

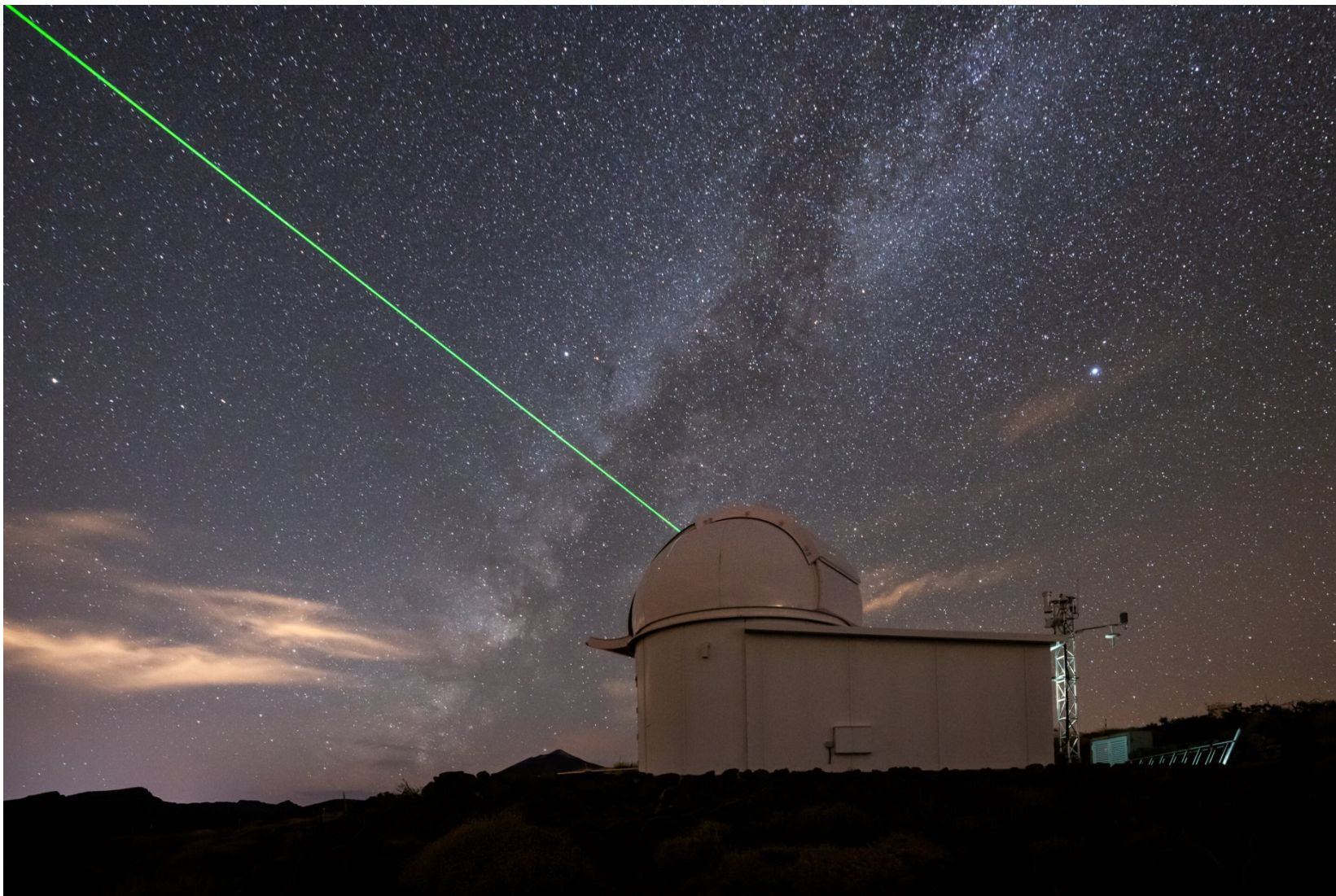
# Лазерная локация спутников (SLR – Satellite Laser Ranging)

Грибанова Марина Сергеевна

(младший научный сотрудник лаборатории  
космической геодезии и вращения Земли  
Института прикладной астрономии РАН)

Профиль ~~alexio-alexio~~

## На Кавказе по спутникам стреляют лазером. Узнал, кто и зачем это делает



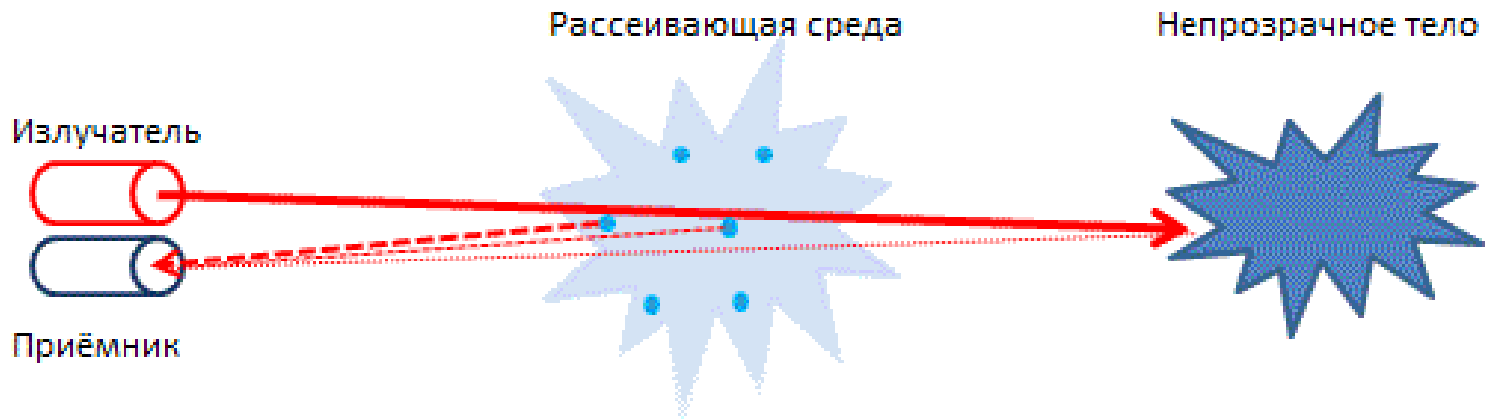
# Принцип работы лазерной локации

Лазерный передатчик посылает короткие световые импульсы на приемник. Луч отражается от объекта и возвращается обратно, ловится передатчиком.

Цель: Обнаружение и определение местоположения объекта при помощи измеренной задержки.

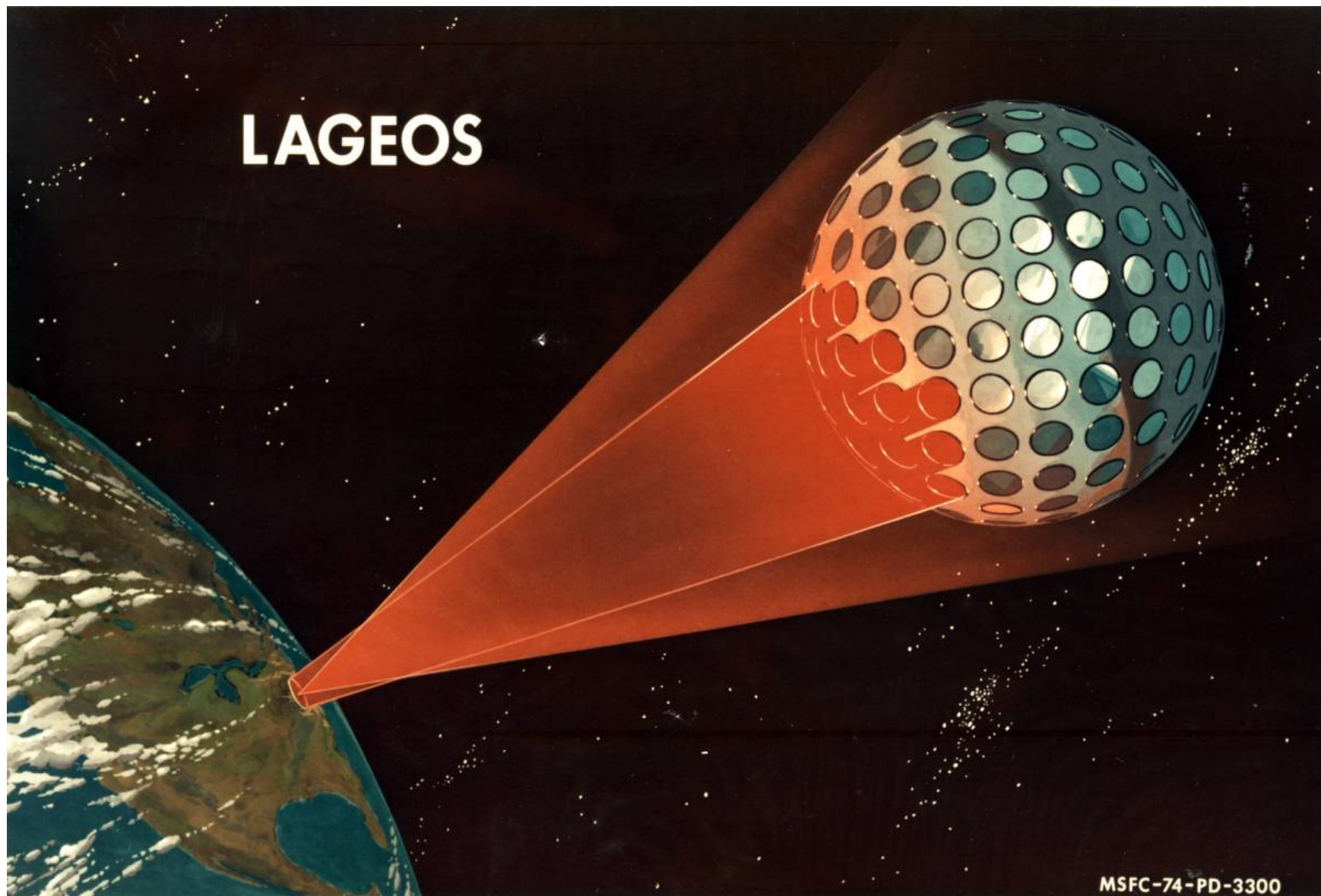
$$p = \frac{c * (t_{\text{пр}} - t_{\text{отпр}})}{2} + \Delta$$

$p$  – расстояние между объектами,  
 $c$  – скорость света,  
 $t_{\text{пр}}$ ,  $t_{\text{отпр}}$  – моменты приема и отправки сигнала,  
 $\Delta$  – сумма поправок, задержек, погрешностей



Расстояние до цели	1 м	10 м	100 м	1 км	10 км	100 км
Время отклика	6.7 нс	67 нс	0.67 мкс	6.7 мкс	67 мкс	0.67 мс

Мгновенные измерения дальности спутников с точностью до миллиметра.  
Отслеживая малейшие изменения высоты орбит спутников, можно  
получать много полезных научных данных.



# История

Запуск спутника Veason-B NASA в 1964 году.  
Точность наблюдений десятки метров.

1971-1973гг. - международный эксперимент ISAGEX.  
Точность наблюдений уже 1-2 метра.

Starlette, 1975г.

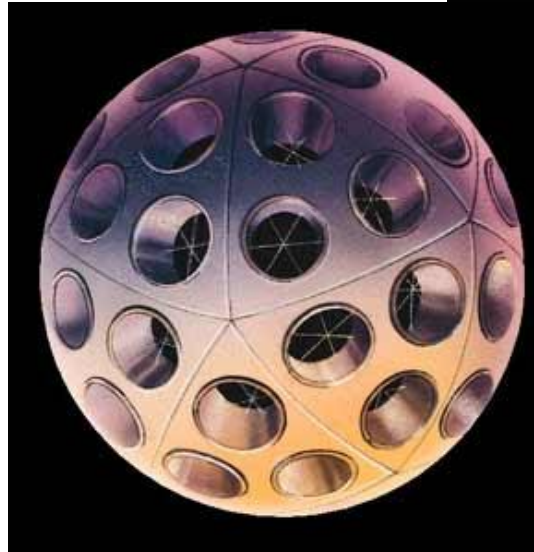
LAGEOS-1 (Laser GEOdynamics Satellite), 1976г.

Определение орбит этих спутников сначала с  
дециметровой, а затем с сантиметровой точностью.

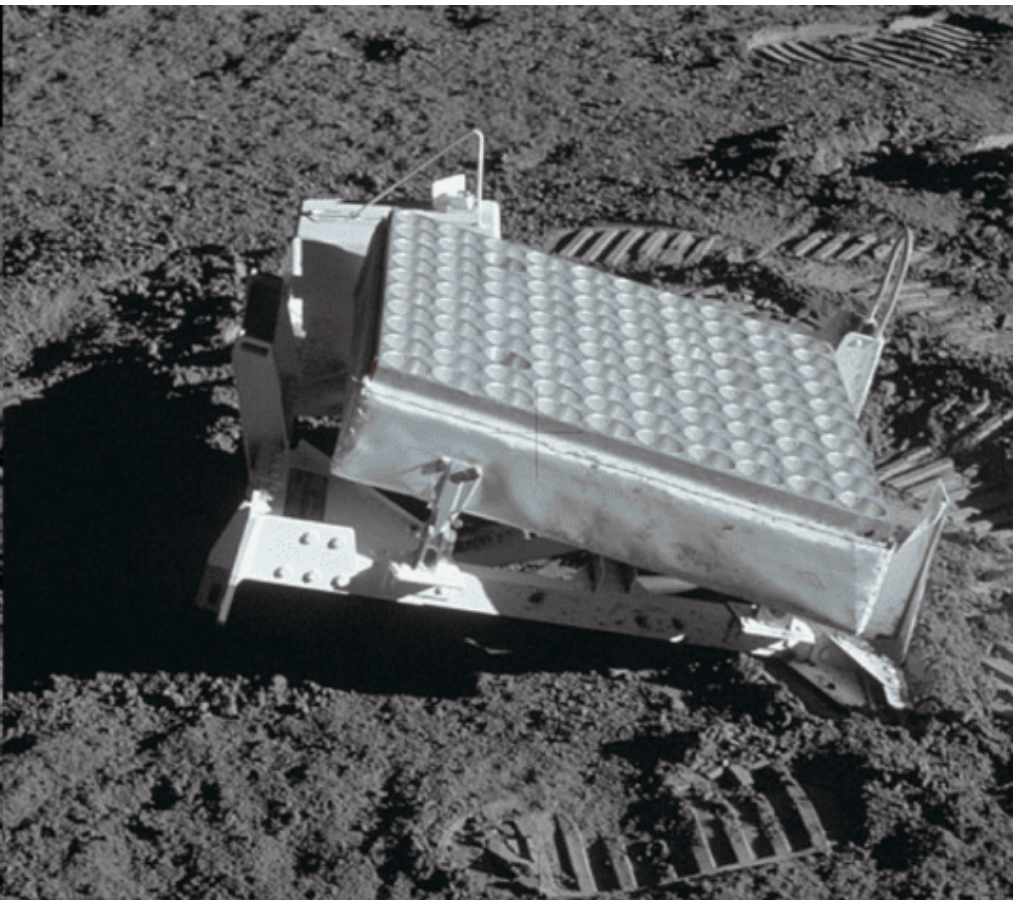
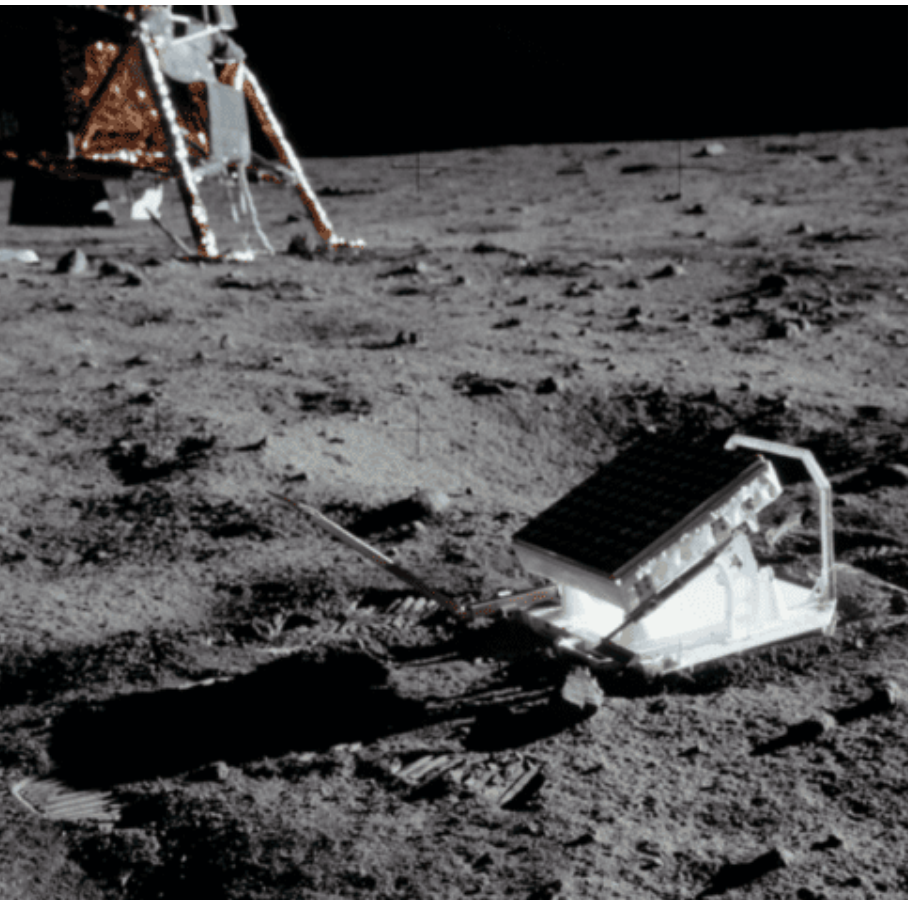
LAGEOS-1, NASA



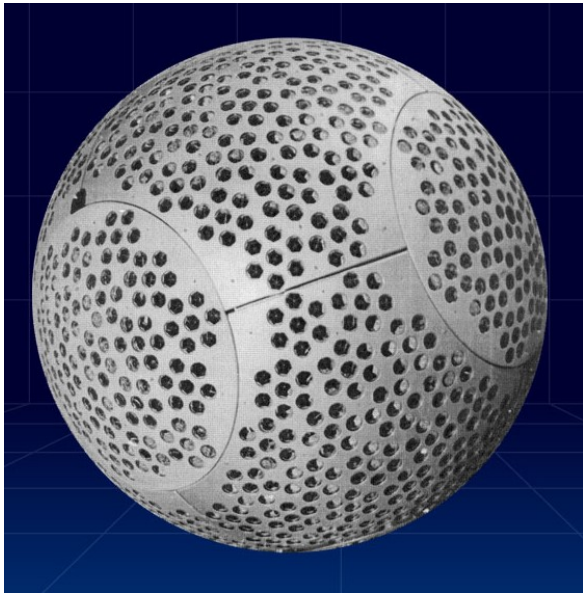
Starlette, Франция



# Лазерный уголковогой отражатель на Луне



Эталон (1989г.), СССР



К середине 90х гг. XX века точность измерения дальностей достигает субсантиметровой точности.

LARES (2012г.), Италия



AJISAI (1986г.), Япония

# Международная Служба Лазерной Локации, 1998 год

ILRS Home Page

★ 42 отзыва



**International Laser Ranging Service**  
A service of the International Association of Geodesy

Search

IAG | GGOS

## Welcome to ILRS

About ILRS

Network

Missions

Science

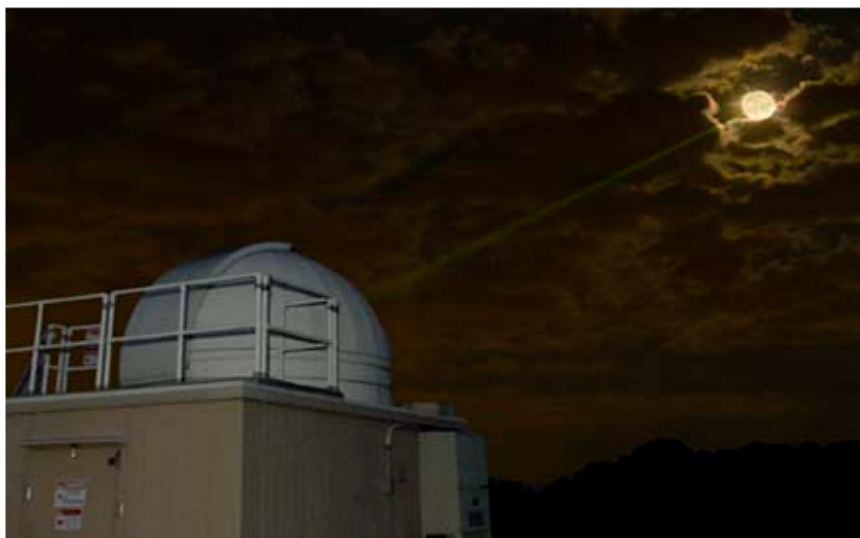
Data & Products

Technology

### Overview

Satellite Laser Ranging (SLR) and Lunar Laser Ranging (LLR) use short-pulse lasers and state-of-the-art optical receivers and timing electronics to measure the two-way time of flight (and hence distance) from ground stations to retroreflector arrays on Earth orbiting satellites and the Moon. Scientific products derived using SLR and LLR data include precise geocentric positions and motions of ground stations, satellite orbits, components of Earth's gravity field and their temporal variations, Earth Orientation Parameters (EOP), precise lunar ephemerides and information about the internal structure of the Moon. Laser ranging systems are already measuring the one-way distance to remote optical receivers in space and can perform

### Welcome



NGSLR Greenbelt, MD

... ..

### Recent News

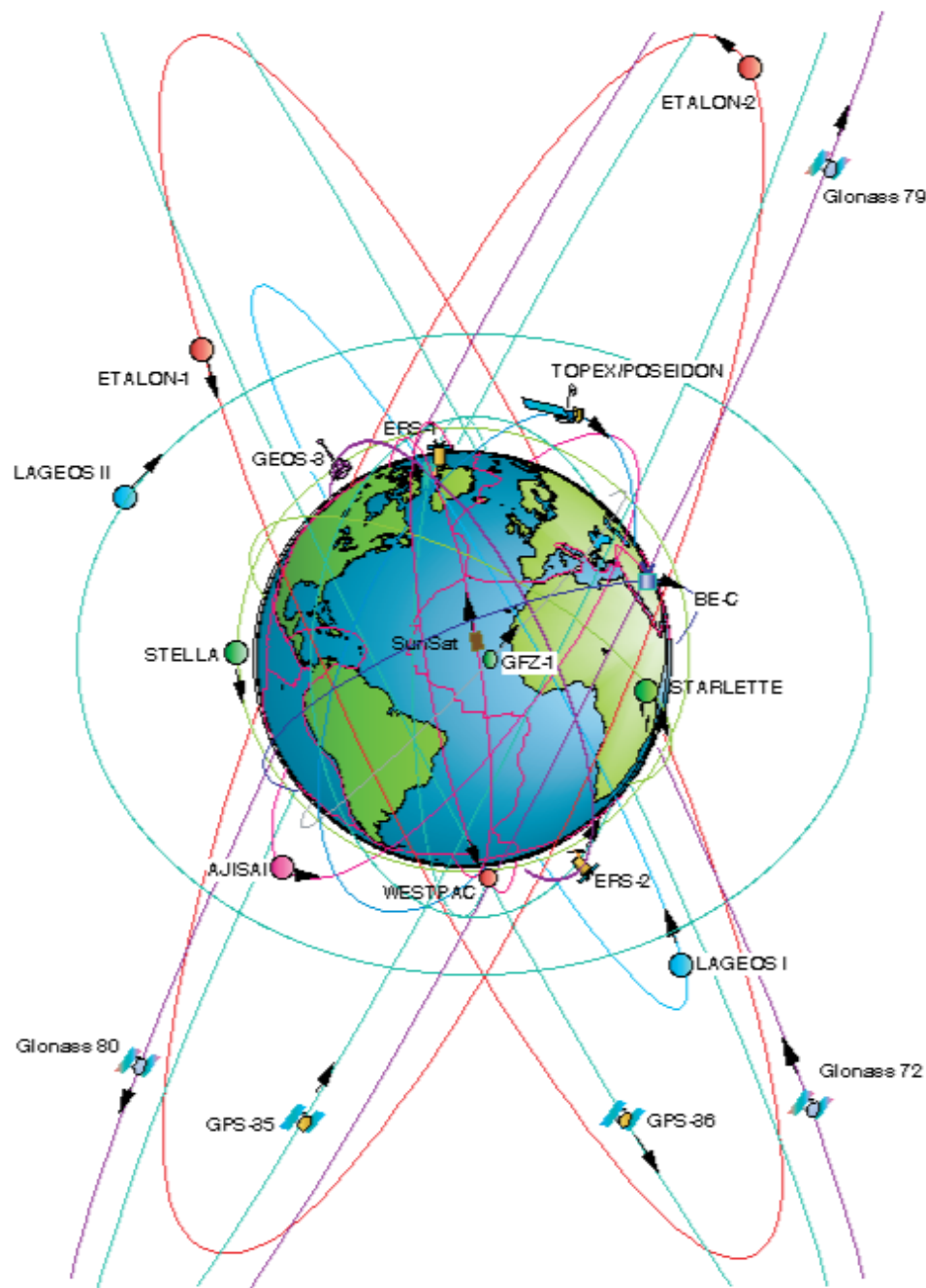
- **The Second LARES 2 and fifth LARES International Science Workshop** - The Second LARES 2 and fifth LARES International Science Workshop will take place in Rome, Italy, May 31 - June 3. General Relativity, Time and Time Travel in General Relativity, Space Research and John Archibald Wheeler. Preliminary list of invited speakers: Kip Thorne (Caltech), Roger Penrose (Oxford University) and Igor Novikov (Lebedev Institute).  
[View program](#)
- **ESA Lunar Pathfinder mission to include Lunar Laser Ranging** - The European Space Agency (ESA) announced that a test



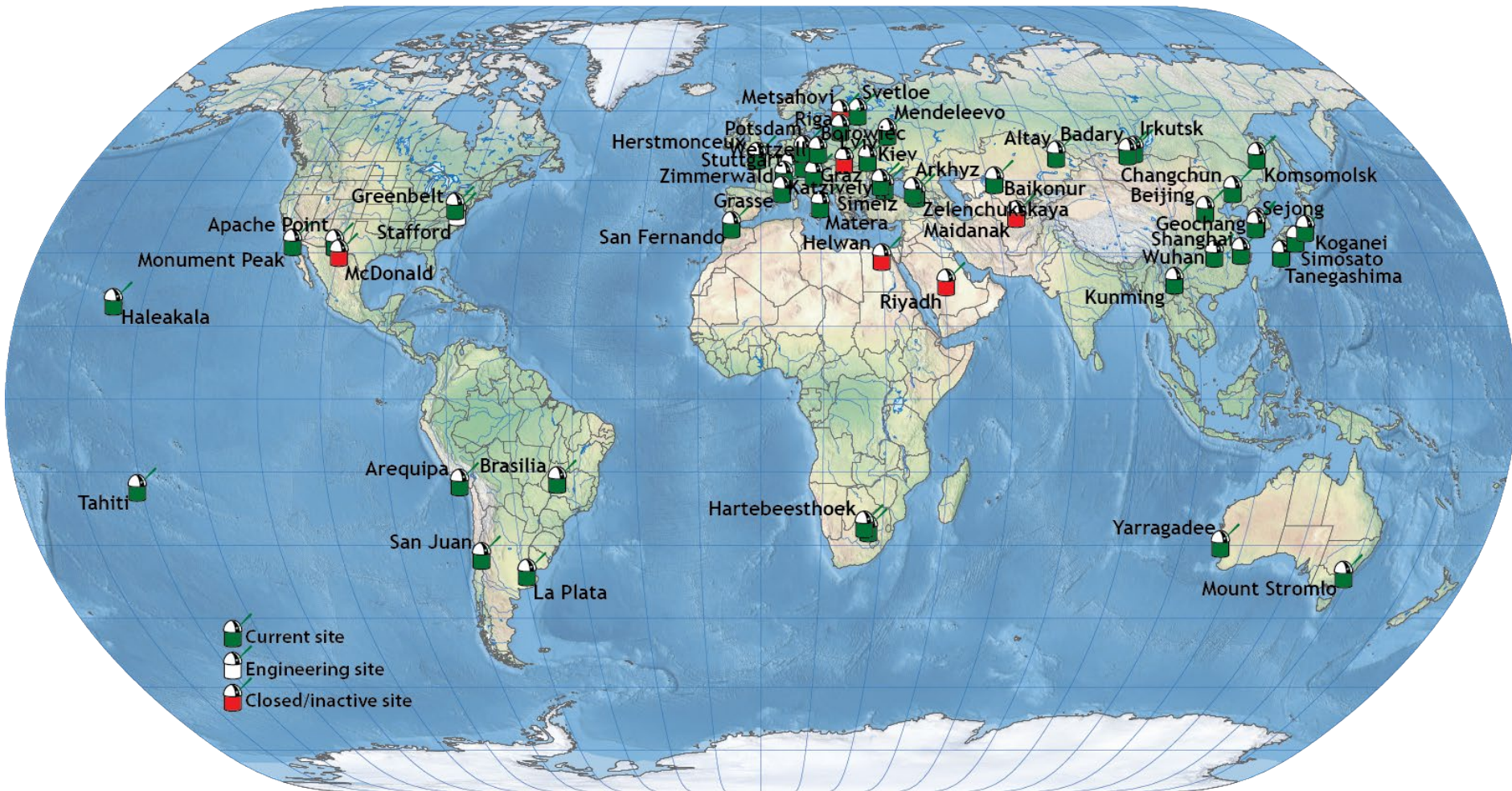
# Современное состояние

Орбитальная группировка «лазерных геодезических» ИСЗ насчитывает 9 спутников с различными высотами и углами наклона орбит. + GPS, ГЛОНАСС, спутники дистанционного зондирования Земли и прочие.

Итого:  
около 100 спутников, поддерживающих SLR



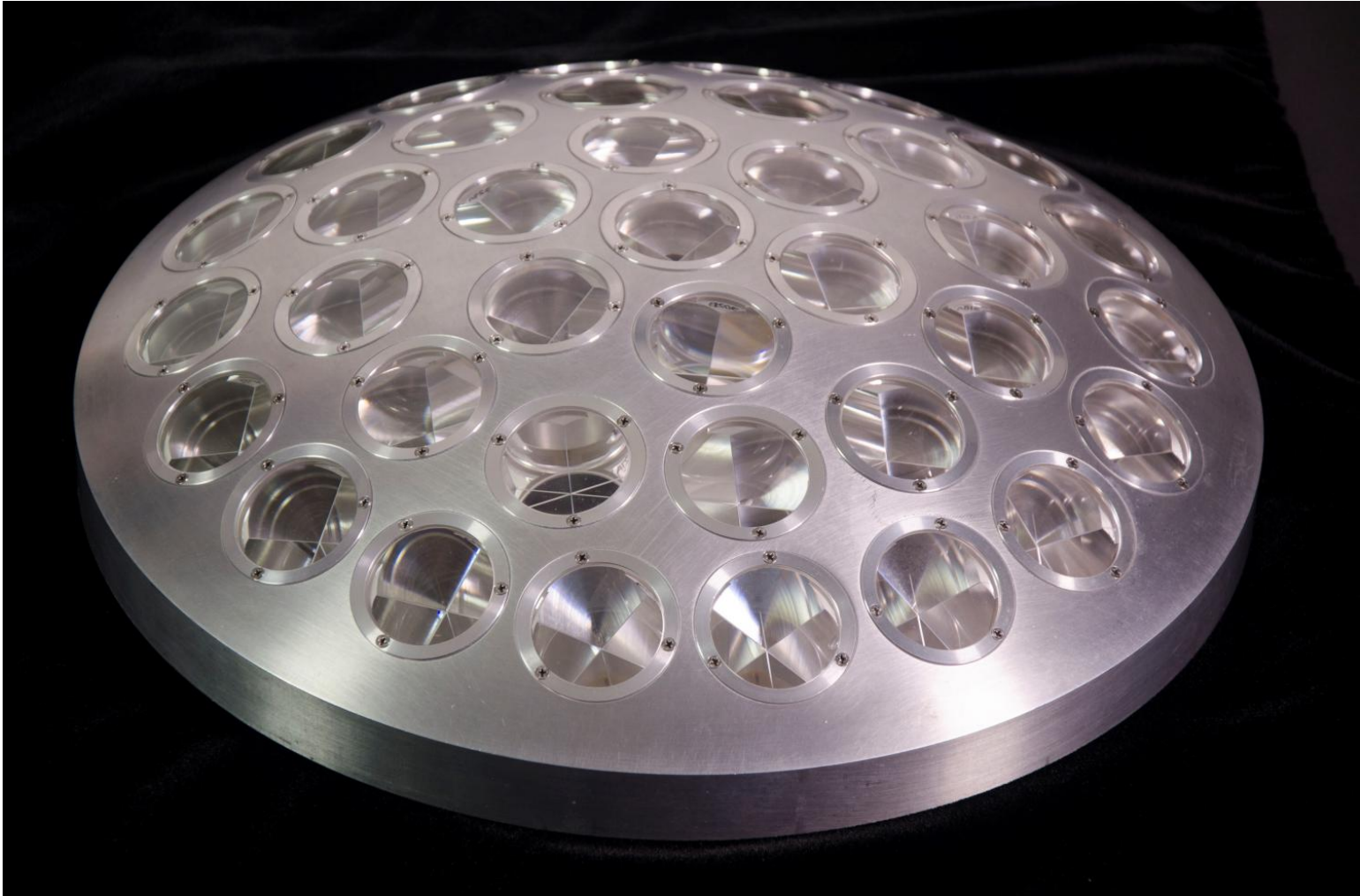
# 44 станции в более чем 30 странах



# Состав системы

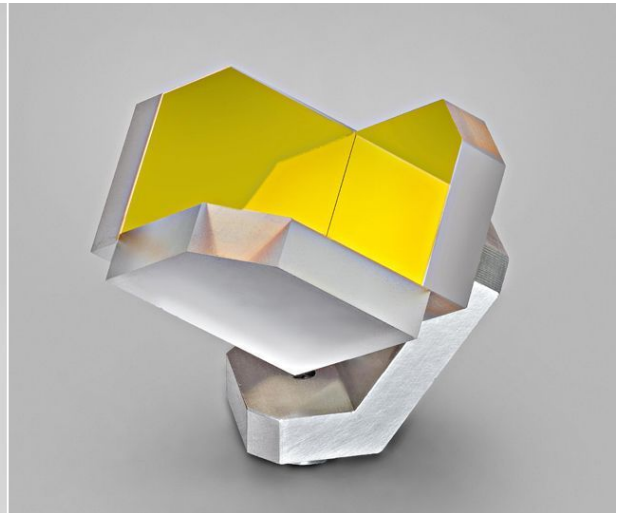
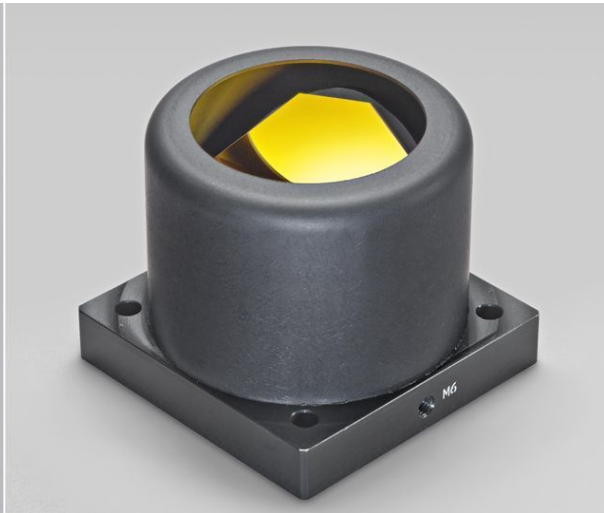
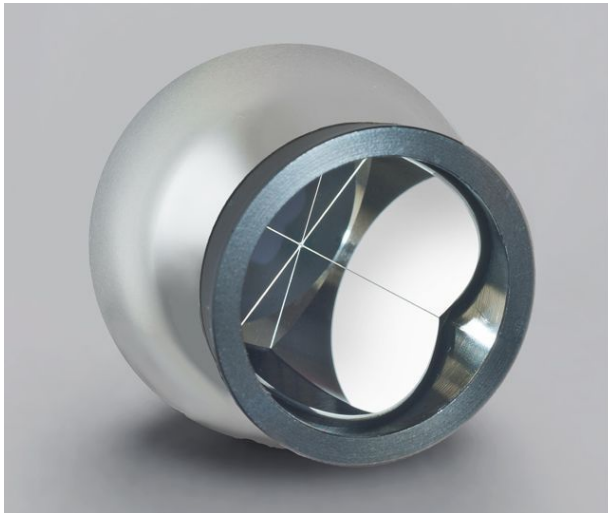
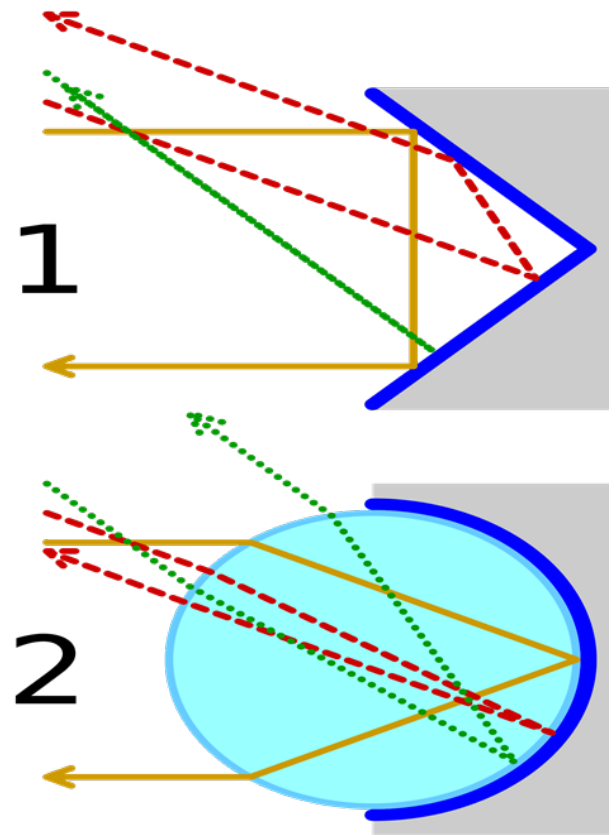
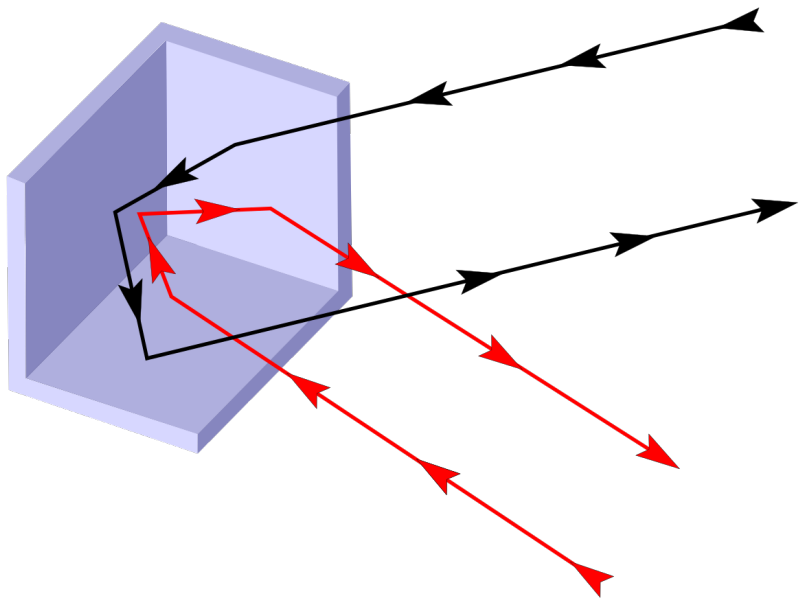
Пассивные космические аппараты на очень стабильных орбитах, на борту которых нет никакой электроники. Обычно это сплошная металлическая сфера, оборудованная ретрорефлекторами.

Поверхность LAGEOS усеяна 426 ретрорефлекторами для отражения лазерных импульсов



# Ретрорефлекторы

Падающий луч отражается строго в обратном направлении.



Маленькие размеры и массивность сводят к минимуму влияние негравитационных возмущений (атмосферное сопротивление, солнце (солнечная радиация)) на орбиту спутника.

В основном для высокоорбитальных ( > 2000 км)

ИСЗ	Страна	Год запуска	Высота орбиты, км	Угол наклона орбиты, градусы	Масса, кг	Диаметр, см
Starlette	Франция	1975	800-1100	49,84	47	24
LAGEOS-1	США	1976	5 860	109,9	400	60
AJISAI	Япония	1986	1 500	50,04	215	685
Эталон-1	СССР	1989	19 140	65	1345	130
Эталон-2	СССР	1989	19 140	65	1345	130
LAGEOS-2	США/Италия	1992	5 620	52,67	400	60
Stella	Франция	1993	830	98,57	48	24
Larets	Россия	2003	691	98,2	23	21
LARES	Италия	2012	1 450	69,5	400	36
БЛИЦ	Россия	2009	832	98,8	7,5	17



Пассивный лазерный спутник «Ларец» (М 1:1)

Сферический лазерный микроспутник «БЛИЦ» (М 1:1)

Макет объектива «Сфера» в разрезе (М 1:1)

Макет системы отделения спутника со сферическим лазерным спутником «БЛИЦ-М» (М 1:1)

Спутник «ГЛАСС» (М 1:1)

## Наземный сегмент:

1. Приёмо-передающий объектив: лазерный излучатель(короткие импульсы света с частотой примерно 10 раз в секунду) и телескоп (принимает отраженный ретрорефлектором сигнал);
2. Объектив гида с ночной камерой(отслеживает курс спутника, наводится на него);
3. Опорно-поворотное устройство;
4. Служба времени и частоты: часы, регистрирующие выстрелы с точностью в 100 наносекунд;
5. Подсистема оптического согласования телескопа с лазерным передатчиком;
6. Также установлена метеостанция и две антенны ГЛОНАСС/GPS приёмников.



В операторской установлено оборудование с информационно-измерительной системой: системы наведения, блоки управления оптическими элементами, приёмники ГЛОНАСС/GPS, системы измерения дальности, блок накачки лазера, стандарты времени и частоты.





# Радиоастрономическая обсерватория «Бадары», республика Бурятия



# Применение:

1. Контроль орбит спутников;
2. Контроль изменений гравитации из-за перераспределения массы;
3. Определение центра масс Земной системы с высокой точностью – геоцентр;
4. Создание/уточнение международной земной системы отсчета;
5. Определение параметров вращения Земли;
6. Взаимодействия Атмосфера-Гидросфера-Криосфера-Твердая Земля;
  1. Прогнозирование глобального изменения климата;
  2. Обнаружение и мониторинг движения тектонических плит, деформаций земной коры, перераспределения массы твердой системы;
  3. Изменения уровня моря и объема льда, подводный рельеф;
  4. Мониторинг атмосферы;
  5. Изучение океанических приливов;
7. Для специальных тестов общей теории относительности.

# Принцип вычисления параметров

Формула связи координат спутника и станции:

- $\vec{\rho} = \vec{r} - \vec{R}$
- $\vec{r} = (x, y, z)$  – координаты спутника
- $\vec{R} = (X, Y, Z)$  – координаты станции

Координаты спутника зависят от уравнения движения, а также действующих на него сил → зависимость координат от интересующих нас параметров.

$$F = F_{\oplus} + F_{tide} + F_{AOD} + F_{bodies} + F_{solar} + F_{drag} + F_{rel} + F_{emp}, \quad (2.9)$$

где

$F_{\oplus}$  – влияние геопотенциала,

$F_{tide}$  – влияние приливов (твердых, океанических, полюсных, атмосферных),

$F_{AOD}$  – влияние непривливаемых перемещений масс в атмосфере и океане,

$F_{bodies}$  – влияние тел Солнечной системы (Луны, Солнца, планет),

$F_{solar}$  – световое давление,

$F_{drag}$  – атмосферное торможение,

$F_{rel}$  – влияние релятивистских эффектов (метрика Шварцшильда, эффект Линзе-Тирринга, прецессия ДеСиттера),

Эффекты, оказываемые на координаты станций:

1. Нагрузка от твердотельных, океанических приливов
2. Атмосферная нагрузка
3. Деформации земной поверхности, вызванные движением полюсов
4. И др.

Поправки к формуле:  $p = \frac{c * (t_{\text{пр}} - t_{\text{отпр}})}{2} + \Delta$

1. Влияние тропосферы – прохождение импульса через тропосферу;
2. Релятивистские эффекты;
3. Несовпадение центра масс спутника и точки прихода луча;
4. Систематическая погрешность лазерного дальномера.

В теории окончательная формула выглядит так

$$\Delta\bar{\rho} = \frac{\partial\bar{\rho}}{\partial\bar{r}_i} \left[ \frac{\partial\bar{r}_i}{\partial\bar{r}_0} \Delta\bar{r}_0 + \sum_{n,m} \frac{\partial\bar{r}_i}{\partial(\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm})} \begin{pmatrix} \Delta\bar{C}_{nm} \\ \Delta\bar{S}_{nm} \end{pmatrix} + \frac{\partial\bar{r}_i}{\partial(x_p, y_p, LOD)} \begin{pmatrix} \Delta x_p \\ \Delta y_p \\ \Delta LOD \end{pmatrix} + \right. \\ \left. + \frac{\partial\bar{r}_i}{\partial(P_1, P_2, \dots, P_l)} \begin{pmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \dots \\ \Delta P_l \end{pmatrix} \right] - \frac{\partial\bar{\rho}}{\partial\bar{R}_j} \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}_j - \frac{\partial\bar{\rho}}{\partial\bar{R}_j} \frac{\partial\bar{R}_j}{\partial(x_p, y_p, LOD)} \begin{pmatrix} \Delta x_p \\ \Delta y_p \\ \Delta LOD \end{pmatrix} + \frac{\partial\bar{\rho}}{\partial\Delta_{RBj}} \Delta_{RBj}$$

Можем упростить

$$\Delta\rho = (P1\Delta r + P2) - (P3\Delta R + P4)$$

Система уравнений из разных наблюдений разных спутников на разных станциях, выбираем начальные условия и какие параметры нам неизвестны (хотим уточнить).

$$\begin{cases} \Delta\rho = (P1\Delta r + P2) - (P3\Delta R + P4) \\ \dots \end{cases}$$

Можем измерить  $\rho$  – observed и вычислить по формуле  $\rho$  – calculated  $\rightarrow$  разность о-с

Наша задача подобрать такие параметры, что решить систему  $\rightarrow$  свести к минимуму разницу между нашими наблюдениями и нашими расчётами.



# Достоинства

1. Малая чувствительность к компонентам атмосферы;
2. Широкий набор наблюдаемых ИСЗ;
3. Высокая точность измерений расстояний (0,5-2,0см);
4. Получение результатов измерений дальности до спутника практически в реальном времени;
5. Источники ошибок принципиально отличаются от факторов, влияющих на РСДБ и GPS;
6. Наличие результатов измерений, начиная с 1975г., что позволяет изучать некоторые параметры на продолжительном временном интервале;
7. Единственный метод измерений, позволяющий непосредственно определять координаты геоцентра (исходное начало общеземной системы координат) и геоцентрических координат станций ;
8. Оборудование на борту спутника относительно недорогое, сравнительно небольшой вес, отсутствие необходимости управления спутниками и их поддержания.

# Недостатки и слабые места

1. Точность наведения на ИСЗ;
2. Расходимость пучка. Ограничение дальности действия и точности. За пределами высоты 20 000 км практически невозможно обнаружить возврат сигнала;
3. Регистрация слабых отраженных от ИСЗ сигналов и фильтрация от помех;
4. Создание точной системы регистрации времени;
5. Отсутствие наблюдений при ухудшении погодных условий (значительная облачность);
6. Высокая стоимость наземного оборудования, требует наличия квалифицированного персонала;

В настоящее время специалисты SLR и LLR стремятся достичь точности в несколько миллиметров.

- более высокие частоты повторения импульсов;
- меньшие по размеру и более быстрые поворотные телескопы;
- Улучшение отношения сигнал/шум;
- Более точные стандарты времени;
- Новые модели спутников.

