



**Казанский государственный университет
Кафедра астрономии и космической геодезии**

Р.А.Кащеев

Введение в космическую геодезию



Задачи геодезии:

- Определение размеров, фигуры и внешнего гравитационного поля Земли.
- Координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО) потребителей.
- Картографирование территорий.
- Решение прикладных задач (изыскания, проектирование, вынос проектов в натуру).
- Геодинамические исследования.
- Определение размеров, фигур, гравитационных полей небесных тел и картографирование их поверхностей.

Шарообразная Земля:

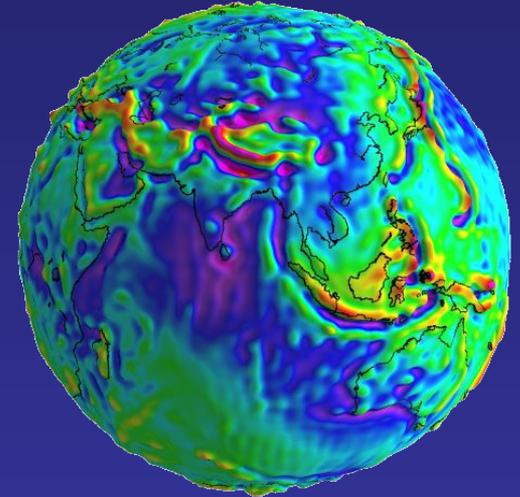
- Эратосфен (240г. до н.э.)

Эллипсоид:

- И.Ньютон (1687г.), А.Клеро (1743г.)

Геоид:

- К.Гаусс: «Земля вообще не есть эллипсоид вращения, а волнообразно отклоняется от эллипсоида» (1828г.)
- Ф.Бессель (1837г.), И.Листинг (1873г.)



Физическая поверхность Земли

Динамическая фигура Земли

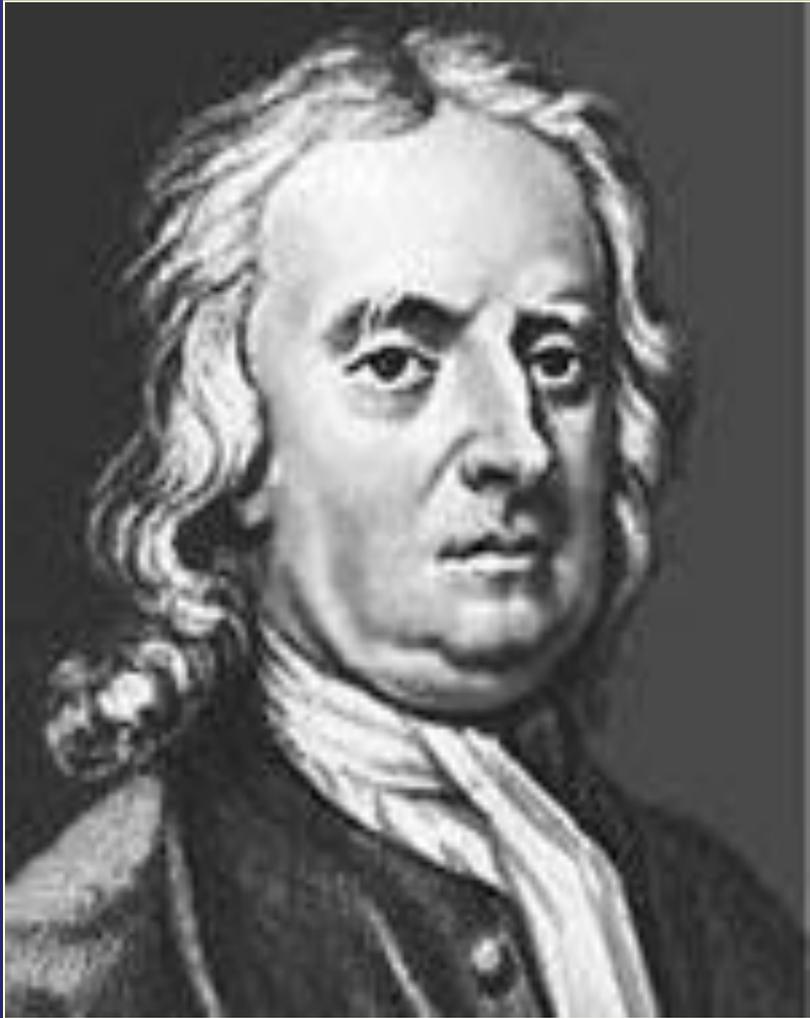
Схема градусных измерений Эратосфена (240 г. до н.э.)



Z=1/50 окружности

S=5000 стадий

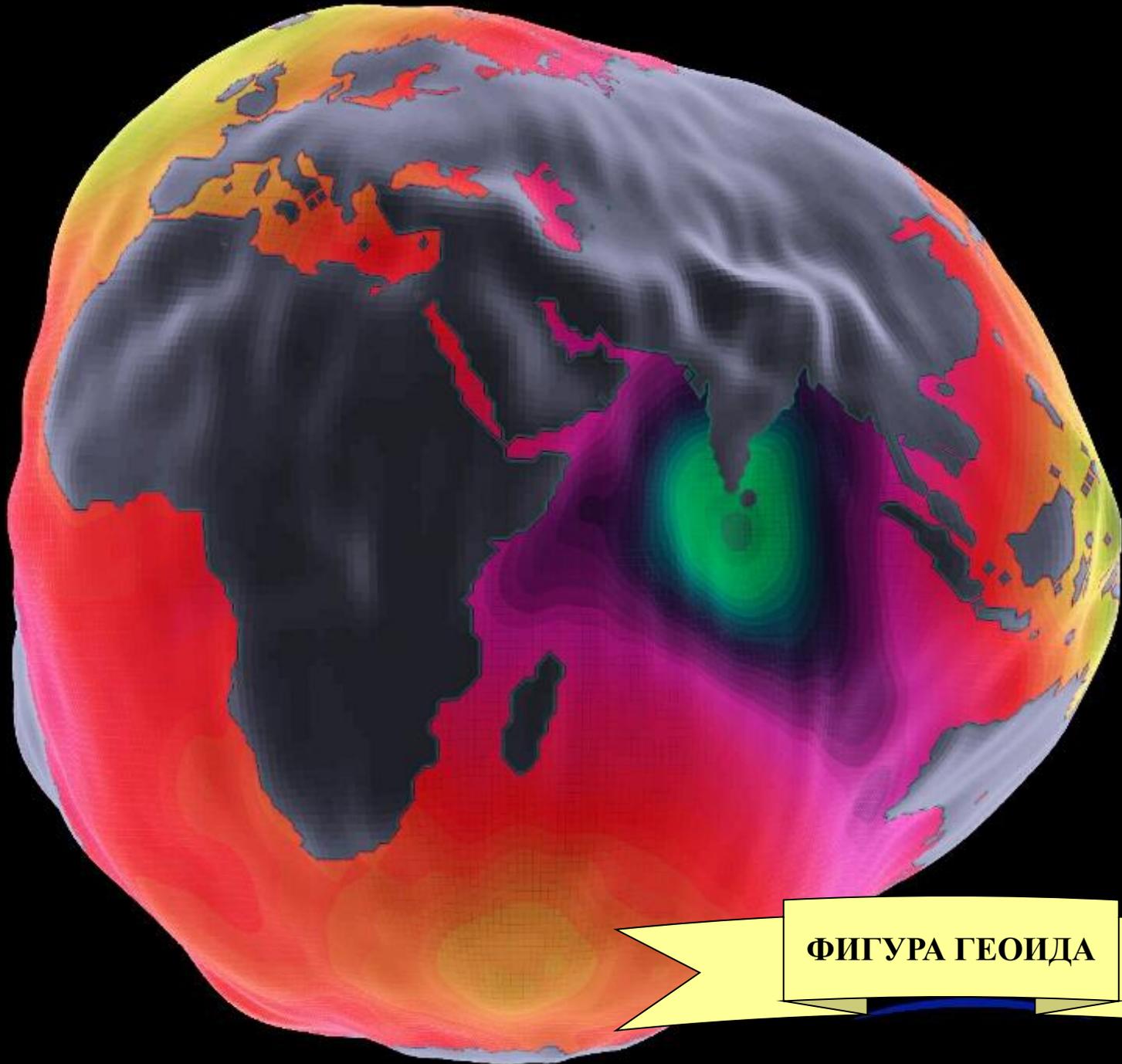
$$R = \frac{5000 * 50}{2 * 6.28} = 39789 \text{ стадий}$$



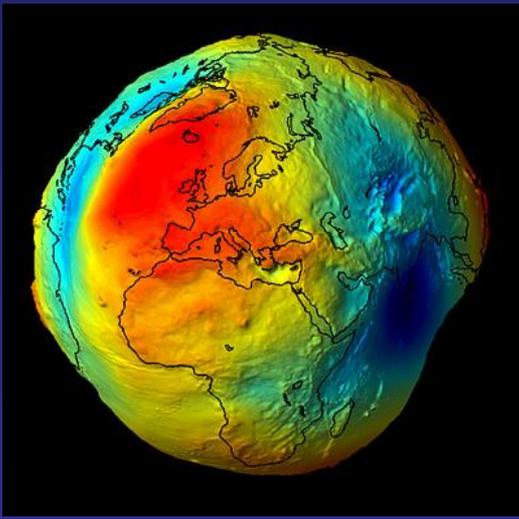
И.Ньютон - 1687
«Математические начала
натуральной философии»

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$G = 6.674 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 / \text{кг} \cdot \text{с}^2$$



ФИГУРА ГЕОИДА



Методы космической геодезии

- **Геометрические методы**
(космическая триангуляция);
- **Динамические методы**
 - орбитальные методы,
 - метод коротких дуг,
 - собственно динамический метод,
 - дифференциальные методы динамической космической геодезии.



Классификации систем координат

- **По геометрии:** прямоугольные, криволинейные (сферические, эллипсоидальные).
- **По участию во вращении Земли:** ЗСК, НСК
- **По расположению центра:**
 - геоцентрические,
 - геодезические,
 - топоцентрические,
 - спутникоцентрические.

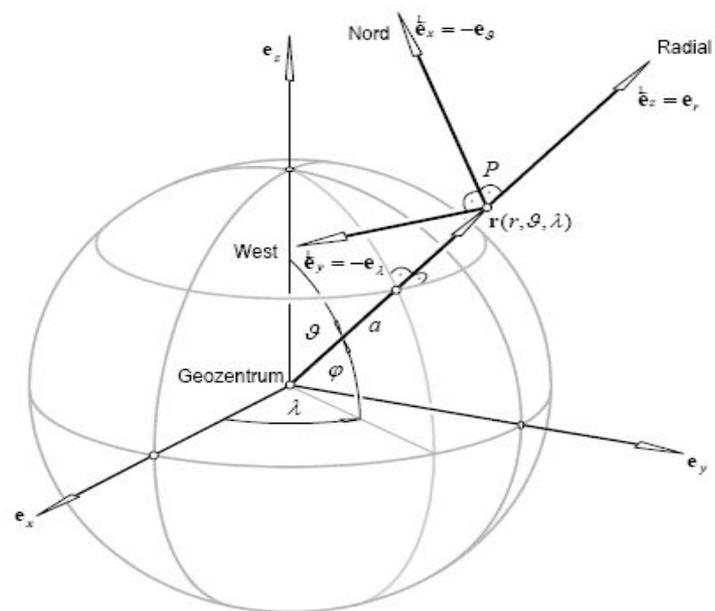
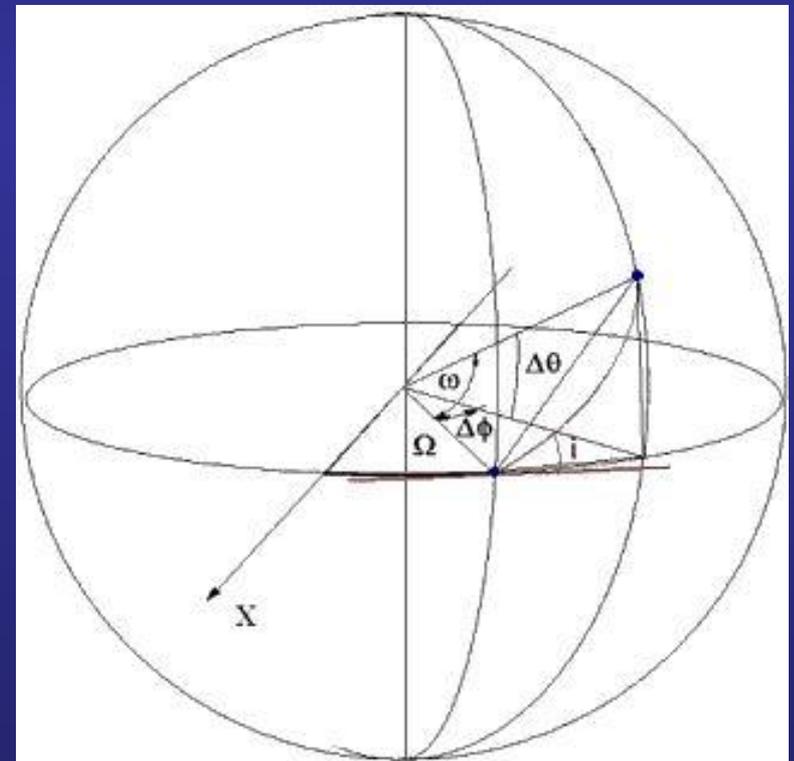


Abb. 9.19: Globales und lokales erdfestes Koordinatensystem.

Орбита ИСЗ



Рис. 3.1. Наклонная эллиптическая орбита ИСЗ



Элементы орбиты ИСЗ

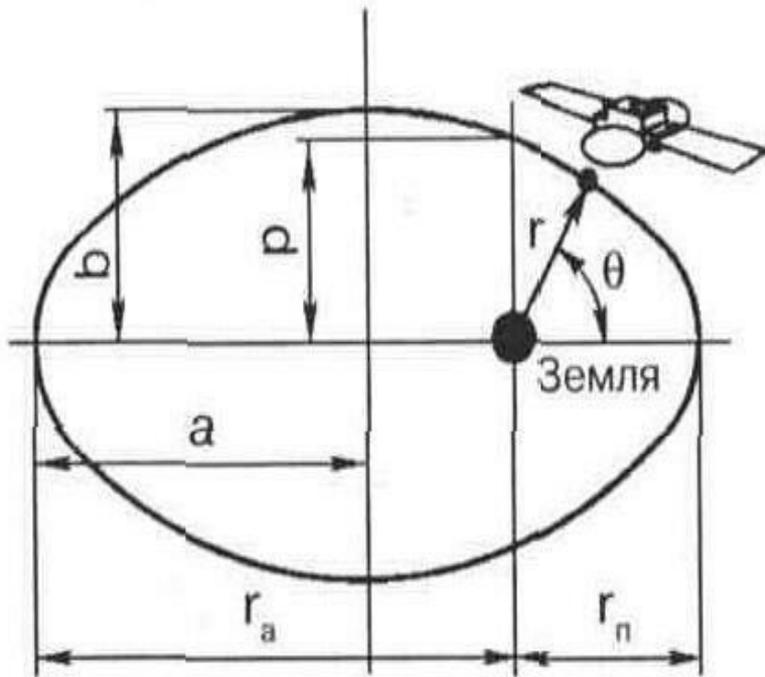
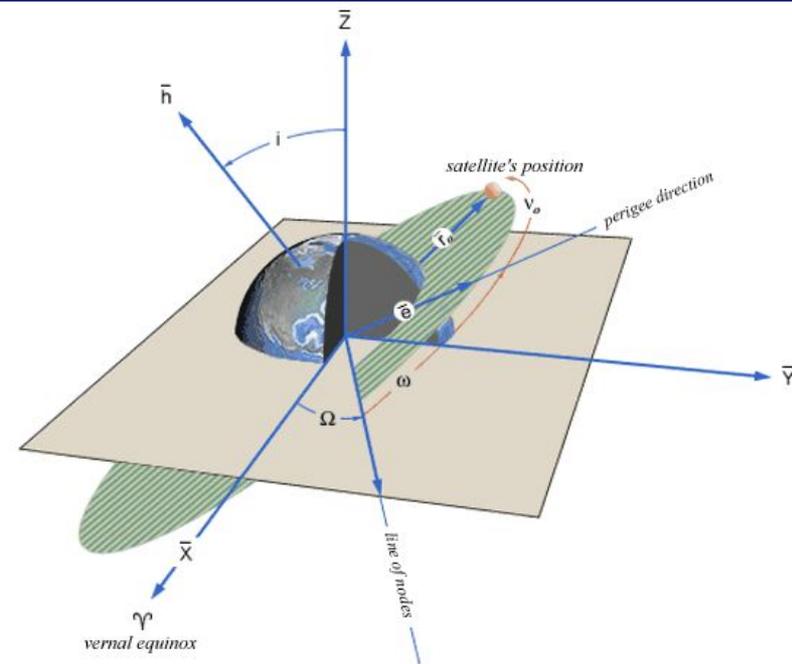


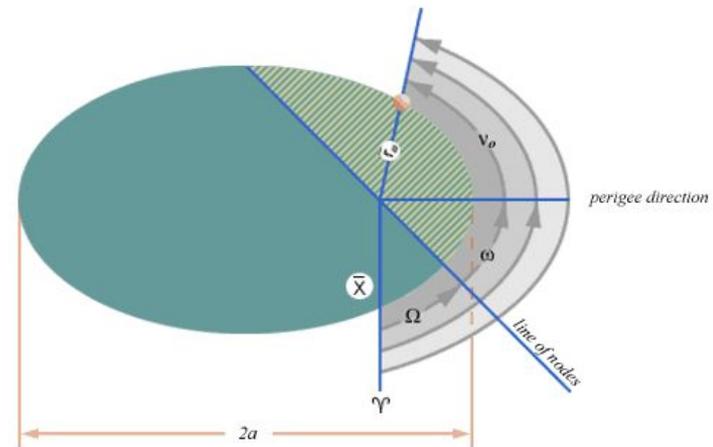
Рис. 3.2. Параметры эллиптической орбиты

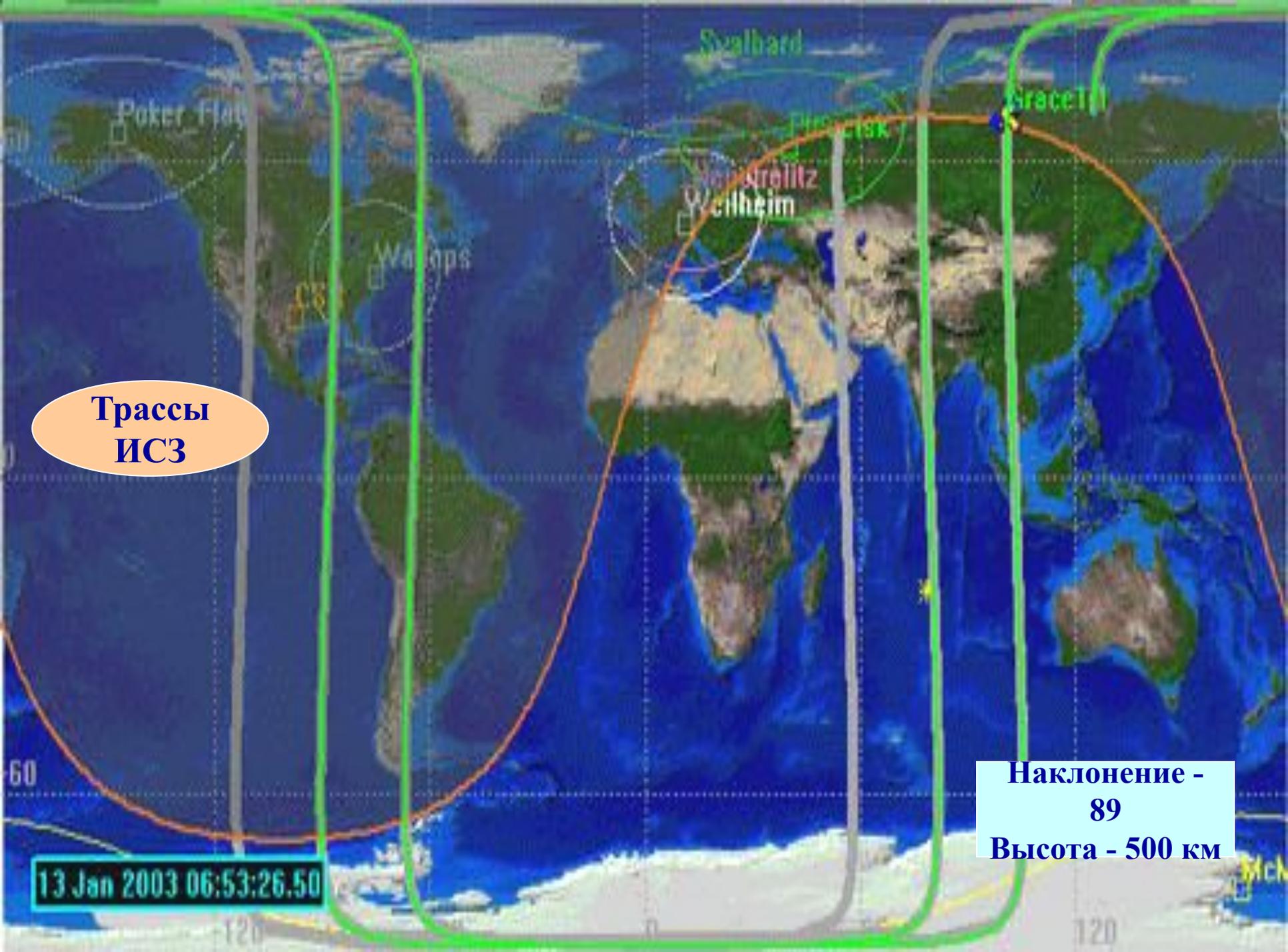
$$r = p / (1 + e \cdot \cos \theta),$$

где r — модуль радиус-вектора (расстояние от ИСЗ до центра Земли); p — фокальный параметр; e — эксцентриситет орбиты; θ — угловая координата радиус-вектора.



- a - defines the size of the orbit
- e - defines the shape of the orbit
- i - defines the orientation of the orbit with respect to the Earth's equator.
- ω - defines where the low point, perigee, of the orbit is with respect to the Earth's surface.
- Ω - defines the location of the ascending and descending orbit locations with respect to the Earth's equatorial plane.
- ν - defines where the satellite is within the orbit with respect to perigee.





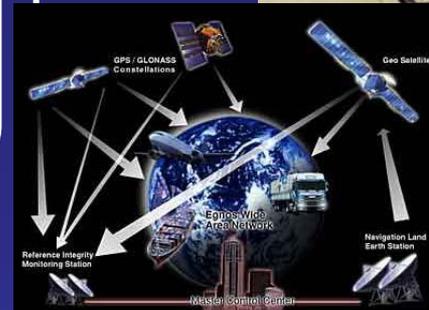
**Трассы
ИСЗ**

**Наклонение -
89
Высота - 500 км**

13 Jan 2003 06:53:26.50



Методы наблюдений ИСЗ



Оптические

Лазерные

Радио-
технически
е

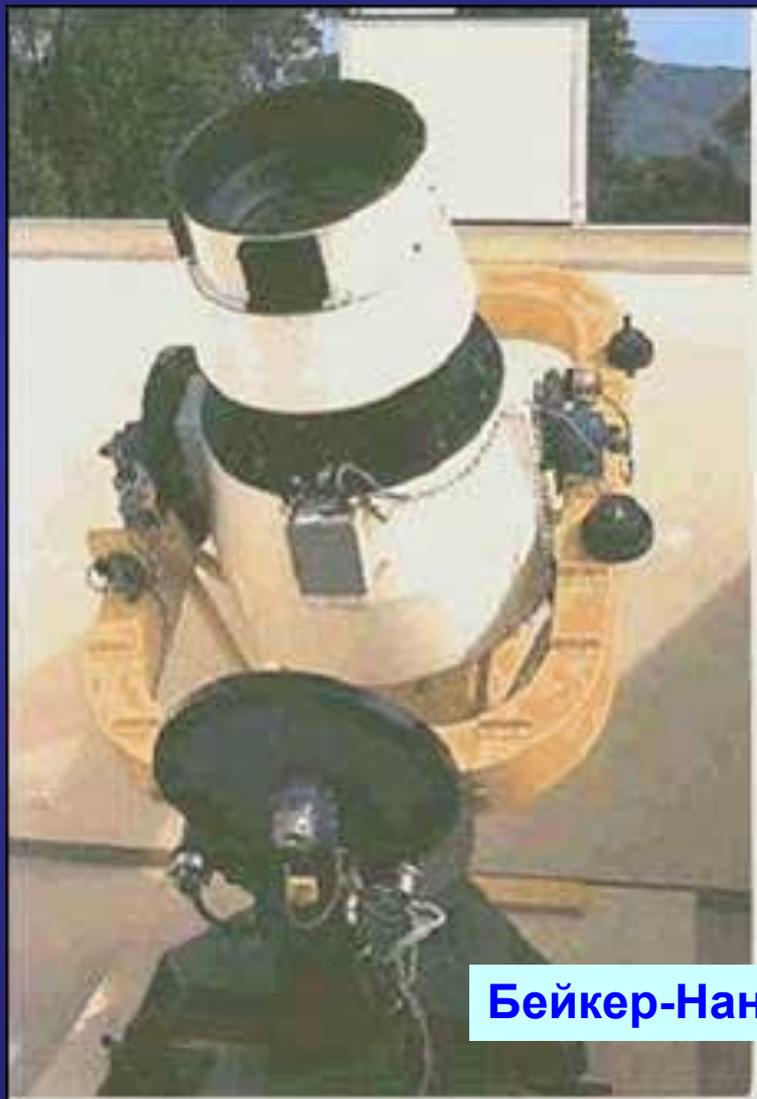
Визуальны
е

Фотографически
е

Радио
дальномерны
е

Допплеровски
е

Фотографические спутниковые камеры

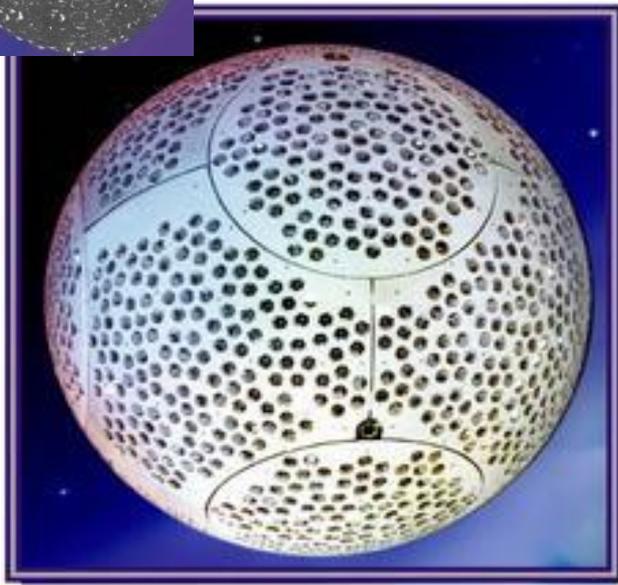
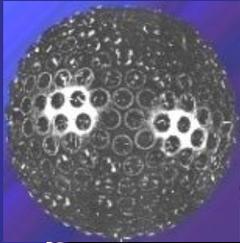


Бейкер-Нанн





Лазерные методы



Пассивные ИСЗ

PAGEOS

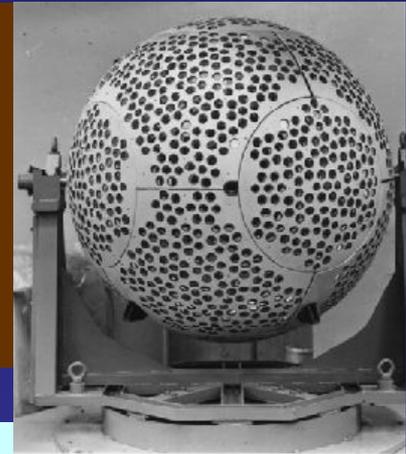


LAGEOS



LAGEOS

Высокоорбитальные лазерные спутники «Эталон 1» и «Эталон 2».



Назначение:

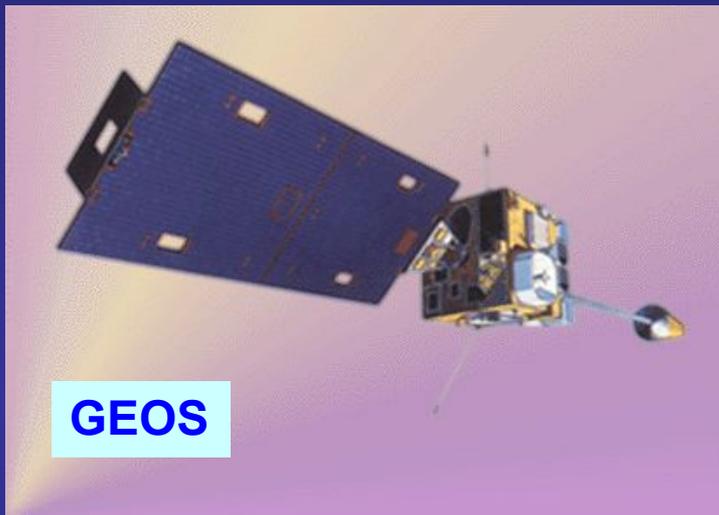
предназначен для решения
прикладных задач навигации.

Параметры:

- высота орбиты 19 100 км
- количество светоотражателей: 2142
- диаметр: 1294 мм
- масса 1300 кг
- эффективная отражающая поверхность: 60 млн. м²



Активные ИСЗ



GEOS



ТОРЕХ-Р



ГЕО-ИК



GPS



ГЛОНАСС



GOCE

Глобальные навигационные спутниковые системы





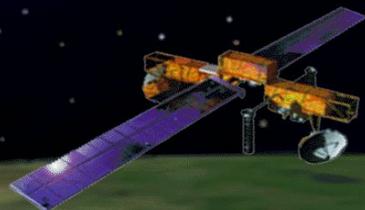
Проблема навигации:

*Каковы
наши требования
к навигации?*

- 1. Глобальность.**
- 2. Оперативность.**
- 3. Точность.**



Дитя военного ведомства США



Спутниковое позиционирование



Навигация



Фотографирование



Местоположение сил



Наведение оружия



Нацеливание



Синхронизация связи



Гражданское использование GPS

Энергетические системы



Персональная навигация



Слежение и доставка



Геодезия и картография



Связь



Авиация



Отдых



Железные дороги



Рыболовство и судоходство



Добыча нефти



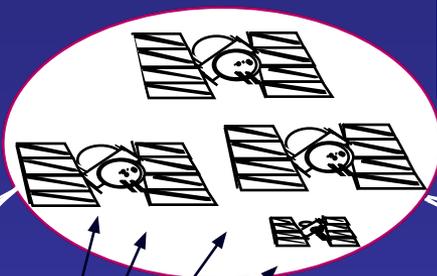
Структура GPS

- GPS состоит из **трех** основных частей - **сегментов**

3. Сегмент пользователей



2. Космический сегмент

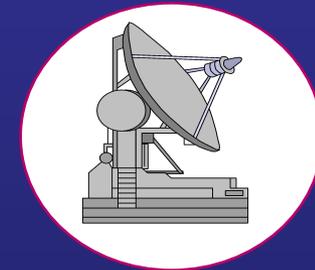


Станции Слежения

О-в Диего Гарсия
О-в Вознесения
Атолл Кваджелейн
Гавайи
Колорадо-Спрингс

1. Сегмент контроля и управления

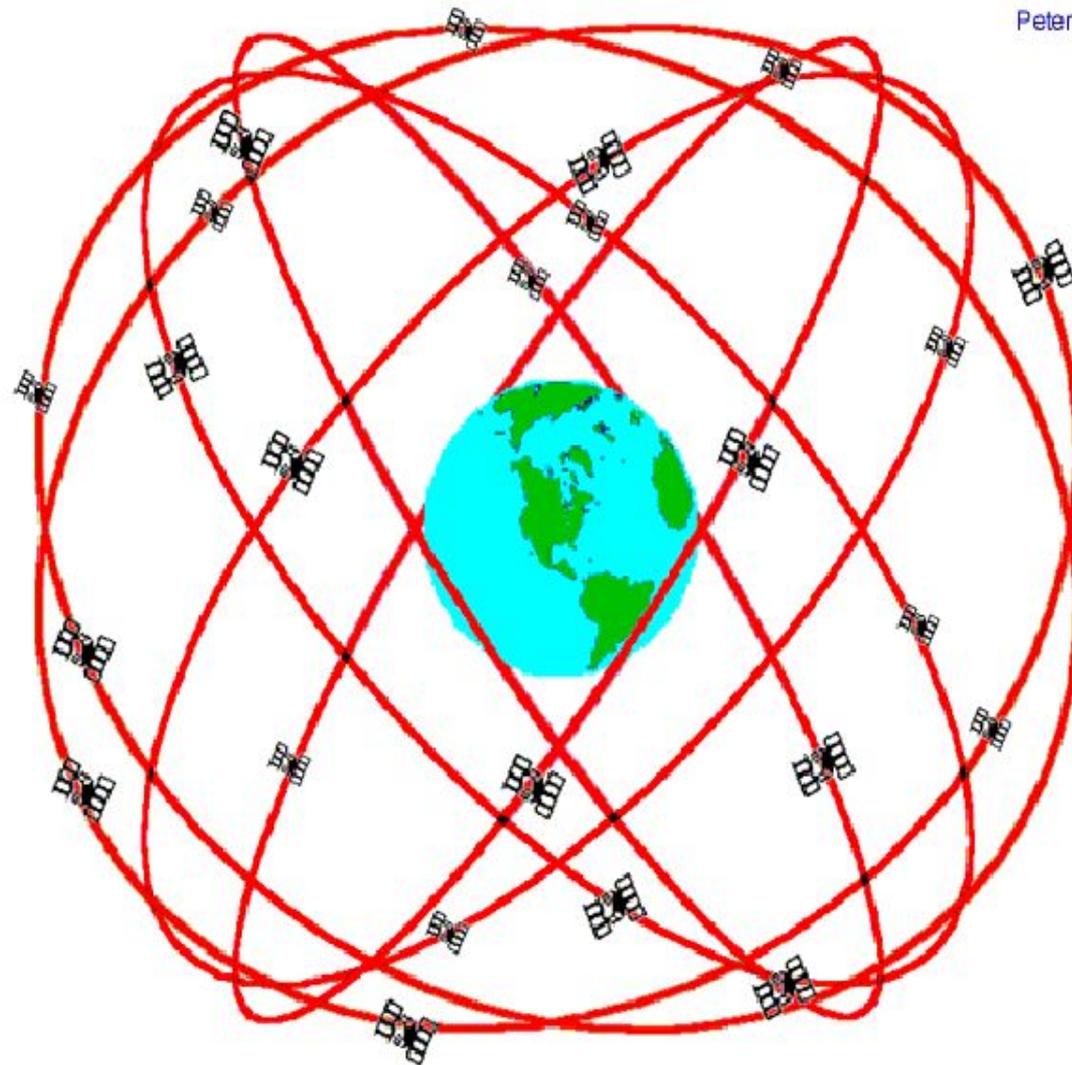
Колорадо
Спрингс



Ground Control Segment

- Master Control Station (1)
- Monitor Station (5)
- ▲ Ground Antenna (4)





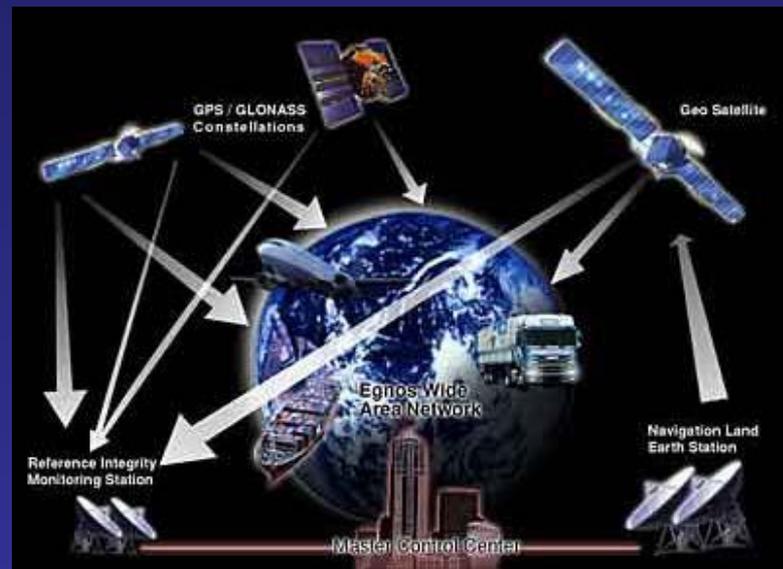
GPS Nominal Constellation

24 Satellites in 6 Orbital Planes

4 Satellites in each Plane

20,200 km Altitudes, 55 Degree Inclination

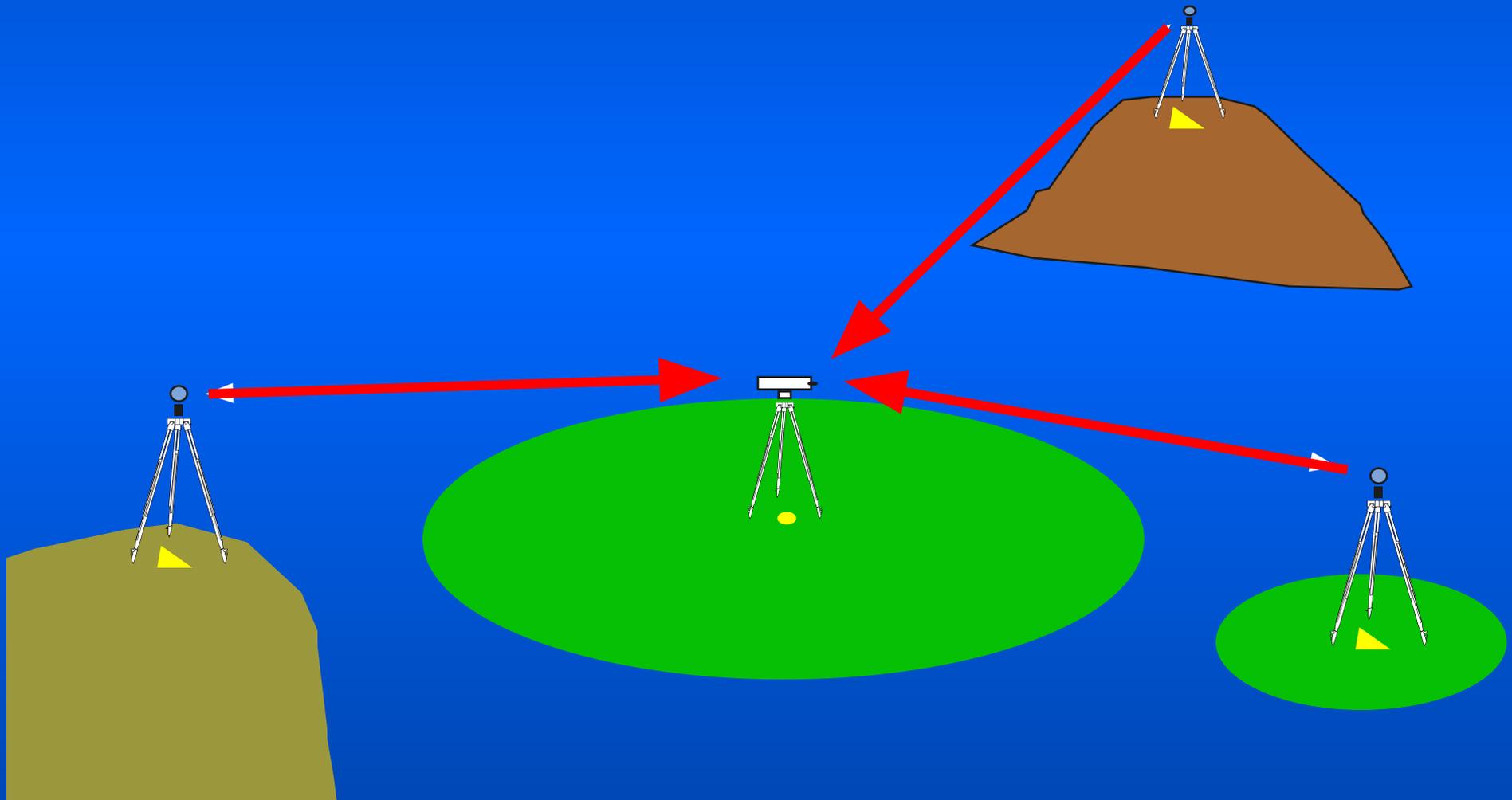
Сегмент пользователей



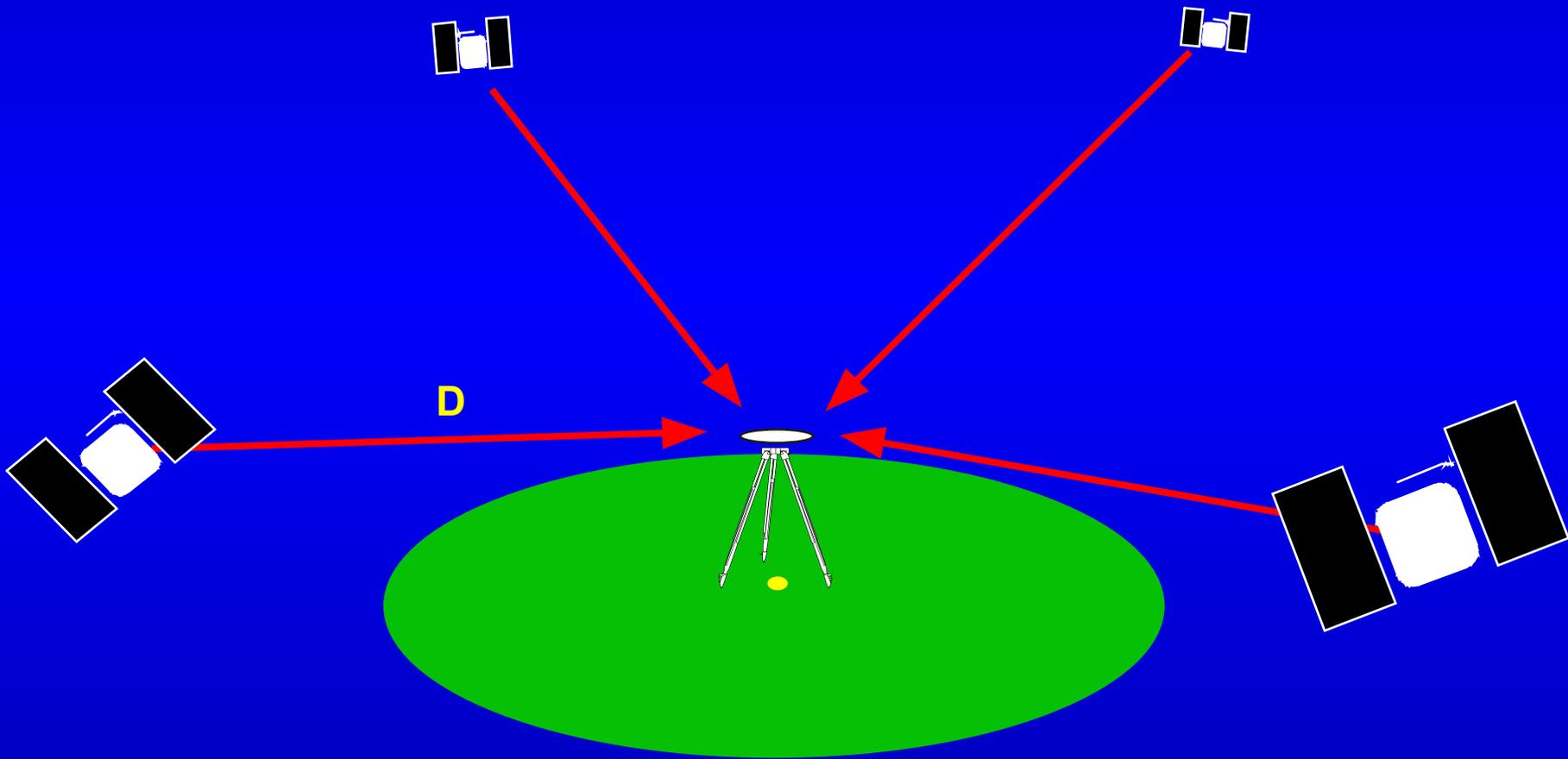
Аппаратура потребителей:



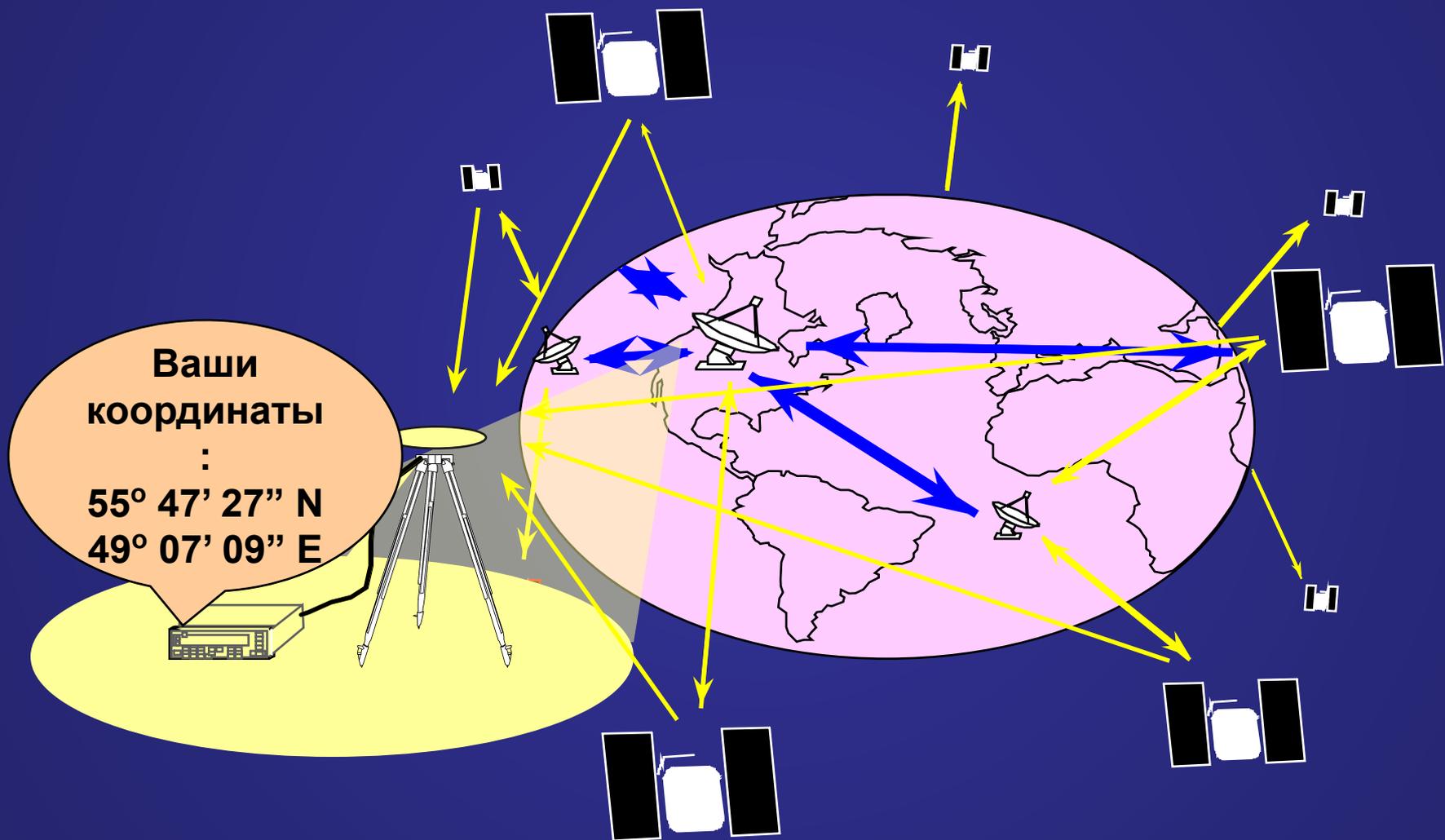
Трилатерация:



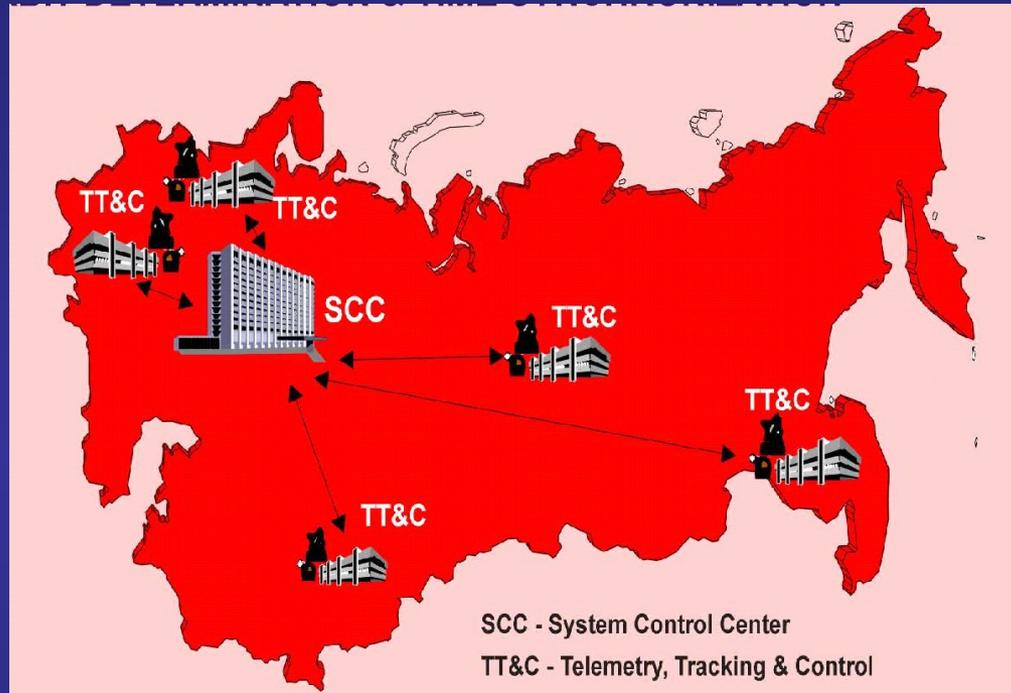
Расстояние (D) = Скорость света (c) x Время (T)



Глобальные навигационные системы



НКУ ГЛОНАСС (Космические Войска)



- ЦУС ГЛОНАСС
 - Краснознаменск, М. О.
 - Управление КА
 - ЭВО
- Станции КИС
 - Ленинградская обл.
 - Щелково, М.О.
 - Енисейск
 - Комсомольск на Амуре
- Центральный синхронизатор
 - Щелково, М.О.

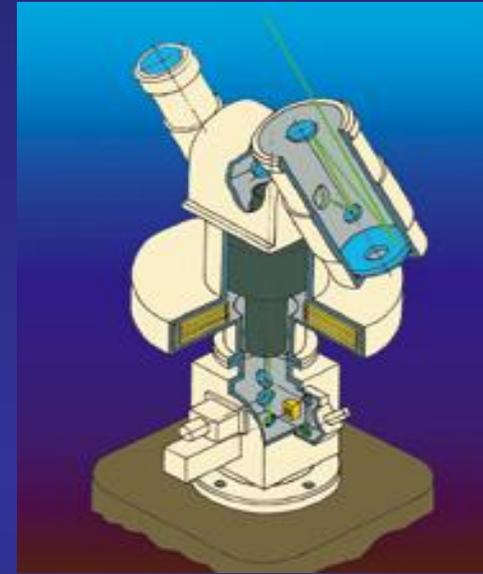
Планы модернизации системы ЭВО:

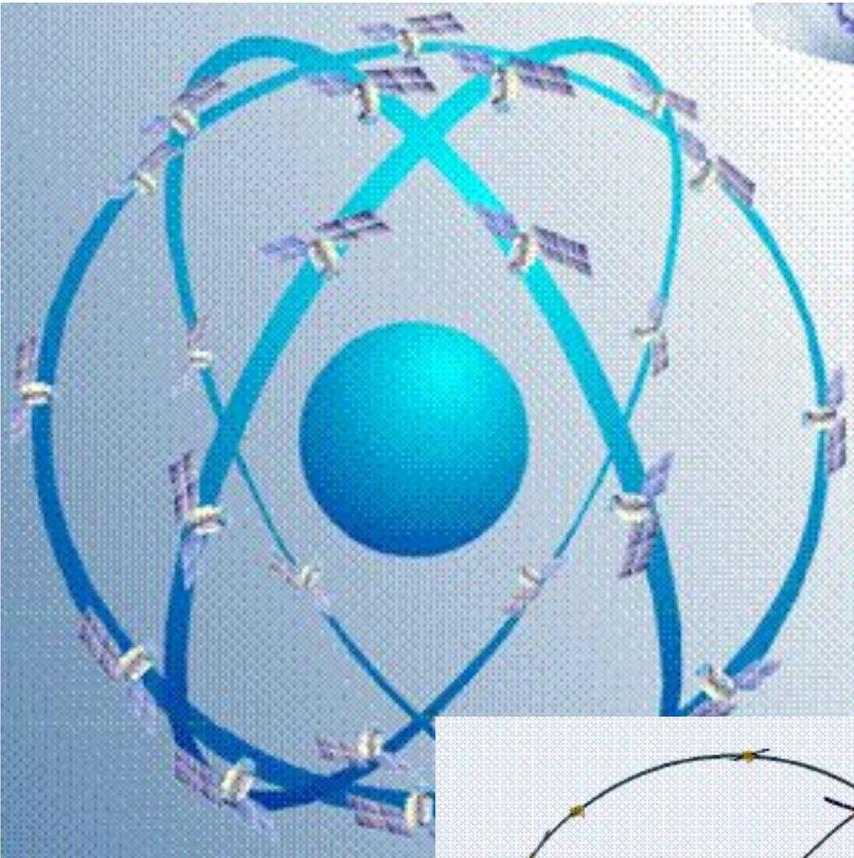
- Развертывание сети беззапросных станций:
 - На пунктах Космических Войск
 - На пунктах Росстандарта (Менделеево, Новосибирск, Иркутск, Хабаровск)

ГИЦИУ КС – г.Краснознаменск



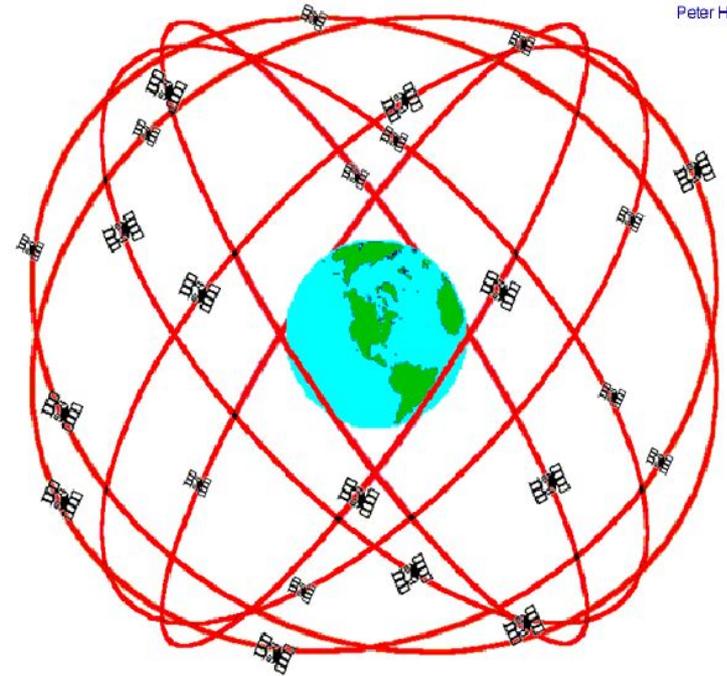
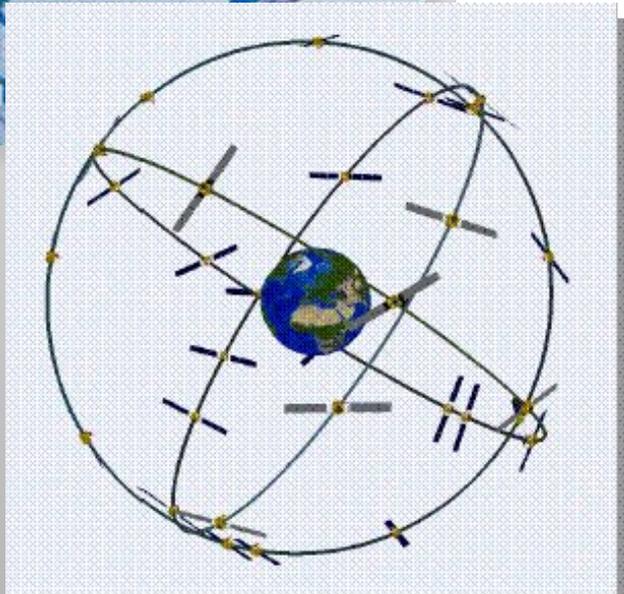
Станции слежения – ГНСС ГЛОНАСС





ГЛОНАСС

Galileo

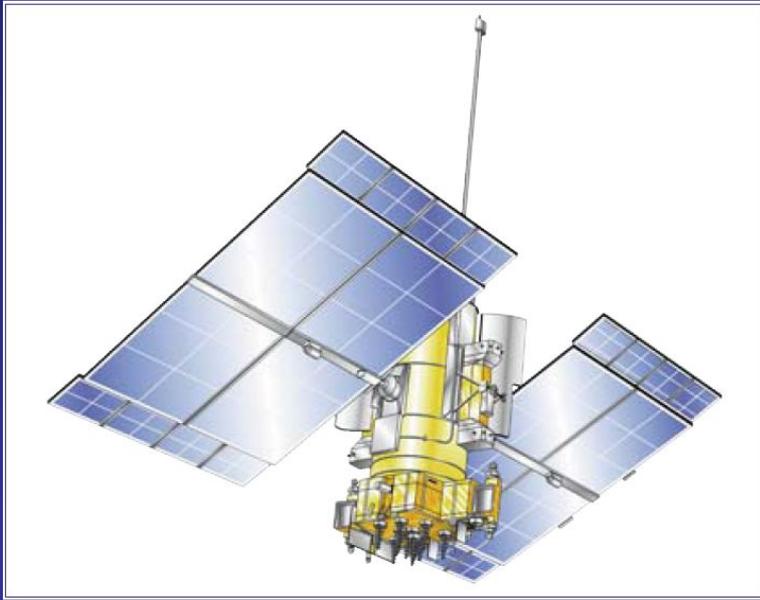


GPS Nominal Constellation
24 Satellites in 6 Orbital Planes
4 Satellites in each Plane
20,200 km Altitudes, 55 Degree Inclination

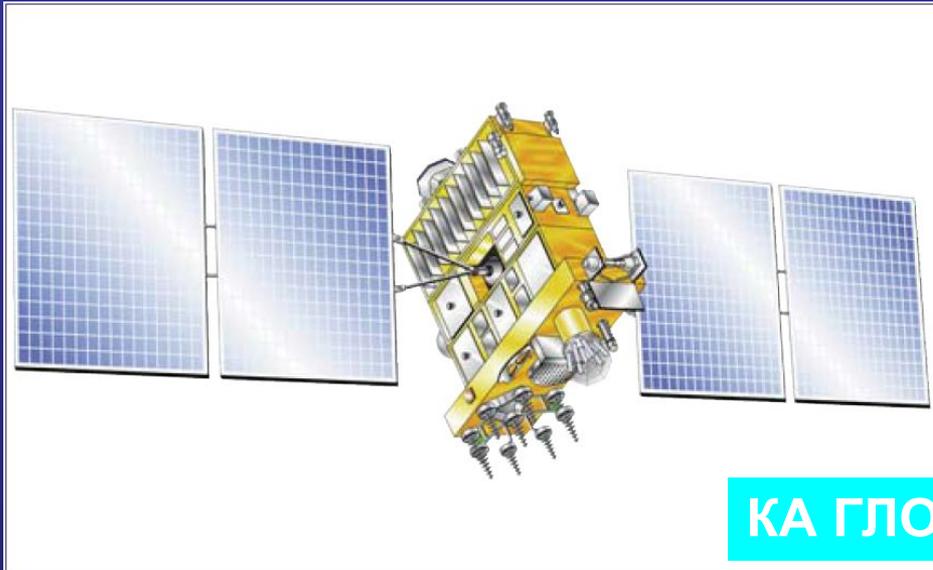
GPS

**Конфигурация
орбит ГНСС**

КА Серии ГЛОНАСС



КА ГЛОНАСС М



КА ГЛОНАСС К

История и перспективы развития группировки:

Программа развертывания орбитальной группировки системы ГЛОНАСС

количество КА в орбитальной группировке



Этапы развития орбитальной группировки ГЛОНАСС:

- 18 КА в группировке – 2007 г.
- 24 КА в группировке – 2010-2011 гг.

Классическая схема определения параметров гравитационного поля Земли по данным об эволюции орбиты ИСЗ основана на интегрировании дифференциальных уравнений Лагранжа

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mathfrak{R} \frac{\partial \mathcal{R}}{\partial \vec{E}}$$

где пертурбационная функция имеет вид:

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_{\oplus} + \mathcal{R}_M + \mathcal{R}_S + \mathcal{R}_{SP} + \dots$$

$$\vec{F} = \text{grad } V, \quad W = V + Q,$$

$$V = \frac{GM}{\rho} \left[1 + \sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{\rho} \right)^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \varphi) \right]$$

- ортогональность системы сферических функций,
- наглядность геофизической интерпретации,
- наилучшее (при фиксированном N) среднеквадратическое приближение,
- развитая теория определения коэффициентов ряда.

Спутниковые методы дифференциальных измерений в системах с изменяемой геометрией расположения элементов

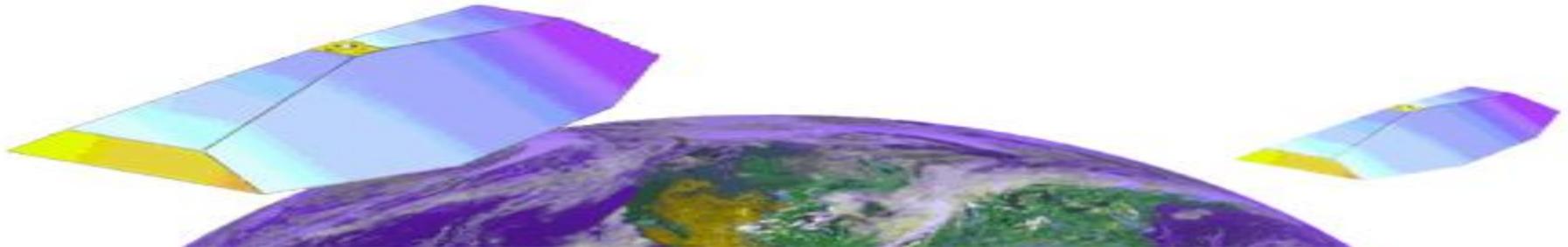
Межспутниковое слежение -

Satellite-to-Satellite Tracking

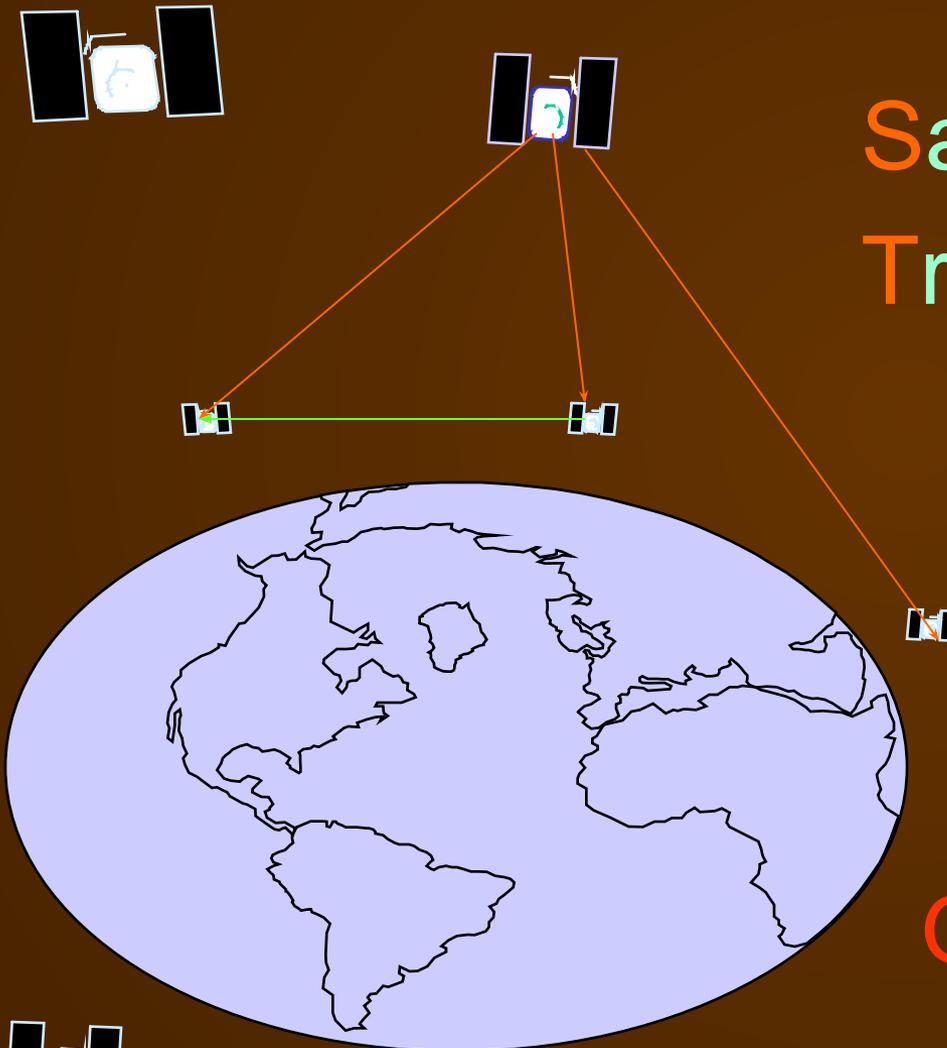
варианты HL SST (High-Low) и LL SST (Low-Low)

Спутниковая градиентометрия -

Satellite Gravity Gradiometry



Advanced satellite techniques



Satellite-to-Satellite
Tracking - SST

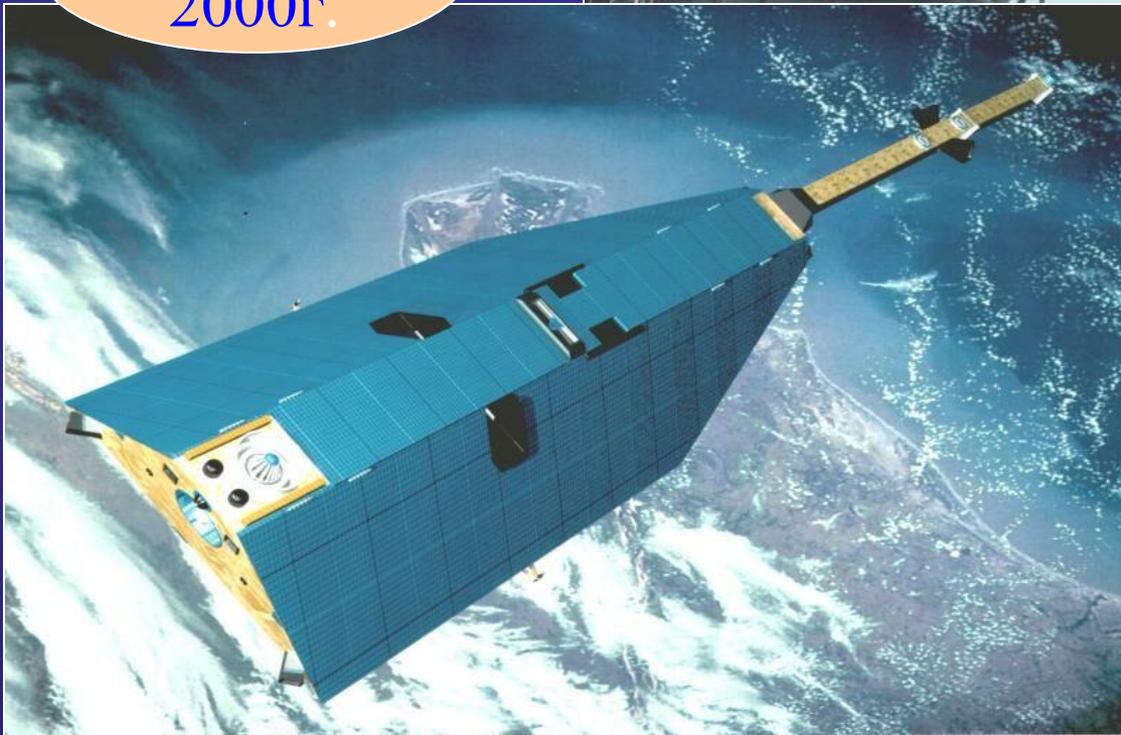
High-Low SST

Low-Low SST

Satellite Gravity
Gradiometry - SGG

CHALLENGING Mini-satellite Payload for geophysical research and application

15 июля
2000г.



Основные задачи программы CHAMP:

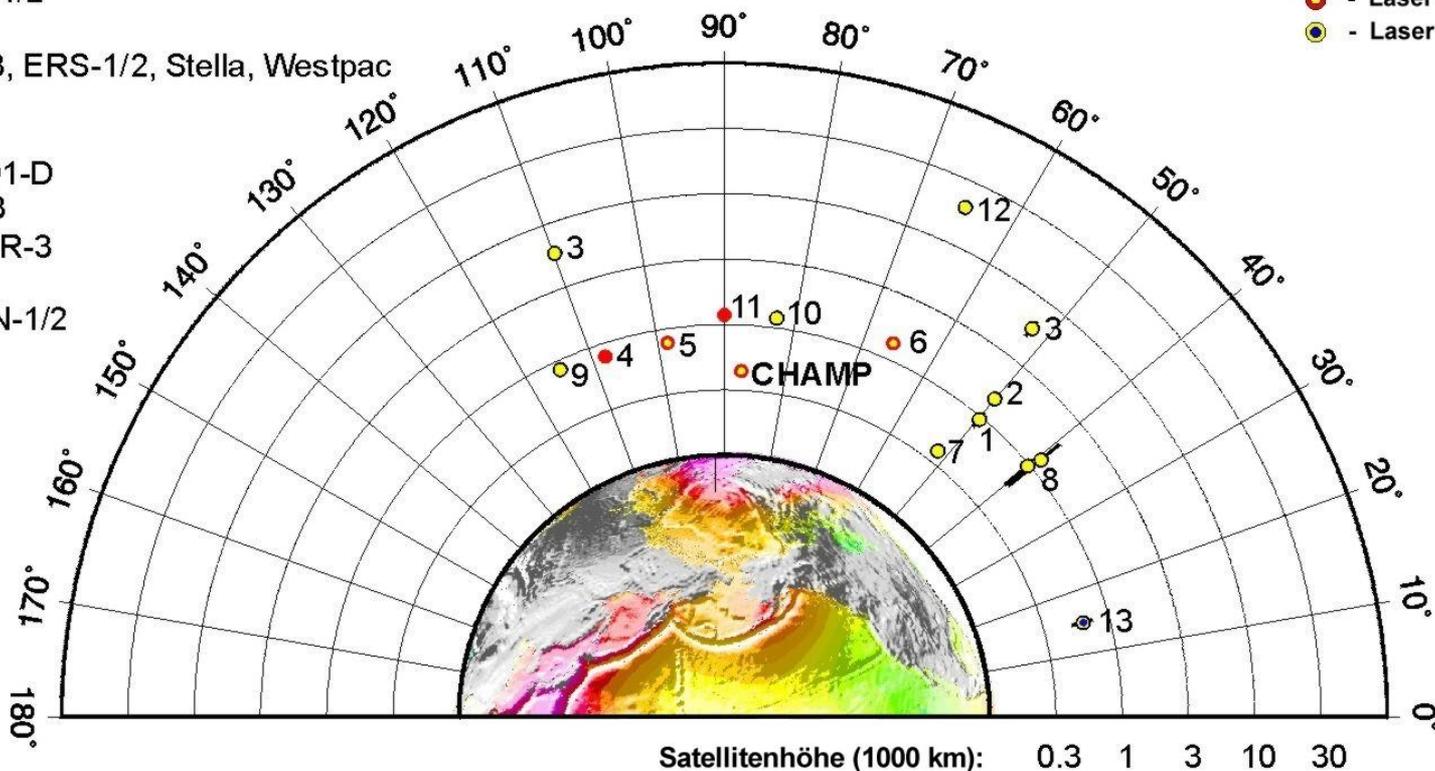
- **Определение параметров гравитационного поля Земли в области низких и средних частот и изменения этих параметров со временем.**
- **Определение параметров глобального магнитного поля Земли и изменения этих параметров со временем.**
- **Изучение атмосферы и ионосферы.**
- **Установление взаимодействия гравитационного и магнитного полей Земли.**

Измерения, выполняемые в интересах гравиметрии:

- **Координаты ИСЗ CHAMP и псевдодальности, измеряемые бортовыми GPS-приемниками между высокими ИСЗ созвездия GPS (высота около 19 000 км) и низким ИСЗ CHAMP (высота около 400 км).**
- **Измеряемые трехкомпонентным бортовым акселерометром составляющие вектора мгновенных ускорений ИСЗ CHAMP.**
- **Измеряемые звездным видеоприбором углы ориентации осей антенн бортовых GPS-приемников относительно звезд.**
- **Бортовая альтиметрия поверхности акватории Мирового океана.**
- **Наземная лазерная локация ИСЗ CHAMP.**

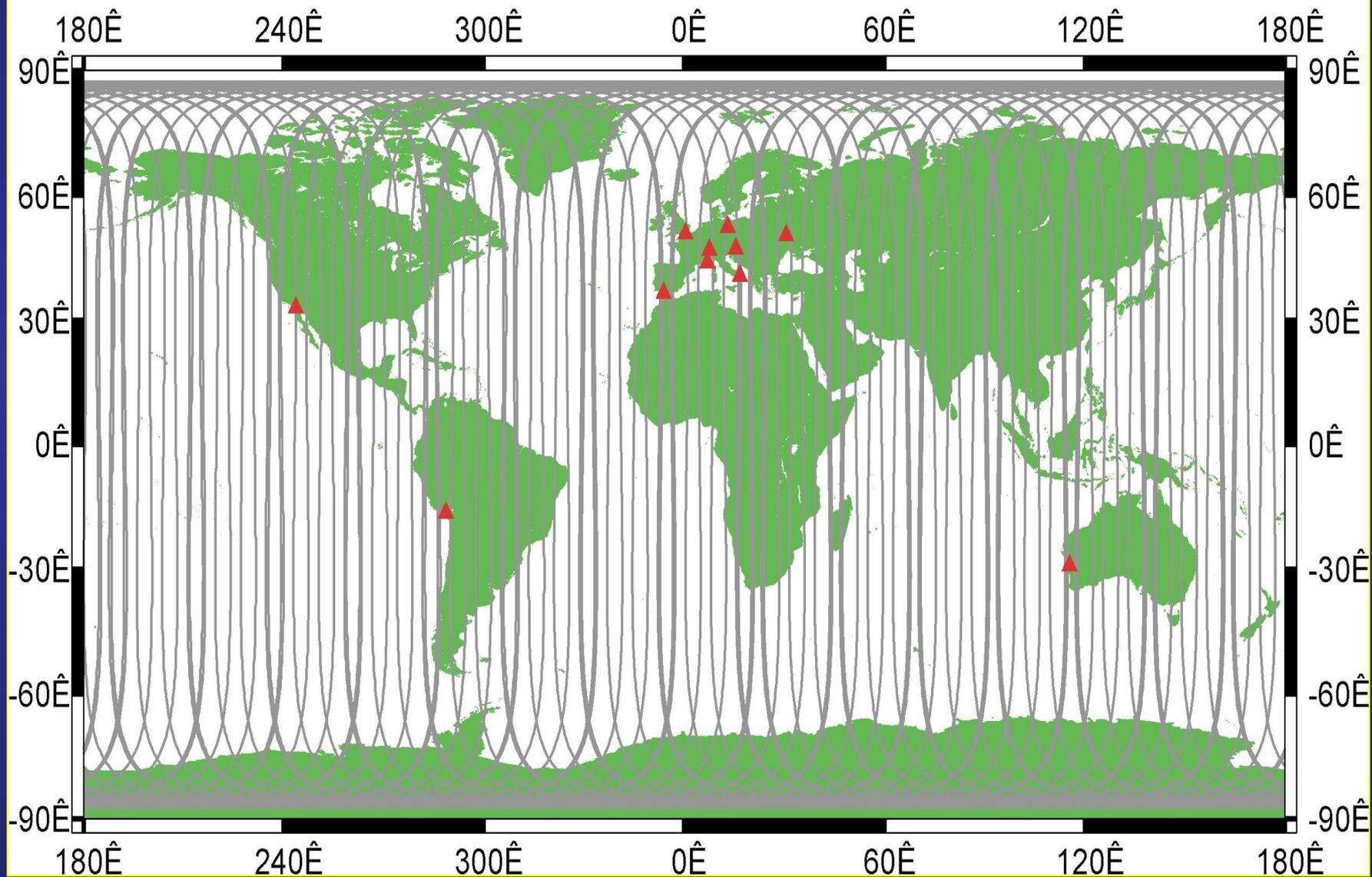
- 1 Starlette
- 2 Ajisai
- 3 Lageos 1/2
- 4 Geosat
- 5 Spot-2/3, ERS-1/2, Stella, Westpac
- 6 Topex
- 7 GFZ-1
- 8 D1-C, D1-D
- 9 GEOS-3
- 10 METEOR-3
- 11 NOVA3
- 12 ETALON-1/2
- 13 PEOPLE

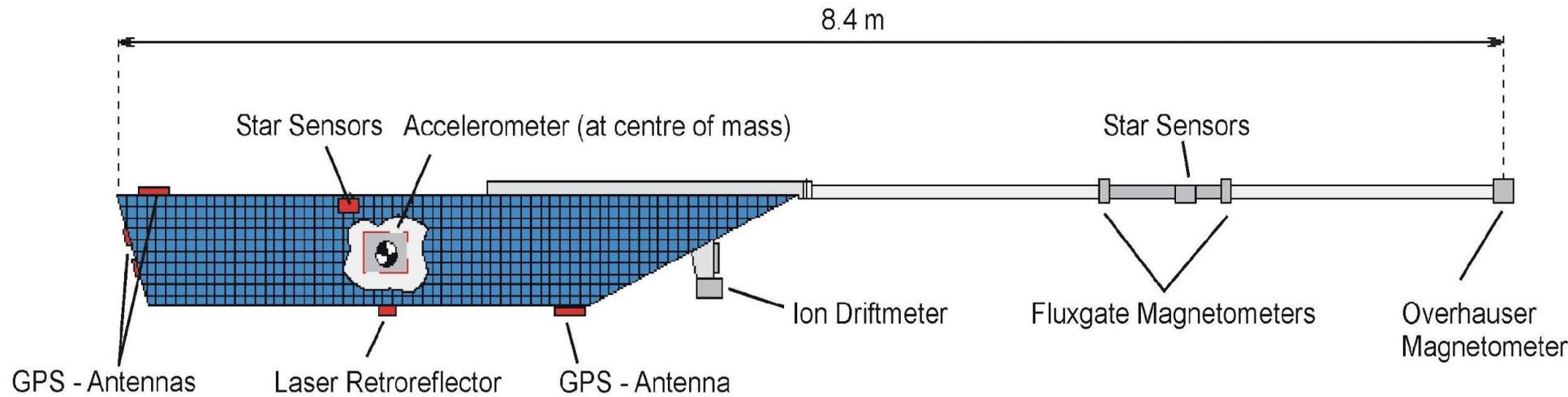
- - Laser
- - Radiowellen
- - Laser + Radiowellen
- - Laser + Kamera



Verteilung der für eine prä-CHAMP Geoid- und Schwerefeldlösung benutzten Satelliten in erdnahen Raum. Zu den Namen der Satelliten sind Flughöhe und Bahnneigung gegen die Äquatorebene eingezeichnet. Die Farben markieren die verwendeten Messsignaltechniken bei der Bahnverfolgung.

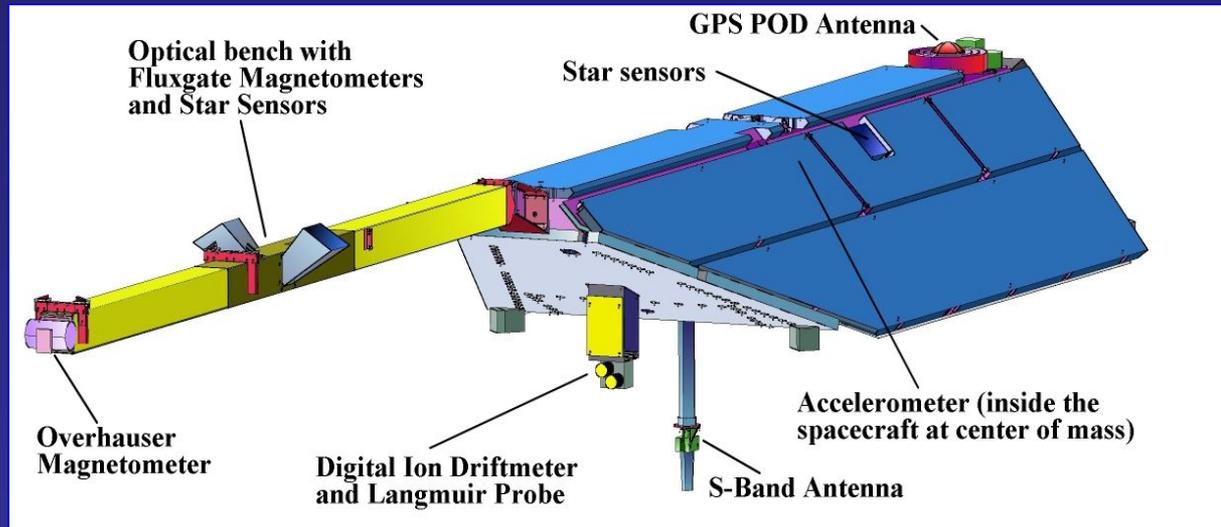
CHAMP Ground Track and SLR Stations, Day 210 - 213, 2000



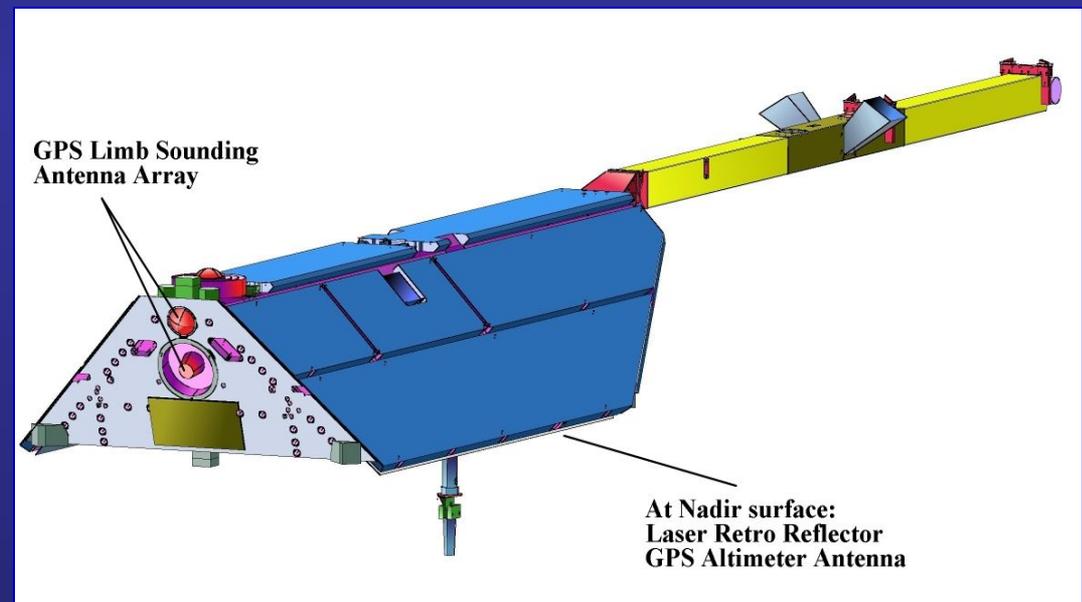


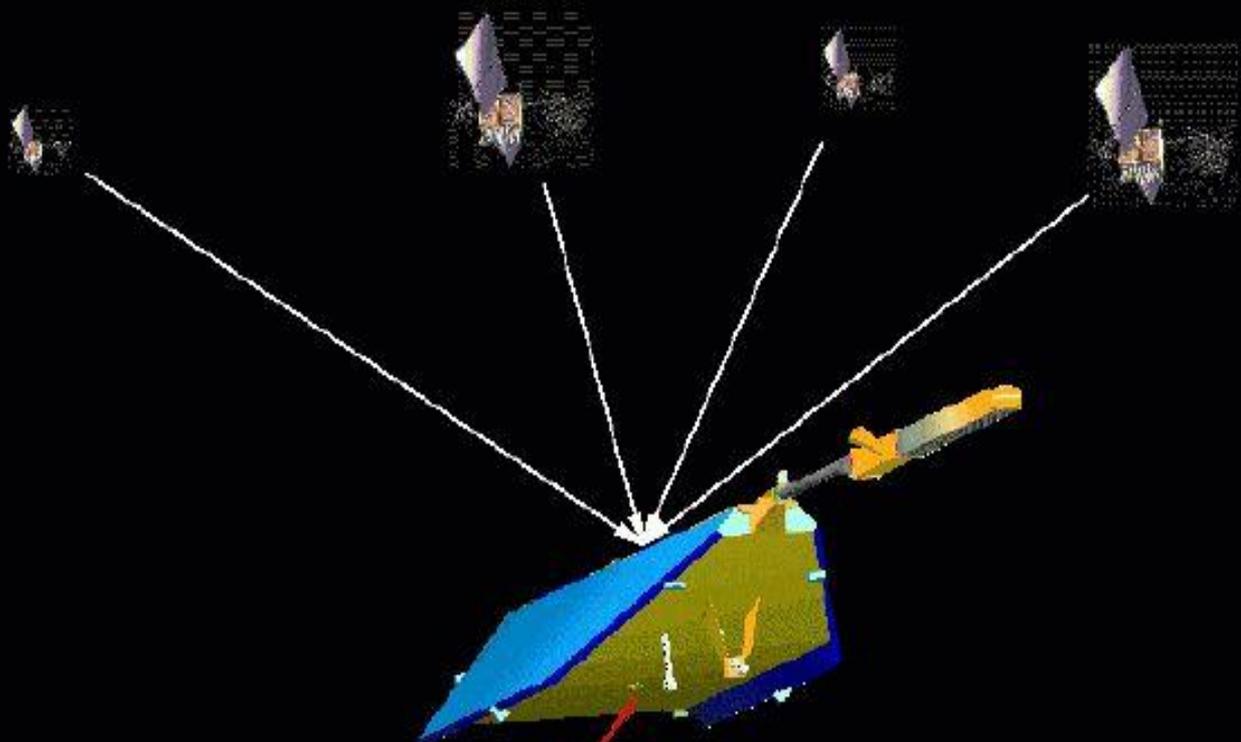
CHAMP mission benefits for a fundamental progress in gravity field recovery:

- near-polar orbit ($i=87^\circ$) for a complete coverage of the Earth
- continuous high-low GPS satellite-to-satellite tracking and a very low orbit (450 km, decaying to 300 km)
- on-board accelerometer for a direct measurement of hard-to-model non-gravitational surface forces, mainly air drag
- long mission lifetime (5 years) to resolve temporal gravity variations



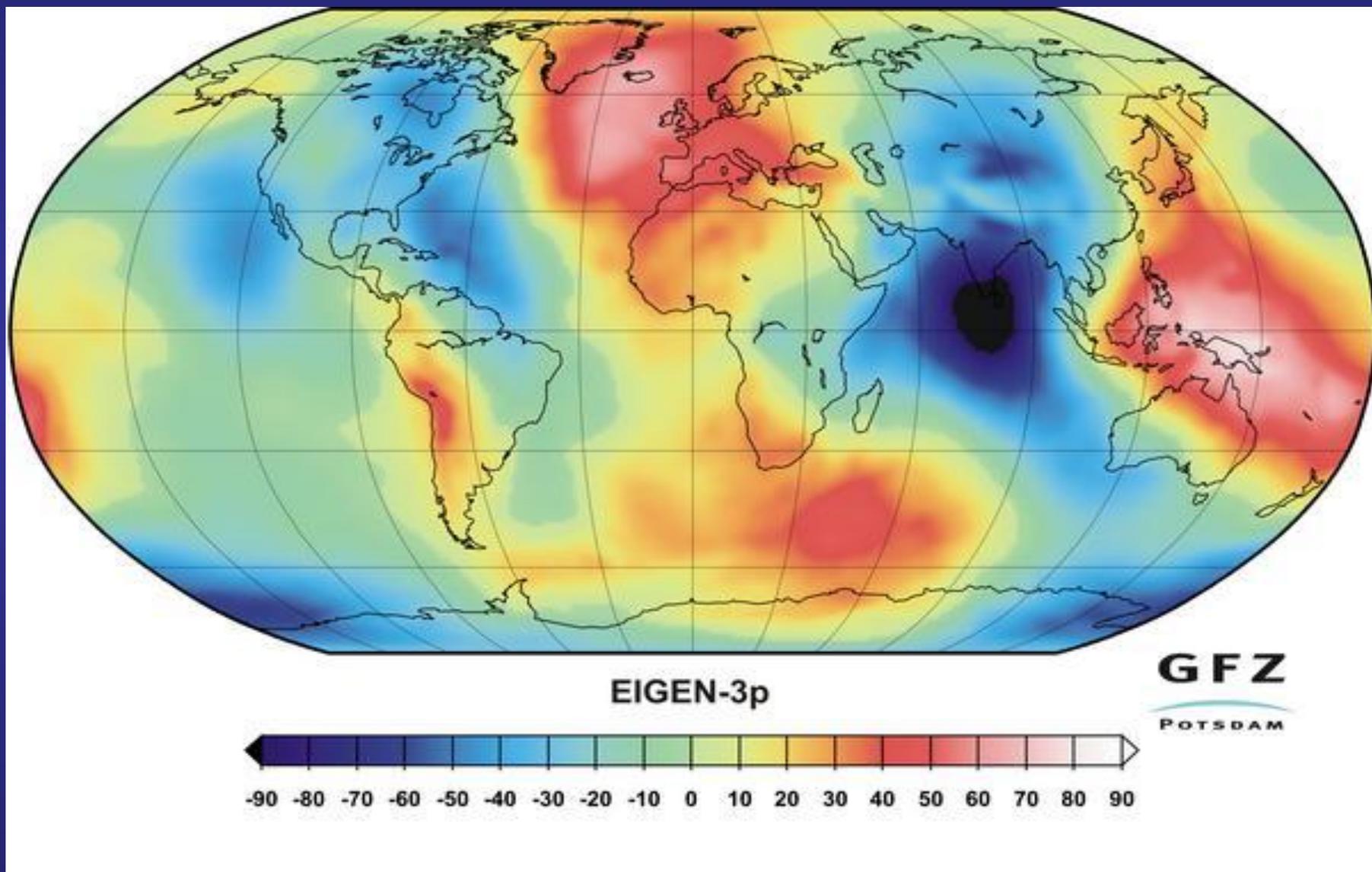
Расположение бортовых антенн GPS-приемников



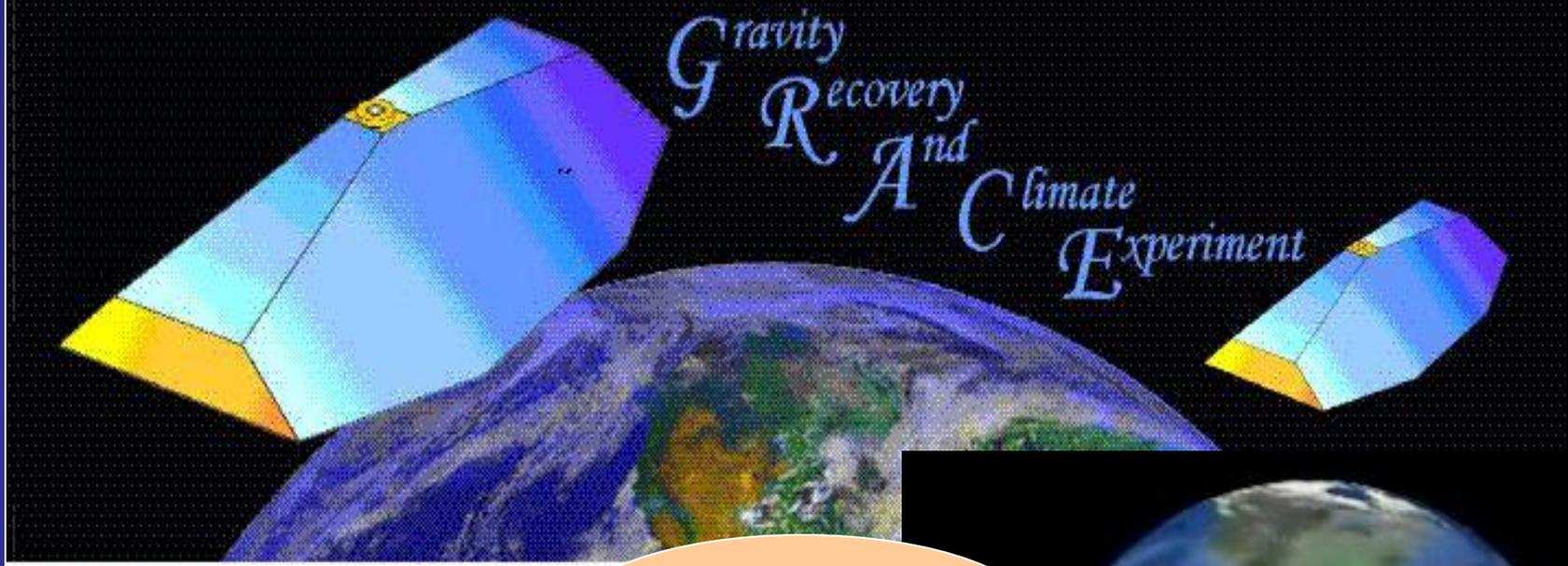


HL SST

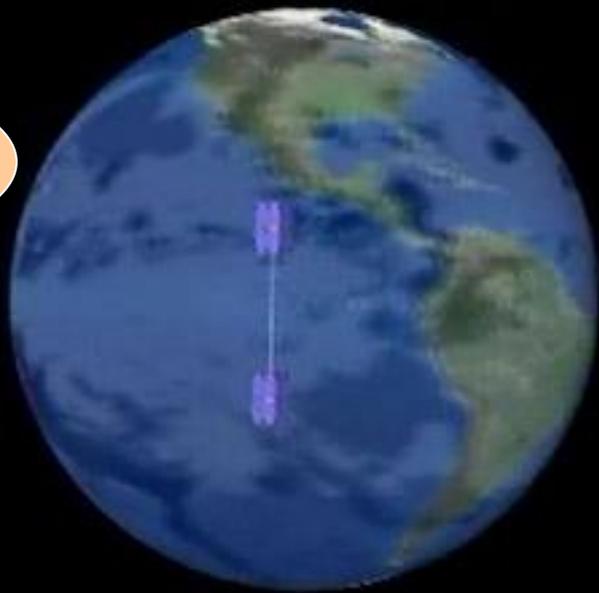
Фигура геоида по данным ИСЗ CHAMP



Gravity Recovery And Climate Experiment



17 марта
2002г.

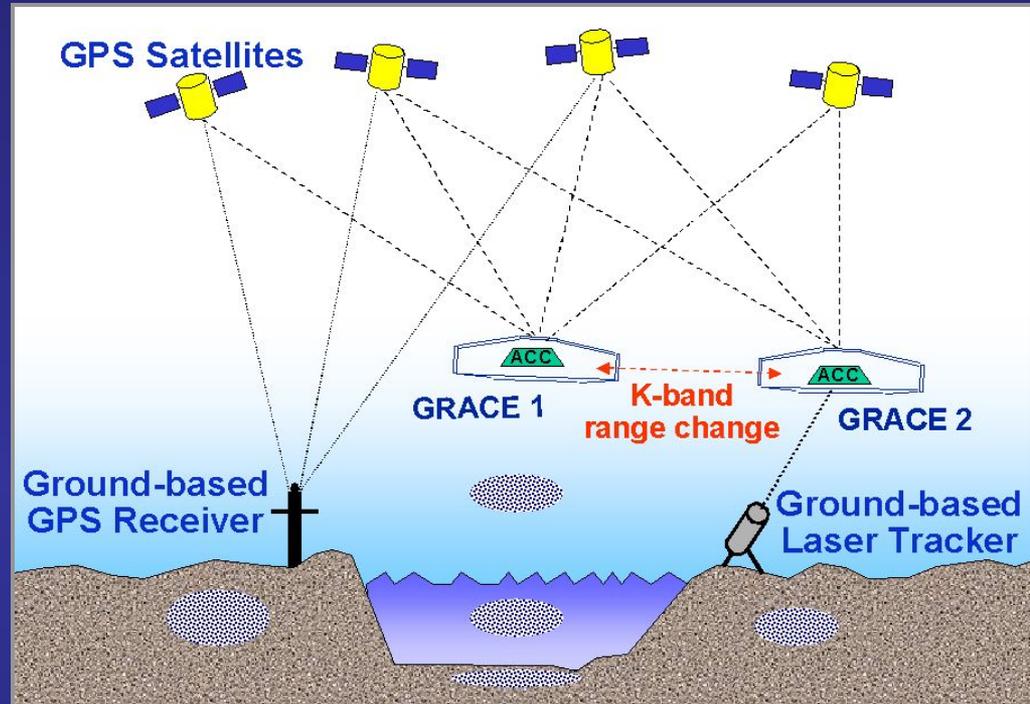
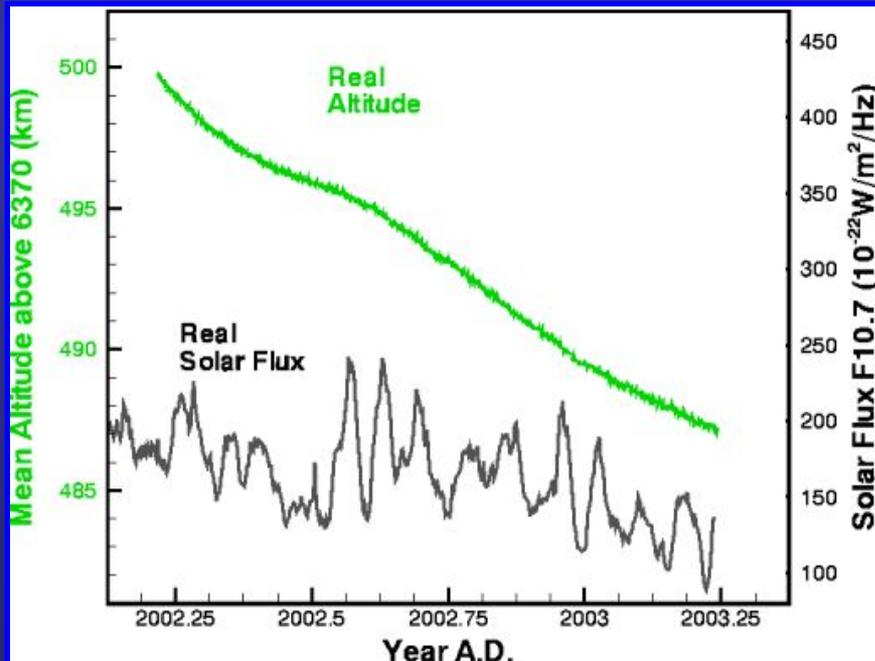


GRACE Mission Concept

Observations:

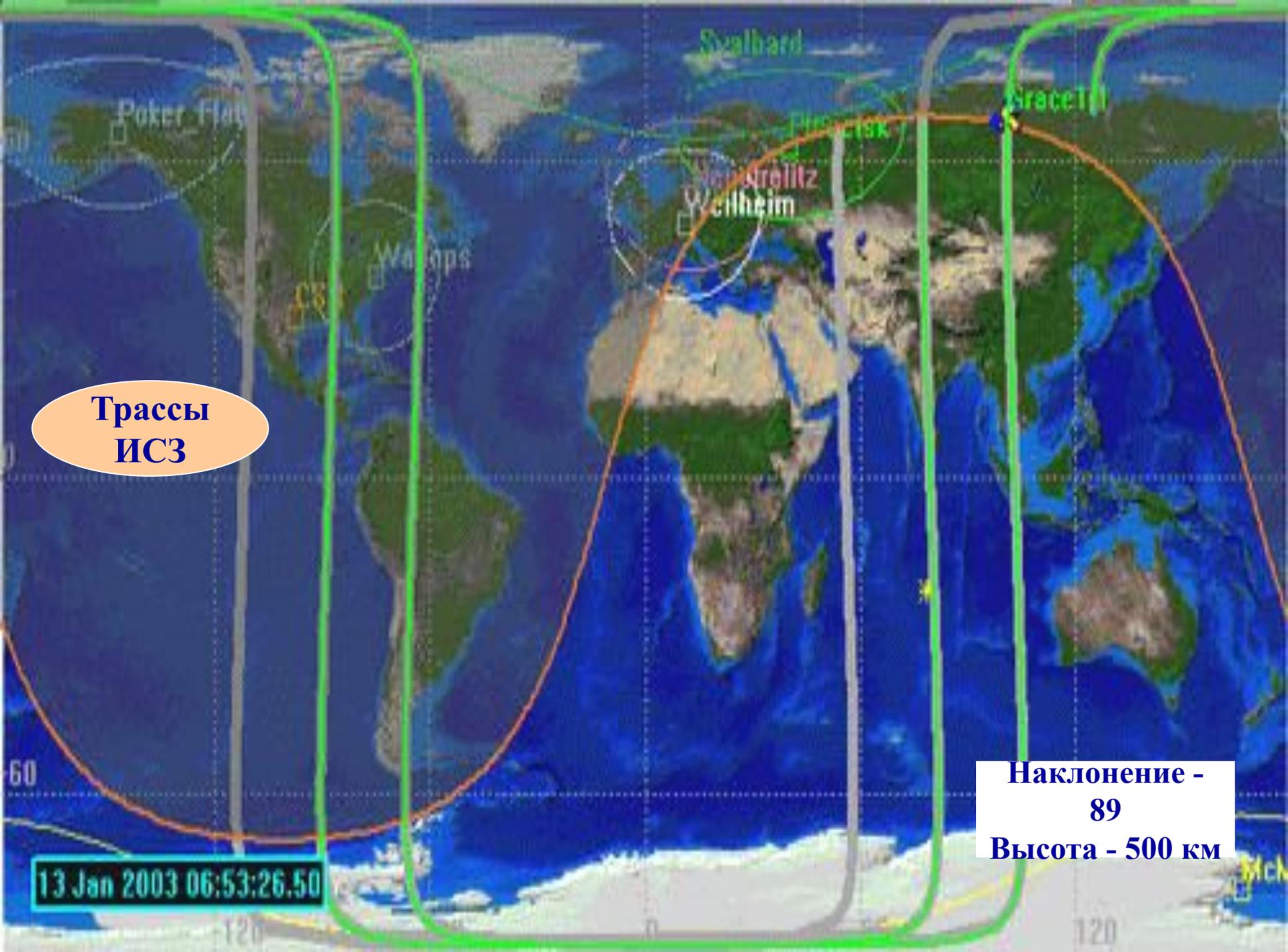
- GPS GRACE A/B hl code & phase
- GRACE A/B II K-band range & range rate
- 3D-surface forces accelerations

Measurement of $\{r_i, \dot{r}_i\}$



Orbit:

- Inclination 89 deg
- Eccentricity 0.002



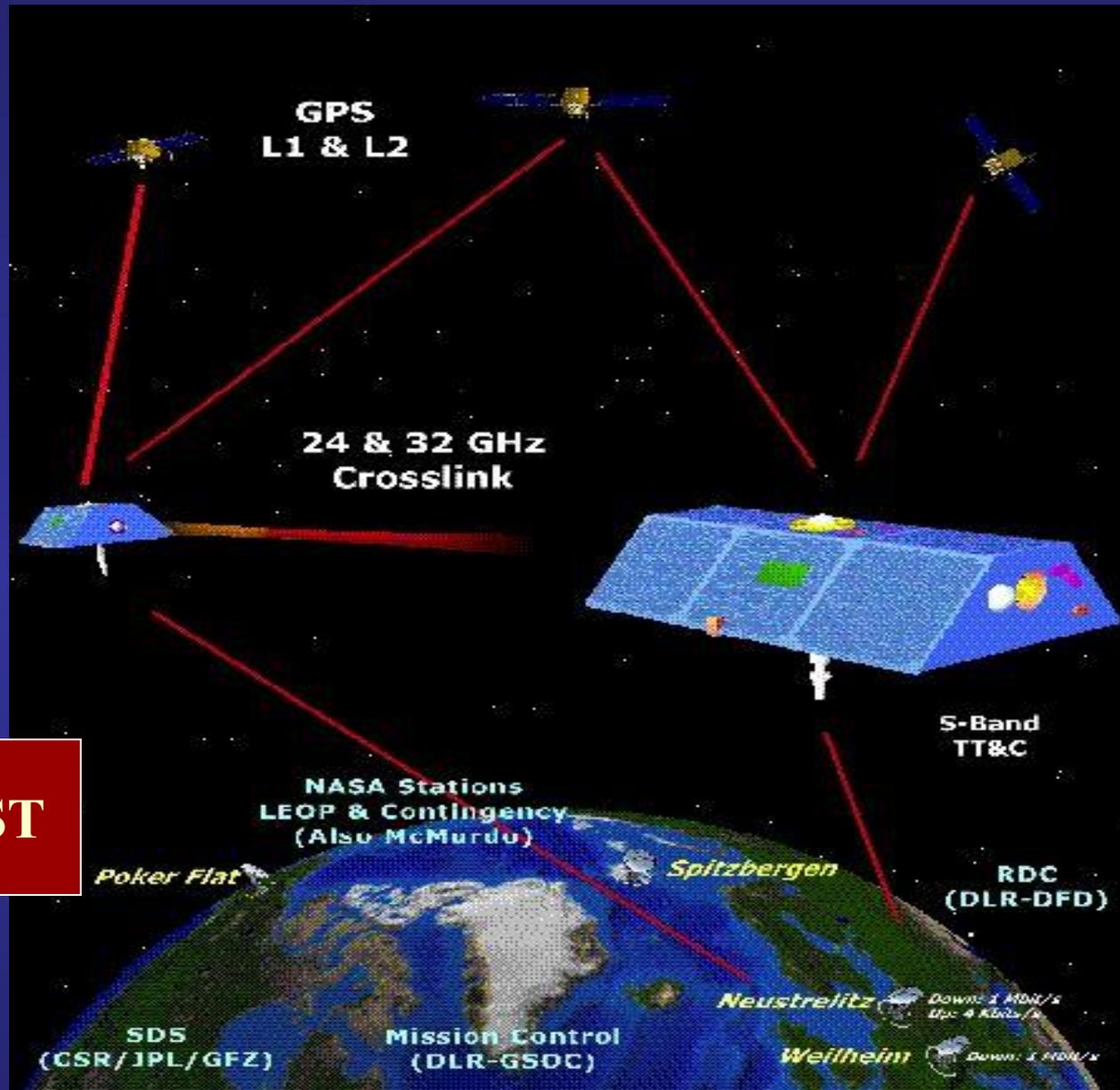
**Трассы
ИСЗ**

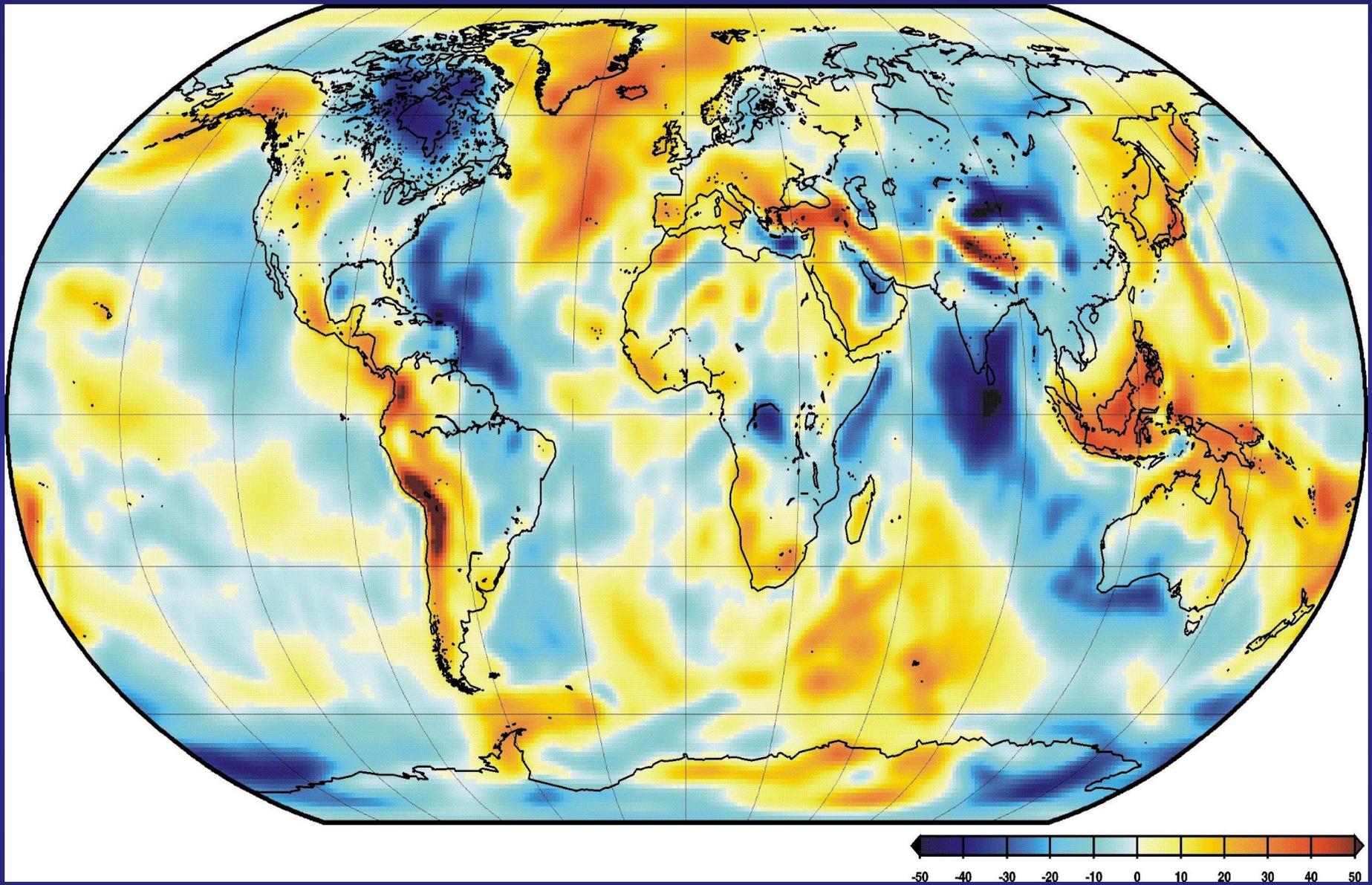
**Наклонение -
89
Высота - 500 км**

13 Jan 2003 06:53:26.50

Позиционирование
ИСЗ GRACE путем
привязки к ИСЗ
созвездия GPS

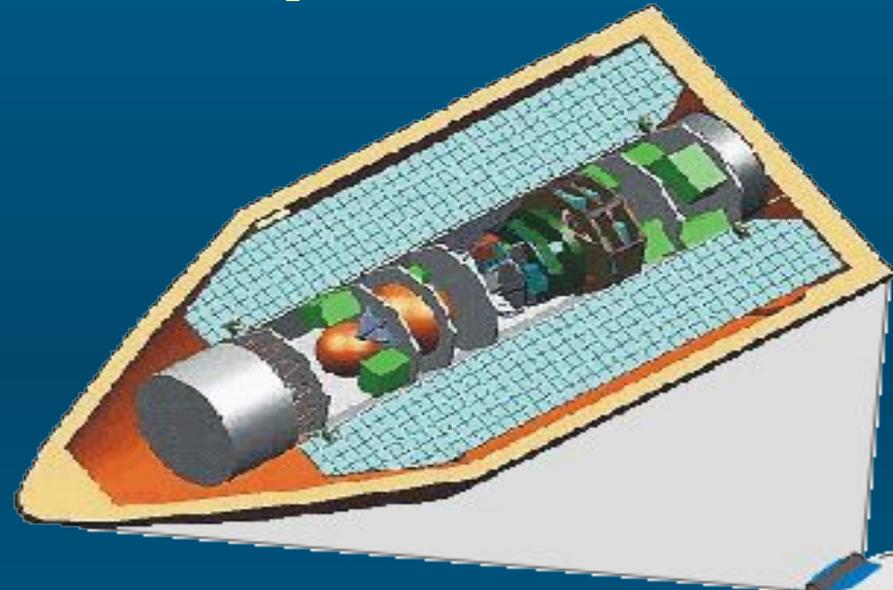
LL SST + HL SST



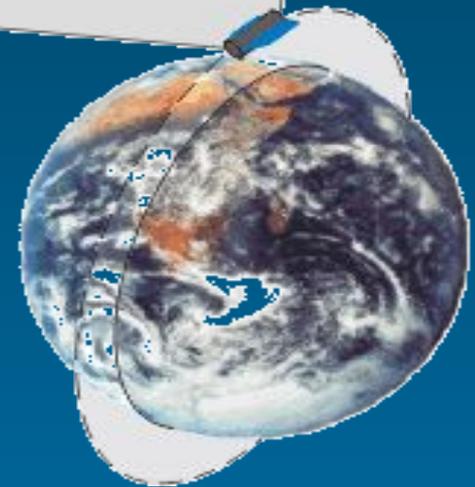


Gravity anomalies [mgal] from 10 days of GRACE data

Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer

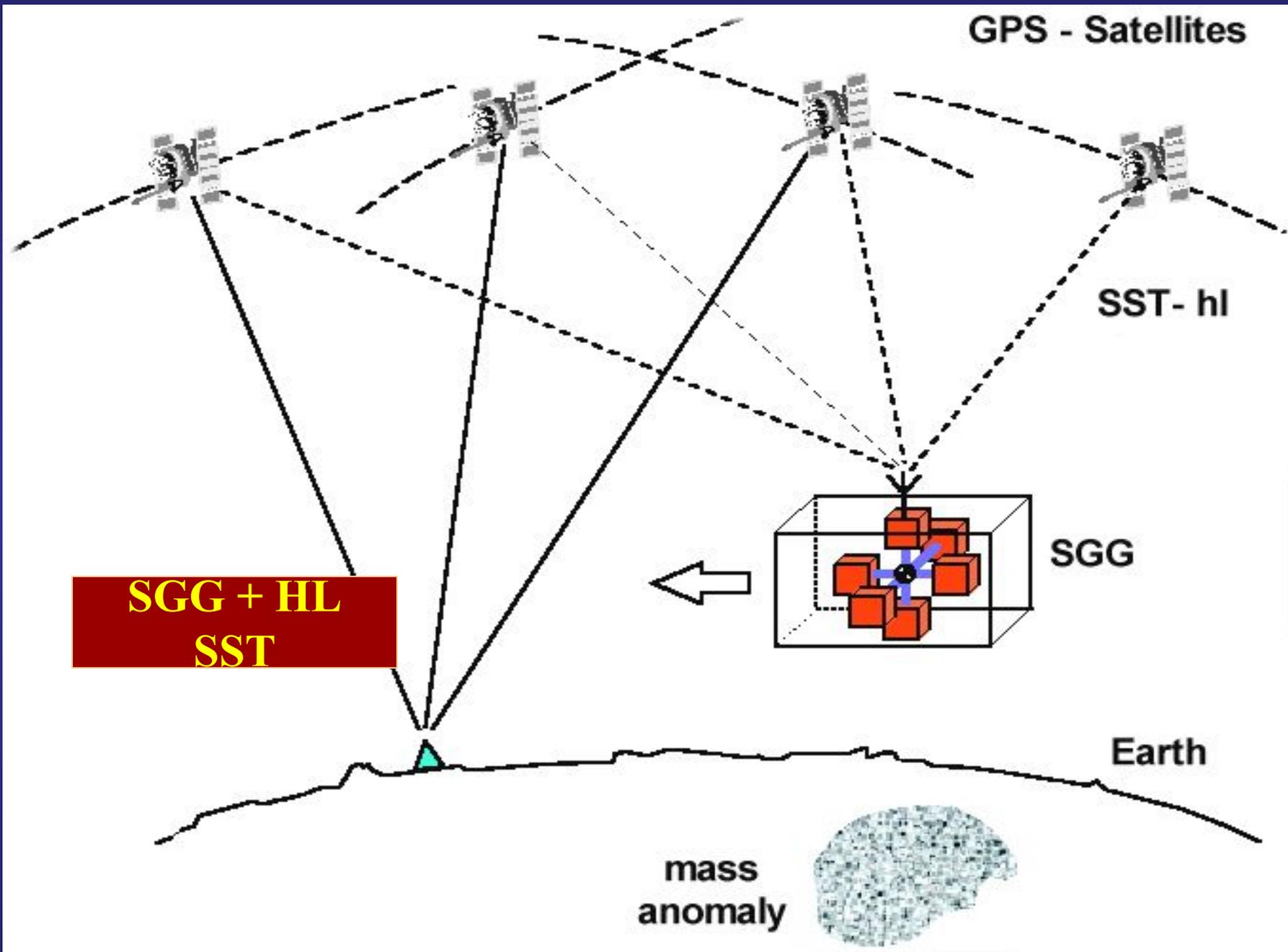


*GOCE -
PROJEKTBURO
DEUTSCHLAND*



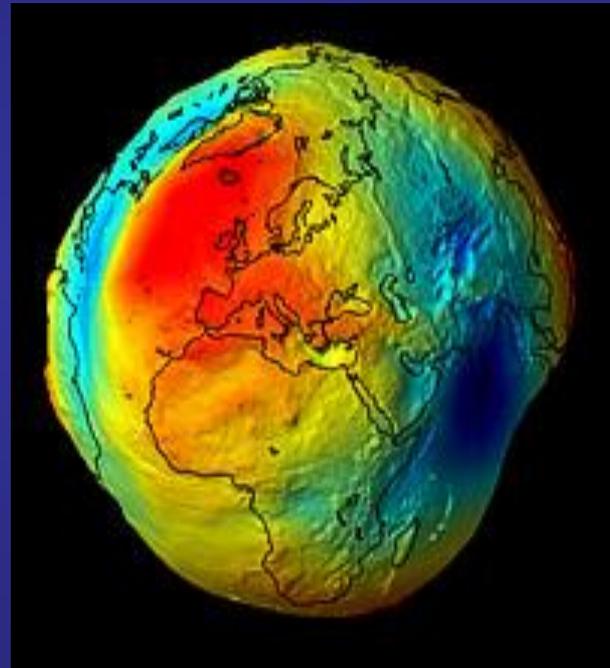
Спутник GOCE - первый спутник выполняющий градиентометрические измерения.





Главные цели миссии GOCE:

- определить гравитационные аномалии с точностью 1 mGal (где $1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ m/s}^2$)
- определить геоид с точностью 1-2 см.
- для достижения вышеупомянутого в пространственном разрешении более чем 100 километров.



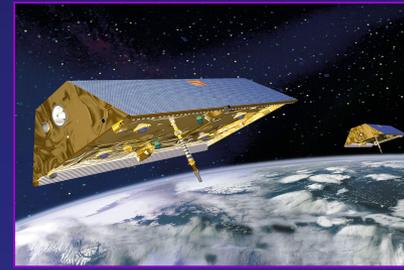
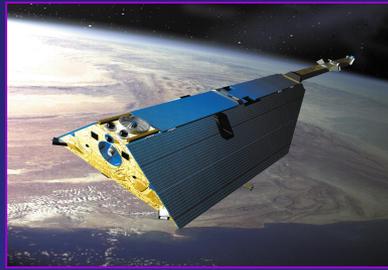
Спутник GOCE - первый спутник с установленным на своем борту градиентометром

Электростатический гравитационный градиентометр (EGG), предназначенный для измерений компонент тензора гравитационного градиента.



- EGG - трехосный градиентометр, состоящий из 3 пар, снабженных сервоприводами акселерометров на сверхстойчивой углеродной основе.
- Принцип работы EGG основан на измерении сил, необходимых для сохранения пробной массы в центре спецучастка. Пара идентичных акселерометров, установленных на расстоянии 50 см, формируют "градиентометрическое плечо". Различие между ускорением, измеренным каждым из этих двух акселерометров, является основной градиентометрической величиной (дифференциальным измерением),





	CHAMP (launched 15 July 2000)	GRACE -A, -B (launched 17 Mar.2002)	GOCE (Aug. 2006)
orbit inclination	87°	89°	96.5°
orbit altitude	454 . 400 (2002) .. 300 km	500 ... 300 km	250 km
mission lifetime	5 years	5 years	2 x 0.5 years
surface force sensor	accelerometer	accelerometer	drag-free
gravity sensor	GPS-CHAMP SST	GPS-GRACE SST, low-low SST (220 km)	GPS-GOCE SST, Gradiometer
gravity field recovery ($\lambda/2$)	achieved: 10 cm, 0.5 mgal @ 500 km goal: 1cm @400 km, 3 month	achieved: 10 cm,1 mgal @250 km goal: 1 cm @150 km 1 mm@500 km,monthly	goal: 1 cm, 1 mgal @ 100km -

Анализ эволюции элементов орбиты

N до 36

HL SST
N до 60

LL SST
N до 90

SGG
N до 360

Ошибки геоида

EGM 96 + аэрогравиметрия

EGM 96 + спутниковые данные + аэрогравиметрия

0.4 м

CHAMP

GRACE

GOCE

0.2 м

Худший прогноз

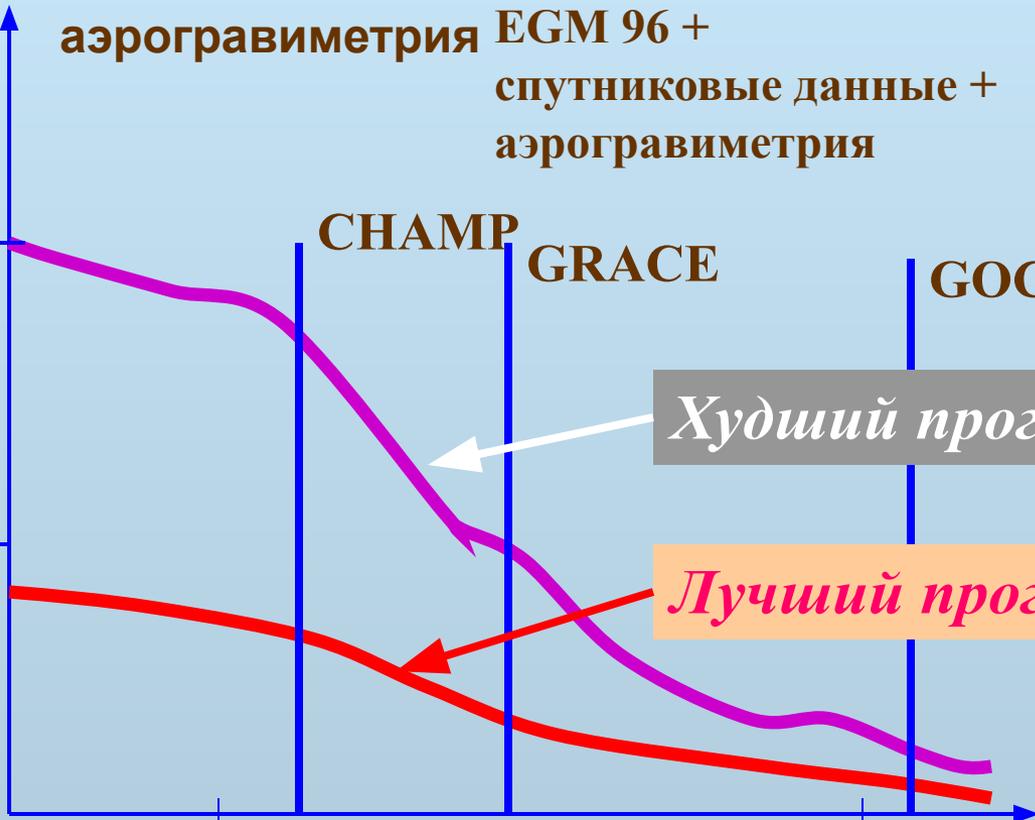
Лучший прогноз

Годы

2000

2005

Перспективы определения фигуры геоида





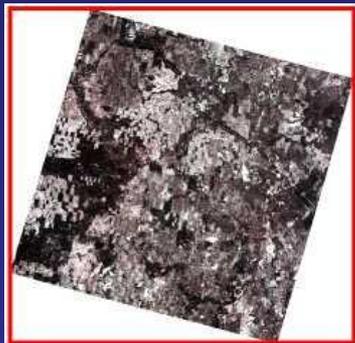






ПРОГРАММА
«Использование результатов
космической деятельности в целях
социально-экономического развития
Республики Татарстан на 2008-2010 годы»

Утверждена постановлением КМ РТ №751
от 15 октября 2008 года



*Создание региональной системы получения обработки и распространения данных дистанционного зондирования Земли.
Получение космических снимков различного разрешения (0.5 - 250 м).*



- **Геоинформационное картографирование РТ.**
- **Городской и сельский кадастры недвижимости.**
- **Мониторинг состояния объектов и поверхности Земли и протекающих на ней процессов.**
- **Метеорология и мониторинг состояния атмосферы.**
- **Использование космоснимков в ГИС органов государственной власти и ОМСУ, размещение их на геопортале Правительства РТ.**

Создание и использование республиканской системы получения, обработки и распространения данных дистанционного зондирования Земли



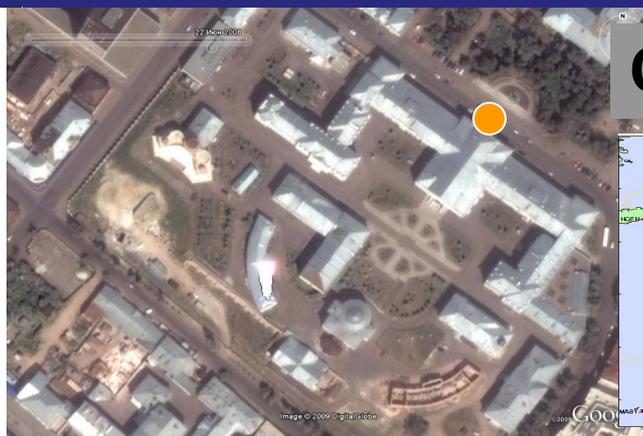
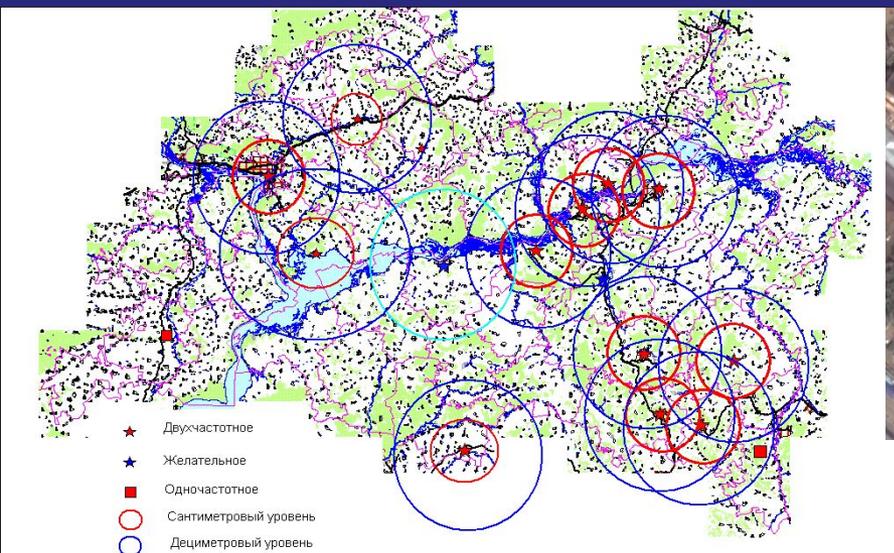


Высокоточная спутниковая навигация (с точностью до миллиметра)



- **Мониторинг состояния крупных, особо ценных и опасных инженерно-технических сооружений.**
- **Высокоточное определение координат при геодезических и прочих работах.**
- **Высокоточное земледелие.**
- **Мониторинг местоположения и состояния транспортных средств.**
- **Создание системы предупреждения техногенных угроз в реальном времени и прогнозирование неблагоприятных природных и техногенных явлений.**

Сеть референционных (базовых) станций приема сигналов ГНСС на территории РТ



Станция КГУ



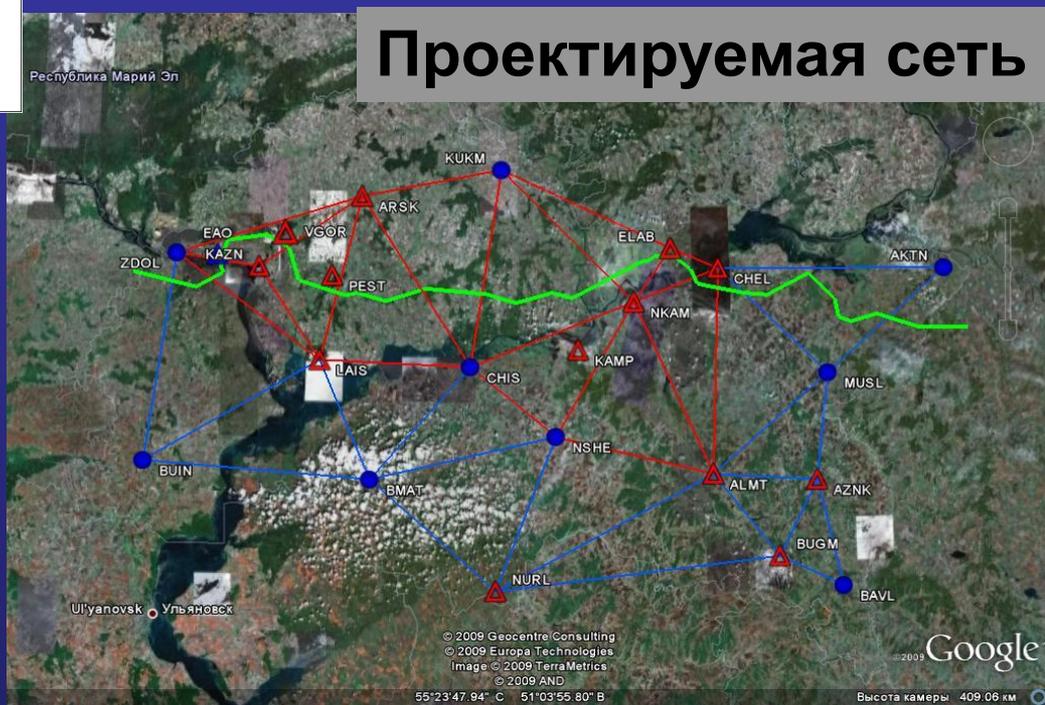
Существующая сеть

Станция КГУ



B = 55° 47' 26" 9714 N
L = 49° 07' 09" 0958 E
H = 91.521 (м)

Проектируемая сеть



© 2009 Geocentre Consulting
© 2009 Europa Technologies
Image © 2009 TerraMetrics
© 2009 AND
55°23'47.94" C 51°03'55.80" B

Google
2009
Высота камеры 409.06 км



**Из «Перечня
поручений Президента
Российской Федерации»
от 13.04.2007, Пр.-619ГС**

«Разработать комплекс мер, направленных на подготовку и повышение квалификации специалистов в области использования результатов космической деятельности, в том числе с учетом потребностей субъектов Российской Федерации.»

По итогам заседания
Президиума ГС РФ
29.03.07, Калуга

Определение высот геоида

$$“h = H + N”$$

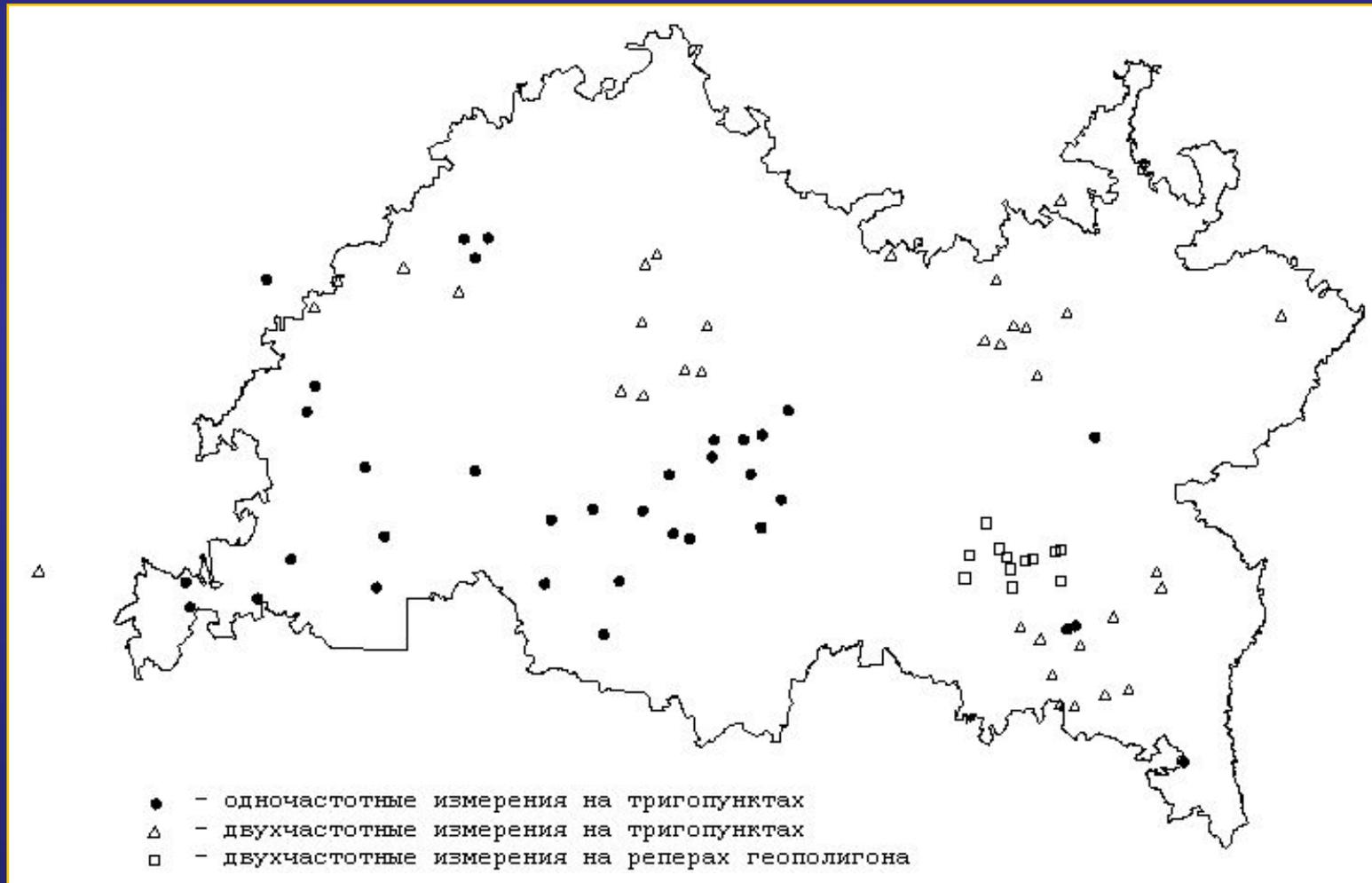


h (геодезическая высота) = QP

N (Высота геоида) = QP_0

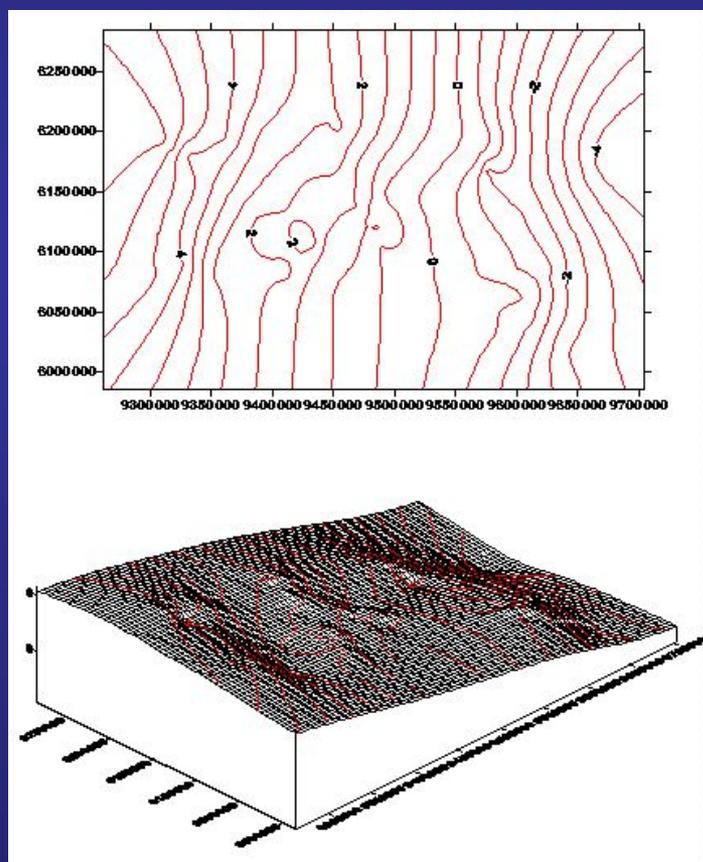
H (ортометрическая высота) = PP_0

Точки GPS- измерений на территории Республики Татарстан

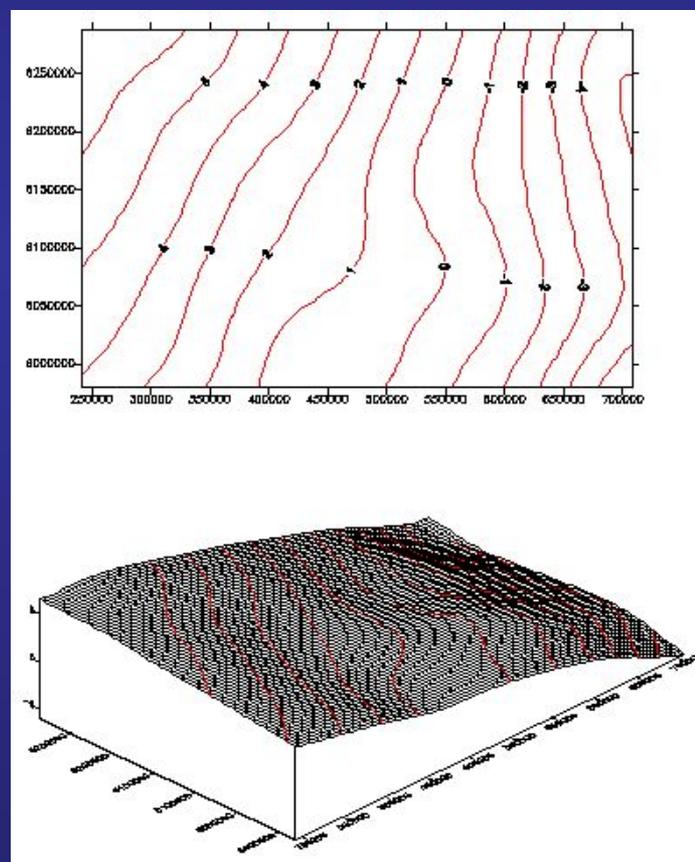


Фигура геоида на территории Республики Татарстан

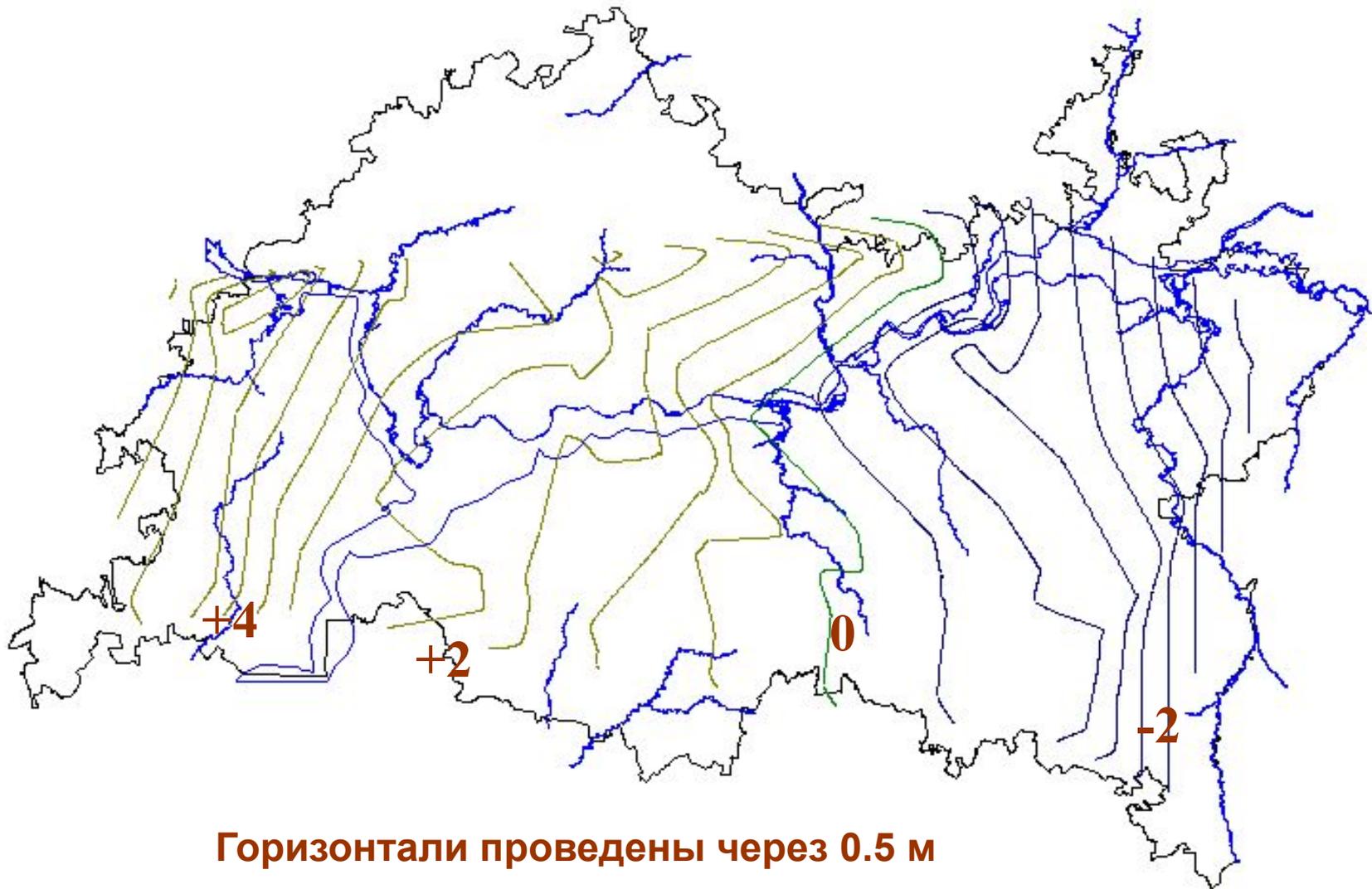
локальный квазигеоид
по GPS-измерениям



глобальный геоид
по модели EGM 96

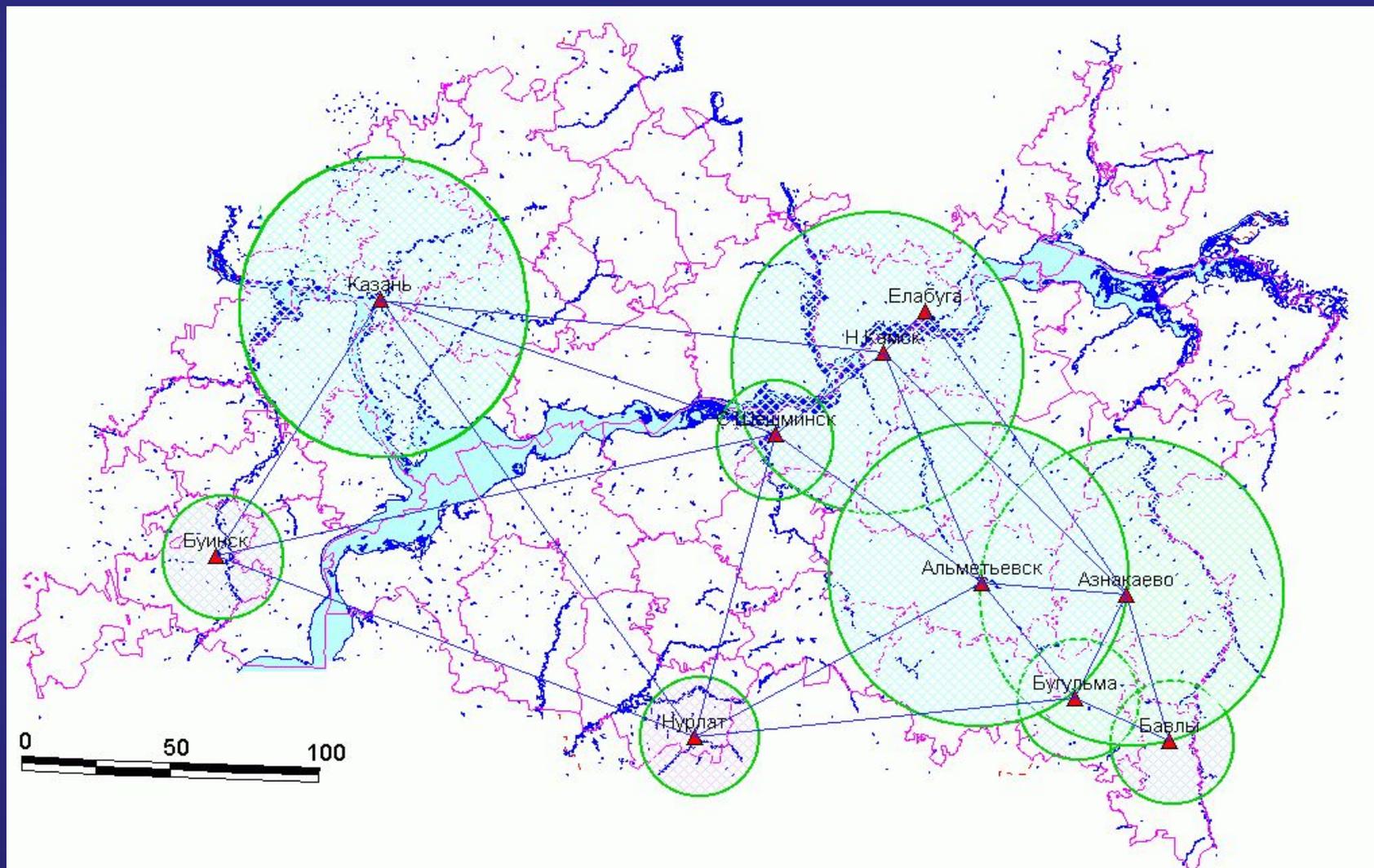


Локальный квазигеоид на территории Республики Татарстан



Горизонтالي проведены через 0.5 м

Сеть геодезических пунктов спутникового позиционирования на территории Республики Татарстан



Благодарю за внимание!



14.08.2007 10:50