



Казанский федеральный университет  
Кафедра астрономии и космической геодезии



*Р.А.Кащеев*  
**Задачи и методы  
космической геодезии**



# Базовое космическое глобальное информационное поле и его потенциальные потребители

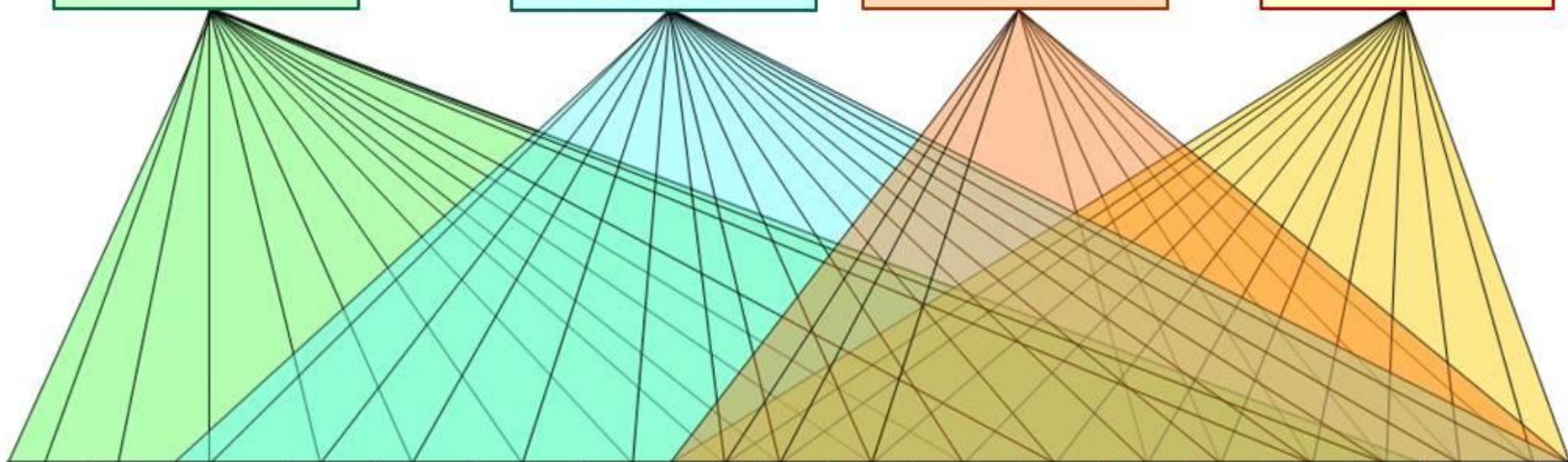


**Дистанционное зондирование Земли**

**Навигационное, геодезическое**

**Связное**

**КОСПАС-САРСАТ**



Метео-обстановка	Сельское хозяйство: анализ состояния лесов, угодий	Геология: поиск полезных ископаемых	Экология	Градо-строительство	Земельный кадастр, межевание, строение	Геодезия, карто-графия	Медицина здраво-охранение	МО МВД	Индивидуальный потребитель	Мониторинг лесных пожаров, вырубки, лесо-устройства	Мониторинг КВО и ОГ	Мониторинг инженер-ных соору-жений	Мониторинг транс-порта	Мониторинг природных и антропо-генных ЧС	Мониторинг судов и биоре-сурсов	Связь, телеви-дение, Интернет	Опове-щение о ЧС
------------------	--	-------------------------------------	----------	---------------------	--	------------------------	---------------------------	--------	----------------------------	---	---------------------	------------------------------------	------------------------	--	---------------------------------	-------------------------------	------------------



## Координатно-временное и навигационное обеспечение



**Высокоточное определение координат и синхронизация становятся неотъемлемой частью:**

- обеспечения национальной безопасности;
- хозяйственной деятельности государств;
- повседневной жизни граждан



ГЛОНАСС



**ГЛОБАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА**

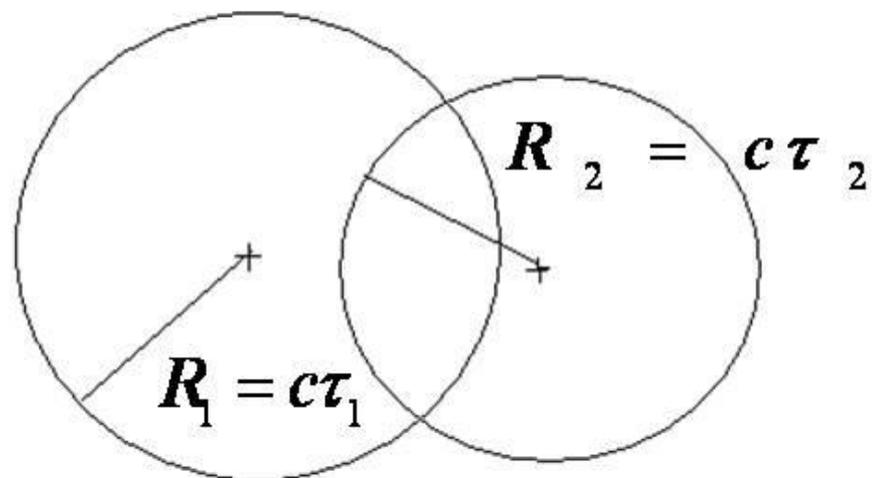


## Основные вехи создания системы ГЛОНАСС

- **1976 г.** Постановление ЦК КПСС и СМ СССР №1043-361 от 16.12.76 г. о создании навигационной системы ГЛОНАСС;
- **1982 г.** Первый запуск КА “Глонасс”;
- **1986 г.** Постановление ЦК КПСС и СМ СССР на модернизацию КА “Глонасс” № 136-46 от 27.01.86 г.;
- **1993 г.** Начата опытная эксплуатация системы неполной комплектации ОГ по Распоряжению Президента РФ №658 РПС от 24.09.1993 г.;
- **1995 г.** Развертывание штатной ОГ по Постановлению Правительства РФ № 237 от 07.03.1995 г.;
- **1998 г.** Поручение Президента Правительству РФ о разработке плана сохранения и развития системы ГЛОНАСС;
- **2001 г.** Принятие Федеральной целевой программы “Глобальная навигационная система” Постановлением № 587 от 20.08.2001 г.;
- **2003 г.** Запуск первого модернизированного КА “Глонасс-М”;
- **2008 г.** Создание орбитальной группировки из 18 КА;
- **2010 г.** Планируемый срок начала ЛКИ перспективного навигационного КА “Глонасс-К” нового поколения;
- **2010 г.** Создание штатной орбитальной группировки из 24 КА.



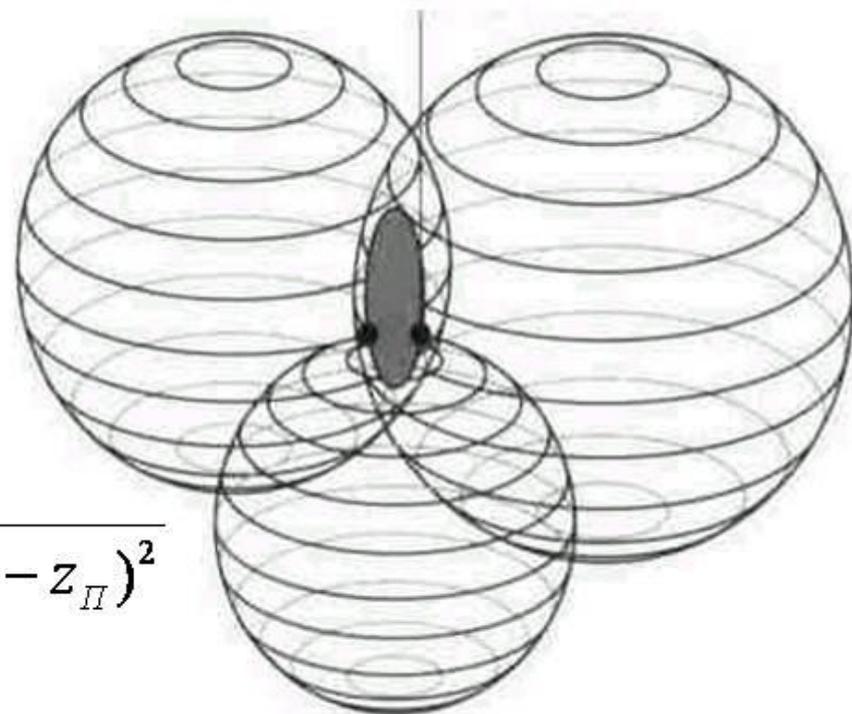
## Дальномерный метод



Для однозначного определения местоположения потребителя необходимо одновременно производить измерения дальности до 3-х опорных точек

Модель измерения дальности

$$R = \sqrt{(x_{\text{НКА}} - x_{\text{П}})^2 + (y_{\text{НКА}} - y_{\text{П}})^2 + (z_{\text{НКА}} - z_{\text{П}})^2}$$





## Принципы навигационных определений по КА системы ГЛОНАСС

- Геометрическая интерпретация навигационных определений пользователя по измерениям дальности и радиальной скорости до навигационных КА представляет собой пересечение сфер, образованных радиусами (измеренные дальности от КА до пользователя) с центрами в местоположении КА.

$$\begin{cases} D_i = \sqrt{(\bar{S}_i - \bar{P}) + \Delta\Phi \times C} \\ \dot{D}_i = \frac{(\bar{S}_i - \bar{P})(\bar{V}_s - \bar{V}_n)}{D_i} + \Delta F \times C \end{cases}$$

$i = 1, 2, 3, 4.$

$\bar{P}, \bar{V}_n$  - определяемые векторы положения и скорости потребителя;

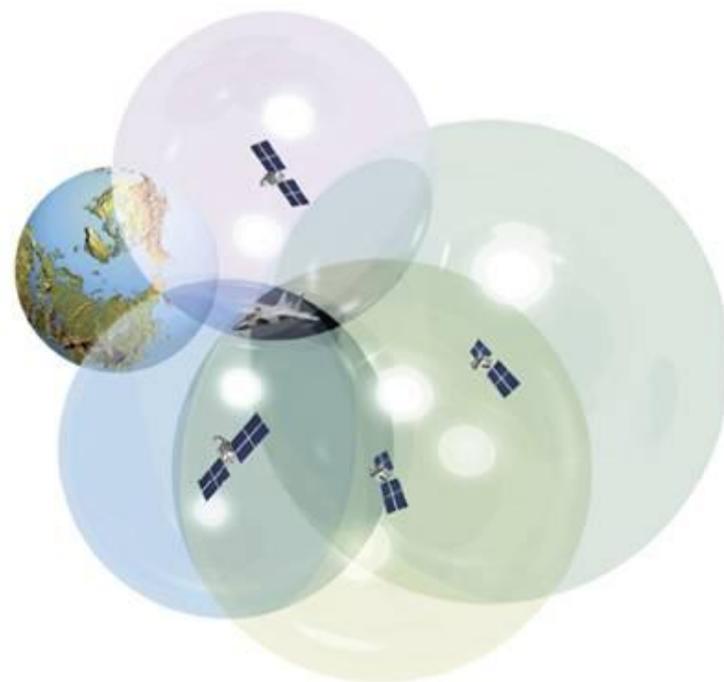
$\bar{S}_i, \bar{V}_{s_i}$  - эфемериды КА;

$D_i, \dot{D}_i$  - измеряемые параметры (дальность и радиальная скорость);

$\Delta\Phi$  - разность фаз генераторов КА и потребителя;

$\Delta F$  - относительный уход частоты опорного генератора потребителя от частоты генератора КА;

$C$  - скорость света.





## Принцип навигации с использованием космической навигационной системы ГЛОНАСС



В навигационном сигнале с каждого спутника передаются:

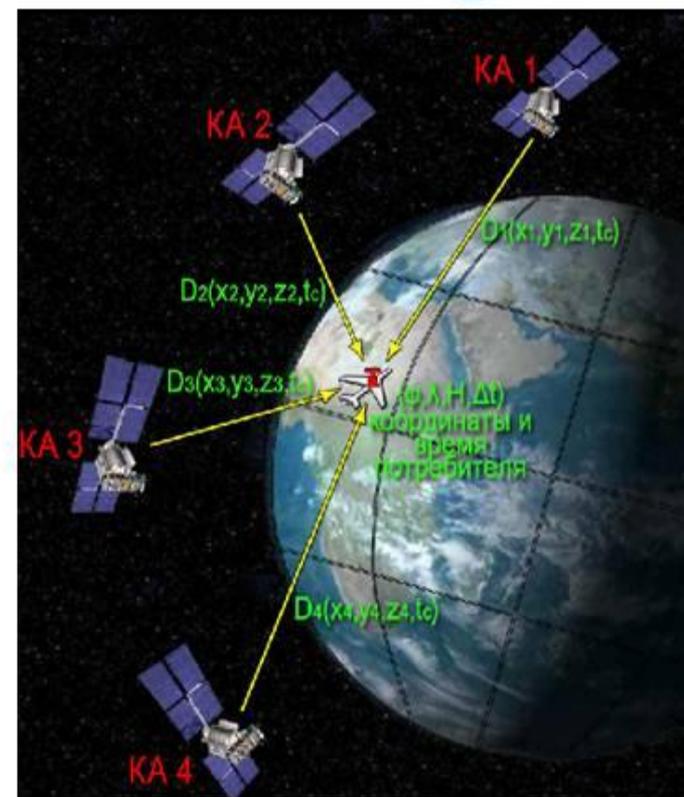
- $X_j Y_j Z_j$  - текущие эфемериды (координаты) спутников
- $t_c$  - системное время момента излучения сигналов, привязанное к всемирному времени UTC

В навигационном приемнике измеряется:

- $D_j$  - псевдодальность от потребителя

до  $j$ -го навигационного спутника (разность моментов времени излучения сигнала и приема в приемнике) решается система уравнений для определения четырех неизвестных:

- $\varphi$  - широта
- $\lambda$  - долгота
- $H$  - высота над поверхностью Земли (или координаты  $X, Y, Z$  – в земной системе координат)
- $\Delta t$  - поправка к часам потребителя по отношению к системному времени



Для определения координат и времени должен приниматься сигнал минимум от 4-х КА



## Архитектура ГЛОНАСС

### Система ГЛОНАСС состоит из:

- ✓ Космического сегмента
- ✓ Наземного комплекса управления
- ✓ Сегмента пользователей

#### Орбитальная группировка:

24 спутника  
(3 плоскости x 8 спутников)  
Тип орбиты: круговая,  
H = 19 100 км,  
i = 64.8°

Период обращения: 11ч. 15мин.

Орбиты сдвинуты по экватору на 120°

Частотный диапазон: L1 ~ 1,6ГГц  
L2 ~ 1,25ГГц

Зона обслуживания: Глобально по поверхности Земли в воздушном и околоземном космическом пространстве до высот 2000 км.

Точность навигационных определений (вероятность 0,95):

В стандартном режиме:

по плановым координатам	~20 м
по высоте	~30 м
по скорости	~5 см/с
по времени привязки к Госэталону РФ	~0,7 мкс

В дифференциальном режиме: от 1 м до 5 м

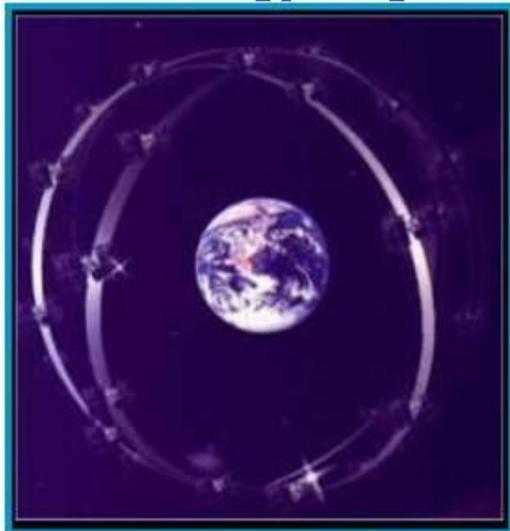


**Обеспечиваются навигационные определения независимо от времени суток, года и метеоусловий**



## Космический комплекс

### Орбитальная группировка



### Ракетно-космический комплекс

<p>Ракета-носитель "ПРОТОН-К" (Протон-М) Разгонный блок "Бриз-М"</p>  <p>Технические комплексы: - космического аппарата - ракеты-носителя - разгонного блока</p> <p>г. Байконур</p>	<p>Ракета-носитель "Союз-2" Разгонный блок "Фрегат"</p>  <p>Технические комплексы: - космического аппарата - ракеты-носителя - разгонного блока</p> <p>г. Плесецк</p>
---	---

### Наземный комплекс управления



### Управление КА, контроль состояния

Создание и восполнение  
орбитальной группировки



## Наземный комплекс управления





## Общий вид и задачи, решаемые центром управления системы (ЦУС-У)



**ЦУС-У обеспечивает управление системой из :**

- **24 КА, находящихся в режиме штатного функционирования;**
- **3 КА на этапе ввода в систему;**
- **3 КА в нештатных ситуациях.**



## Технические средства модернизированного НКУ



Задачи, решаемые НКУ модернизированной глобальной навигационной системы ГЛОНАСС, состоят из двух компонент:

1. собственно управление космическими аппаратами орбитальной группировки, включая:
  - планирование работы наземных средств управления КА;
  - расчет программы управления КА и подготовку информации, выдаваемой на КА;
  - выдачу управляющих воздействий для обеспечения функционирования КА;
  - закладку информации, обеспечивающей выполнение целевой функции как отдельным КА, так и системой в целом;
  - контроль и анализ состояния собственно КА;
2. обеспечение целевой функции системы, включая:
  - эфемеридное и частотно-временное обеспечение системы;
  - контроль качества навигационного поля системы;
  - обеспечение целостности навигационного поля системы;
  - юстировку измерительных средств с использованием КОС.



## Кванто-оптические средства



Блок регистрации оптических излучений

### Оптическая ретрорефлекторная антенная система

Основные характеристики аппаратуры ОРАС:

ОРАС обеспечивает среднюю квадратическую погрешность измерения дальности, см ..... не более 5 при работе с КОС «Сажень-С»

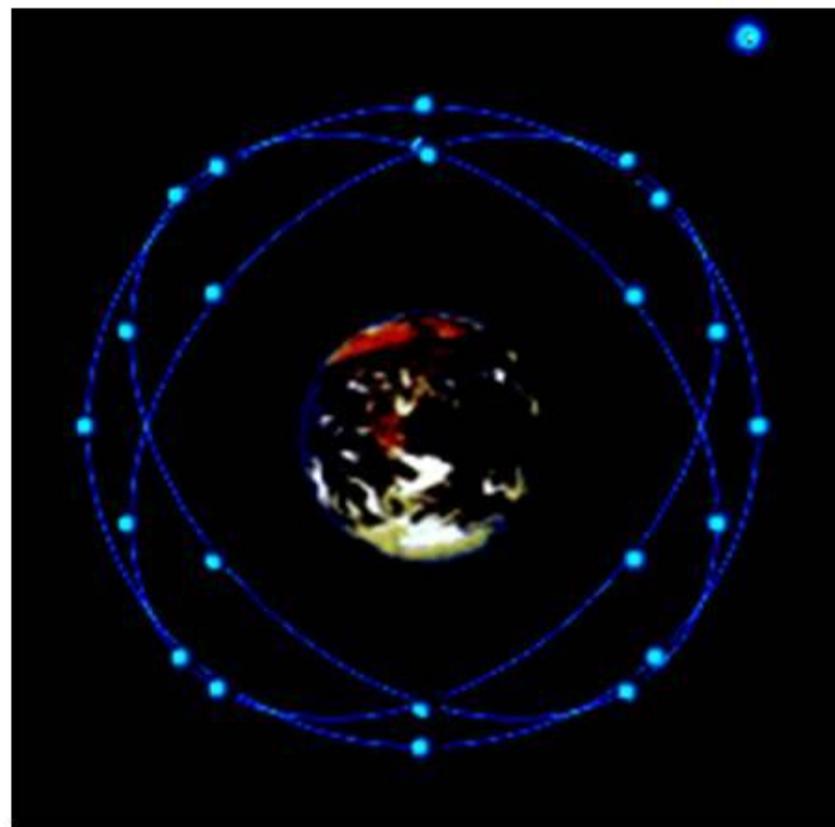


ММКОС «Сажень-ТМ»



## Орбитальная группировка

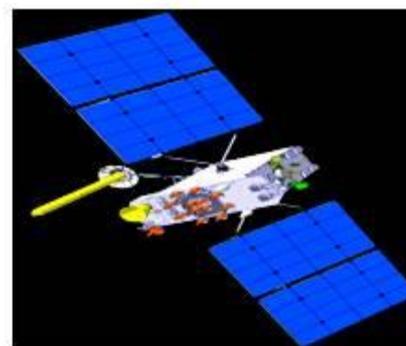
- Орбитальная группировка:
  - 24 спутника, 3 плоскости по 8 спутников
  - Смещение орбиты вдоль экватора  $120^\circ$
- Параметры орбиты
  - орбита – круговая
  - высота 19100 км
  - отклонение  $64.8^\circ$
  - вращение 11 часов 15 минут





## Эволюция космических аппаратов системы ГЛОНАСС

- **ГЛОНАСС**
  - Гарантированный САС 3 года
  - Сигналы 3 вида (L1 ВТ, СТ; L2 ВТ)
  - Вес 1415 кг
  - Энергопотребление 1000 Вт
- **ГЛОНАСС – М**
  - Гарантированный САС 7 лет
  - Сигналы 4 вида (L1 ВТ, СТ; L2 ВТ, СТ)
  - Вес 1415 кг
  - Энергопотребление 1450 Вт
- **ГЛОНАСС – К**
  - Гарантированный САС 10 лет
  - Сигналы 5 видов (L1 ВТ, СТ; L2 ВТ, СТ; L3 СТ)
  - Вес 875 кг
  - Энергопотребление 1600 Вт





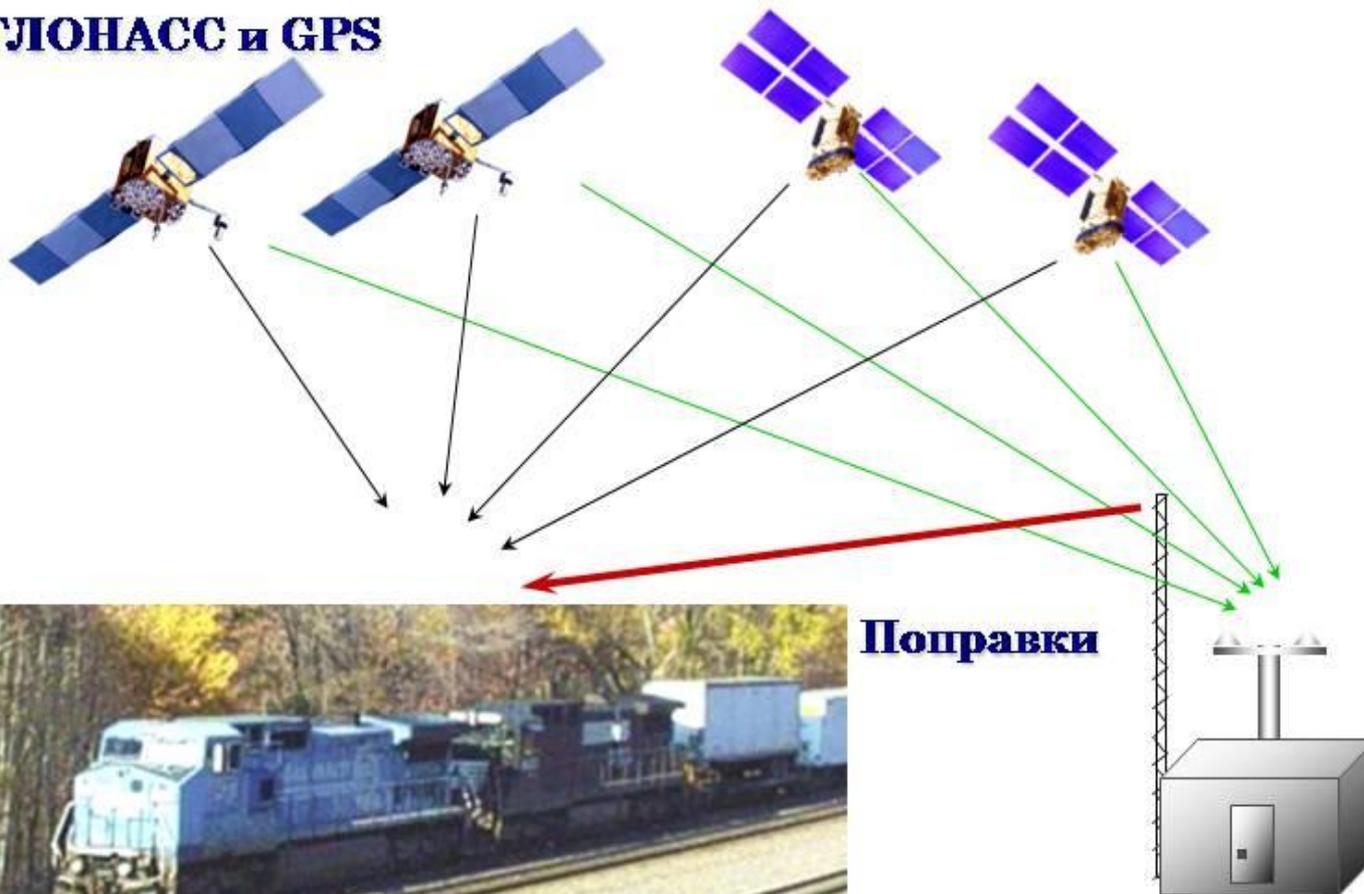
**Виды аппаратуры спутниковой навигации  
ГЛОНАСС/GPS, созданные ОАО «Российские  
космические системы»**





## Принцип функционирования локальных функциональных дополнений

**КА ГЛОНАСС и GPS**



**Поправки**

**Опорная станция**





## Контроль за состоянием крупногабаритных объектов

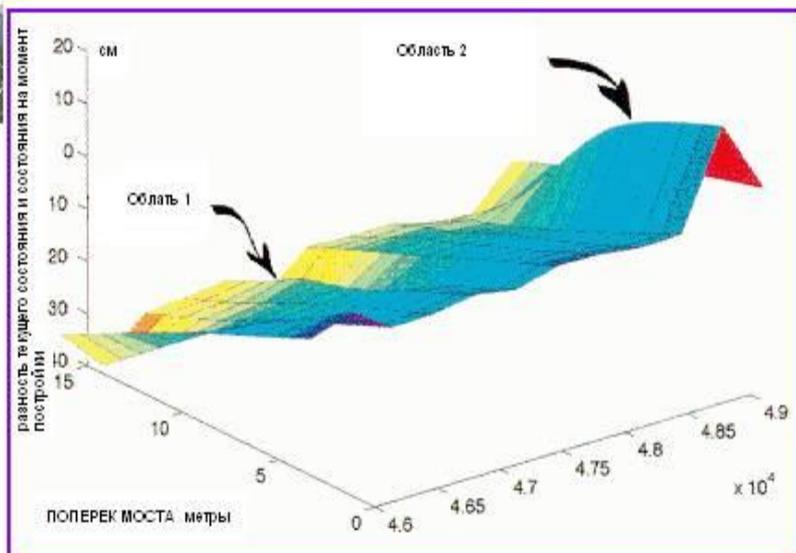


**Мосты – крупногабаритные конструкции, контроль за деформациями которых имеет особое значение**



**Приемники ГЛОНАСС/GPS  
устанавливаются в основных  
контрольных точках**

**Центр управления системой  
непрерывно в реальном  
времени имеет полную  
информацию о текущих  
деформациях объекта и  
изменениях относительно  
первоначального состояния**

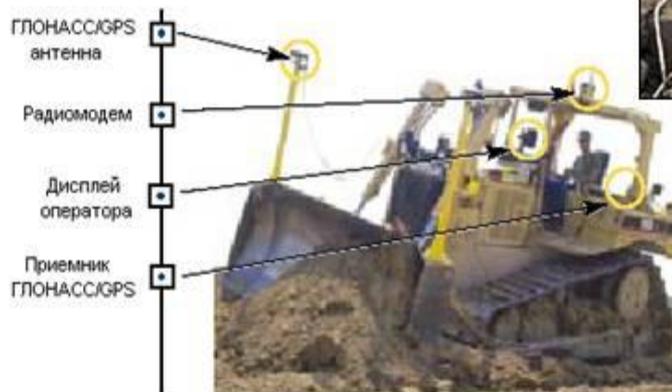




## Управление техникой на строительной площадке



**Излучаемые КА  
ГЛОНАСС/GPS сигналы  
позволяют высокоточно  
определять координаты  
строительных машин**





## Сферы применения функциональных дополнений

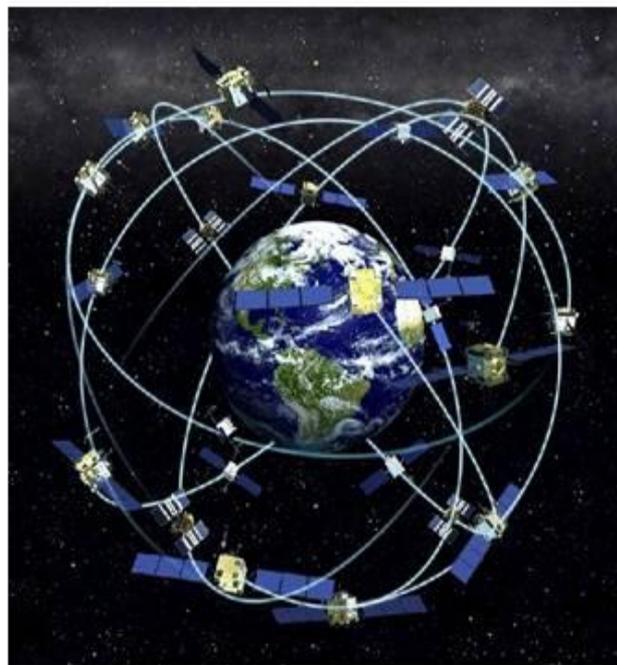
1. **Авиационный транспорт**
2. **Морской транспорт**
3. **Железнодорожный транспорт**
4. **Автомобильный транспорт**
5. **Топографическая съёмка**
6. **Научные исследования, обучение и др.**

## Основные типы функциональных дополнений

1. **Локальные (передача поправок к первичным измерениям навигационных параметров)**
2. **Региональные (ведомственные)**
3. **Широкозонные (передача поправок к эфемеридно-временной информации, информации о целостности ГНСС)**



GPS





## Наземный сегмент GPS



L-диапазон



S-диапазон



Главный центр управления, Шривер, Колорадо, база ВВС  
резервный центр управления, Ванденберг, база ВВС

• 16 Станций мониторинга  
6 OCS + 10 NGA

▲ 12 наземных антенн  
4 GPS + 8 для управления КА



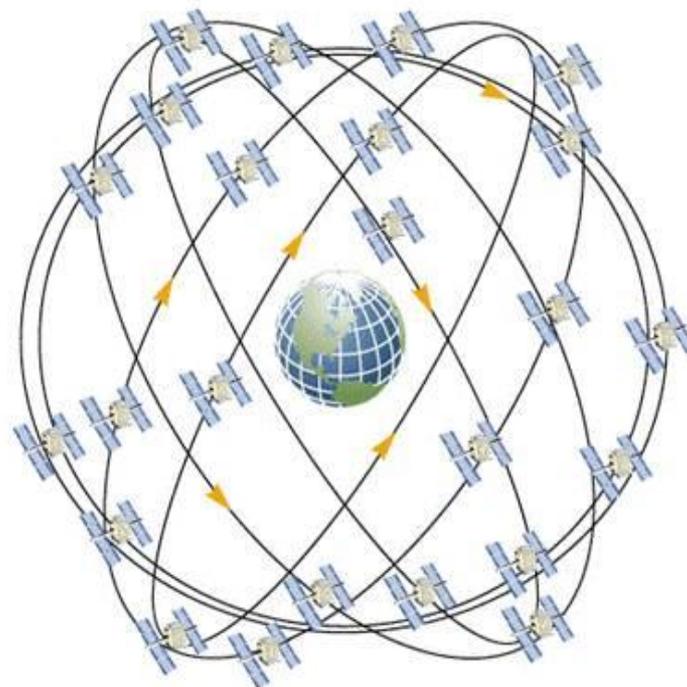
■ MCS Master Control Station Schriever AFB  
■ AMCS Allemaie MCS Vandenberg AFB

● Monitor Station Network Control Center  
● NGA Monitor Stations  
+ OCS Monitor Stations  
▲ Наземные антенны GPS  
▲ Станции слежения



## Орбитальная группировка

- Орбитальная группировка:
  - 24 спутника, 4 плоскостей по 4 спутника
  - Зона покрытия: глобальная
- Параметры орбиты
  - орбита – круговая
  - высота 20,200 км
  - наклонение  $55^\circ$  ( $63^\circ$  для блока 1)
  - вращение 12 часов





## Национальная политика США и Евросоюза в области глобальных навигационных спутниковых систем



В ноябре 2004 года Президент США Дж. Буш утвердил новую национальную политику в области систем навигационного обеспечения космического базирования.

Правительство США должно обеспечить в глобальном масштабе предоставление услуг GPS на безвозмездной основе, свободной от прямых сборов для коммерческих применений».

Там же закрепляется «открытый и бесплатный доступ к информации, необходимой для работы и создания навигационной аппаратуры».



Ввод в эксплуатацию ГНСС ЕС изначально планировался на 2008 год, однако затем был перенесен на 2012 год (стоимость проекта Galileo оценивается в \$4 миллиарда).

Покрытие издержек на создание системы предполагается за счет коммерческих услуг, регулируемых услуг, услуг по обеспечению безопасности жизни.

«... График создания европейской ГНСС Galileo, несмотря на то что концессионный договор уже подписан, находится под угрозой срыва...»

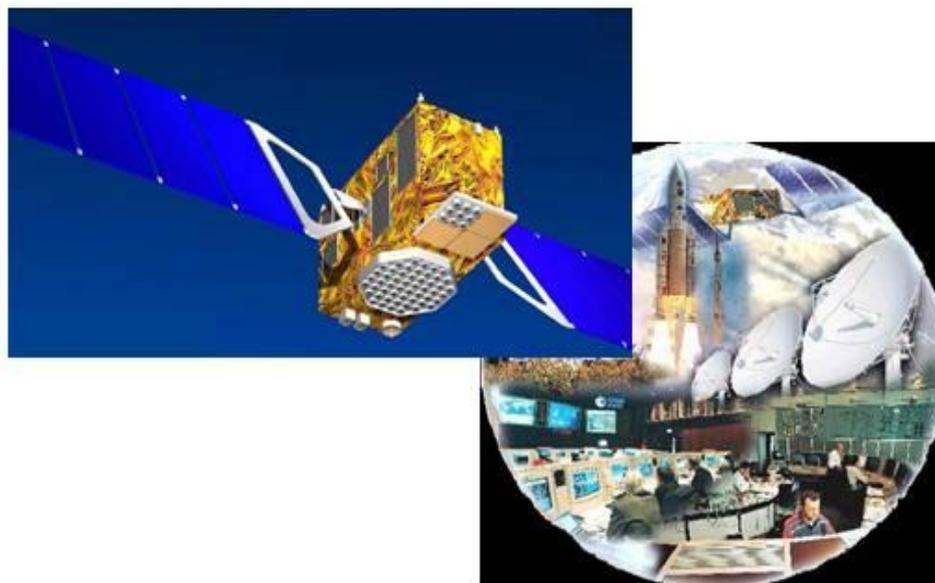
Из выступления 22.03.2007  
на заседании министров транспорта в Брюсселе  
Министра транспорта Германии, председательствующей в ЕС



## Перспективы GALILEO



- ❑ Первый запуск экспериментального спутника **GSTB-V2a** осуществлен в декабре 2005 года
  - ❑ Запуск 4 КА **GALILEO** для начала летных испытаний планируется в 2010 -2011 году
  - ❑ Развертывание группировки в 16 КА и начало предоставления услуг запланировано на 2013 год, 30 КА планируется к 2015 году
  - ❑ Планируемая точность навигационного обслуживания - выше чем достигаемая в системе **GPS**
- 
- ❑ В составе ОГ 30 КА в трех плоскостях
    - ❑ Из них 3 пассивных запасных КА
  - ❑ Предоставление 4-х видов услуг
    - ❑ Открытый доступ (2 сигнала)
    - ❑ Коммерческий доступ – еще один сигнал (с дополнительной информацией по целостности и юридическими гарантиями)
    - ❑ Для потребителей связанных с безопасностью жизнедеятельности (авиация, морфлот, ж/д)
    - ❑ Для правительственных спецслужб (фактически аналог военного сигнала)





## Программа спутниковой навигации Китая

### *Beidou – региональная навигационная система*

*Пять геостационарных спутников, 17 января 2010 г. запущен 3 КА второго поколения.*

*2006 г. - заявление Китая о разработке собственной глобальной навигационной спутниковой системы COMPASS в ответ на фактическое исключение Китая из органа по управлению будущей системой GALILEO.*

*Система COMPASS как расширение существующей системы Beidou. Космический сегмент, состоящий из 5 геостационарных спутников и 30 спутников на средних орбитах.*

*Два сигнала - открытого пользования и военный.*

*14 апреля 2007 г. – запуск первого среднеорбитального КА*

*2012г. – предоставления услуг в Азиатском регионе*

*2020г. – глобальное предоставление услуг*



## Планы Индии по созданию независимой навигационной спутниковой системы

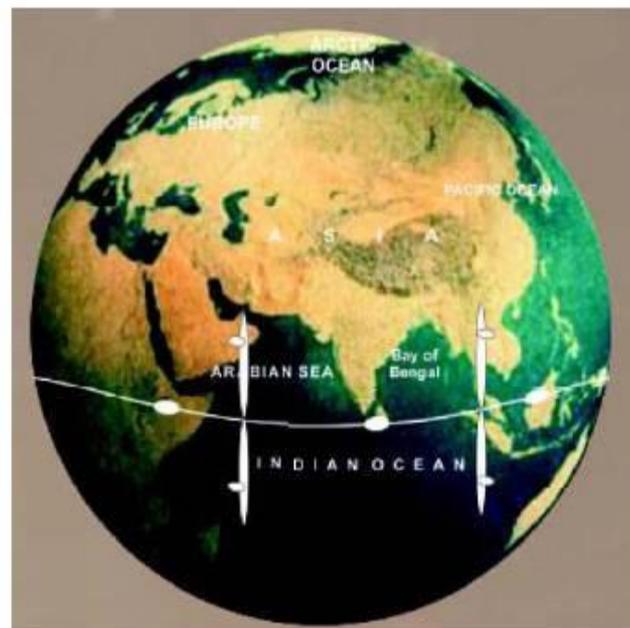
**Система IRNSS (Индийская Региональная Навигационная Спутниковая Система) – независимая система спутниковой навигации.**

**Космический сегмент: 3 геостационарных спутника и 4 спутника на геосинхронных орбитах. Два сигнала (L5 и S диапазоны).**

**Спутники, наземный комплекс и приемники потребителей будут произведены в Индии.**

**Зона покрытия: Индия и 1500 км вокруг ее границ.**

**Первоначальный срок ввода в эксплуатацию: 2011-2012 гг. , последние два года статус программы не обновлялся**





## Состояние спутниковых навигационных систем в настоящее время

### **NAVSTAR (GPS)**

Принадлежит министерству обороны США, что считается другими государствами её главным недостатком. Более известна под названием GPS.

### **ГЛОНАСС**

Принадлежит министерству обороны России. Является попыткой восстановить функционировавшую с 1982 года советскую систему. Находится на этапе повторного развёртывания спутниковой группировки (оптимальное состояние орбитальной группировки спутников, запущенных в СССР, было в 1993—1995 гг.). Современная система будет обладать некоторыми техническими преимуществами по сравнению с NAVSTAR.

### **Бэйдоу или Compass**

Развёртываемая в настоящее время Китаем система навигации, пока предназначенная для использования только в этой стране. Особенность — небольшое количество спутников, находящихся на геостационарной орбите.

### **Galileo**

Европейская система, находящаяся на этапе создания спутниковой группировки.

### **IRNSS**

Индийская навигационная спутниковая система, в состоянии разработки. Предполагается для использования только в этой стране. Запуск первого спутника ожидается в 2009 году.

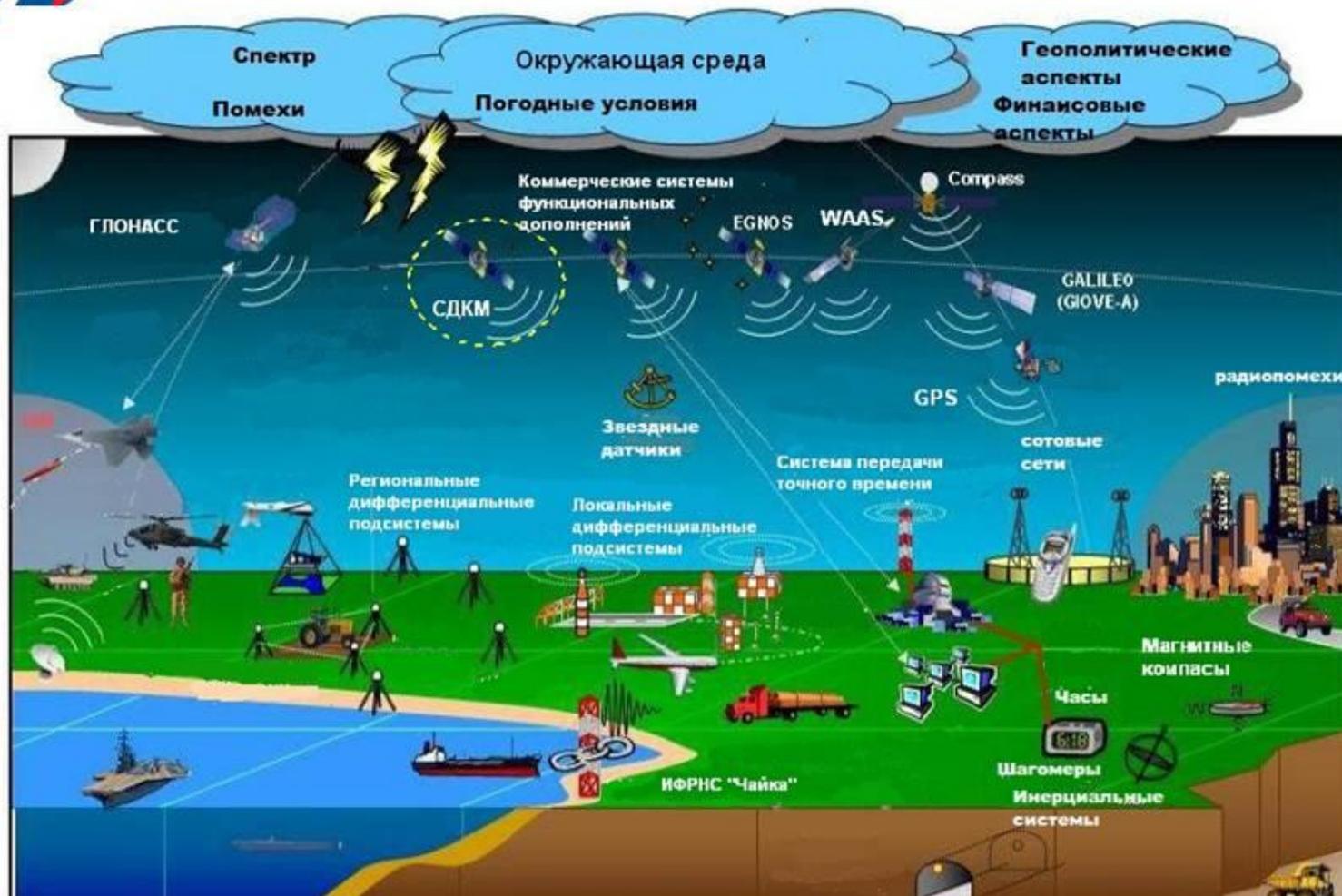


## Сравнительный анализ ГЛОНАСС, GPS, Galileo

- Характеристики ОГ GALILEO соответствуют описанным особенностям 3-плоскостных систем и, очевидно, выбирались с учетом этих особенностей, а именно:
- наклонение ( $54^\circ$ ) обеспечивает равномерность ошибок (максимальных, минимальных, средних по широте);
- количество спутников в системе (27) обеспечивает глобальную наблюдаемость навигационной задачи.
- Принципы и критерии проектирования ОГ для системы GPS весьма затруднительно интерпретировать (6 плоскостей, резонансный период, асимметрия спутников в плоскостях), однако, к текущему моменту ОГ GPS, несмотря на значительные максимальные ошибки по сравнению не только с GALILEO, но и ГЛОНАСС, имеет до широт  $\pm(45^\circ)$  гораздо меньший процент «больших» ошибок, чем в системе ГЛОНАСС. Так, в частности, доступности для GPS и GALILEO до широт  $50^\circ$  соизмеримы. Для широт выше  $\pm(50^\circ)$  оценки точности/доступности заметно уступают и GALILEO и ГЛОНАСС. Именно поэтому планами модернизации системы GPS предусмотрено заметное увеличение общего количества спутников в ОГ.
- Точность/доступность ГЛОНАСС практически совпадает с точностью/доступностью GALILEO и лучше, чем у GPS, для широт выше  $45^\circ$ . В приполярных регионах они даже лучше, чем в GALILEO. Для широт, ниже  $45^\circ$  точность/доступность системы ГЛОНАСС заметно хуже. Кроме того, для широт  $\approx \pm 27^\circ$ , как видно из графика на рис. 4.6, существуют точки, в которых в течение  $\approx 24$  мин  $((1-A) \times 1440$  мин  $\approx 24$  мин) в сутки навигация резко ухудшается.



## Существующие средства навигационно-временного обеспечения

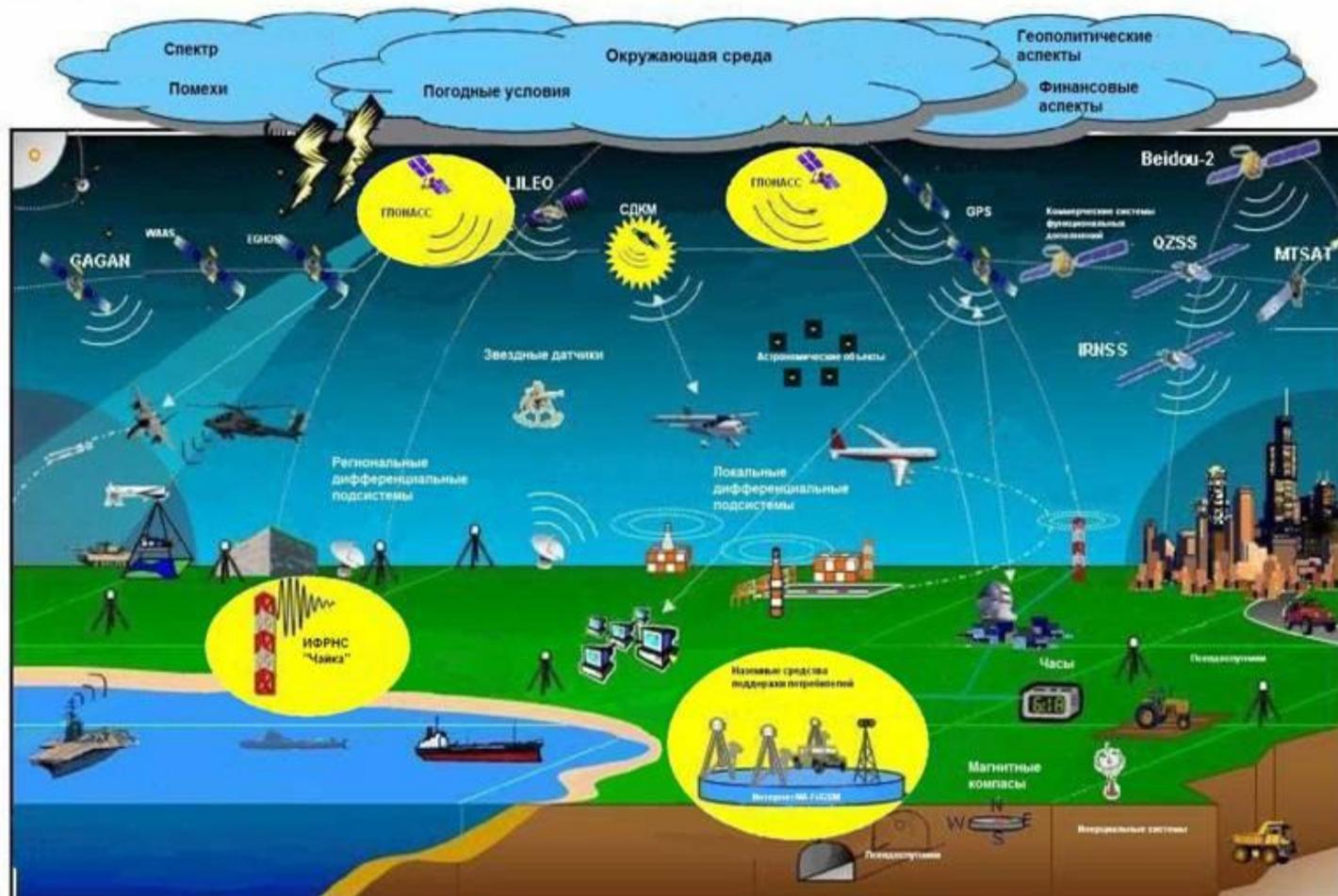


СДКМ – система долговременной коррекции и мониторинга

ИФРНС – интульсно-фазовая радионавигационная система



## Перспективная архитектура системы навигационно-временного обеспечения



СДКМ – система дополнительной коррекции и мониторинга

ИФРС – импульсно-фазовая радионавигационная система