

Использование бистатической системы радиолокации на сигналах ГНСС (ГЛОНАСС, GPS и др.)

Authors: ***Фатеев В.Ф., д.т.н., проф.***

Ксендзук А.В., д.т.н.

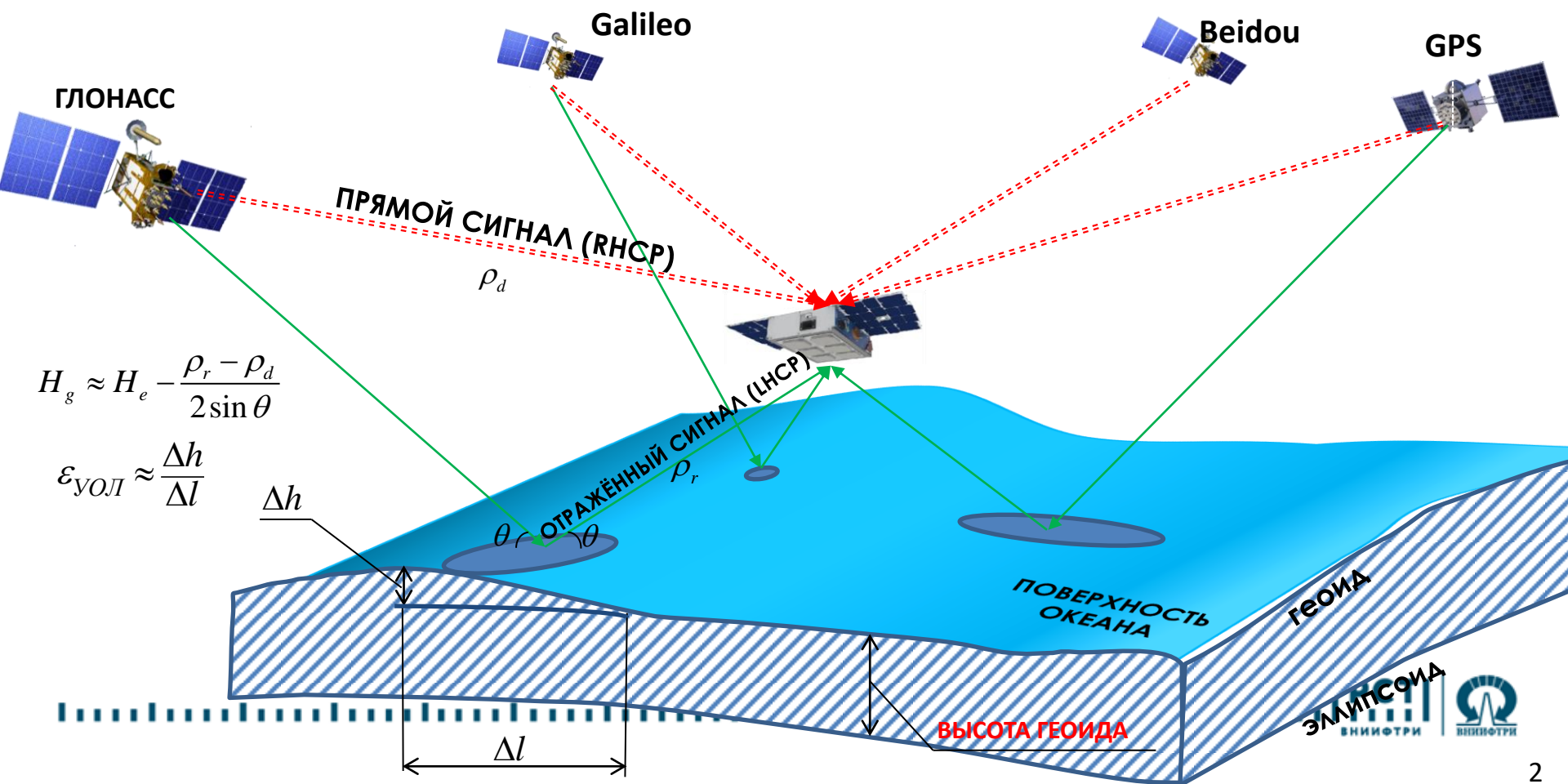
Лопатин В.П.

Артющев Д.А.

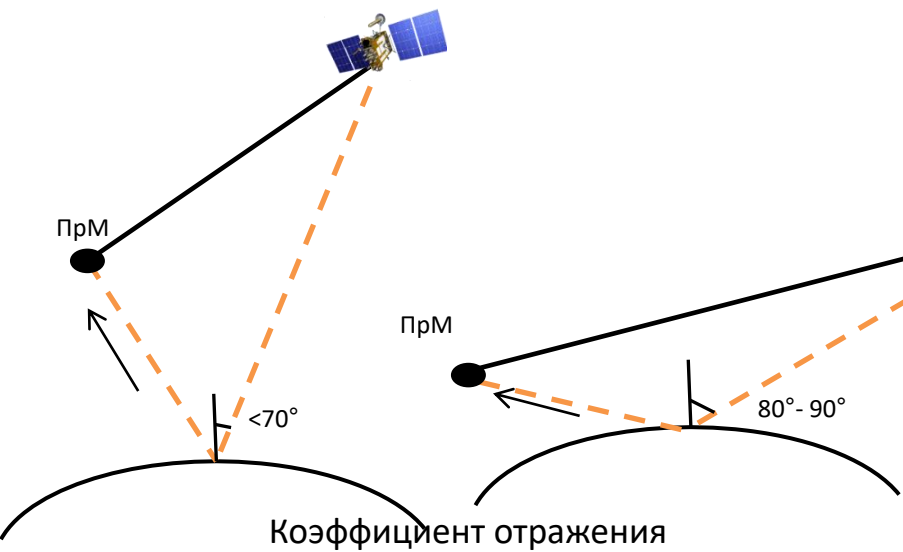
Принцип бистатической радиолокации на сигналах ГНСС

Решаемые задачи:

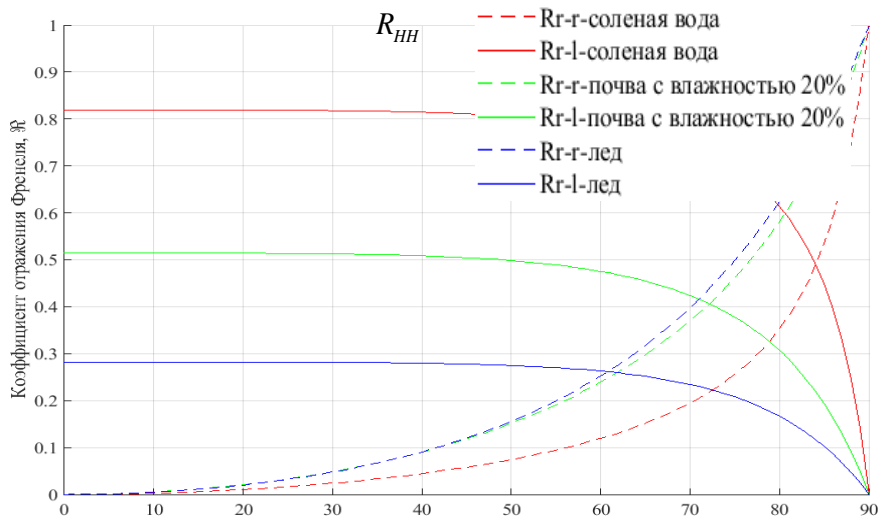
1. Определение высоты геоида (альтиметрия);
2. Определение уклонения отвесной линии;
3. Определение степени волнения водной поверхности (скаттерометрия);
4. Определение скорости и направления приповерхностного ветра;
5. Определение ледовых полей;
6. Определение границ водных объектов;
7. Определение влажности почв;
8. Определение источников сигналов ГНСС



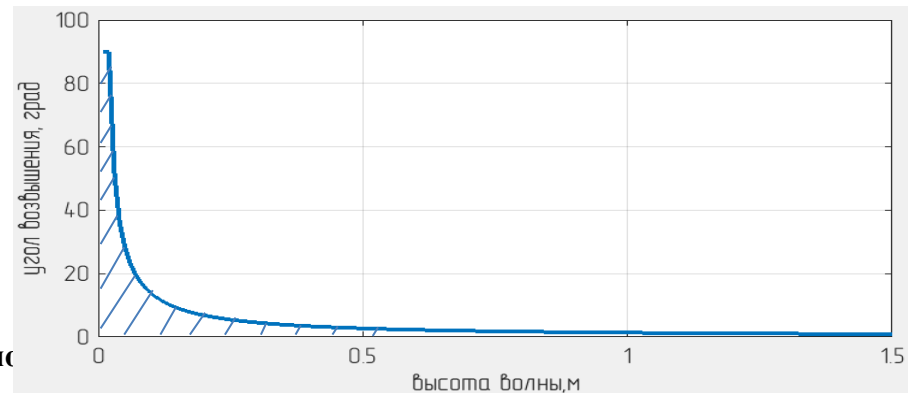
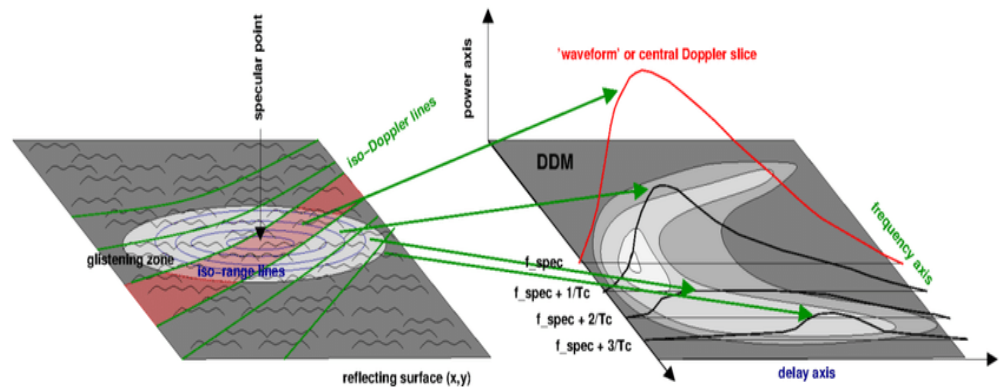
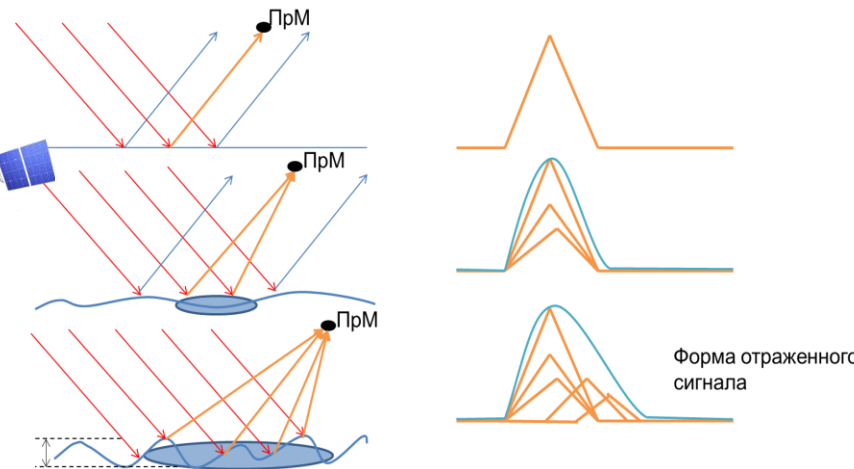
Отражение в бистатической ГНСС-радиоальтиметрии



$$R_{RL}(\theta, \varepsilon) = 0.5 \begin{pmatrix} \frac{\varepsilon \cos(\theta) - \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta)}}{\varepsilon \cos(\theta) + \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta)}} & -\frac{\cos(\theta) - \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta)}}{\cos(\theta) + \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta)}} \\ \frac{\cos(\theta) - \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta)}}{\cos(\theta) + \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta)}} & \frac{\varepsilon \cos(\theta) - \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta)}}{\varepsilon \cos(\theta) + \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta)}} \end{pmatrix}$$

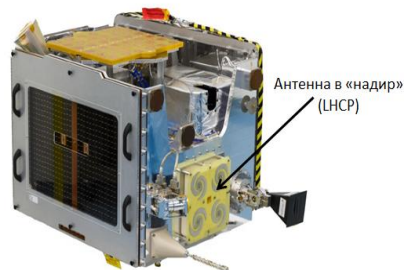


Антенна в «надир» должна иметь лев. круг. поляризацию для углов 0° и прав. круг. поляризацию для настильных углов $70^\circ - 90^\circ$

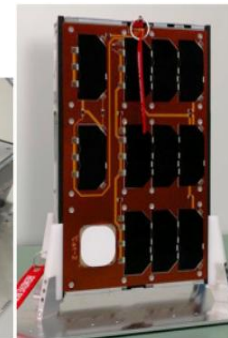


Зарубежные спутники с бортовой бистатической радиолокационной системой на сигналах ГНСС

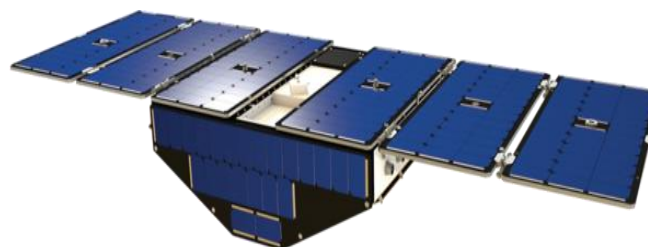
- эксперименты с борта CHAMP(2000 г.);
- UK-DMC1 (2003 г.);
- TechDemoSat-1 (2014 г.);
- эксперименты с борта SMAP (2015 г.);
- 8 спутников CYGNSS (2016 г.);
- ³Cat-2 CubeSat (2016 г.);
- WNISAT 1R (2017 г.);
- DoT-1 SSTL (2019 г.);
- спутники Spire Global (2019-н.в.);
- BF-1A, BF-1B (2019 г.);
- ³Cat-5/A и ³Cat-5/B (2020 г.);
- FengYun-3E, 3F, 3G (2021 г., 2023 г.);
- PRETTY (2023 г.);
- GEROS-ISS (после 2025 г.);
- HydroGNSS (после 2025 г.);
- Triton(после 2025 г.);
- G-TERN (после 2025 г.).



TDS-1 (635 км, 160 кг, 2014г)



CubeSat 3Cat2 (635 км, 7.1 кг, 2016г)



8 MKA **NASA CYGNSS**
(500 км, 28 кг, 12.2016г)



WNISAT-1R, BF-1 Китай
(600 км, 48 кг, 2017г., 2019 г.)



³Cat-5/A, Испания (6U, 2020г.)

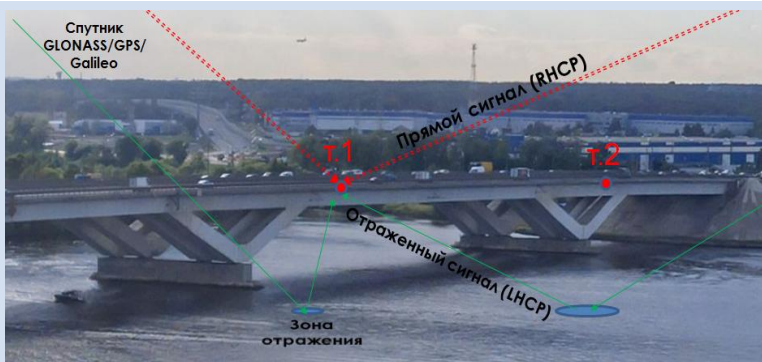


Lemure Spire, США (571 км, 5 кг, 2019-н.в.)

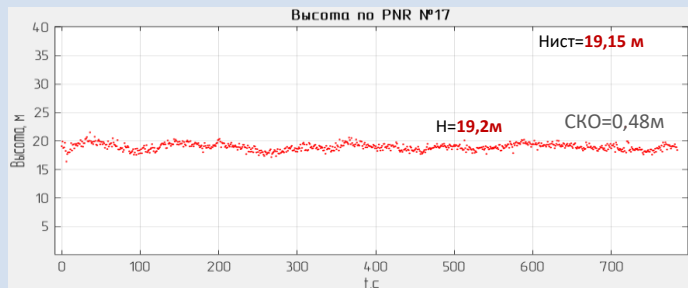


Наземные эксперименты ВНИИФТРИ по измерению высоты до подстилающей поверхности

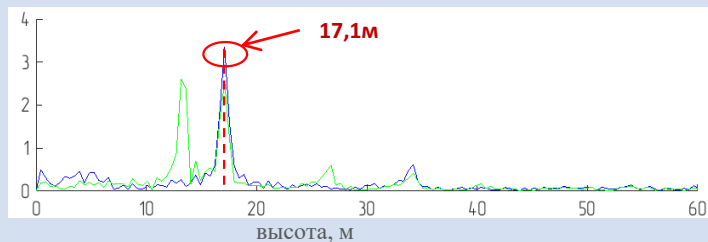
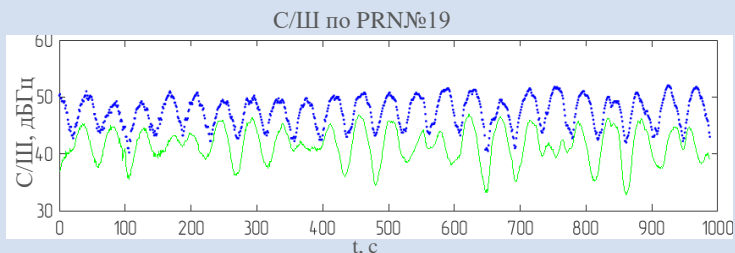
Эксперимент по измерению высоты уровня воды



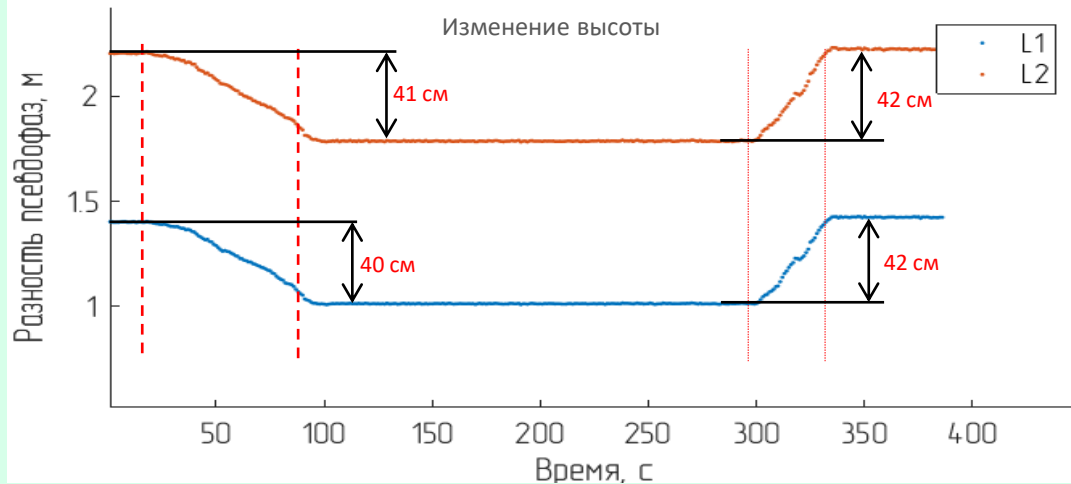
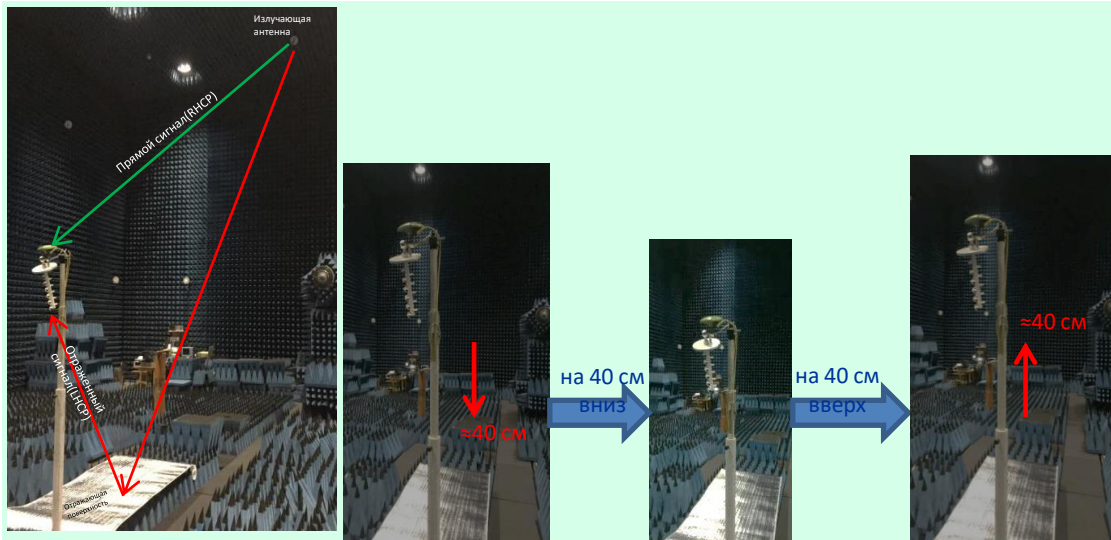
Метод на основе кода сигнала в точке T.1



Метод на основе измерения С/Ш в точке T.2



Эксперимент в безэховой камере (БЭК)



Погрешность определения изменения высоты по фазовым измерениям ~1 см.

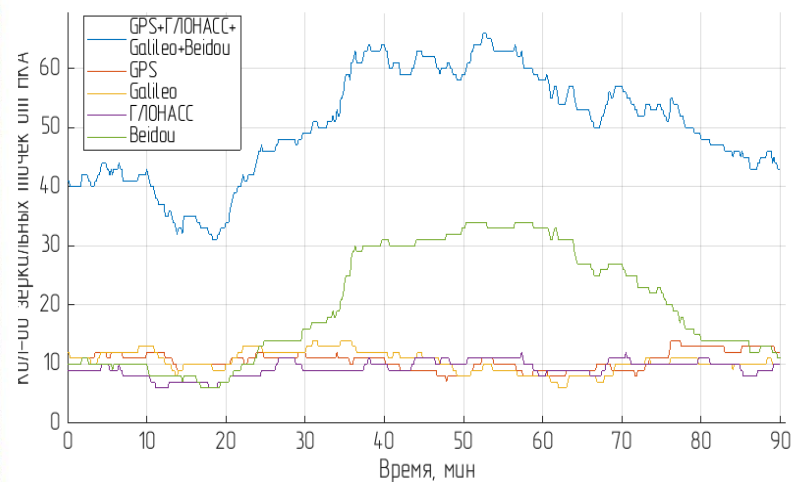
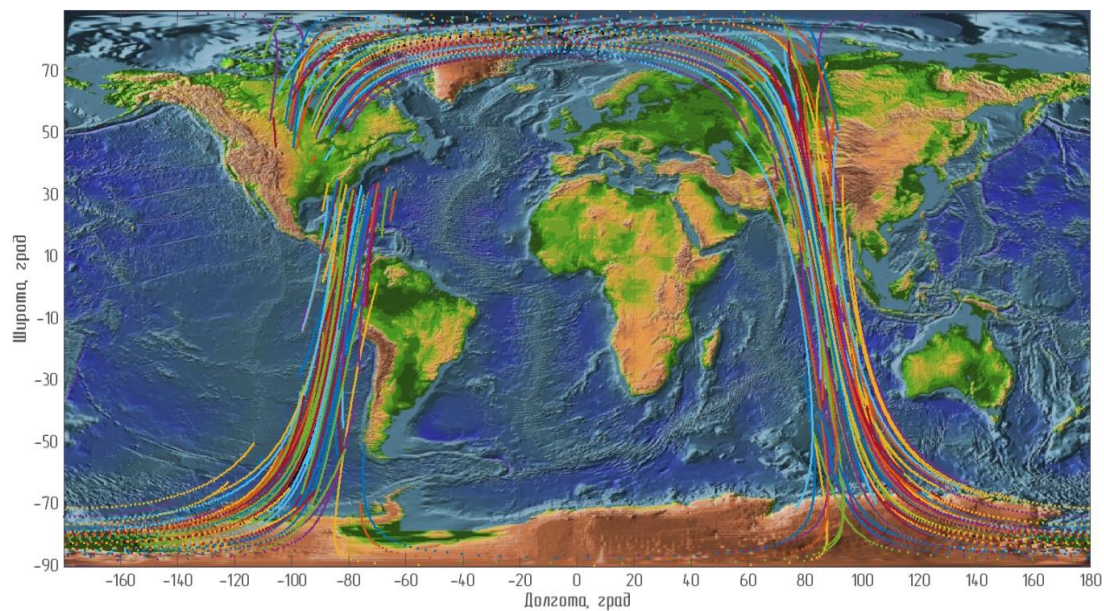
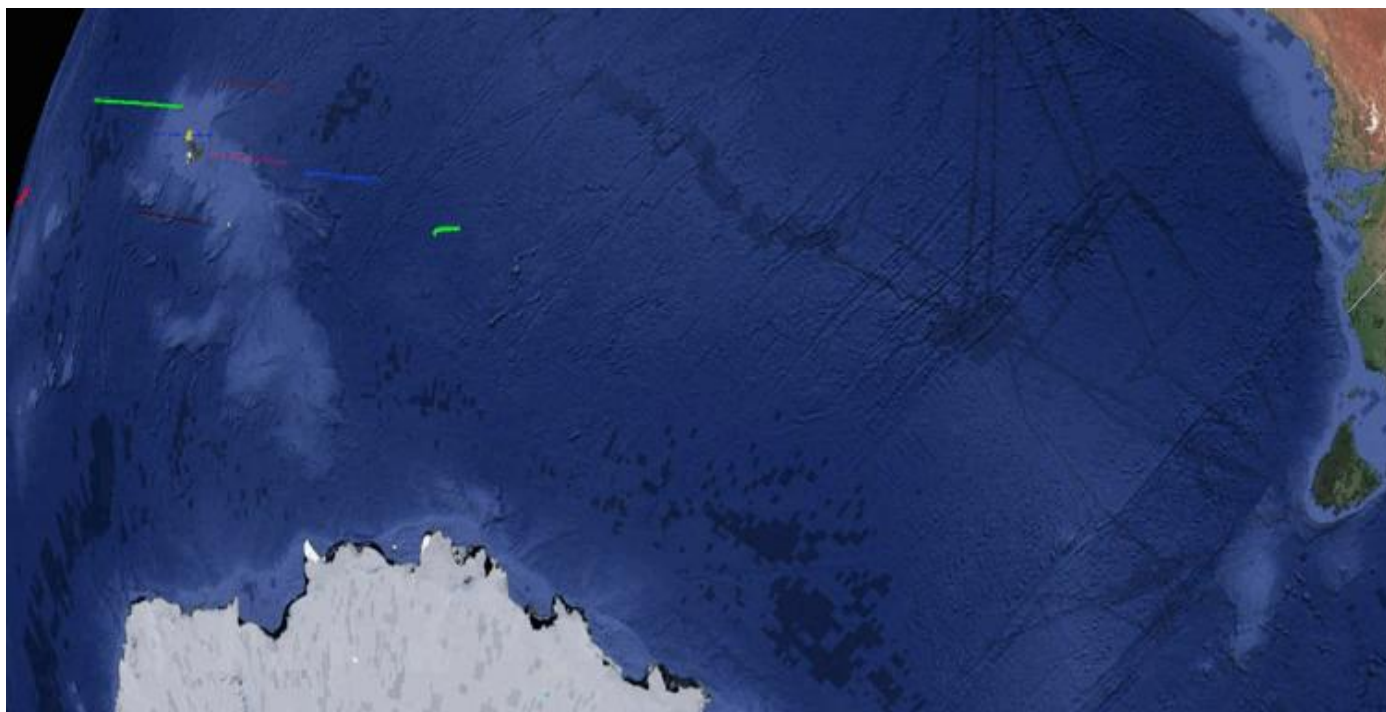
Эксперименты по измерению высоты до подстилающей поверхности



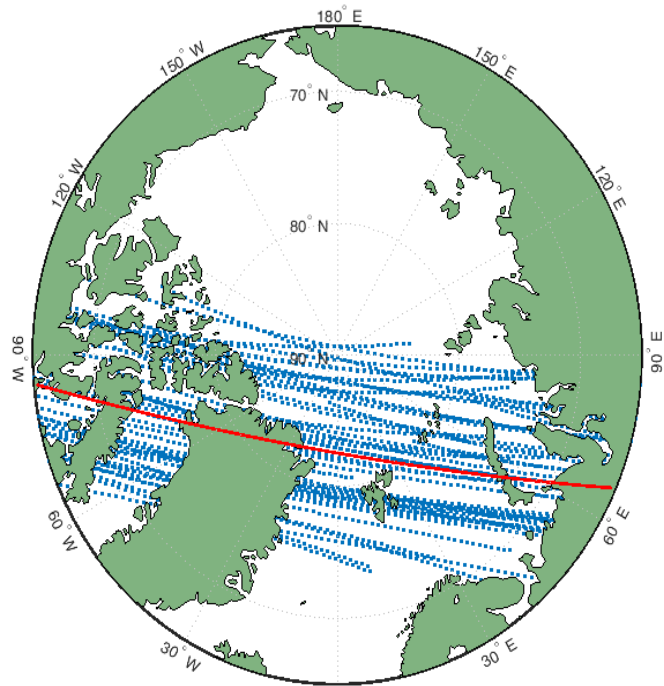
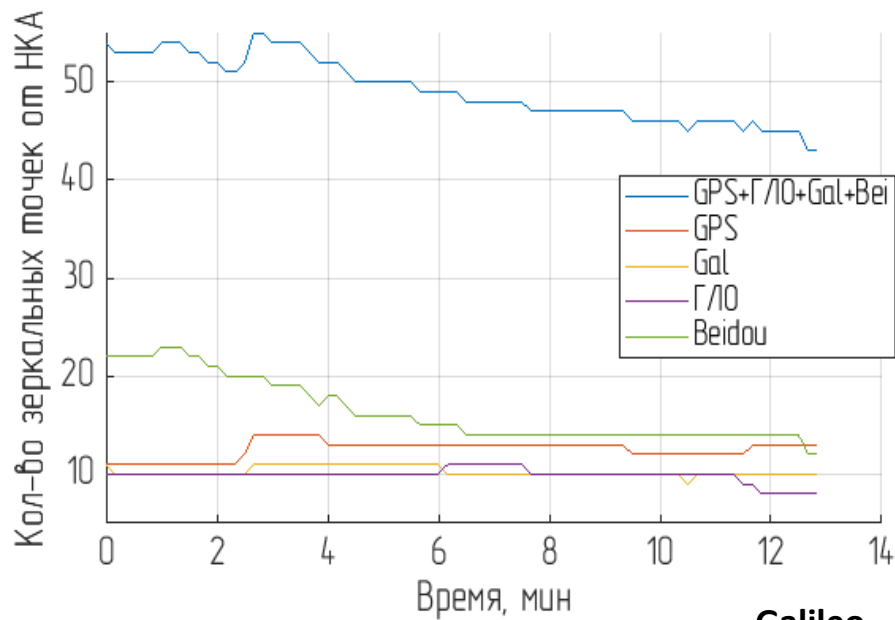
Эксперименты с борта БПЛА



Количество точек зеркального отражения при приеме на низкой орбите (500 км)



Количество точек зеркального отражения в Арктическом регионе при приеме на низкой орбите (500 км)

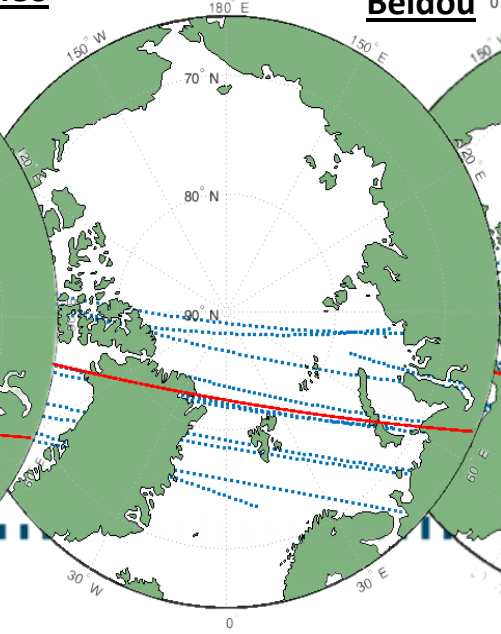
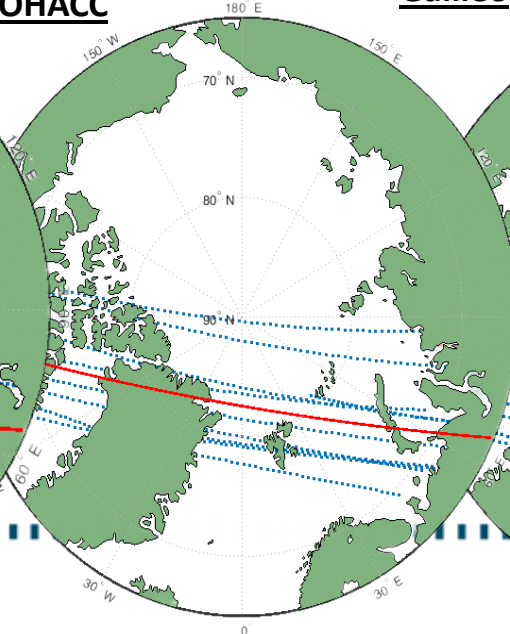
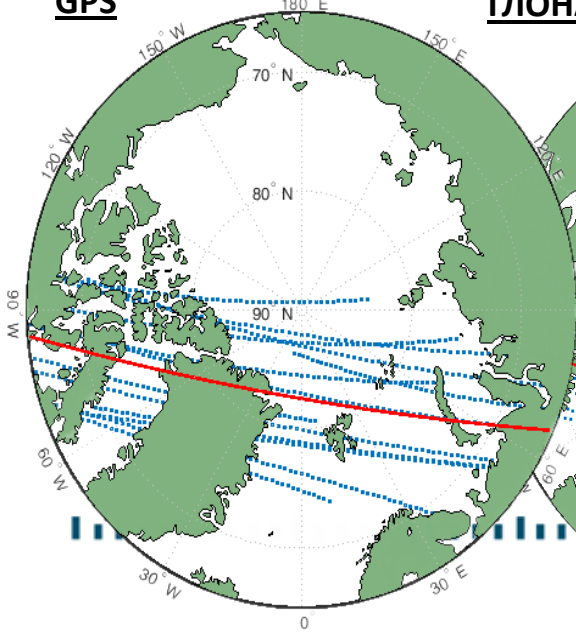


GPS

ГЛОНАСС

Galileo

Beidou

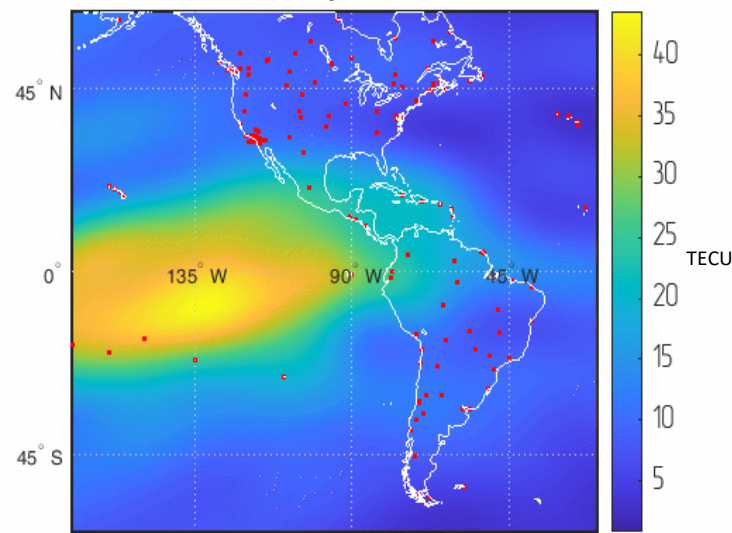


Обработка первичных измерительных данных КА CYGNSS, TDS-1, Spire

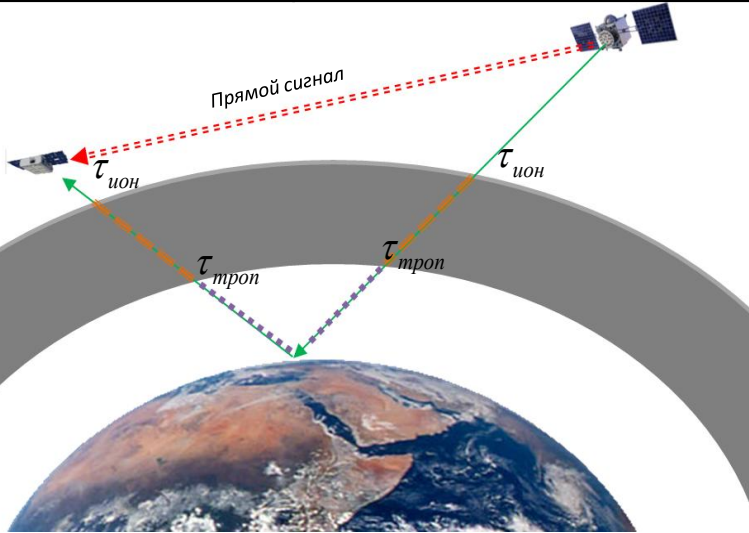
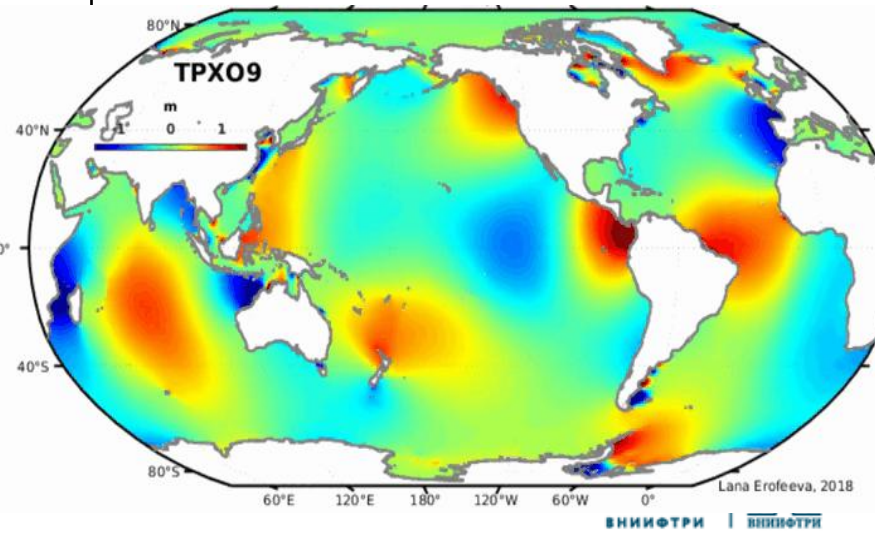
Поправка	Методы учета
ионосферная поправка	измерения на нескольких частотах
	расчет по глобальным моделям GIM (C1PG, IGSG, <u>GPSG</u> , BEEG, <u>CARG</u> , <u>CKMG</u>)
тропосферная поправка	расчет по глобальным моделям <u>ECMWFv5(ERA5)</u> , NCEP/NCAR
поправка, вызванная приливами	расчет по глобальной модели приливов (DTU, <u>FES</u> , TPXO, EOT20)
поправка, вызванная состоянием подстилающей поверхности	при фазовых измерениях не учитывалась

Модель ионосферы CODE

20-Sep-2017

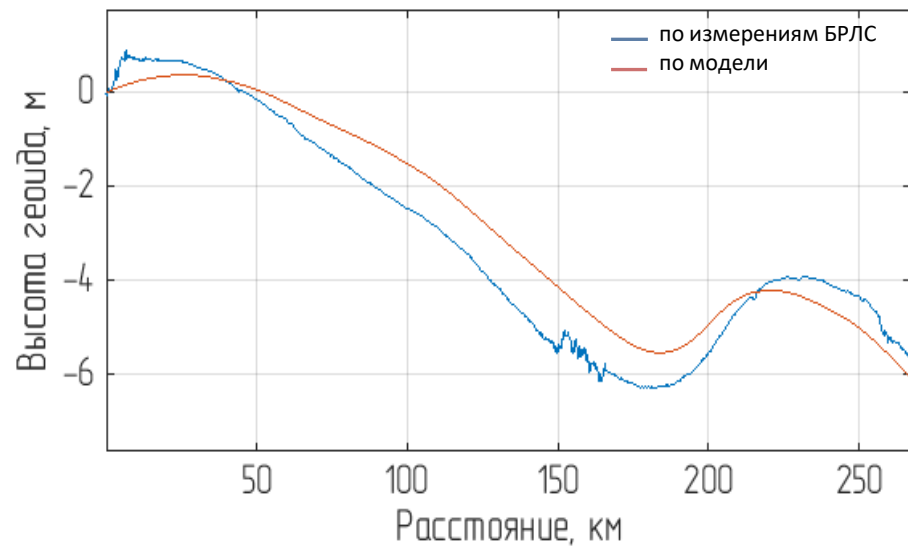


Приливы по модели TPXO

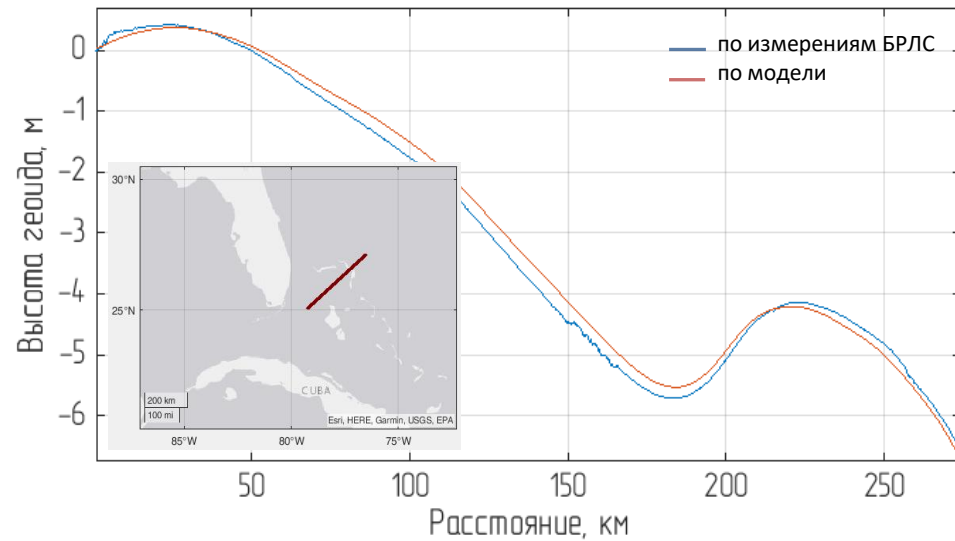


Результаты обработки первичных измерительных данных КА

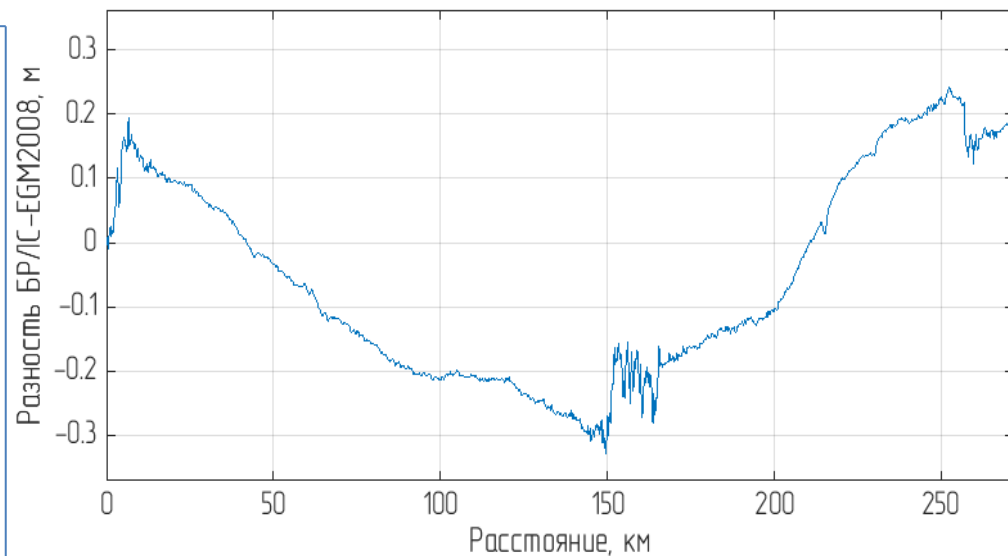
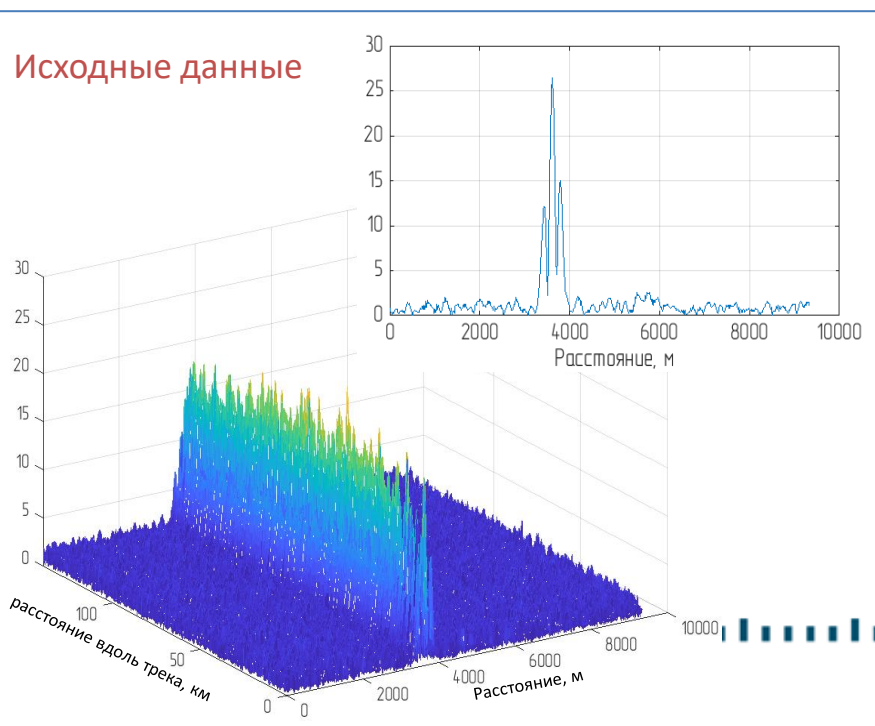
Без учета поправок



С учетом поправок



Исходные данные

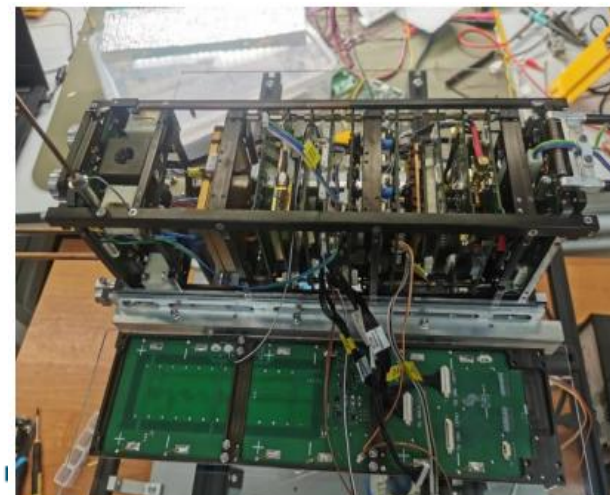
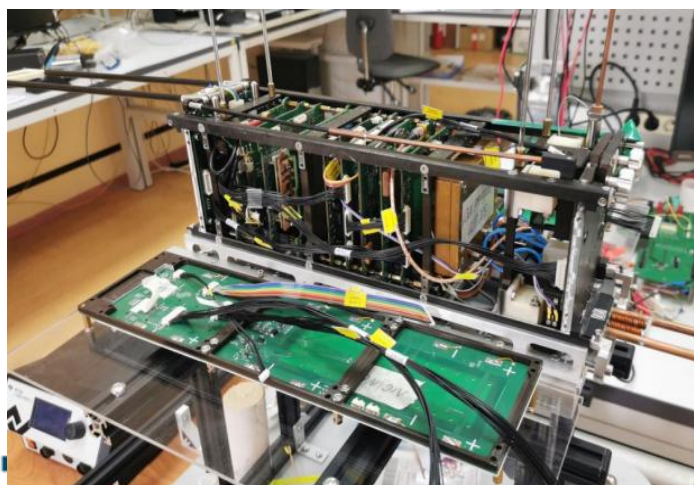
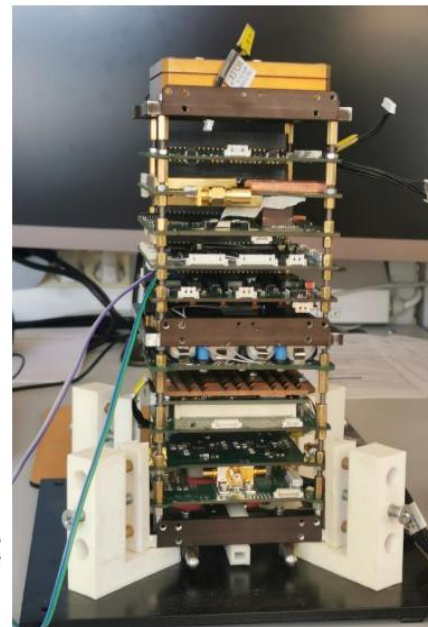
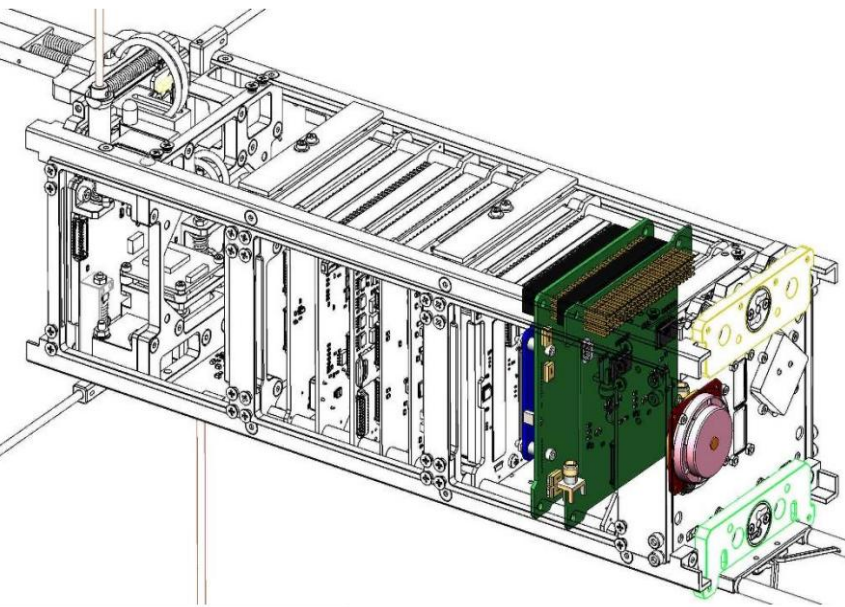


Вывод: СКО разности высоты геоида БРЛС-EGM2008

13,3 см

Пространственное разрешение 280 м

Планируемая спутниковая платформа



Заключение

1. Создание и запуск низкоорбитальной бортовой бистатической системы на сигналах ГНСС позволит определять:

- высоту геоида и УОЛ;
- степень волнения;
- скорость приповерхностного ветра;
- ледовую обстановку.

2. Проведен ряд наземных и летных экспериментов для отработки методов.

3. Обработка первичных зарубежных спутниковых данных показала погрешность метода бистатической радиовысотометрии по сигналам ГНСС **13,3 см.**

Спасибо за внимание !

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-67-10007,

<https://rscf.ru/project/23-67-10007/>

