

**2.5. Глотов В.Д., Митрикас В.В., Пафнутьев А.А., Аржанников А.А.**

**Опыт и основные направления использования технологий спутниковой лазерной дальнометрии в ИАЦ КВНО АО ЦНИИмаш**

*(ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш», Королев, Россия)*

Спутниковая лазерная дальнометрия основана на том, что с наземной станции посылаются ультракороткие лазерные импульсы в направлении космического аппарата (КА), оснащенного оптическими отражателями (ретрорефлекторами), а затем на этой же станции принимается отраженный сигнал. При этом погрешность определения дальности от станции до КА для лучших мировых лазерных станций составляет порядка 1-3 мм.

Работы в области спутниковой лазерной дальнометрии проводятся в Информационно-аналитическом центре координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) АО ЦНИИмаш начиная с 1990 года. В рамках этого направления специалистами ИАЦ КВНО создано, сертифицировано на отечественном и международном уровне и постоянно модифицируется уникальное прецизионное программно-математическое обеспечение, позволяющее путем обработки лазерных измерений определять орбиты космических аппаратов различных классов и другие параметры на сантиметровом уровне точности. С 1994 года ИАЦ КВНО является центром анализа Международной службы вращения Земли (IERS), проводя работы по ежесуточному определению параметров вращения Земли по результатам обработки лазерных измерений КА Лагеос-1 и Лагеос-2.

С 1997 года ИАЦ КВНО является ассоциированным центром анализа Международной службы лазерной дальнометрии (ILRS), проводя работы по:

- определению орбит КА ГЛОНАСС по измерениям мировой сети ILRS;

- определению и прогнозированию орбит КА, расчету целеуказаний для обеспечения работ по лазерной локации отечественных и зарубежных КА (Ларец, Рефлектор, Метеор-3, Блиц, Westpac и др.);
- оценке точности лазерных станций сети ILRS (40 станций);
- контролю работы лазерных станций Российской сети (13 станций), обеспечению их целеуказаниями, построению «нормальных точек».

ИАЦ КВНО в качестве центра анализа участвовал в международных экспериментах IGEX-98 (1998-1999 гг.) и LARGE (2013-2015 гг.), в рамках которых проводилась лазерная локация КА системы ГЛОНАСС станциями мировой сети ILRS. В ходе экспериментов было получено и обработано более 50000 сеансов измерений, использовавшихся для повышения точности эфемеридного обеспечения системы ГЛОНАСС. В настоящее время работы ИАЦ КВНО в области спутниковой лазерной дальнометрии активно продолжаются, в том числе, в рамках обработки данных новых отечественных лазерных станций «Точка» и прецизионному определению взаимного положения ретрорефлектора и радиомантенны для каждого КА системы ГЛОНАСС.

### **Satellite laser-ranging technologies in JSC TSNIMASH IAC PNT: lessons learned and main application areas**

*Glotov V.D., Mitrikas V.V., Pafnutiev A.A., Arzhannikov A.A. (JSC TSNIMASH, Korolev, Moscow region)*

Satellite laser-ranging (SLR) technology utilizes a ground station sending ultra-short laser impulses towards a spacecraft (SC) equipped with optical reflectors (retroreflectors) and then receiving the reflected signal. Through this, the distance between the SC and the ground station is measured, top of the line laser stations are able to achieve up to 1-3 mm of measured range accuracy.

SLR-related research has been running in Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing (IAC PNT) of JSC TSNIIMASH since 1990. In this field IAC PNT experts have designed, produced, certified (both on the national and international level) and have been constantly improving the state-of-the-art precision-built firmware to process laser-ranging data and define orbital and other parameters with centimeter-level accuracy for different types of SC. Since 1994, IAC PNT has been serving as International Earth Rotation Service (IERS) Analysis Center to define Earth rotation parameters on a daily basis utilizing processed laser measurement data with SC Lageos-1 and Lageos-2 targeted.

Since 1997, IAC PNT has been functioning as International Laser Ranging Service (ILRS) Analysis Center working on the following activities:

- Defining GLONASS SC orbital parameters based on the raw measurements of the ILRS international station network;
- Defining and predicting orbital parameters, tracking support for laser ranging stations measuring distances to national and foreign SC (Laretz, Reflector, Meteor-3, Blitz, Westpac etc.);
- Accuracy assessment for 40 stations of the ILRS network;
- Russian laser station network performance control (13 stations), providing these stations with tracking support data, calculating “normal points”.

As the analysis center, IAC PNT took part in different international experiments, such as IGEX-98 (1998-1999), and LARGE (2013-2015). These experiments involved laser ranging measurements by the ILRS international station network targeting GLONASS SC. During the experiments, more than 50000 measurement sessions were conducted and processed to improve the accuracy of GLONASS SC orbits definition. Now IAC PNT continues to run activities related to SLR, such as processing data collected by new Russian “Tochka” laser stations and precisely measuring the relative positions of retroreflector and radio antenna for every GLONASS SC.



# Опыт и основные направления использования технологий спутниковой лазерной дальнометрии в ИАЦ КВНО АО ЦНИИмаш

Готов В.Д., Митрикас В.В., Пафнутьев А.А., Аржанников А.А.

АО ЦНИИмаш, Королев, Московская область



СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И  
НАВИГАЦИЯ  
ЕВПАТОРИЯ, КРЫМ, РОССИЯ, 2022

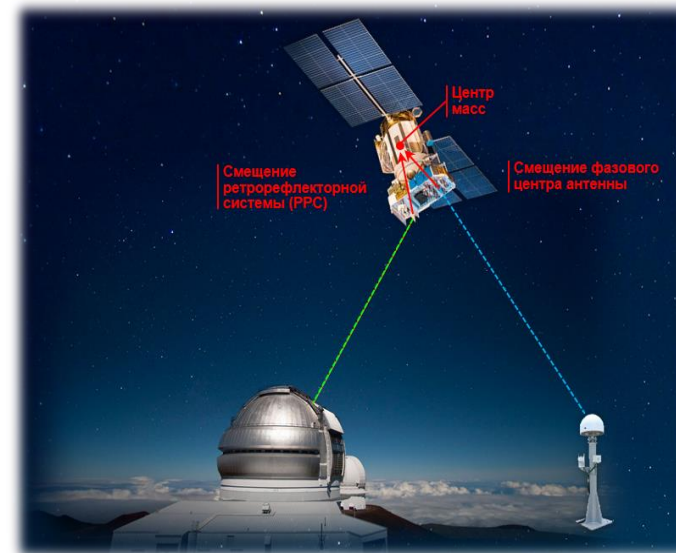
# Спутниковая лазерная дальнометрия (1/2)

## Достоинства:

- Высокая точность измерений (ошибка 1-3 мм);
- Оптический диапазон измерений (простая модель тропосферы);
- Длительный интервал наблюдений (изучение движения литосферных плит, координат геоцентра и станций);
- Космическая колокация на КА ГНСС.

## Недостатки:

- Невозможность работы при облачности;
- Усложнение измерений в дневных условиях и при засветках оптики от Солнца и Луны;
- Высокая стоимость разработки, изготовления и эксплуатации => мало станций.







# Текущие проекты ILRS

Количество станций ILRS - 40

Общее количество КА в листе приоритетности ILRS – 54 (из них 8 – российских):

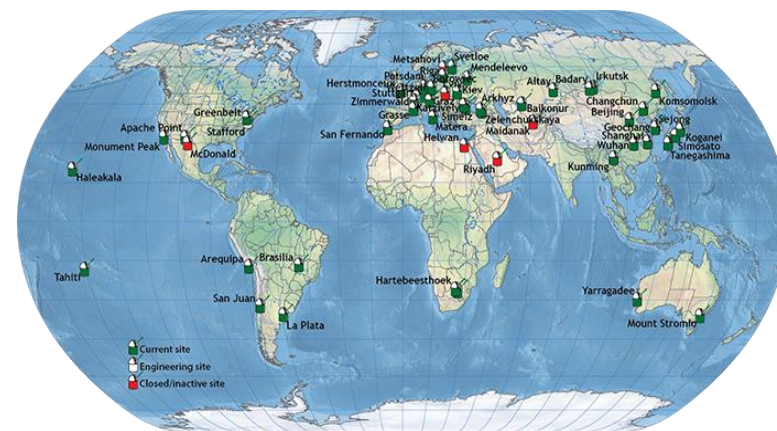
- 23 КА по программам спутниковой навигации (4 КА ГЛОНАСС, 4 Galileo, 4 BeiDou, 6 IRNSS, 5 QZS)
- 9 геодезических КА (LAGEOS-1,2, Эталон 1,2, LARES, Stella, Starlette, Ajisai, Larets)
- 22 КА в рамках научных и технических экспериментов

Для справки: В 1998 году была проведена локация 35 спутников, в 2018 - более 110

Только 17 станций выполняют рекомендации ILRS по проведению не менее 3500 сеансов наблюдений в год



**LAGEOS-1**: Диаметр – 60 см  
Вес – 407 кг  
Орбита – 5860 км



**Сеть станций ILRS**

# Операционный Центр Российской сети (с 1990 года)

## Текущий состав сети РФ (13 станций):

- Алтай, Байконур, Архыз, Бразилия, ЮАР (ГК Роскосмос);
- Светлое, Зеленчукская, Бадары, Кацивели, Симеиз (РАН);
- Менделеево, Иркутск (Росстандарт);
- Комсомольск-на-Амуре



## Состав работ Операционного Центра:

- Обеспечение станций целеуказаниями по всем КА;
- Сбор измерений, контроль их качества;
- Построение «нормальных точек»;
- Передача сеансов измерений в центры ILRS.



Бразилия





# История: эксперимент IGEX-98 (1/2)

Международный ГЛОНАСС Эксперимент IGEX-98 (The International GLONASS Experiment) проводился с 19 октября 1998 по 19 апреля 1999 года, а позже был продлен до 2003 года.

=====

## Основные задачи IGEX-98:

- установка глобальной сети слежения за ГЛОНАСС;
- определение орбит ГЛОНАСС с точностью один метр или лучше;
- привлечение к совместной работе лазерной спутниковой подсистемы;
- определение параметров перехода между системой координат ГЛОНАСС ПЗ-90 и WGS-84 (системой координат GPS);
- проникновение в суть моделирования движения ГЛОНАСС (учет влияния солнечной радиации, режимов ориентации и т.д.).

# История: эксперимент IGEX-98 (2/2)

Международный ГЛОНАСС Эксперимент IGEX-98 (The International GLONASS Experiment) проводился с 19 октября 1998 по 19 апреля 1999 года, а позже был продлен до 2003 года.

=====

## Основные результаты :

- Вычислены эфемериды КА ГЛОНАСС с ошибкой 10-40 см (1 сигма) по результатам обработки 6500 сеансов лазерных измерений 30-ти станций мировой сети и 60-ти станций на базе навигационных приемников ГЛОНАСС/GPS;
- Построена матрица перехода между системами координат ПЗ-90-ГЛОНАСС и WGS-84 (GPS);
- Отработаны методика, алгоритмы и программно-математическое обеспечение (ПМО) высокоточного расчета эфемерид КА ГЛОНАСС;
- Отработано оперативное взаимодействие с международной системой Центров хранения и анализа данных с использованием Интернет.

# История: эксперимент LARGE (1/2)

LARGE (Laser Ranging to GNSS) – эксперимент по расширенной лазерной локации ГНСС (на базе полностью развернутой системы ГЛОНАСС). Предложен на 18-м Международном семинаре в ноябре 2013 года в Фудзиэде, Япония.

=====

## Обоснование необходимости эксперимента:

Лазерные уголкового отражатели установлены на всех КА ГЛОНАСС, Galileo (Евросоюз), Beidou (Китай), запланирована их установка на КА серии GPS III (США), начиная с девятого GPS-III-SV9.

## Основные цели эксперимента:

- Определить стратегию измерений станций ILRS для эффективного анализа орбит ГНСС
- Анализ лазерных данных для повышения точности определения орбит и калибровки радиосистем ГНСС

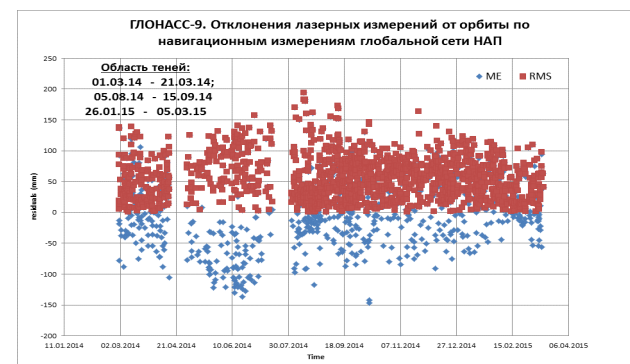
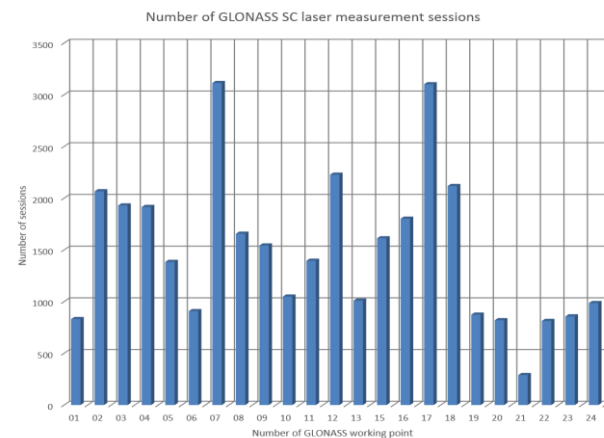
# История: эксперимент LARGE (2/2)

LARGE (Laser Ranging to GNSS) – эксперимент по расширенной лазерной локации ГНСС (на базе полностью развернутой системы ГЛОНАСС). Предложен на 18-м Международном семинаре в ноябре 2013 года в Фудзиэде, Япония.

=====

## Основные результаты:

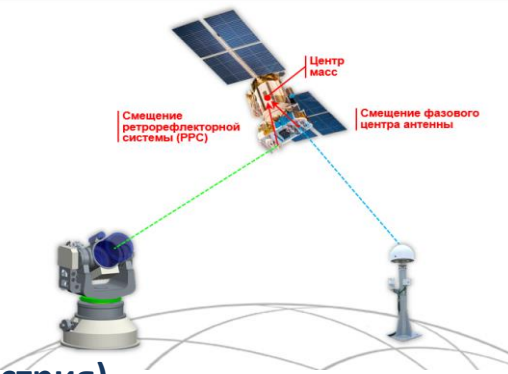
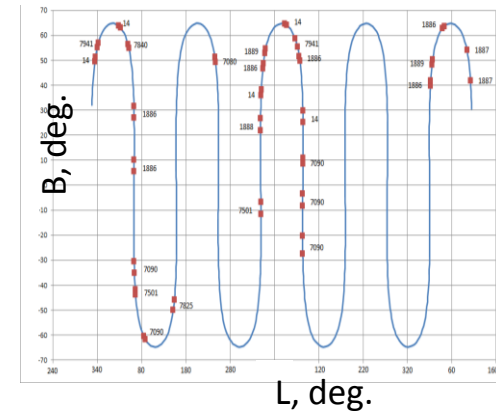
- За 2014-15 годы проведено около 40 000 сеансов лазерных измерений для 24 КА ГЛОНАСС;
- Количество дневных измерений в 6-10 раз меньше, чем ночных;
- Отклонение лазерных измерений от финальных орбит КА ГЛОНАСС, рассчитанных в ИАЦ КВНО по данным сети IGS, составляет 25-35 мм;
- Точность определения орбиты КА ГЛОНАСС в теневых и свободных от теней областях примерно одинакова;
- Погрешность определения орбиты для КА во второй плоскости в 1,5 - 2 раза выше, что может быть объяснено различной ориентацией этой плоскости относительно эклиптики.



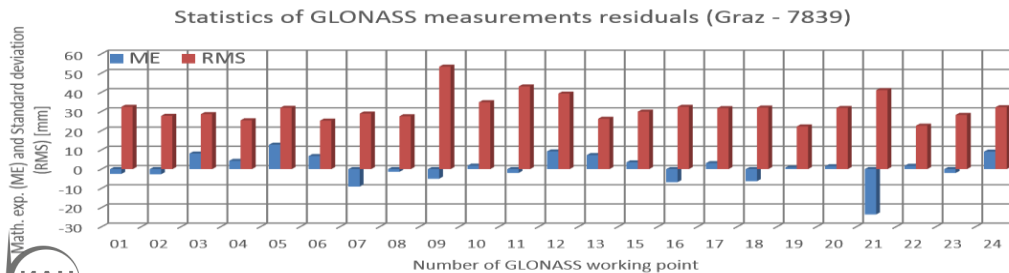
# Определение и контроль точности орбит КА ГЛОНАСС

## Результаты анализа :

- Контроль точности орбит возможен на основе анализа отклонений лазерных измерений от орбит КА;
- Анализ отклонений дает возможность оценки точности разных моделей обработки данных и их оптимального выбора
- Необходима точная (мм) привязка к центру масс КА ретрорефлектора (РР) и радиоантенны КА (их взаимное положение уникально для каждого КА ГЛОНАСС-М);
- Максимальное различие значений координаты центра РР для разных КА достигает 6.7 см



## Статистика отклонений лазерных измерений станции Грац (Австрия) от финальных орбит КА ГЛОНАСС



## Основные направления дальнейшего развития технологии лазерной спутниковой локации:

- Снижение стоимости разработки и эксплуатации лазерных станций (стоимость ГНСС-станции = 1% стоимости КОС; мировая сеть – 40 станций КОС и 18000 ГНСС-станций);
- Автоматизация в целях повышения производительности и исключения операторских ошибок;
- Повышение точности измерений за счет модернизации действующих станций и разработки новых станций;
- Разработка новых моделей, методов, алгоритмов и программно-математических комплексов для высокоточного анализа лазерных измерений;
- Апостериорная обработка накопленных данных с учетом новых моделей и алгоритмов в целях построения высокоточной опорной координатной системы ITRF2020.



# Заключение

## Основные выводы:

- Технологии спутниковой лазерной дальнометрии успешно применяются в работах по определению и контролю точности орбит КА, при калибровке радиотехнических средств, в космической геодезии, других областях
- Основное направление дальнейшего развития - улучшение экономических и эксплуатационных качеств лазерной спутниковой дальнометрии, а также адаптация этой технологии к новым применениям
- Развивается мировая сеть лазерных станций: в ближайшей перспективе планируется включение 8 новых станций (Аргентина, Финляндия, Индия, Япония, Испания, Норвегия);
- Начиная с 1990 года в ИАЦ КВНО накоплен большой опыт успешного использования спутниковой лазерной дальнометрии при реализации различных космических проектов, ИАЦ КВНО – ассоциированный центр анализа ILRS со всеми компетенциями и собственным ПМО
- В ИАЦ КВНО продолжаются плановые работы по созданию и отработке высокоточных методик, алгоритмов и ПМО целевой обработки измерений КОС в интересах оценки характеристик КА ГЛОНАСС и повышения точности ЭВО



# Спасибо за внимание!

**АО ЦНИИмаш, 141070, Российская Федерация,  
Московская область, г. Королев, ул. Пионерская, д. 4  
Телефон/Факс: +7 (495) 513 41 39  
Эл. адрес: [ianc@glonass-iac.ru](mailto:ianc@glonass-iac.ru)  
Веб-сайт: [www.glonass-iac.ru](http://www.glonass-iac.ru), [www.tsniimash.ru](http://www.tsniimash.ru)**