

# Наблюдение водной поверхности с помощью бистатической радиолокационной системы на сигналах ГНСС

Авторы: ***Фатеев В.Ф. д.т.н., проф. (ВНИИФТРИ)***

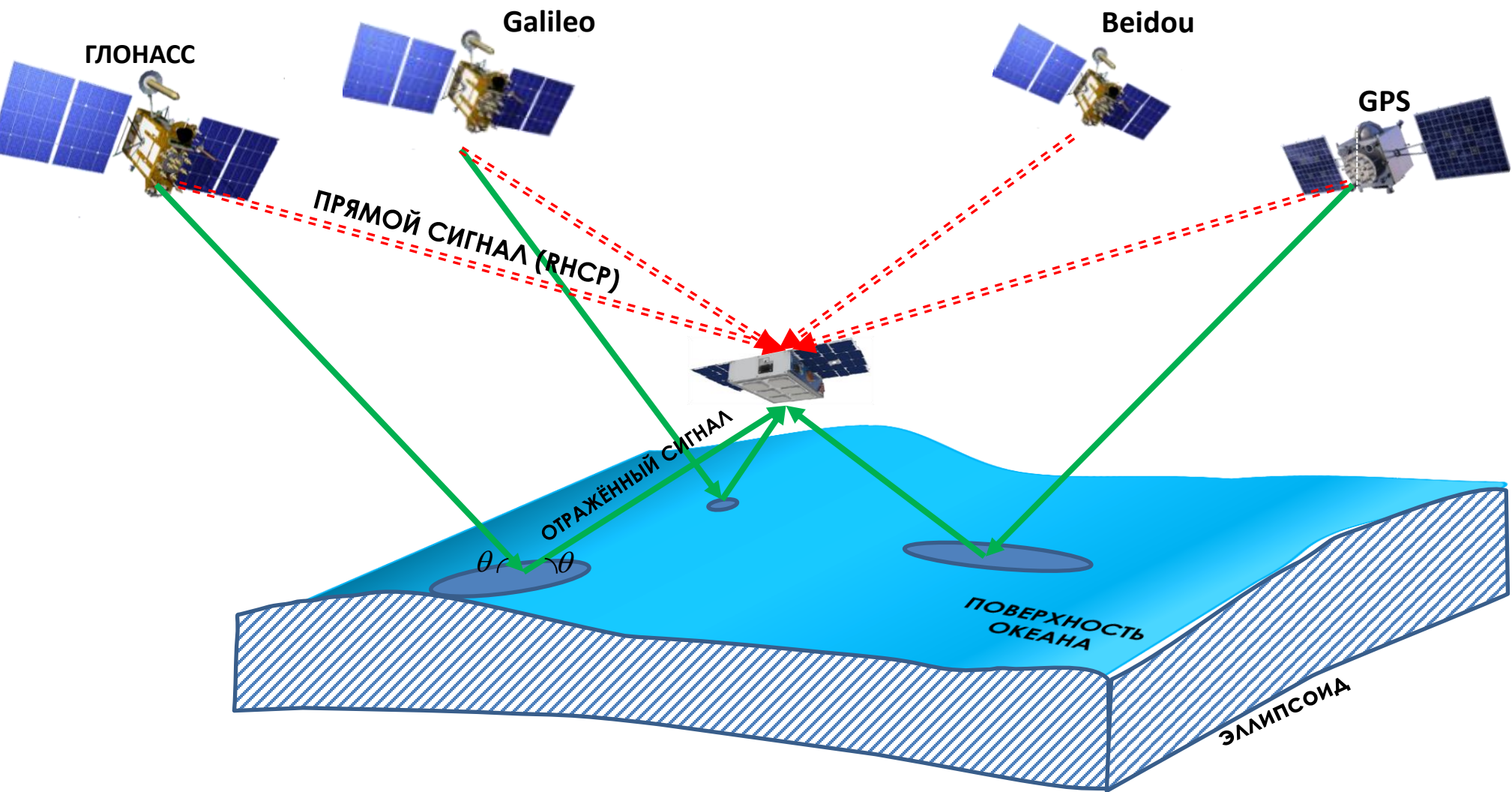
***Лопатин В.П. (ВНИИФТРИ)***

***Титченко Ю.А., к.ф.-м.н. (ИПФ РАН)***

***Ковалдов Д.А. (ИПФ РАН)***

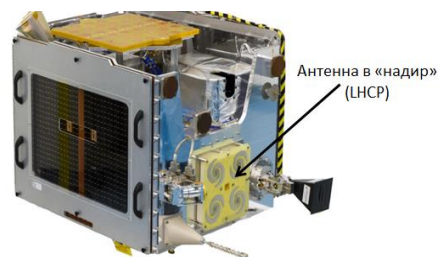
Докладчик: **Лопатин Владислав Павлович**

# Принцип бистатической радиолокации на сигналах ГНСС

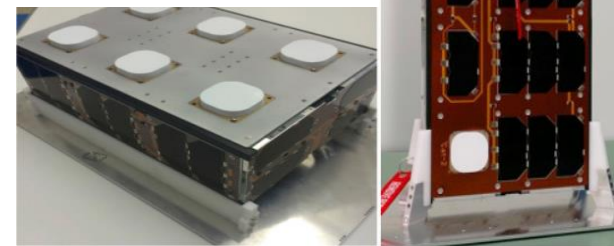


# Зарубежные спутники с бортовой бистатической радиолокационной системой на сигналах ГНСС

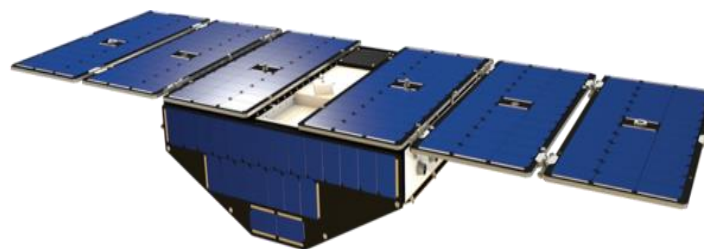
- эксперименты с борта CHAMP(2000 г.);
- UK-DMC1 (2003 г.);
- TechDemoSat-1 (2014 г.);
- эксперименты с борта SMAP (2015 г.);
- CYGNSS (2016 г.) 8 КА;
- <sup>3</sup>Cat-2 CubeSat (2016 г);
- WNISAT 1R (2017 г.);
- DoT-1 SSTL (2019 г.);
- спутники Spire Global (2019-н.в.);
- BF-1A, BF-1B (2019 г);
- <sup>3</sup>Cat-5/A и <sup>3</sup>Cat-5/B (2020 г.);
- FengYun-3E, 3F, 3G (2021 г., 2023 г.);
- PRETTY (2023 г.);
- Tianmu-1(2023-нв) 22 КА;
- 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 МКА **NASA CYGNSS**  
(500 км, 28 кг, 12.2016г)



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



**<sup>3</sup>Cat-5/A, Испания** (6U, 2020г.)



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

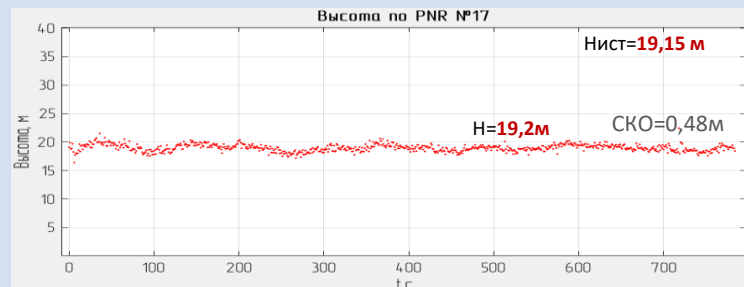


# Собственные эксперименты по измерению высоты над водной поверхностью

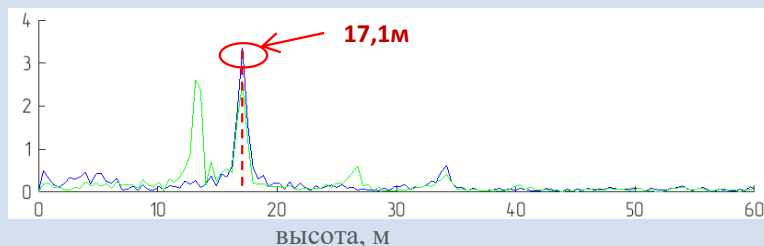
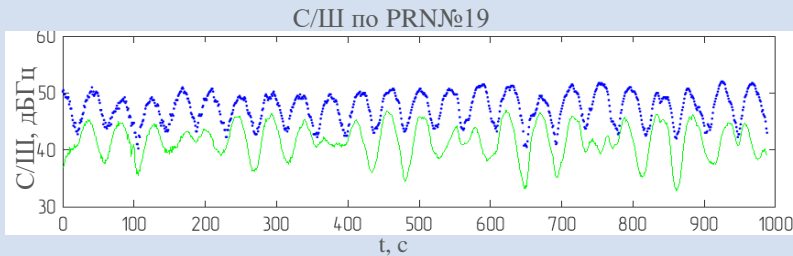
## Эксперимент по измерению высоты уровня воды



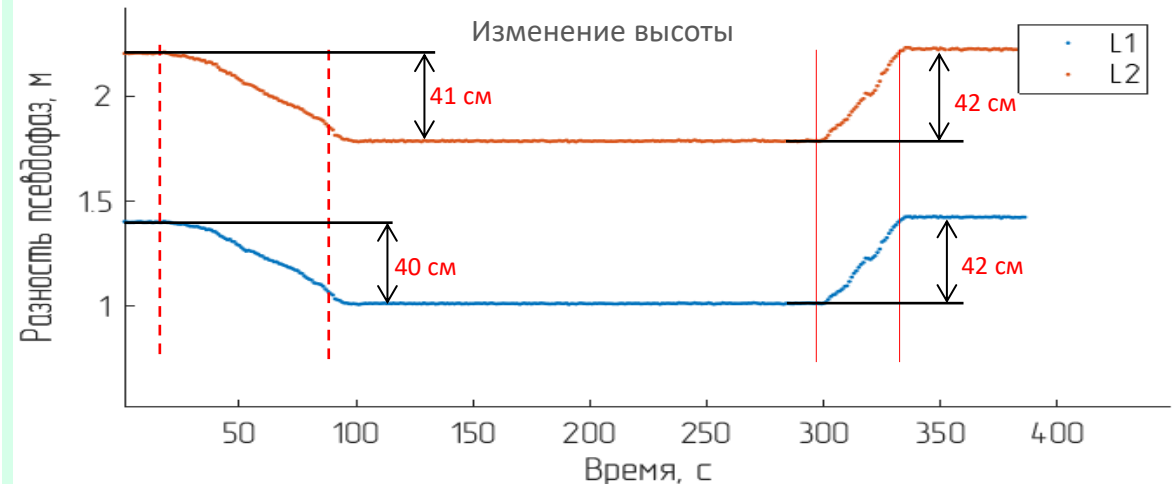
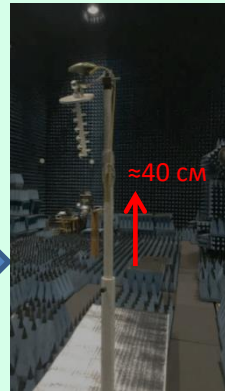
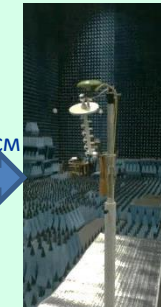
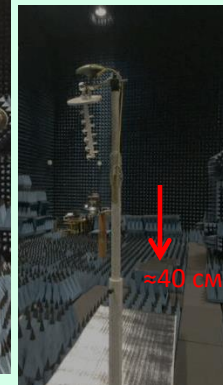
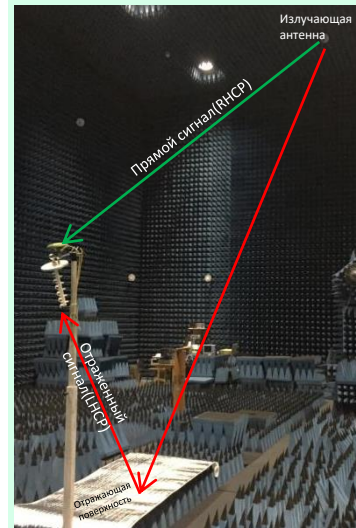
### Метод на основе кода сигнала в точке T.1



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



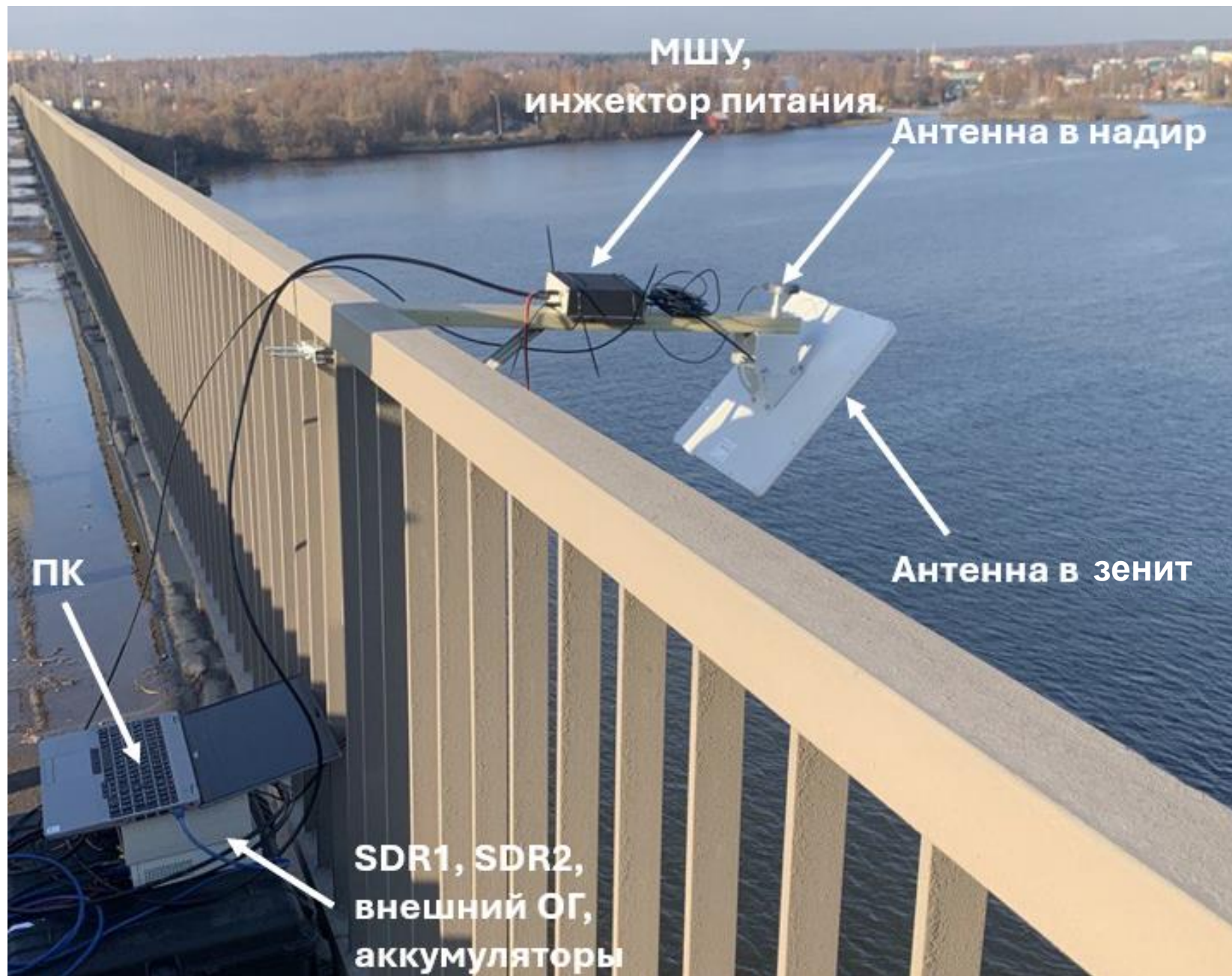
## Эксперимент в безэховой камере



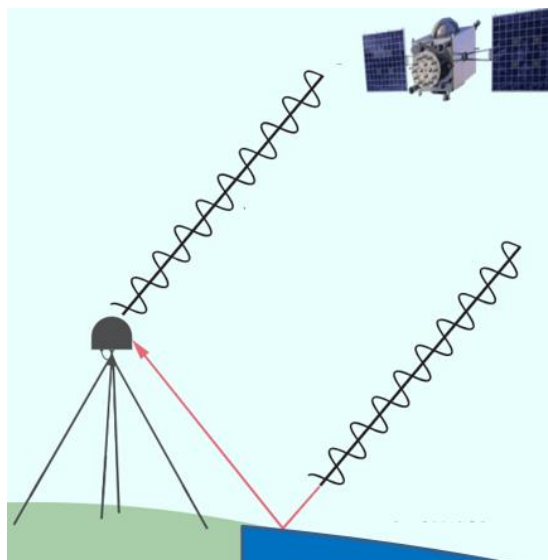
- Вывод:**
- погрешность оценки высоты кодовым методом не более 0,5 м;
  - погрешность оценки высоты фазовым методом не более 0,02 м;
  - погрешность оценки высоты методом С/Ш не более 0,02 м.



## Эксперименты по измерению высоты над водной поверхностью



# Использование отраженных сигналов ГНСС для оценки уровня водной поверхности



## Геометрия задачи по определению высоты

Прямой сигнал  
Отраженный сигнал  
Антенна

метры

метры

м. Моделирование ОСШ

Изменение отношения  
«сигнал/шум» пропорционально:

$$\Delta SNR \sim A \cos \left( \frac{4\pi}{\lambda} h \sin(\theta(t)) + \varphi_0 \right),$$

ОСШ

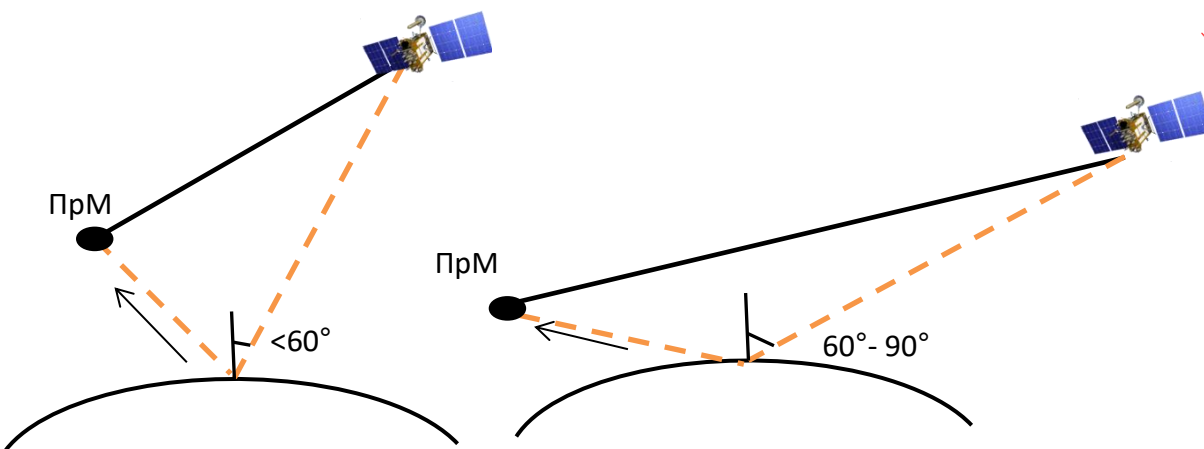
$\theta(t)$  - угол возвышения *НКА ГНСС*;

$h$  - высота антенны до  
отражающей поверхности;

$\lambda$  - длина волны сигнала ГНСС.

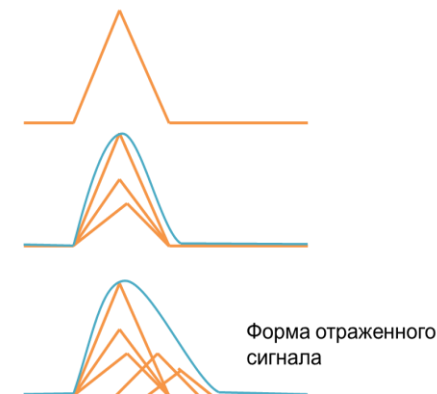
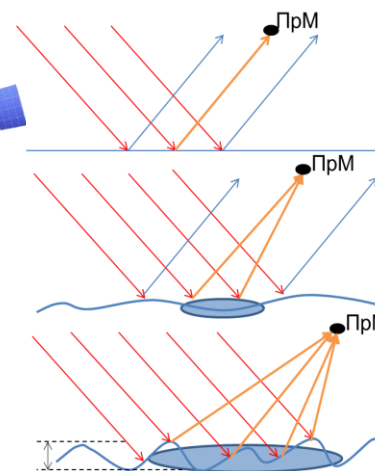
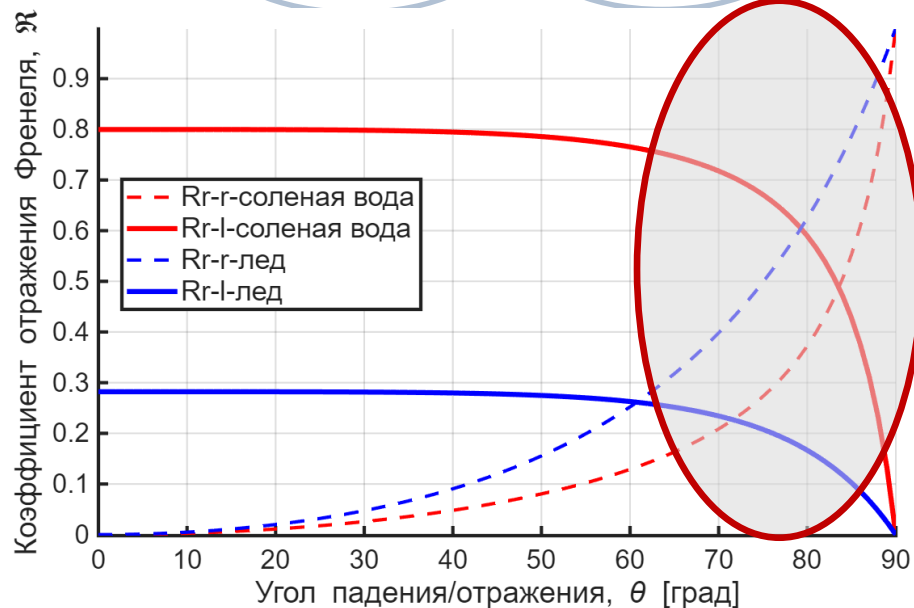
Угол возвышения, град

# Возможность приема прямых и отраженных сигналов ГНСС



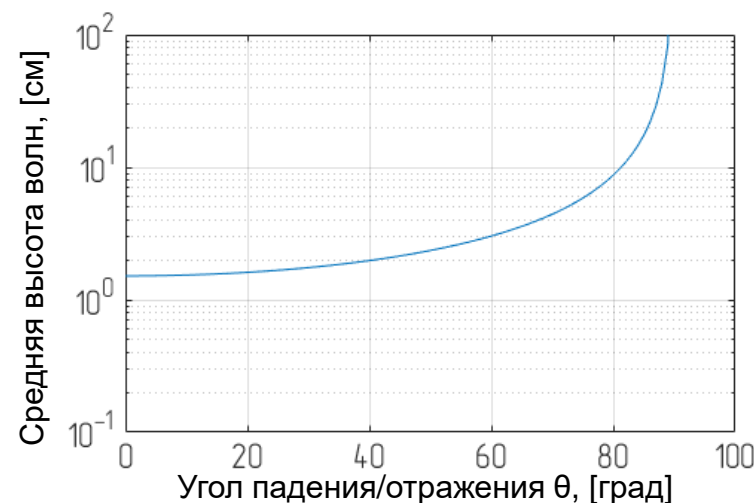
Коэффициент отражения Френеля

$$R_{RL}(\theta, \varepsilon) = 0.5 \left( \frac{\varepsilon \cos(\theta) - \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta)}}{\varepsilon \cos(\theta) + \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta)}} R_{HH} + \frac{\cos(\theta) - \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta)}}{\cos(\theta) + \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta)}} R_{VV} \right)$$



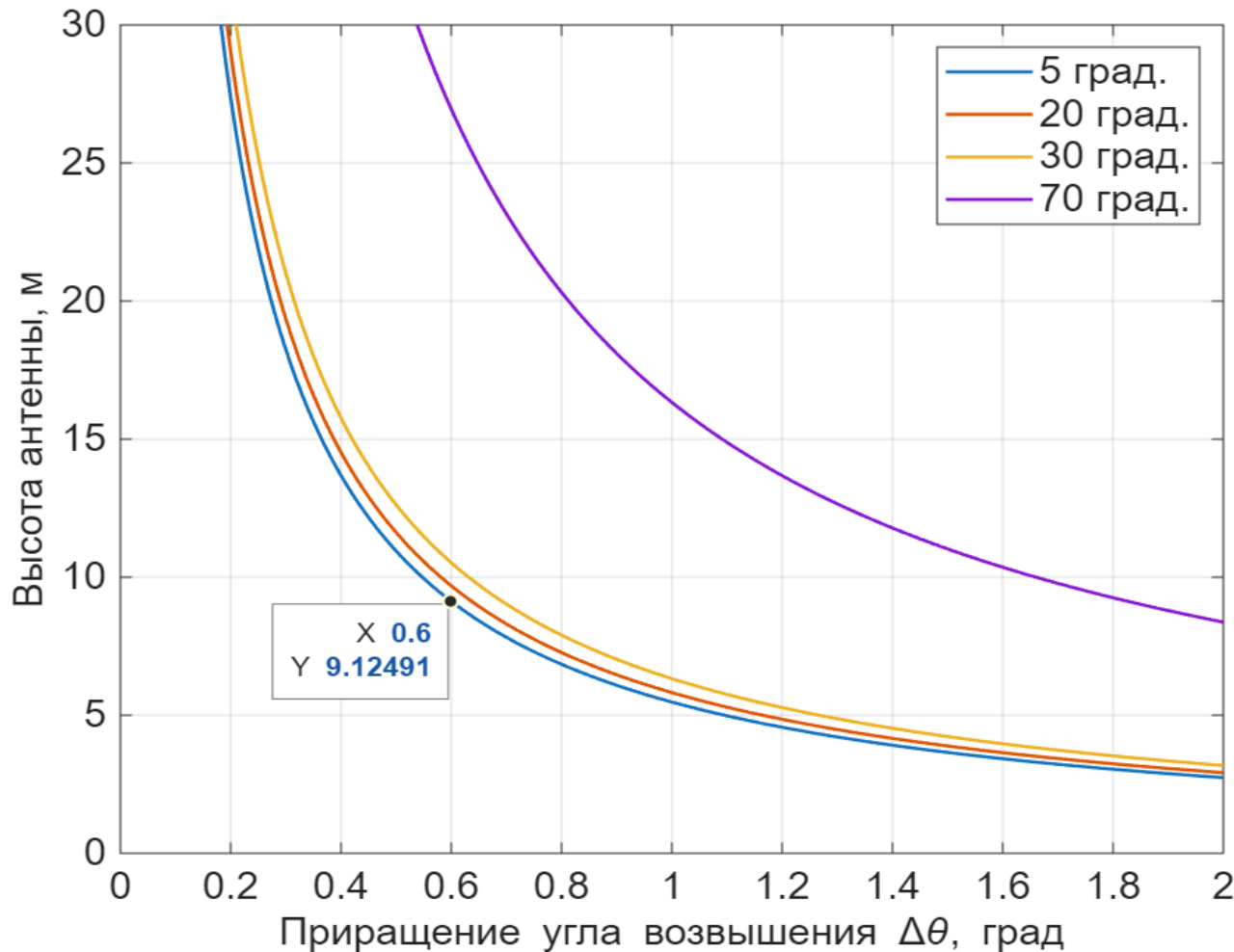
Критерий Релея:  $\frac{8H_{m0} \cos(\theta)}{\lambda} < 1$

$H_{m0}$  - средняя высоты волн  
 $\theta$  - угол падения/отражения  
 $\lambda$  - длина волны ГНСС-сигнала



**Вывод:** поляризация ГНСС сигнала не изменяется при углах возвышения спутников от  $0^\circ$  до  $30^\circ$  и суммарный ГНСС-сигнал может приниматься одной антенной.

## Необходимое время оценки уровня водной поверхности по измерениям отношения сигнал/шум



$$\frac{4h}{\lambda} \sin(\theta(t_0) + \Delta\theta) - \frac{4h}{\lambda} \sin(\theta(t_0)) = 2\pi$$

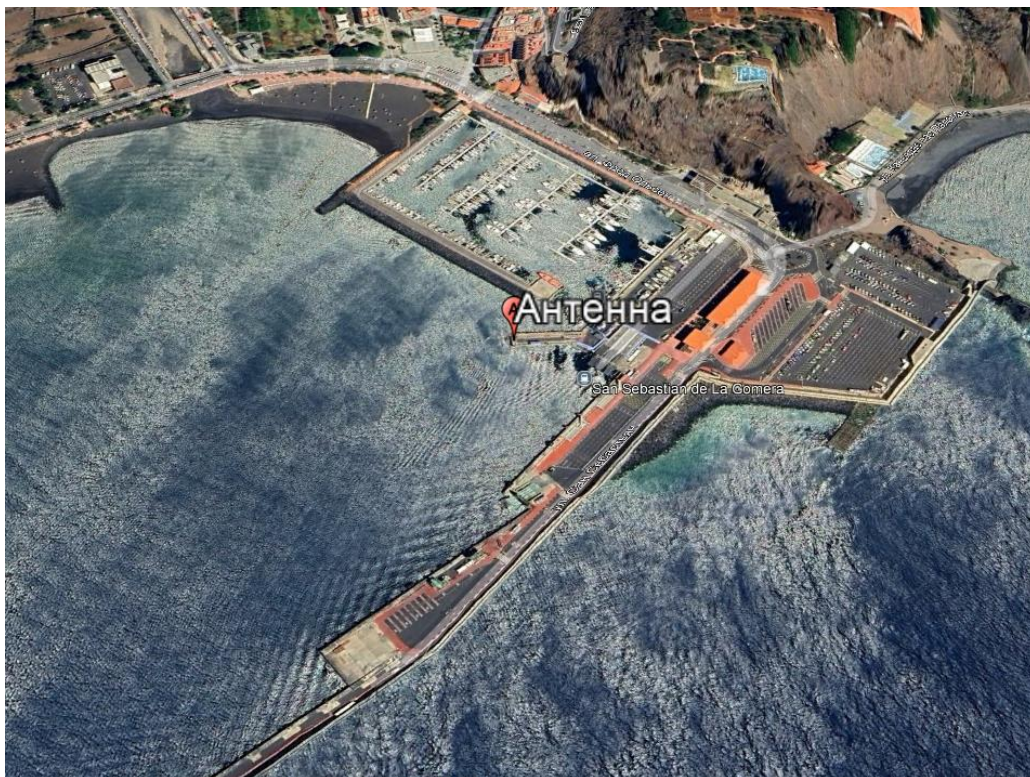
$$h = \frac{\pi\lambda}{4 \sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \cos\left(\theta(t_0) + \frac{\Delta\theta}{2}\right)}$$

Средняя скорость возвышения НКА на низких углах возвышения **0,03 град/с**

**Вывод:** оценка высоты в 9 м возможна за 20 с измерений отношения «сигнал/шум» суммарного сигнала одного НКА.

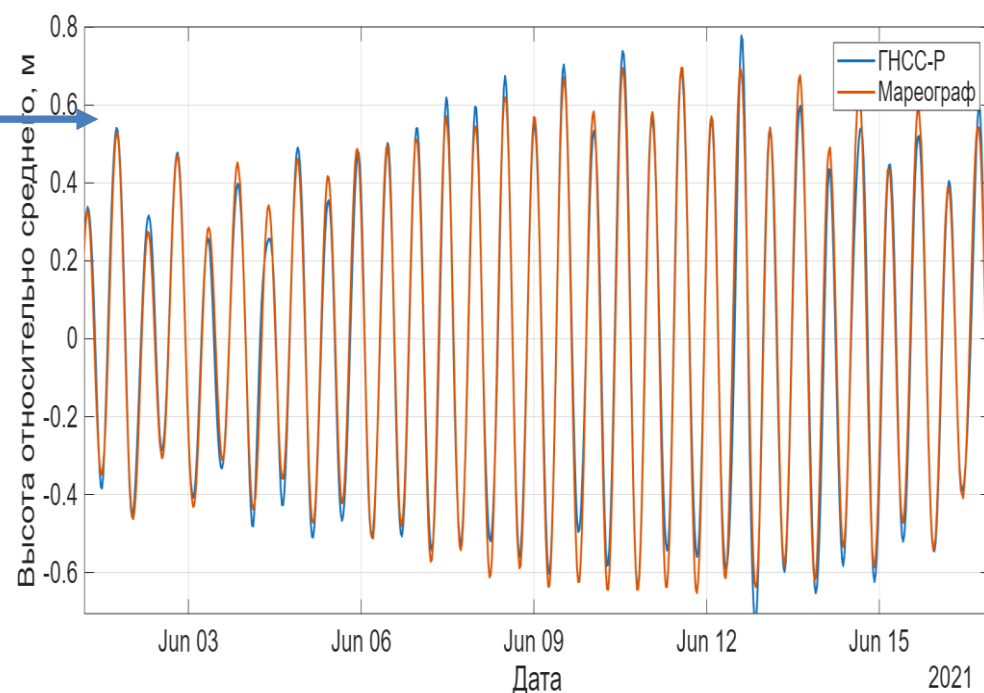
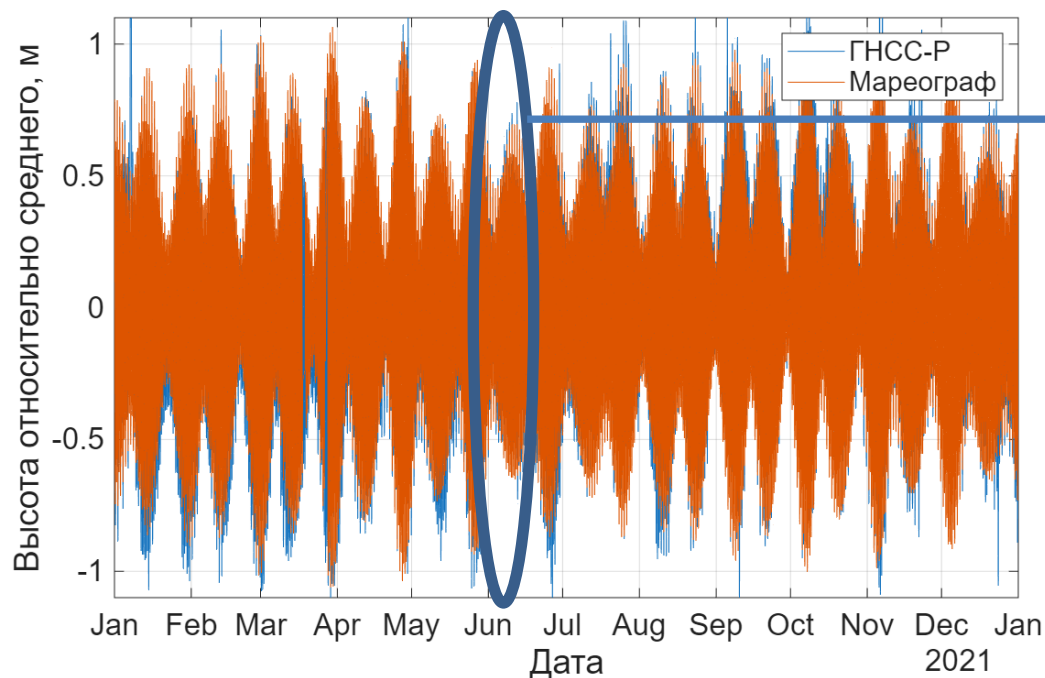


## Измерения ГНСС-станции в качестве мареографа (о. Гомера)

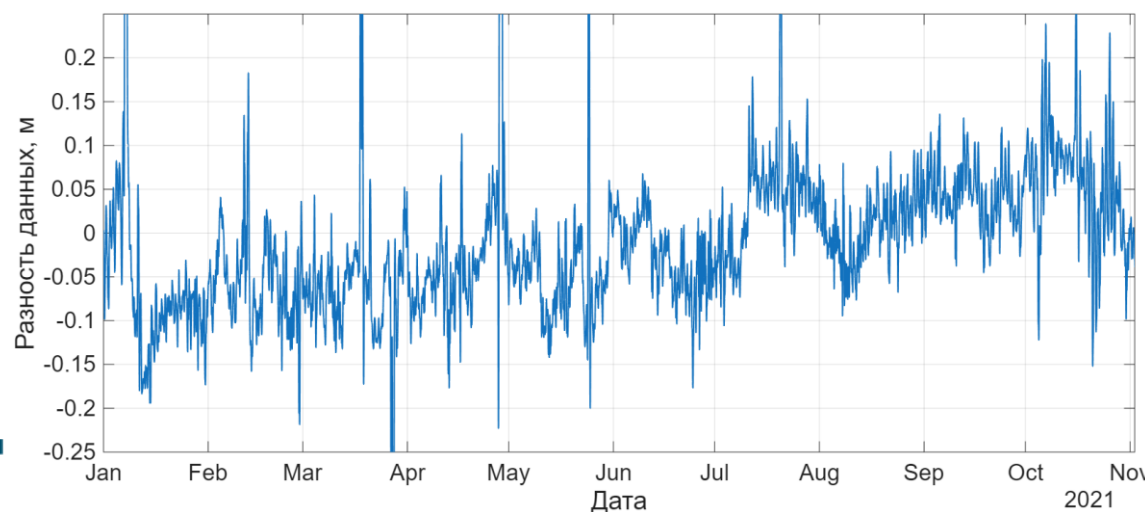


Мареограф MIROS  
Частота – 9.4 – 9.8 ГГц;  
Погрешность –  $\pm 5$  мм.

## Результаты обработки измерений ГНСС-станции в качестве мареографа (о. Гомера)



### Разность измерений уровня мареографа и ГНСС-станции



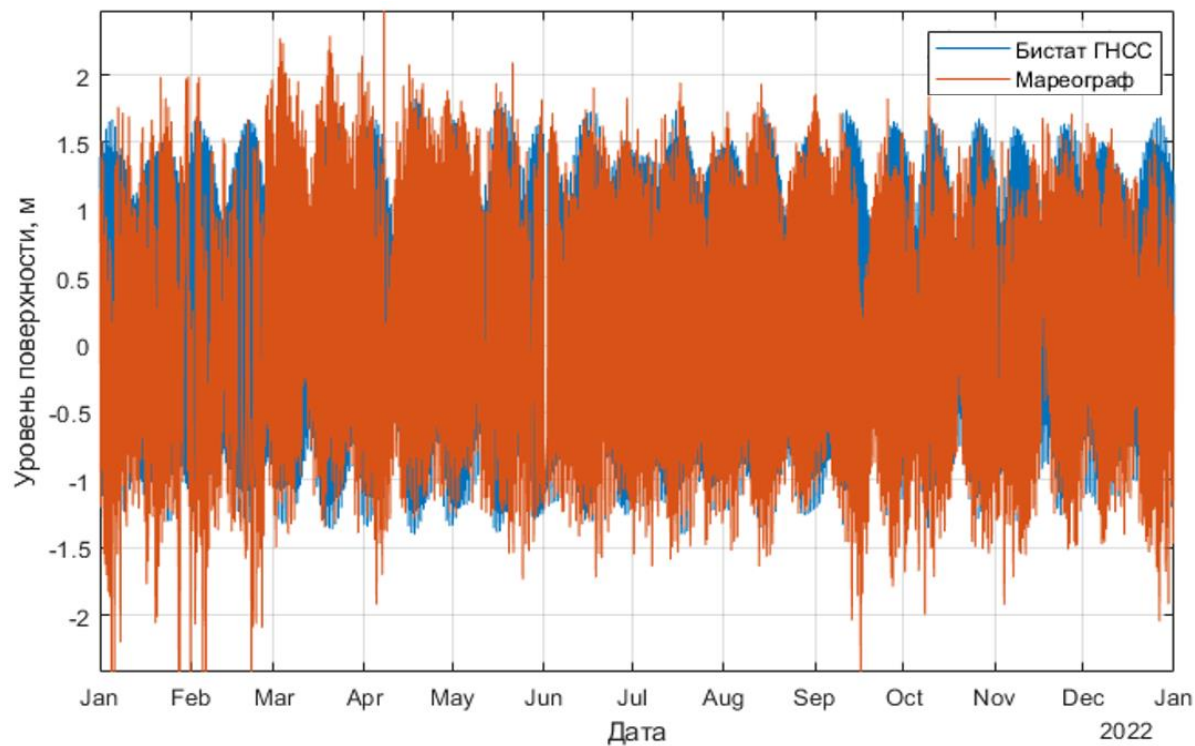
СКО разности высоты – **12,1 см**

Ср. значение разности – **0,9 см.**





## Результаты обработки измерений ГНСС-станции в качестве мареографа (бухта Долларт)



СКО разности высоты – **17 см**

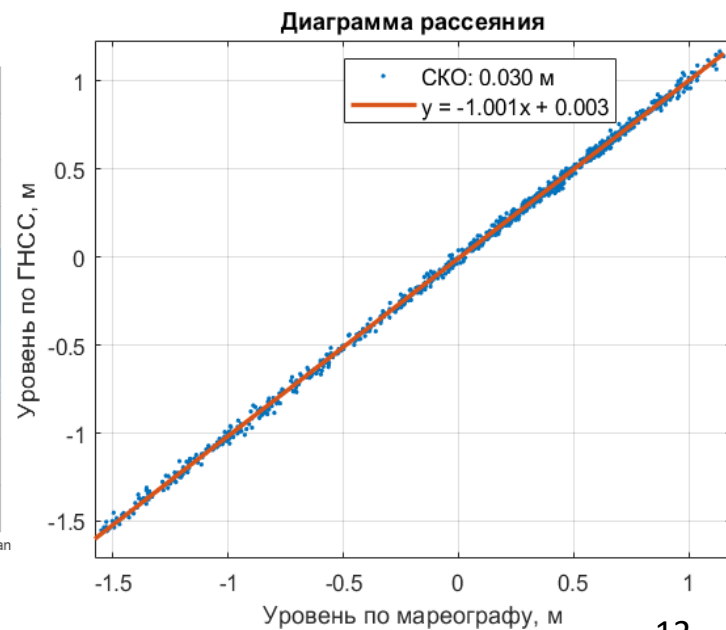
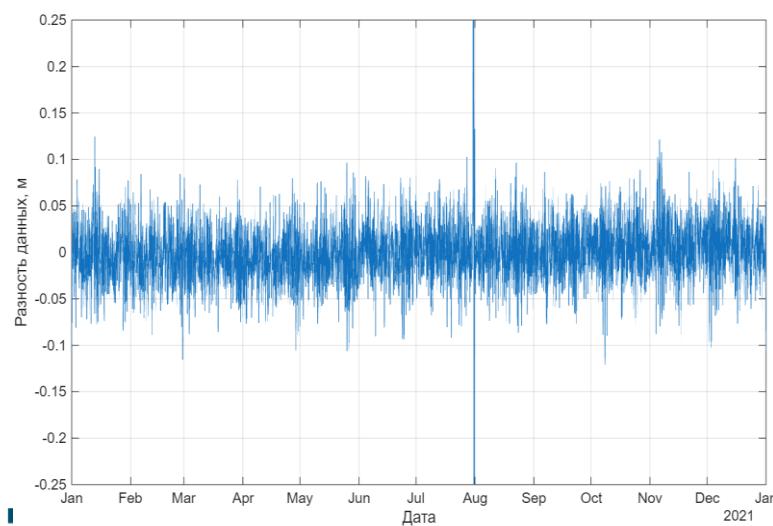
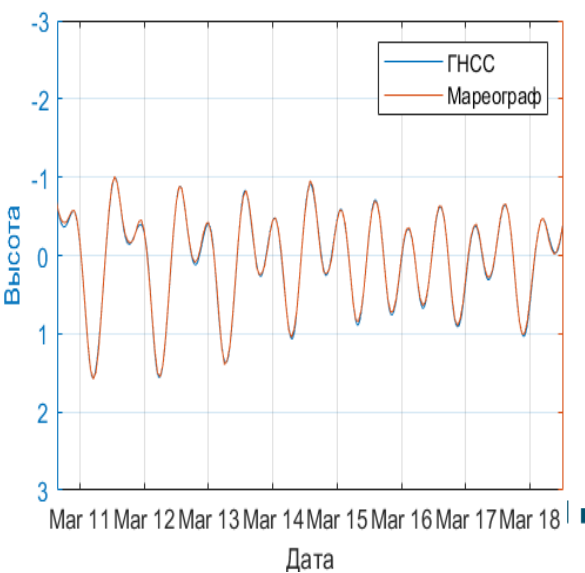
Ср. значение разности – 0 см.

# Результаты обработки измерений ГНСС станций в качестве мареографа (о. Сан Хуан)



СКО разности – 3 см

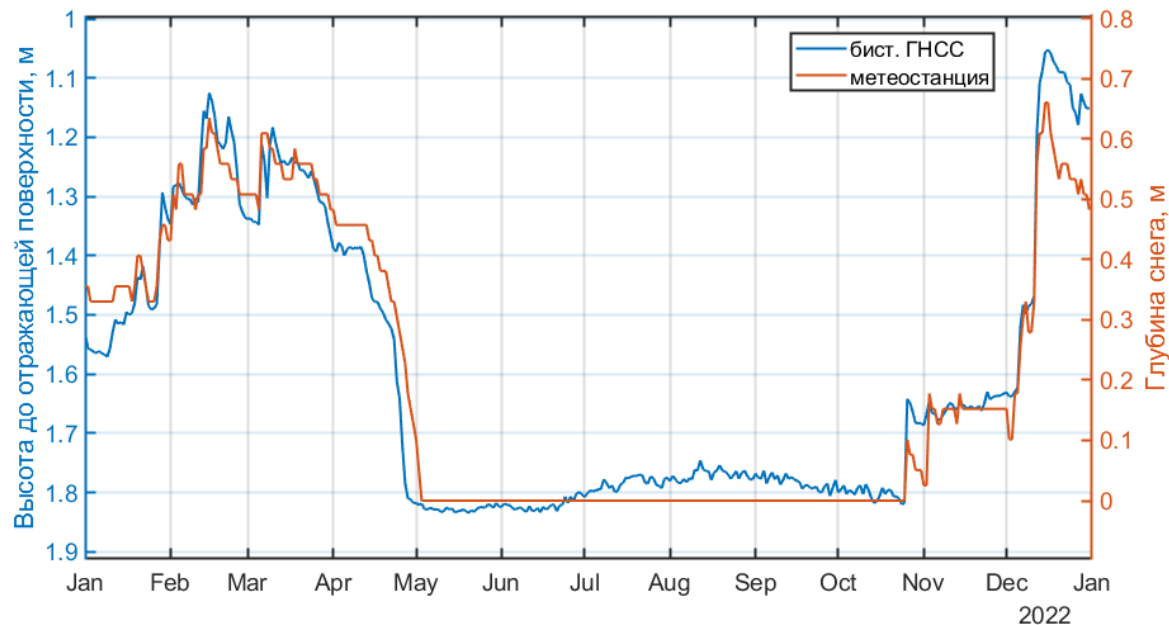
Ср. значение – 0 см.





# Результаты измерение высоты снежного покрова по отраженным сигналам ГНСС (Солдотна, Аляска)

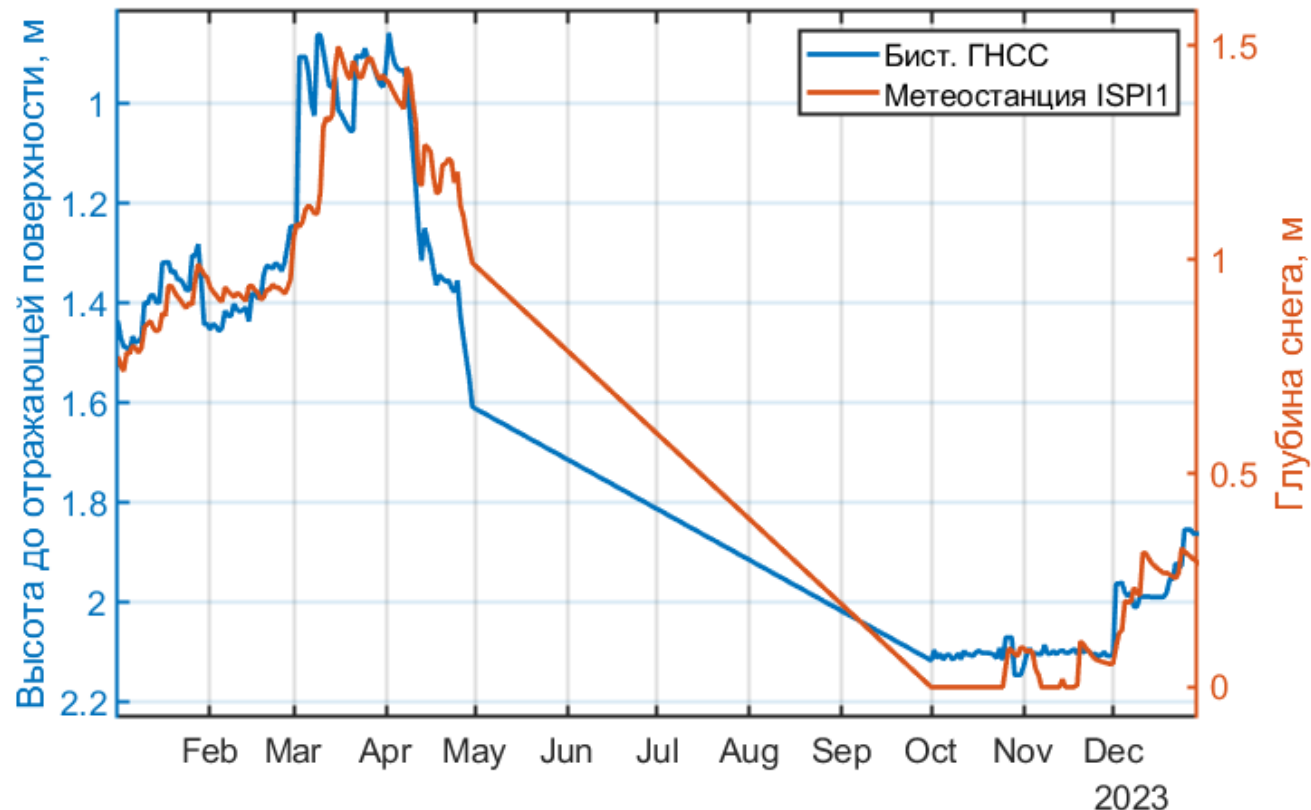
## Солдотна, Аляска (GPS, 30 с)



Коэффициент корреляции 0,97

Лосиный заповедник Кенай

# Результаты измерение высоты снежного покрова по отраженным сигналам ГНСС (Айленд Парк, Айдахо)





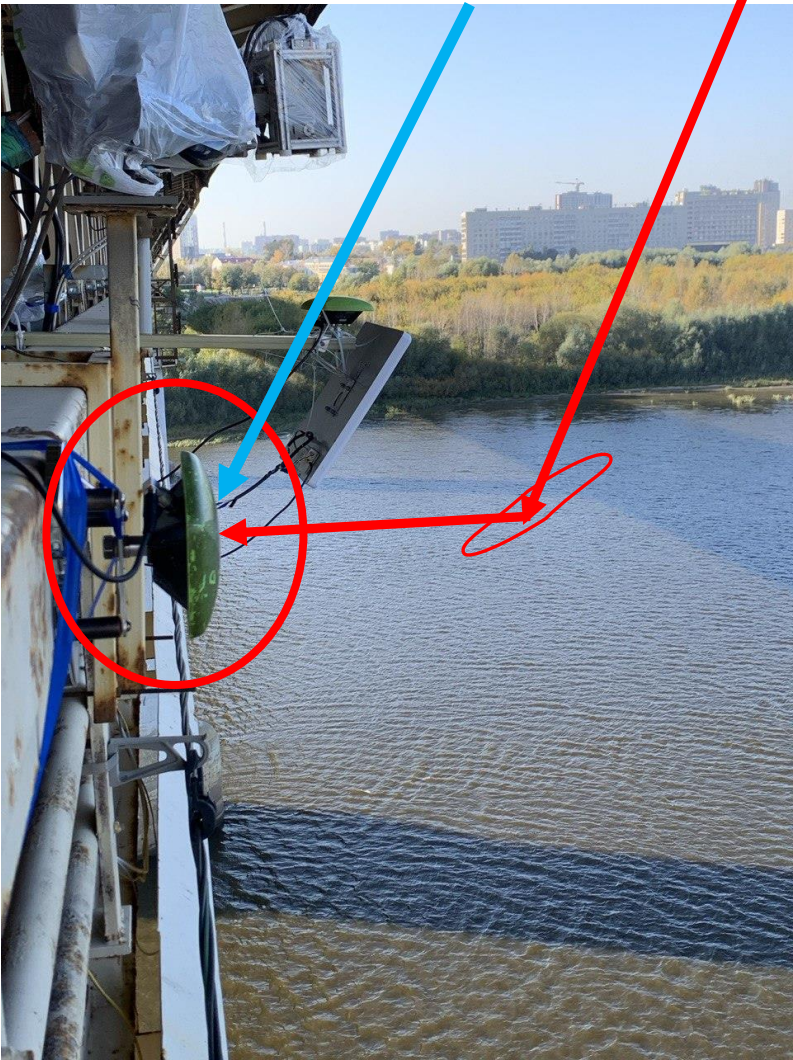
# Эксперимент с метромостом г. Нижний Новгород (ВНИИФТРИ, ИПФ РАН) с использованием отраженных сигналов ГНСС

## Решаемые задачи эксперимента:

- 1) Определение высоты отражающей поверхности с использованием метода отношения сигнал/шум;
- 2) Определение волнения отражающей водной поверхности.

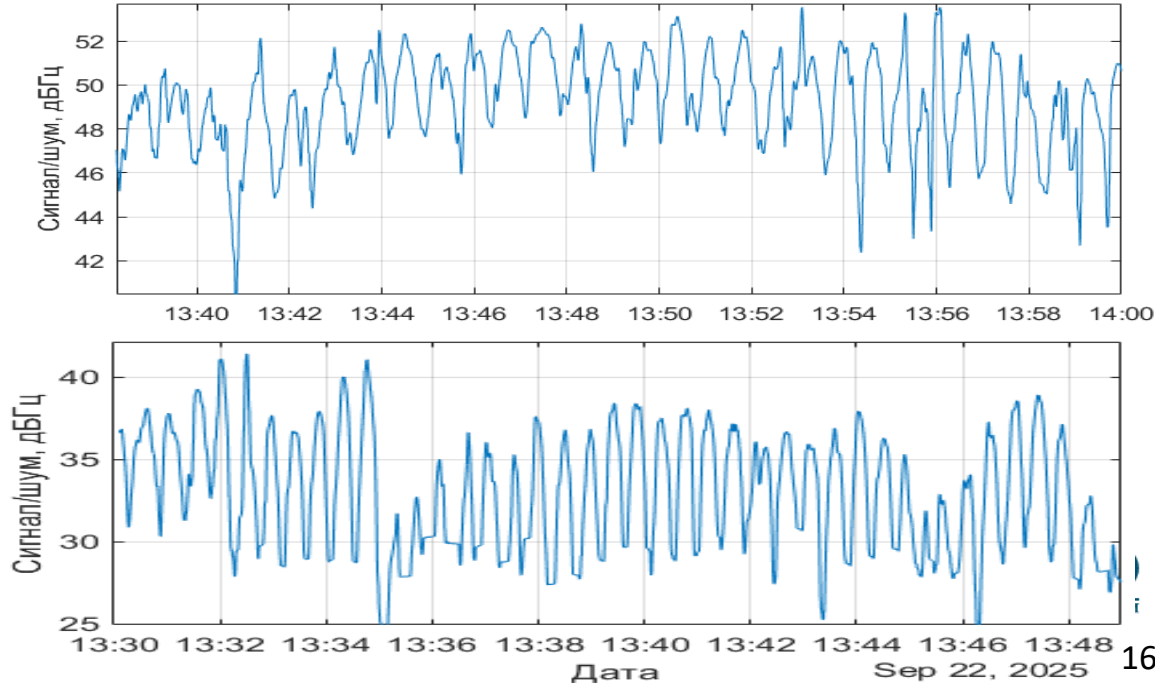


# Эксперимент с метромоста с использованием метода отношения «сигнал/шум»



Параметр	Значение
Сектор углов НКА по азимуту	от - 30° до 120°
Углы места НКА	0°...30°
ГНСС	ГЛОНАСС, GPS, Galileo
Частота измерений	10 Гц
Длительность измерений	5 дней

Данные отношения «сигнал/шум» по НКА ГЛОНАСС

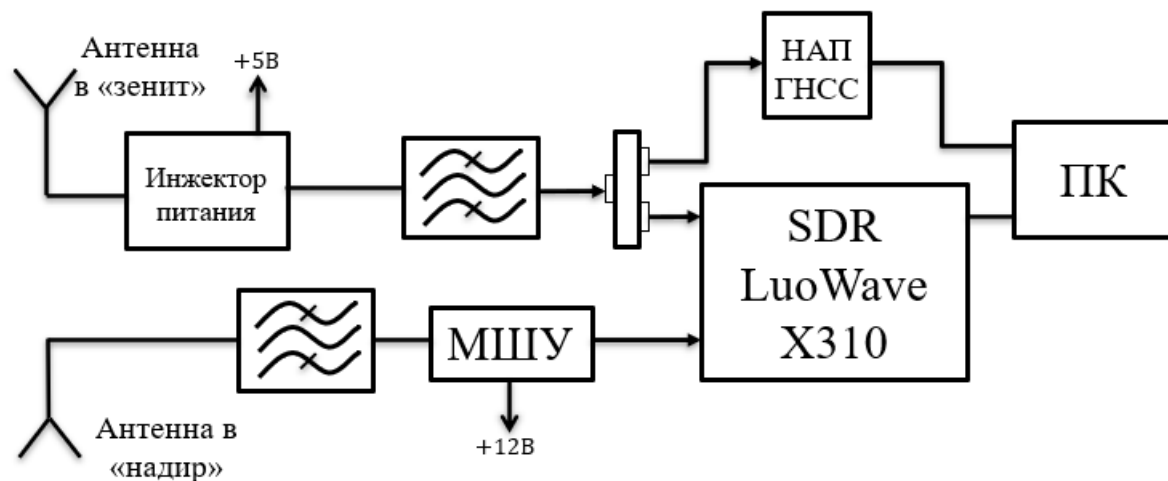




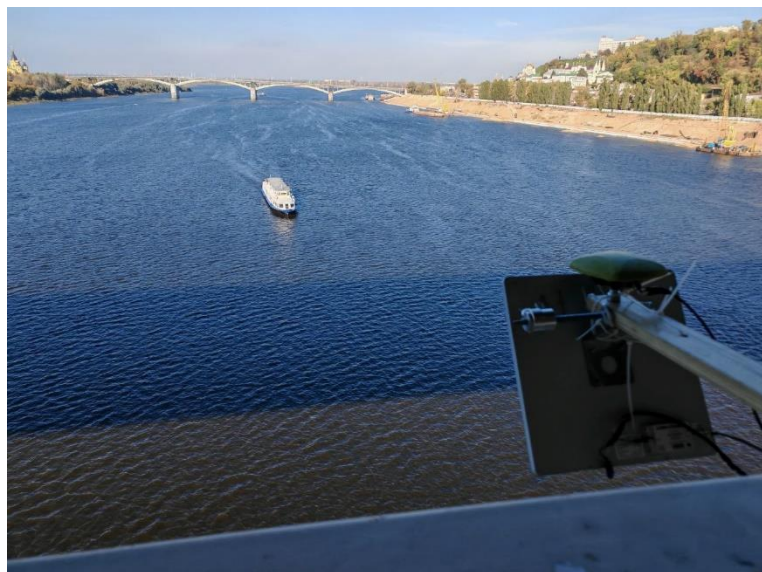
# Эксперимент с метромоста

## Решаемые задачи:

- 1) Определение высоты отражающей водной поверхности;
- 2) Определение волнения отражающей водной поверхности.



Параметр	Значение
Частота	L1
Частота дискретизации	20 МГц
Разрядность АЦП	14 бит
Коэфф. усиления антенны в «надир»	14 дБ
Поляризация антенны в «надир»	LHCP



# Заключение

1. Обработка данных зарубежных ГНСС-станций показала, что для уровенных постов целесообразно размещение ГНСС-станции вблизи водных объектов.
2. Погрешность измерений сопоставима с погрешностью классического мареографа.
3. Возможно использование ГНСС-станций для оценки высоты снежного покрова.
4. Проведен эксперимент с моста над р. Ока.

# Спасибо за внимание !

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

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