



Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН, КНЦ СО РАН)

Всероссийская конференция с международным участием «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов» (SDM-2023)  
г. Бердск, Новосибирская область, Россия

# **ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫСОТЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ АНТЕННЫ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ РЕФЛЕКТОГРАММ ОТ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ В ДИАПАЗОНЕ L1**

**Авторы:**

**Макаров Д.С., Харламов Д.В., Малимонов М.И**



# Содержание

- Введение.
- ГНСС-рефлектометрия (ГНСС-Р). Возможности метода в мониторинге ледовых покровов.
- Особенности метода ГНСС-Р.
- Экспериментальные результаты тестового цикла ГНСС-Р ледового покрова от ледостава до таяния на разных высотах приемника.
- Итоги и выводы.



# Введение

- Сигналы навигационных спутников (далее НС) имеют значимый аналитический ресурс для реализации непрерывного мониторинга земных покровов, атмосферы, ионосферы.
- Многолучевость позволяет по изменению характеристик отраженного или рассеянного средами сигнала восстанавливать значимые для практики свойства этих сред
- Практическое использование ледовых покровов достаточно развито: ледовые переправы, зимники, наледи на реках, профессиональный и любительский подледный лов.
- Не редки трагические ситуации переоценки людьми прочности льда в весенний период.
- Известно, что весной ледовый покров даже при зимней толщине становится менее прочным, его кристаллическая структура насыщается водой.
- **Необходим и возможен мониторинг состояния ледового покрова с использованием сигналов навигационных спутников.**

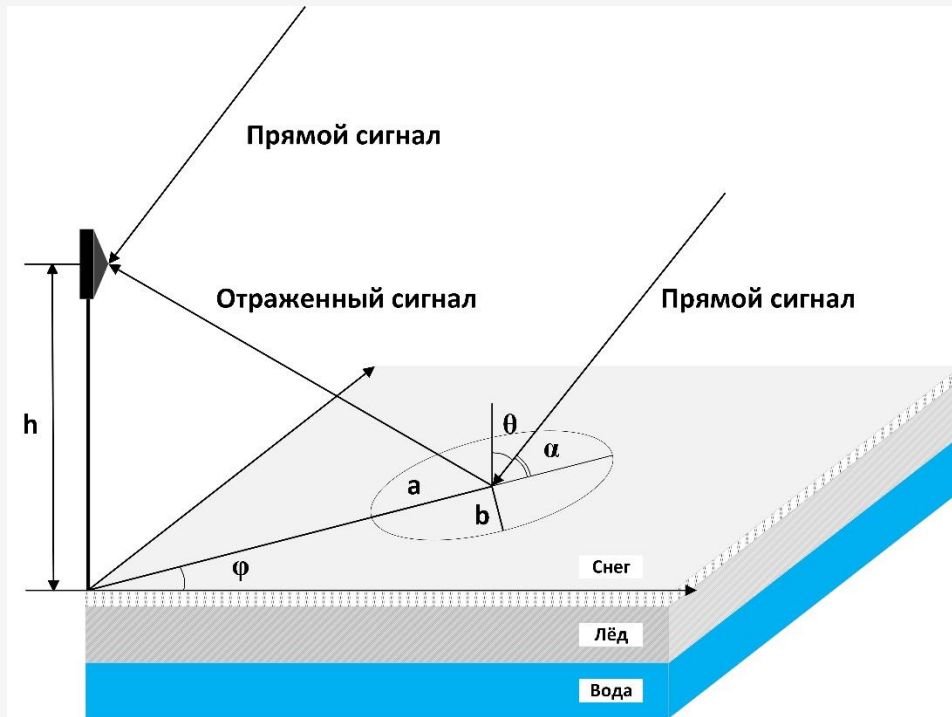


## Характеристики ГНСС

Характеристики	GPS	ГЛОНАСС
Число КА	24	24
Число орбитальных плоскостей	6	3
Число КА в каждой плоскости	4	8
Высота орбиты, км	20 000	19 100
Наклонение орбиты, град.	55	64,8
Период обращения КА	11 ч : 58 м	11 ч : 46 м



# Схема формирования интерференционного сигнала на приемной антенне.



$$E^2 = E_0^2 \left[ 1 + r^2 + 2r \cos \left( \frac{4\pi h \sin \theta}{\lambda} \right) \right]$$

$h$  – высота антенны;

$\theta$  – угол падения электромагнитной волны, проходящей от навигационного спутника;

$r$  – коэффициент отражения (для линейных и круговых поляризаций);



## Формат экспериментальных данных

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	№ кадра	№ спутника	Дата	Время	Псевдодальность м	Фазовая псевдодальность, цикл	Азимут	Угол места	Амплитуда
2	6687	23	31.03.2019	13:33:56	18407300.21229608357	696708.27410888671875	-162.8880429131526455	47,99451174	131
3	6688	23	31.03.2019	13:33:57	18407698.34485918656	698800.4564208984375	-162.8930708259478024	47,98711353	138
4	6689	23	31.03.2019	13:33:58	18408096.537660252303	700892.98291015625	-162.89809630695191345	47,97971499	131
5	6690	23	31.03.2019	13:33:59	18408494.785185016692	702985.84779357910156	-162.903119582166795	47,97231603	133
6	6691	23	31.03.2019	13:34:00	18408893.151301272213	705079.19342041015625	-162.90814107438563951	47,96491646	128
7	6692	23	31.03.2019	13:34:01	18409291.623654261231	707173.10841369628906	-162.91316006801872618	47,95751678	149
8	6693	23	31.03.2019	13:34:02	18409690.21704177931	709267.62646484375	-162.91817673227899377	47,95011648	147
9	6694	23	31.03.2019	13:34:03	18410088.899913825095	711362.68312072753906	-162.92319077398656191	47,94271576	128
10	6695	23	31.03.2019	13:34:04	18410487.716384548694	713458.49046325683594	-162.92820283951621718	47,93531456	116
11	6696	23	31.03.2019	13:34:05	18410886.659055057913	715554.96783447265625	-162.93321269951388786	47,92791306	119
12	6697	23	31.03.2019	13:34:06	18411285.674597490579	717651.80274963378906	-162.93822008090455711	47,92051108	129
13	6698	23	31.03.2019	13:34:07	18411684.781718477607	719749.11834716796875	-162.9432252796046896	47,91310851	131
14	6699	23	31.03.2019	13:34:08	18412083.994447998703	721846.96124267578125	-162.94822788937429436	47,9057057	125
15	6700	23	31.03.2019	13:34:09	18412483.318719118834	723945.45512390136719	-162.95322884590066792	47,89830245	126





# Сухой и влажный лед

Кристалл  
(3 ноября)



Кристалл + вода  
(20 апреля)





# Радиофизические свойства пресных льдов и воды в диапазоне частот навигационных спутников L1

Комплексные диэлектрическая проницаемость и показатель преломления в диапазоне L1=1,5 - 1,6 ГГц и при температурах 0°C существенно различаются:

Сухой лёд  $\epsilon' \sim 3,0 - 3,2$  и  $\epsilon'' \sim 0,0003$ ,  
вода  $\epsilon' \sim 86$  и  $\epsilon'' \sim 7$ .

Действительная и мнимая части показателя преломления имеют значения:

для льда  $\alpha \sim 1,75$ ,  $\beta \sim 0$   
для воды  $\alpha \sim 9,27$ ,  $\beta \sim 2,65$ .

**Характерные средние размеры:**

- толщины ледовых покровов водоемов –  $1\text{ см} < d < 1-2\text{ м}$ ;
- микрокристаллов льда и микрообъемов воды –  $a \sim 1\text{ см}$  ;
- длины волн  $\lambda$  диапазона L 1: GPS – 19,04 см, ГЛОНАСС – (18,8 -18,9) см

Пресноводные водоемы России:  $a/\lambda \ll 1$ ,  $d/\lambda \sim$  или  $\gg 1$





# Рефракционная модель ледовых покровов

## *Влажный лед как смешанный диэлектрик (вода + лед)*

$$(\varepsilon_{вл})^\gamma = W_{л}(\varepsilon'_{л})^\gamma + W_{в}(\varepsilon'_{в})^\gamma,$$

где  $W_{л}$ ,  $W_{в}$  объемные доли льда и воды смеси вода + лед,  $\gamma$  – коэффициент, варьируется от 0 до 1, определяется экспериментально или из теоретических предпосылок

Рефракционные параметры среды  $n = \alpha + i\beta = \sqrt{\varepsilon\varepsilon'}$ ,

где  $\alpha$  – коэффициент преломления,  $\beta$  – показатель поглощения модельной среды – влажного льда.

Вещественные и мнимые части комплексных значений  $\varepsilon$  и  $n$  связаны соотношениями:

$$\varepsilon' = \alpha^2 - \beta^2, \quad \varepsilon'' = 2\alpha\beta.$$

Показатели преломления и поглощения соответственно определяются выражениями;

$$\alpha = \sqrt{(\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} + \varepsilon') / \sqrt{2}} \quad \text{и} \quad \beta = \sqrt{(\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} - \varepsilon') / \sqrt{2}}.$$

Г.С. Бордонский. Характеристики микроволновых свойств пресных ледовых покровов при пластической деформации // 2014. Криосфера Земли, 2014, Т. 18, № 2, с. 24–30

В.М. Котляков, Ю.Я. Мачерет, А.В. Сосновский, А.Ф. Глазовский.

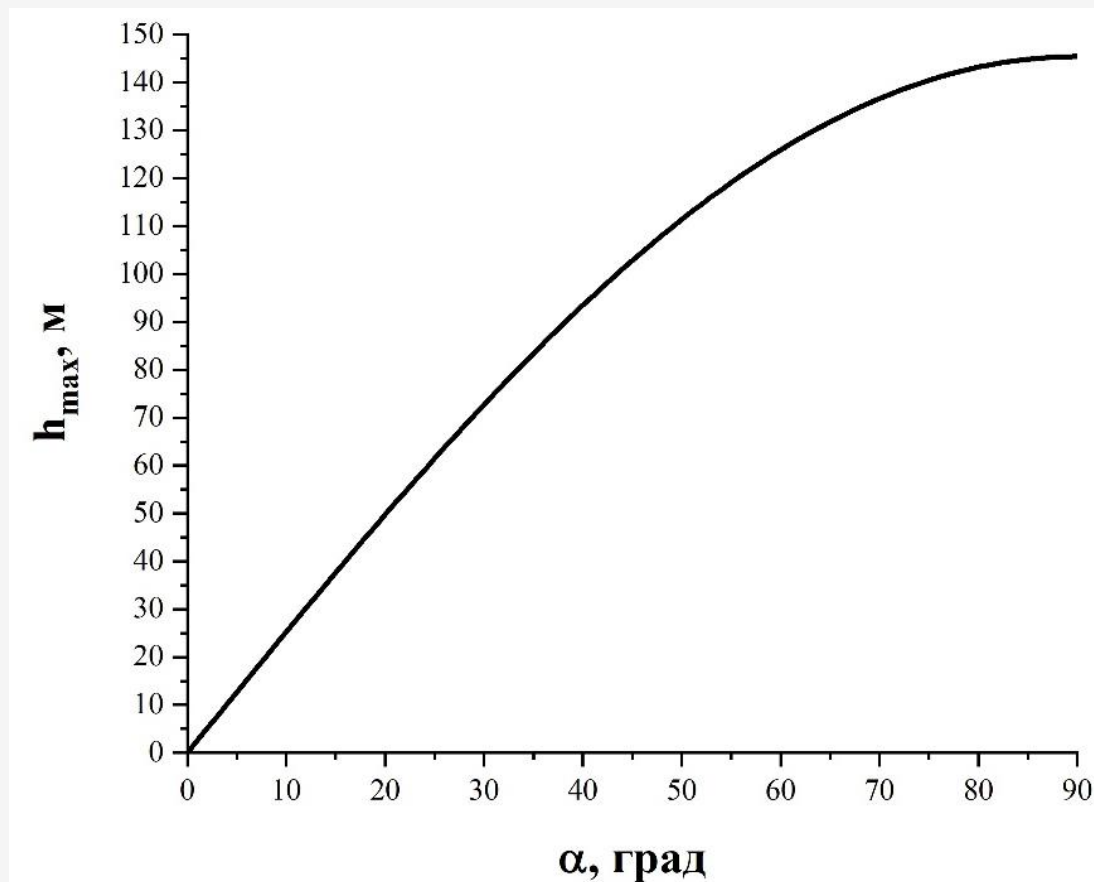
Скорость распространения радиоволн в сухом и влажном снежном покрове // 2017 Лёд и Снег. Т. 57, № 1. С 45-56.



## Максимальная высота инструмента

Высота антенны ограничена временем когерентности прямого и отраженного сигналов. Время когерентности определяется как разность хода обоих сигналов ( $\Delta r$ ), делённая на скорость света ( $c$ ), и должна быть меньше времени микросхемы спутника  $\tau_c = 1 \text{ мс} / 1023 = 0,97 \text{ мкс}$ .

$$h_{max} \leq \frac{0.97 * 10^{-6} * c * \sin \alpha}{2}$$





## Пространственное разрешение

Согласно принципу Кирхгофа, поле волны, отраженной от земной поверхности, формируется на антенне токами, возбуждаемыми падающей волной на поверхности в области, ограниченной первой зоной Френеля, которая является зондируемым участком. Расстояние от антенны до центра первой зоны Френеля на поверхности зондируемого объекта может быть оценено по формуле:

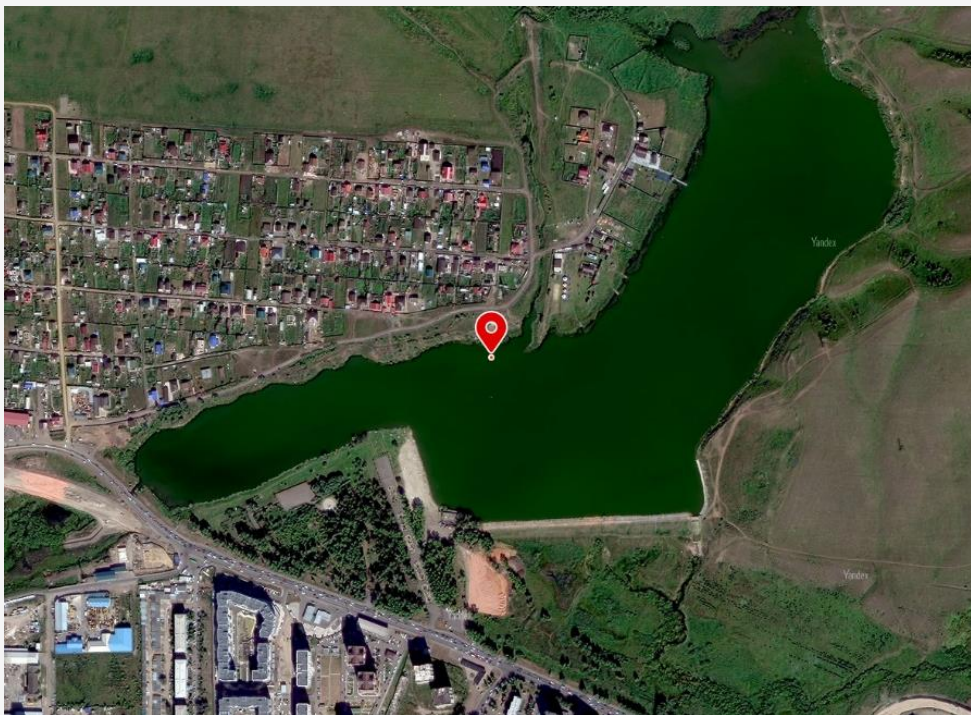
$$\rho_c = h \tan \theta$$

где  $h$  – высота фазового центра антенны.  $\theta$  - зенитный угол спутника ГНСС ( $\theta = 90^\circ - \alpha$ ). Первая зона Френеля ограничена эллипсом с большой,  $a$ , и малой,  $b$ , полуосями

$$a = \frac{\sqrt{h \sin \alpha}}{\sin^2 \alpha}, b = \frac{\sqrt{h \sin \alpha}}{\sin \alpha}$$



## Тестовая площадка и оборудование



**Приемник НСРП-04, Антенны с право круговой поляризации; Штатив для антенны;  
Место проведения – оз. Бугач, г. Красноярск**

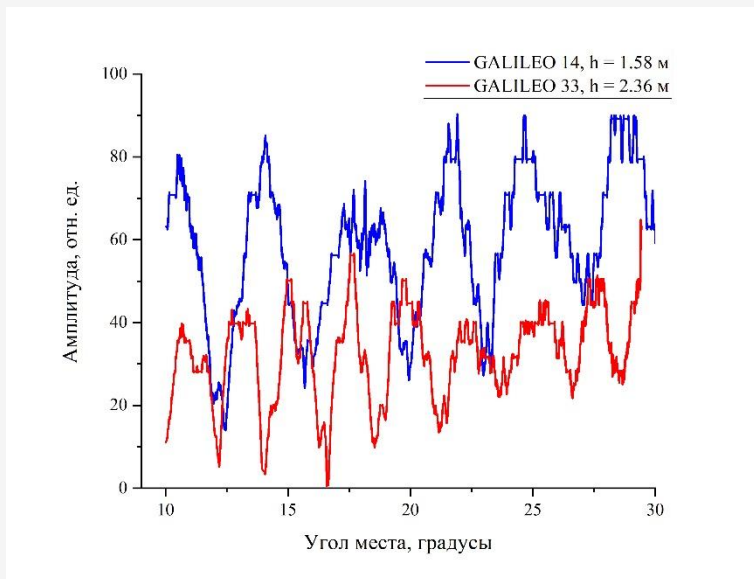


## Серия экспериментов

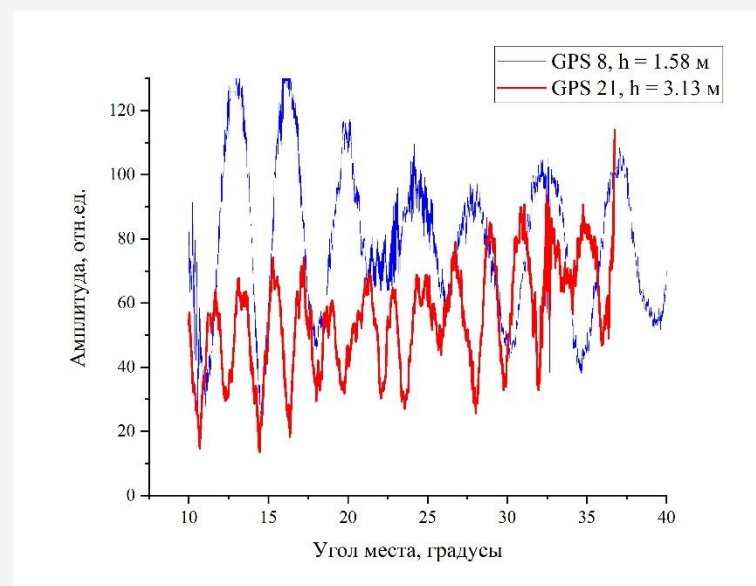
Дата проведения	Высота фазового центра антенны, м	Толщина льда, м	Время сеанса
07.12.2022	3,18	~0,4	2:7:10
22.12.2022	3,18	~0,51	2:37:15
15.03.2023	1,58	~ 0,95	1:28:30
	2,36		1:24:45
05.04.2023	1,58	~ 0,9	1:52:32
	3,13		1:27:42
21.04.2023	1,58	0,68 – 0,78	1:35:29
	3,13		1:17:45



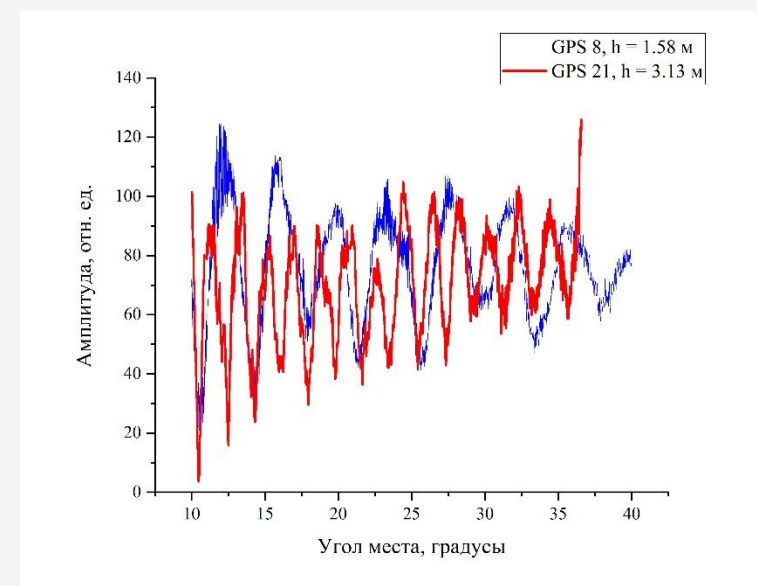
# Интерференционные рефлектограммы



**15.03.2023**



**05.04.2023**



**21.04.2023**





# Обработка результатов

объекта

Опорные точки: Склон от севера к югу 15 с уменьшением к месту расположения антенн.

Кто добавил: Харламов

Выбрать файл для заполнения | Сохранить карточку эксперимента | Удалить эксперимент

GLONASS\_1

GLONASS\_14

GLONASS\_15

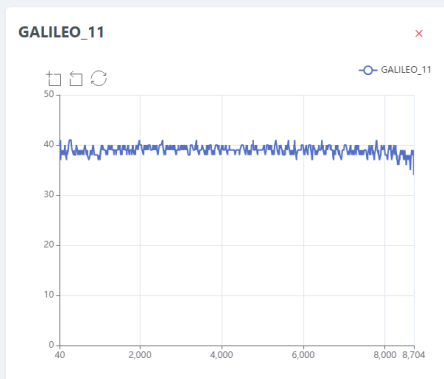
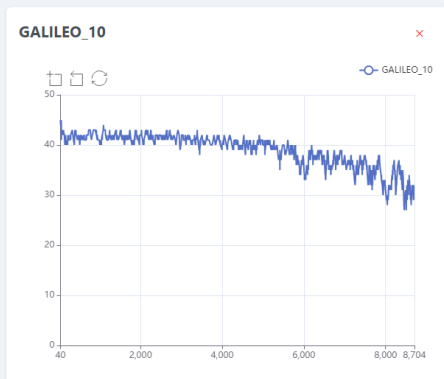
GLONASS\_17

GLONASS\_18

Добавить свой график | Очистить графики

Единичный  Множественный

ДБ от номера кадра



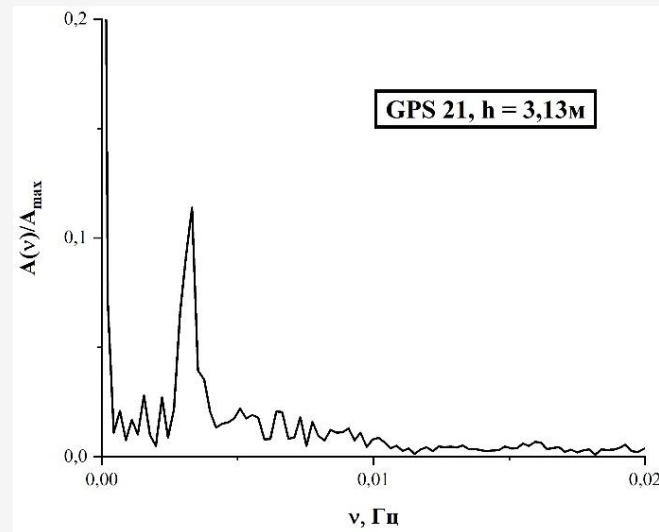
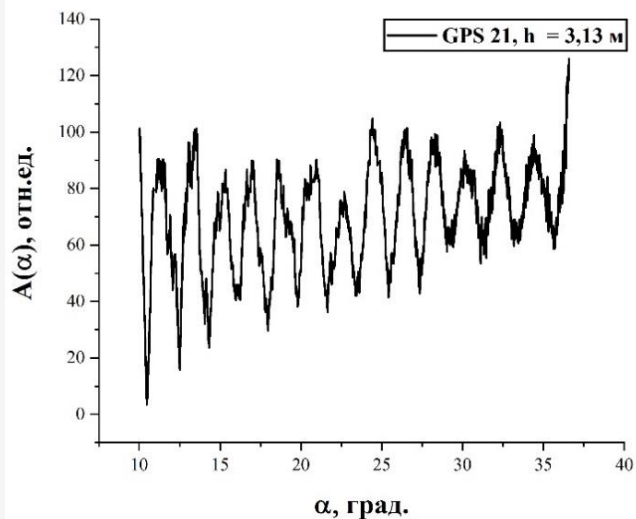
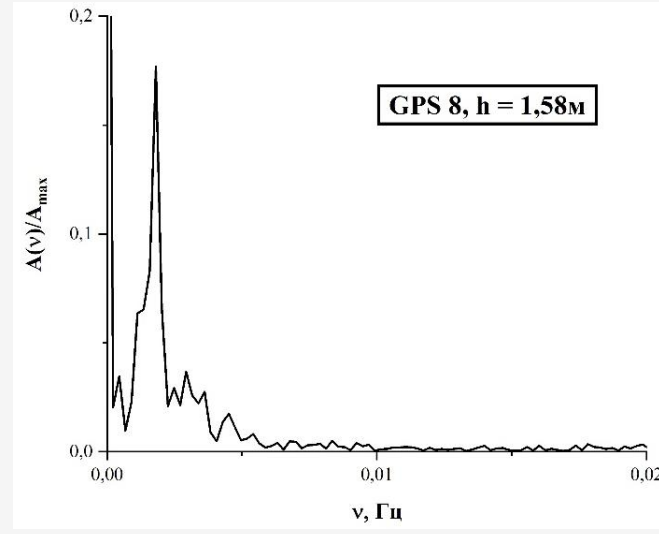
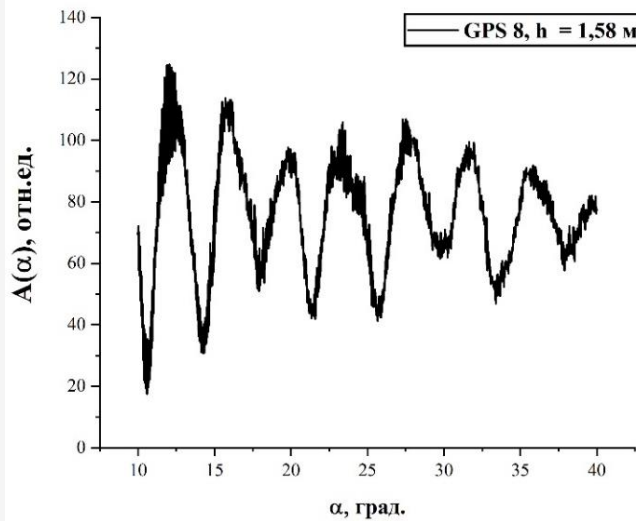
Первичная обработка была произведена с помощью облачного сервиса первичной обработки данных. Были отфильтрованы и подобраны наиболее подходящие сеансы регистрации для дальнейшего анализа по следующим критериям: диапазон азимута лежит в диапазоне сканирования зондируемого объекта и одинаковый угол места во всех сеансах (в нашем случае от  $10^\circ$  до  $40^\circ$ ).

Дальнейшая математическая обработка осуществлялась с помощью пакета OriginPro





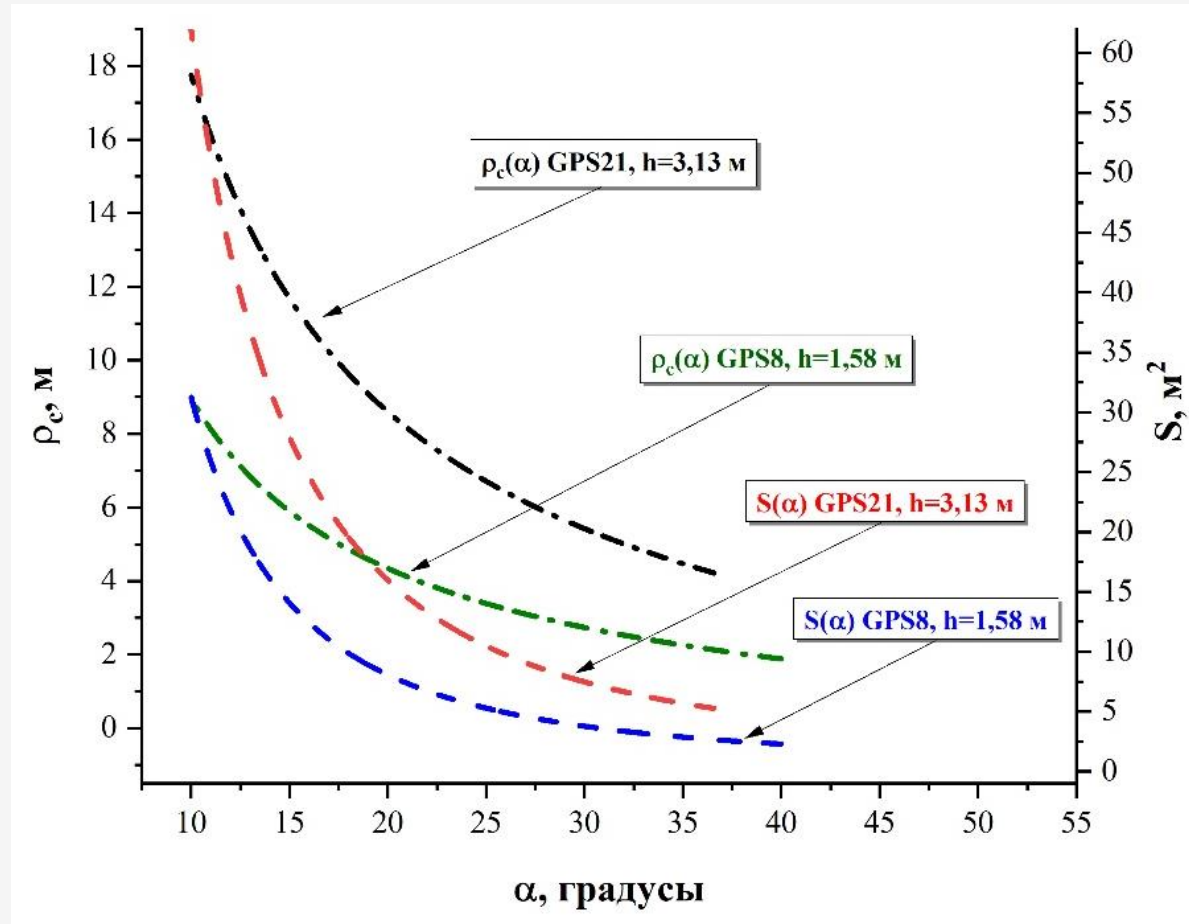
# Обработка с помощью быстрого Фурье-преобразования



- Среднее значение амплитуды: для спутника GPS 8 ( $h=1,58$  м) - 76,08757, а для GPS 21 ( $h=3,13$  м) – 70,32571
- Изменение периода функции
- Для измерений с высотой приемной антенны 1,58м другие частоты (помимо основной) наиболее выражены чем с высотой 3,13м



# Разрешение метода



Результаты зависимости площади зондируемого участка от угла места  $S(\alpha)$  и расстояния до центра зондируемого участка от угла места  $\rho_c(\alpha)$



## Итоги и выводы

- Проведена серия тестовых измерений интерференционных рефлектограмм ледовых покровов озера вблизи города Красноярск в стационарном зимнем состоянии и весной, в период прогрева и таяния. Интервал толщин льда от 40 до 95 см.
- Измерения осуществлялись автономным приемник-регистратор НСРП-04, изготовитель ООО «Инжиниринговое бюро Феникс», г. Красноярск с использованием антенн, принимающих сигналы правой круговой поляризации. Приемные антенны устанавливались на льду. Высота расположения фазового центра антенн варьировалась в интервале 1,58 - 3,18 м.
- С увеличением высоты расположения антенны площадь зондируемой области увеличивается, но уменьшается диапазон углов места, при которых наблюдается интерференция.
- Изменения периода рефлектограммы из-за высоты антенны позволяет сократить временные затраты по проведению сеансов записи.
- После обработки рефлектограмм с помощью быстрого Фурье преобразования, сеансы с более низкой высотой антенны показывают лучшую информативность.



Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН, КНЦ СО РАН)

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**