностью аналогичным сигналам «ГЛОНАСС-М», дополнительно излучает в диапазоне L3 радиосигналы открытого доступа с кодовым разделением.



Навигационные сигналы ГЛОНАСС с кодовым разделением

| Диапазон | Несущая частота, МГц | Сигнал |
|----------|----------------------|-------------------------|
| L1 | 1 600,995 | L1OC L1SC |
| L2 | 1 248,06 | L2OCp L2SC L2 KСИ |
| L3 | 1 202,025 | L3OC |



<https://www.glonass-iac.ru/>

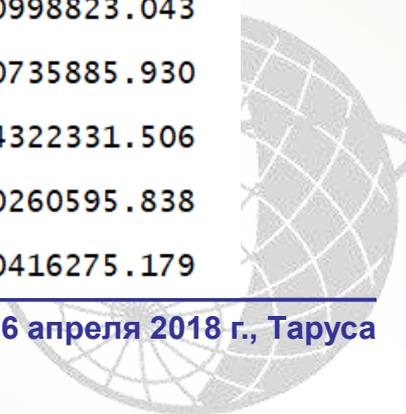
Данные измерений (RINEX)

RINEX (Receiver INdependent EXchange Format) — формат обмена данными для файлов исходных данных спутниковых навигационных приёмников.

```

2.11 OBSERVATION DATA M (MIXED) RINEX VERSION / TYPE
teqc 2013Mar15 20180413 00:15:04UTCPGM / RUN BY / DATE
Linux 2.4.21-27.ELsmp|Opteron|gcc -static|Linux x86_64|+= COMMENT
BIT 2 OF LLI FLAGS DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION COMMENT
MOBJ MARKER NAME
12365M002 MARKER NUMBER
FDI RDAAC OBSERVER / AGENCY|
MT302240425 JPS LEGACY 2.6.1 Jan,10,2008 REC # / TYPE / VERS
RA0033 JPSREGANT_SD_E1 NONE ANT # / TYPE
2936422.2599 2178372.5000 5208856.1381 APPROX POSITION XYZ
0.1312 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
1 1 WAVELENGTH FACT L1/2
7 L1 L2 C1 P1 P2 # / TYPES OF OBSERV
30.0000 INTERVAL
18 LEAP SECONDS
2018 4 12 0 0 0.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
END OF HEADER
18 4 12 0 0 0.0000000 0 17G22G11G17R21G01R07G32G08G18G31G03R15
R05R14R06R22G14
110349578.674 7 85986708.66646 20998824.009 20998822.611 20998823.043
108967814.757 8 84910002.23246 20735885.430 20735884.835 20735885.930
127814710.998 5 99595887.00342 24322327.688 24322326.881 24322331.506
108418519.963 8 84325556.618 7 20260594.103 20260593.921 20260595.838
107288244.805 8 83601250.60947 20416271.649 20416271.095 20416275.179

```



Перспективы развития

- Разработка и запуск КА нового поколения с расширенным сроком активного существования
- Оснащение КА новыми атомными стандартами времени и частоты
- Введение новых несущих частот
- Миниатюризация и удешевление атомных стандартов времени и частоты. Оснащение пользовательской аппаратуры
- Ввод в штатную эксплуатацию систем Beidou (Китай), QZSS (Япония), NavIC (Индия)
- Развитие многоканальной приемной аппаратуры потребителя
- Развитие сетей наземной ГНСС-инфраструктуры
- Развитие широкозонных функциональных дополнений

