



ФИЦ КНЦ СО РАН
Лаборатория космических систем и технологий

Мониторинг ледовых покровов с помощью сигналов навигационных спутников

Д.С. Макаров, Д.В. Харламов, А. В. Сорокин

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов

11–15 ноября 2019 года. Москва, ИКИ РАН

XVII Всероссийская Открытая конференция



Содержание

- Введение.
- Сухой и влажный лед.
- Рефракционная модель ледовых покровов.
- ГНСС-рефлектометрия (ГНСС-Р). Возможности метода в мониторинге ледовых покровов.
- Экспериментальные результаты тестового цикла ГНСС-Р ледового покрова от ледостава до таяния.
- Итоги и выводы.



Введение

- Цикл формирования ледовых покровов рек и озер Сибири от ледостава до полного завершения процесса таяния льда длится 5-6 и более месяцев.
- 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.**



Сухой и влажный лед

Кристалл (3.11.18 г.)



Кристалл + вода (31.03.19 г.)





Рефракционная модель ледовых покровов

Эффективная комплексная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$

Сухой лед (Частоты 1,-1,6 ГГц)

- Холодный лед, $t = -20\text{ }^\circ\text{C}$, $\epsilon' < 3,188$; $\epsilon'' \sim 0,003$
- Лед в диапазоне t от -20 до $0\text{ }^\circ\text{C}$, $3,197 + 0,06 t$; (субполярные ледники)
- Плотный лед при $t = 0\text{ }^\circ\text{C}$ $\epsilon' = 3,19 \pm 0,04$;

Вода (Частоты 1,-1,6 ГГц)

- Вода свободная при $t = 0\text{ }^\circ\text{C}$ $\epsilon' \sim 84$; $\epsilon'' \sim 10$
- Вода поверхностная (частично связанная) $\epsilon' < 84$; $\epsilon'' < 10$

Влажный лед как смешанный диэлектрик (вода + лед)

$$(\epsilon'_{вл})^\alpha = W_l (\epsilon'_l)^\alpha + W_v (\epsilon'_v)^\alpha$$

где W_l , W_v объемные доли льда и воды смеси вода + лед, α – коэффициент, варьируется от 0 до 1, определяется экспериментально или из теоретических предпосылок

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.

© А. В. Сорокин, Д.С. Макаров, Д.В. Харламов, 2019 г.



Рефракционная модель ледовых покровов

Комплексный показатель преломления среды n (Частоты 1,-1,6 ГГц)

$$n = \alpha + i\beta = \sqrt{\varepsilon},$$

где α – коэффициент преломления, β – показатель поглощения модельной среды – влажного льда.

Вещественные и мнимые части комплексных значений ε и n связаны соотношениями:

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

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

Коэффициенты α и β влажного льда смесь свободной воды и «сухого» льда определяются в виде:

$$\alpha_{\text{вл}} = W_{\text{л}}\alpha_{\text{л}} + W_{\text{в}}\alpha_{\text{в}}, \quad \beta_{\text{вл}} = W_{\text{л}}\beta_{\text{л}} + W_{\text{в}}\beta_{\text{в}},$$

где $W_{\text{л}}$, $W_{\text{в}}$ объемные доли льда и воды в смеси вода + лед.

Существенные различия α и β воды и льда являются чувствительными параметрами отражательных и рассеивающих характеристик ледяных покровов.



Аналитические ресурсы излучения ГНСС в мониторинге земной поверхности

Начало. Радиометрия поверхности океана и определение скорости волн и ветра. Martin-Neira M. A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to ocean altimetry, // ESA Journal, 1993, vol.17. – P. 331-355

Развитие. Анализ отраженного и рассеянного излучения аппаратов ГНСС. Сформировано научное направление GNSS –Reflectometry (GNSS-R). Jin S., Cardellach E., Xie F. GNSS Remote Sensing - Springer Dordrecht Heidelberg, **New York, London. - 2014. - 286 p**

Приложения.

- Определение влажности почвы, растительных покровов;
- Восстановление рельефа отражающей поверхности, толщины и состояния ледовых покрытий водоемов, снежных слоев;
- Состояния и соленость поверхности океана;
- Непрерывный мониторинг состояния ионосферы и атмосферы.



ГНСС и формат данных

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

	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



Соотношения геометрических параметров ледовых покровов и длины волны излучения ГНСС диапазона L1 (1,5 -1,6 ГГц)

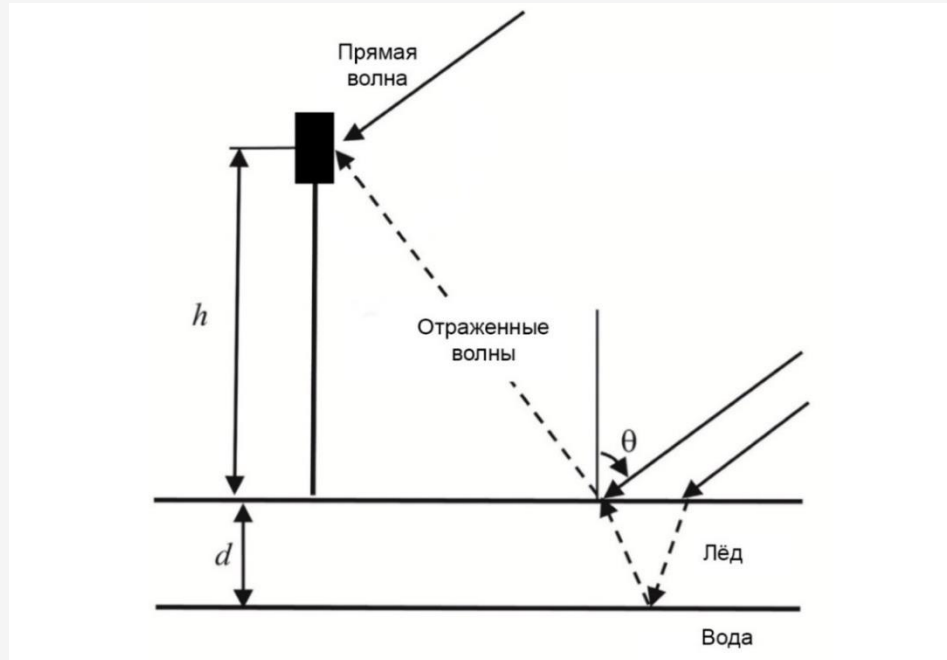
Характерные средние размеры:

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

Пресноводные водоемы России: $a/\lambda < 1$, $d/\lambda \sim$ или > 1



Схема формирования интерференционного сигнала на приемной антенне



$$R_{H,V}(\theta) = \frac{r_{л,H,V}(\theta) + r_{в,H,V}(\theta)e^{2ik_0dw_л}}{1 + r_{л,H,V}(\theta)r_{в,H,V}(\theta)e^{2ik_0dw_л}},$$

$$r_{л,V}(\theta) = \frac{\epsilon_л \cos \theta - \sqrt{\epsilon_л - \sin^2 \theta}}{\epsilon_л \cos \theta + \sqrt{\epsilon_л - \sin^2 \theta}}, \quad r_{в,V}(\theta_1) = \frac{\epsilon_в \cos \theta_1 - \sqrt{\epsilon_л} \sqrt{\epsilon_в - \epsilon_л \sin^2 \theta_1}}{\epsilon_в \cos \theta_1 + \sqrt{\epsilon_л} \sqrt{\epsilon_в - \epsilon_л \sin^2 \theta_1}},$$

$$r_{л,H}(\theta) = \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon_л - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon_л - \sin^2 \theta}}, \quad r_{в,H}(\theta_1) = \frac{\epsilon_л \cos \theta_1 - \sqrt{\epsilon_в - \epsilon_л \sin^2 \theta_1}}{\epsilon_л \cos \theta_1 + \sqrt{\epsilon_в - \epsilon_л \sin^2 \theta_1}},$$

где $r_{л,H,V}(\theta)$ и $r_{в,H,V}(\theta)$ – коэффициенты отражения Френеля от границы «воздух – лёд» и «лёд – вода», k – волновое число в слое льда, d – высота ледового покрова, h – высота антенны над поверхностью льда; θ – угол падения электромагнитной волны, приходящей от навигационного спутника.

М.И. Михайлов, К.В. Музалевский, В.Л. Миронов. Измерение толщины льда на пресноводном пруде и реке. с использованием сигналов ГЛОНАСС и GPS. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 167–174



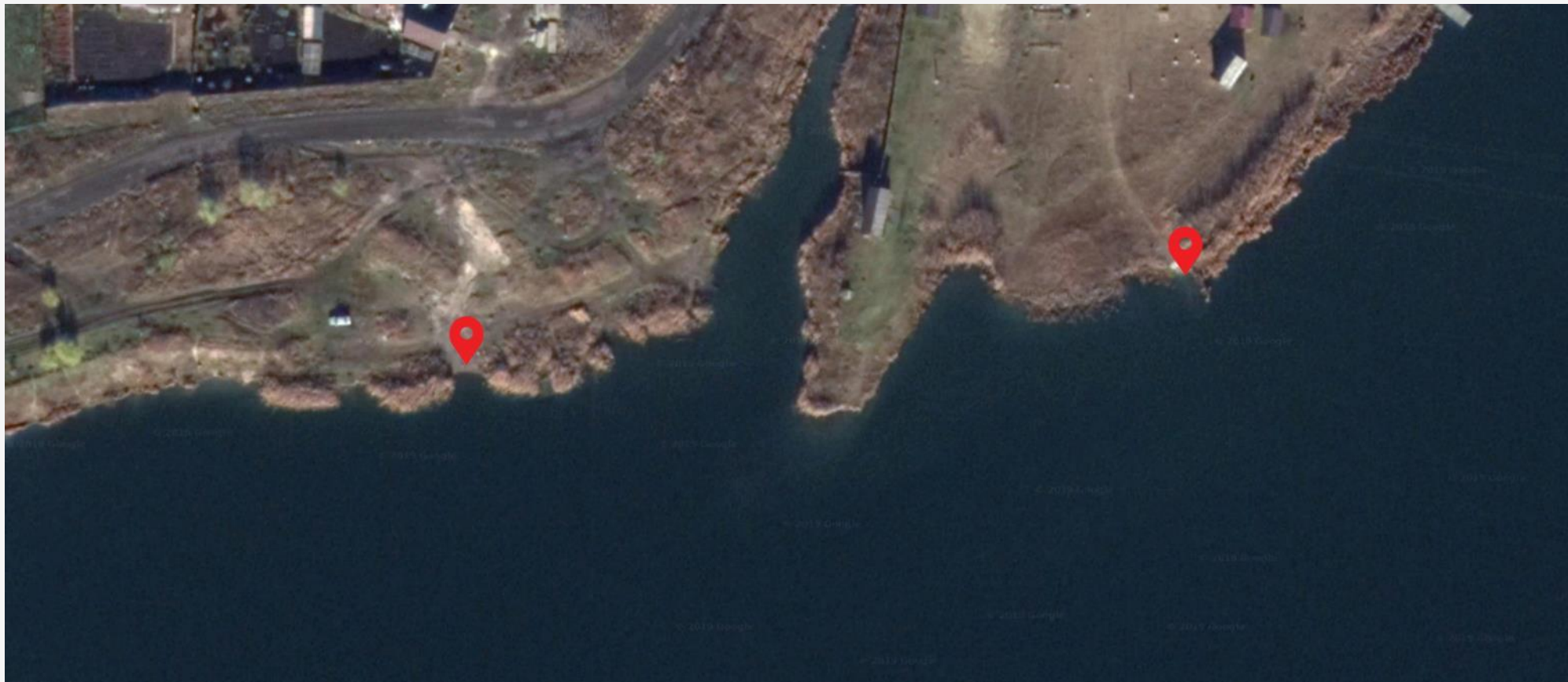
Оборудование



- Приемник – МРК-32Р, изготовитель НПО «Радиосвязь», г. Красноярск ;
- Портативный специализированный четырех канальный приемник-регистратор НСРП-04, изготовитель ООО «Инжиниринговое бюро Феникс», г. Красноярск;
- Комплект антенн приема сигналов с линейной и правокруговой поляризации;
- Ноутбук;
- Мачта размещения антенн и приемника НСРП-04.



Тестовая площадка



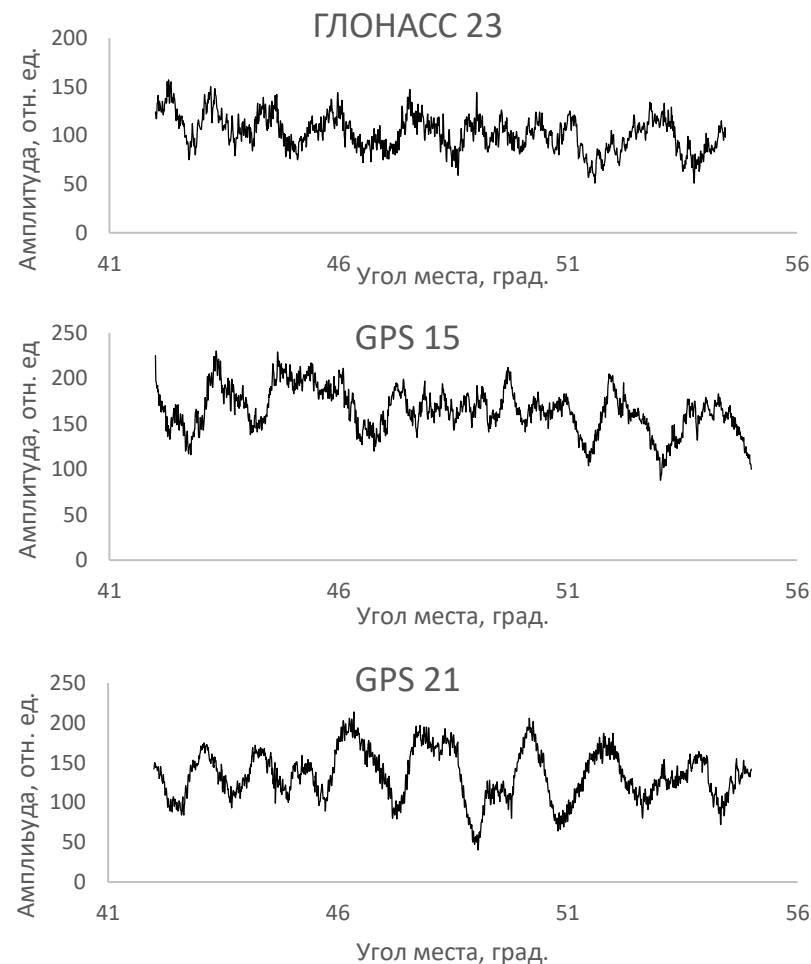
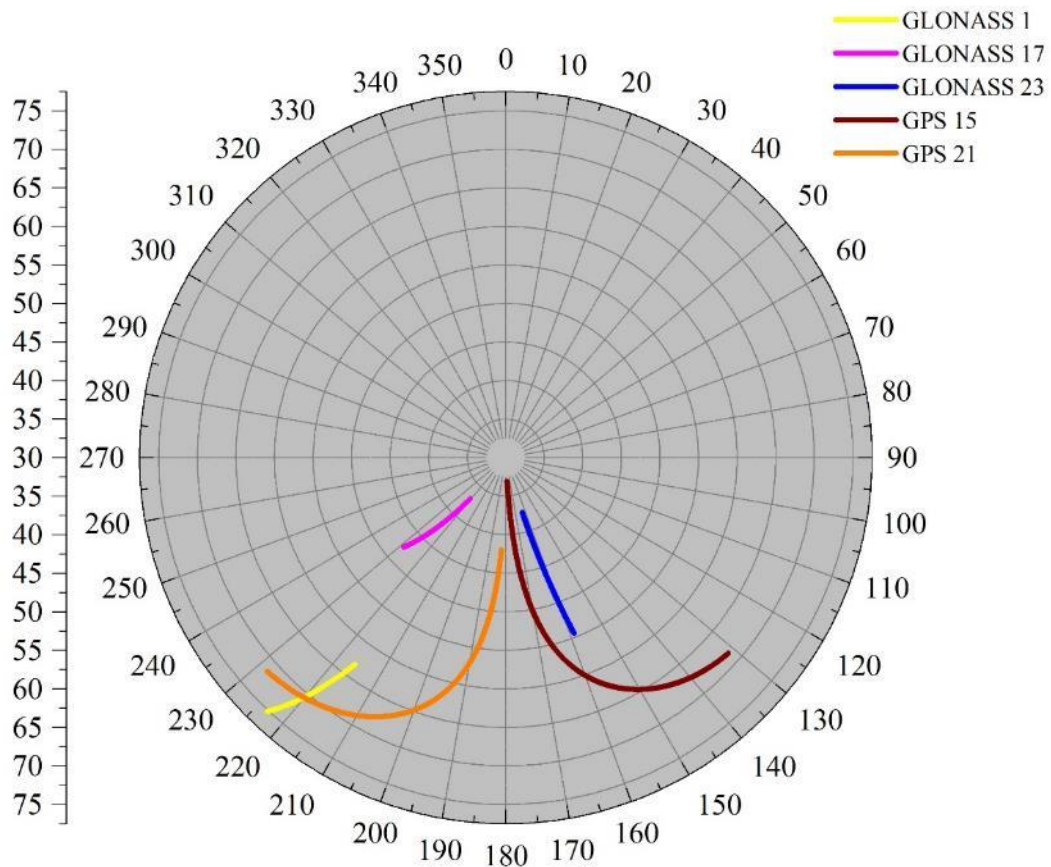


Сцена регистрации интерференционных рефлектограмм 3.11.18 г. ($d = 4,2$ см)





Интерференционные рефлектограммы и полярные диаграммы спутников (3.11.18 г.)



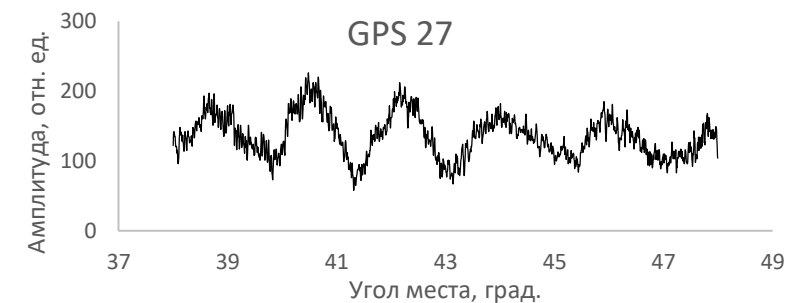
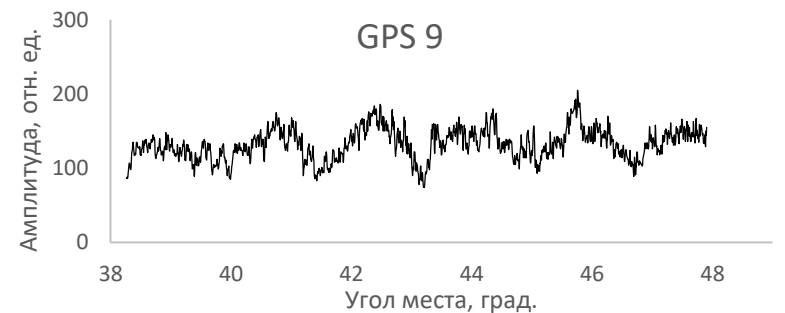
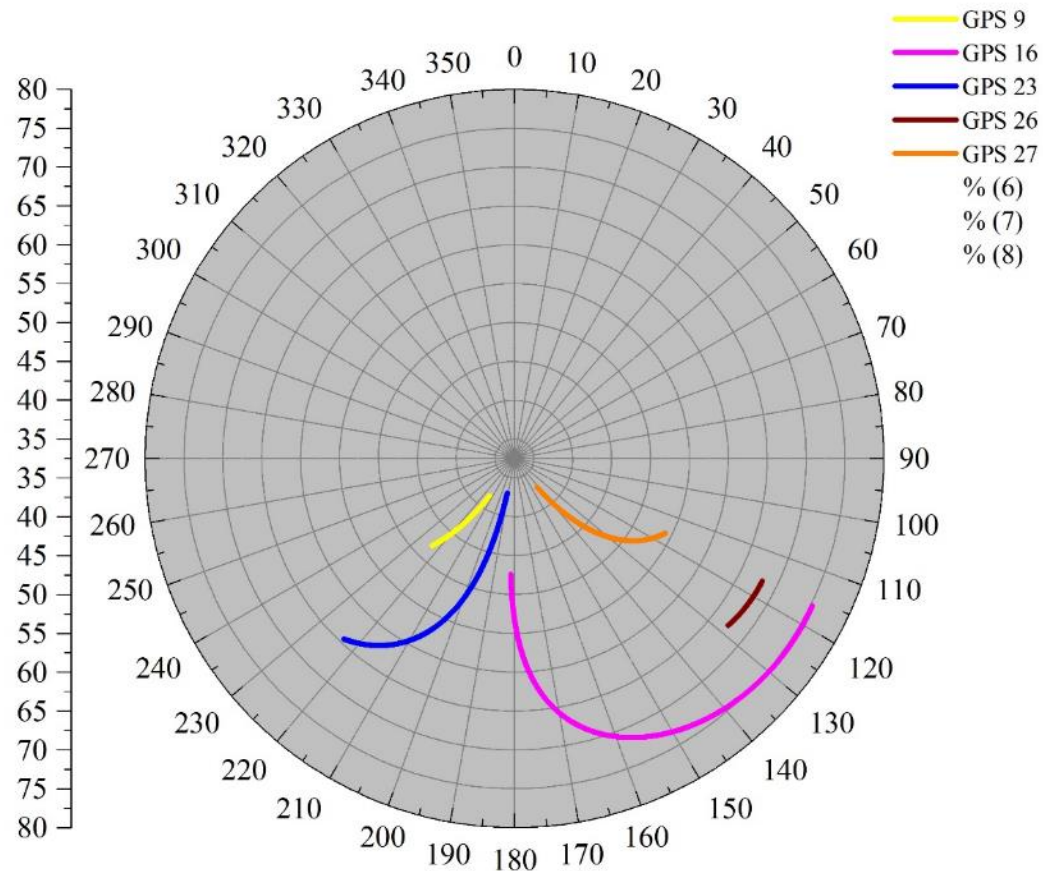


Сцена регистрации интерференционных рефлектограмм 31.03.19г. ($d = 105$ см)





Интерференционные рефлектограммы и полярные диаграммы спутников (31.03.19 г.)



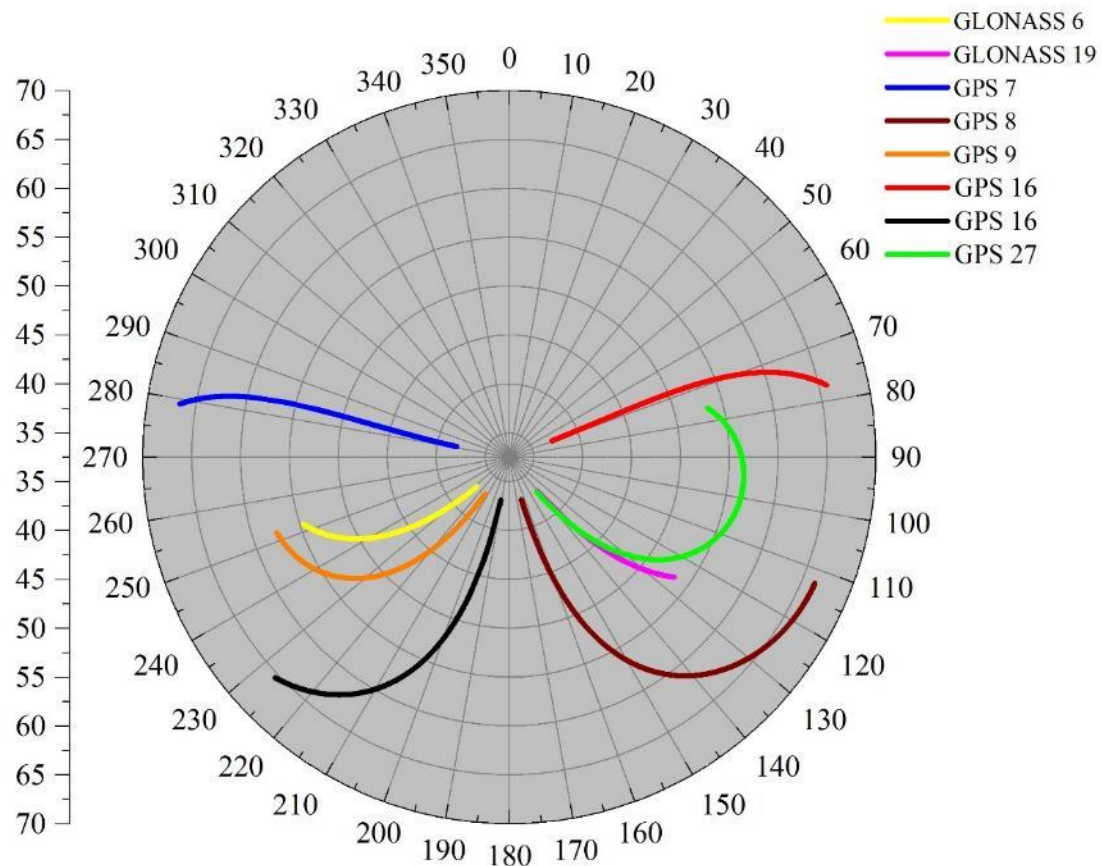


Сцена регистрации интерференционных рефлектограмм 20.04.19 г. ($d \leq 1\text{ м}$)



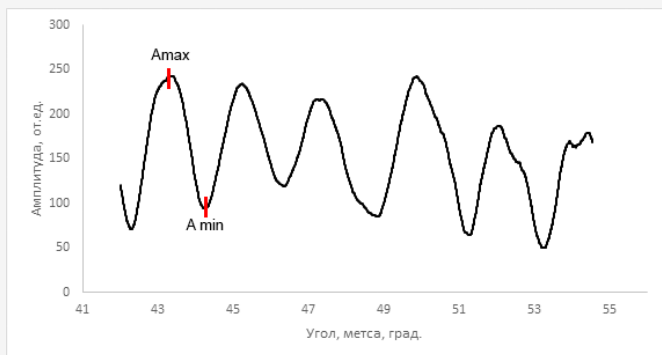
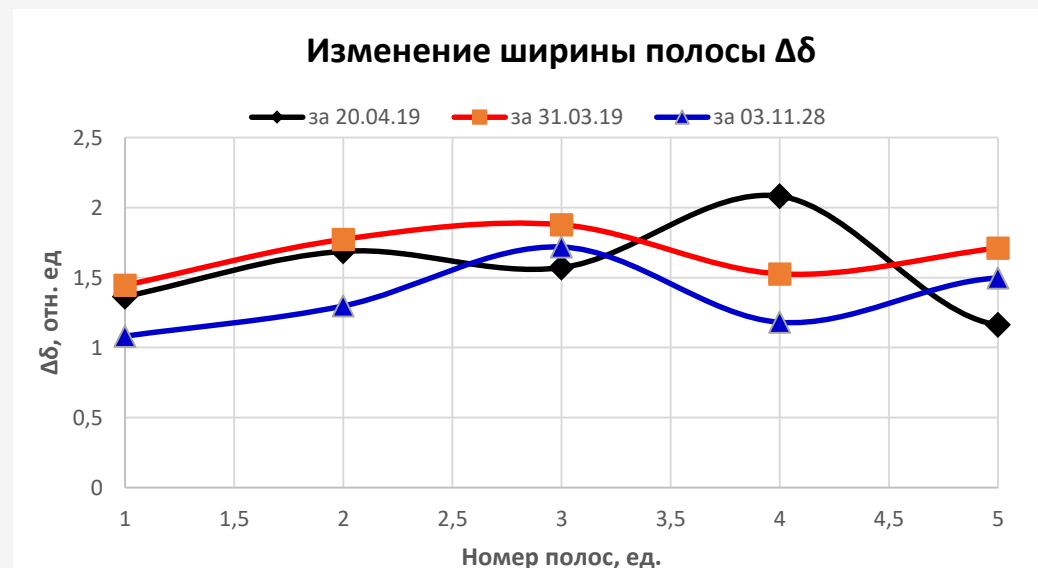
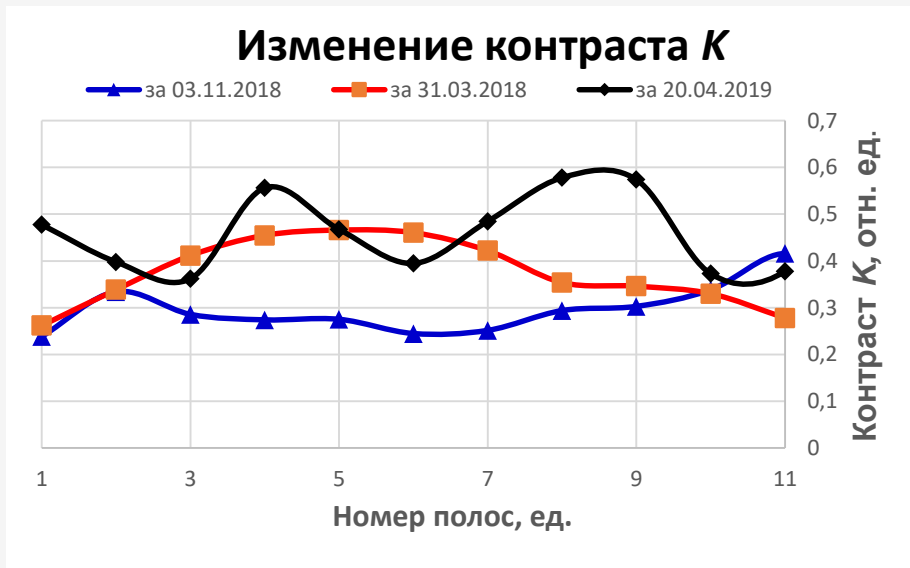


Интерференционные рефлектограммы и полярные диаграммы спутников (20.04.19г.)





Изменение контраста и ширины полос интерферограмм



$$K = \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max} + A_{min}}$$



Возможность мониторинга состояние ледового покрова

<i>Изменяемые характеристики интерференционных рефлектограмм</i>	<i>Параметры состояния ледового покрова</i>
<ol style="list-style-type: none">1. Зависимости ширин и контраста интерференционных полос от регистрируемых в массиве данных углов возвышения и азимута навигационных спутников.2. Координатная привязка места отражения от ледового покрова – полярная диаграмма траектории спутника.	<ol style="list-style-type: none">1. Толщина льда.2. Объемная влажность льда.3. Шероховатость поверхности.4. Объемные неоднородности, трещины5. Поверхностные слои снега, воды.

- Сканирование сигналами навигационных спутник ледяных покровов позволяет получить набор интерферограмм с координатной привязкой участка сканирования относительно точки расположения антенны*.
- Зависимости контраста и ширин интерференционных полос связаны с коэффициентом преломления α и показателем поглощения β ледяного покрова, чувствительными к появлению жидкой и связанной воды в объеме льда.
- Возможно восстановление количества воды в объем льда на основе рефракционной модели с учетом особенностей динамики процессов фазового перехода кристаллического льда в жидкое состояние в пресных и соленых водоемах.

* Пат. 2 682 718 Российской Федерации. МПК G01S 19/03 (2010.01) Способ определения коэффициентов погонного ослабления сигналов навигационных космических аппаратов в лесном массиве с координатной привязкой // Макаров Д.С., Савин И.В., Сорокин А.В., Фомин С.В. Харламов Д.В. № 2018119448; заявл.25.05.2018; опубли. 21.03.2019, Бюл. № 9. 8 с.



Итоги и выводы

- Проведена серия тестовых измерений интерференционных рефлектограмм ледовых покровов озера вблизи города Красноярск в стадии ледостава (октябрь-ноябрь), стационарном зимнем состоянии (март) и весной, в период прогрева и таяния (апрель). Интервал толщин льда от 4,2 до 105 см.
- Измерения осуществлялись серийным приемником МРК-32Р производства НПО «Радиосвязь» и автономным приемник-регистратор НСРП-04, изготовитель ООО «Инжиниринговое бюро Феникс», г. Красноярск с использованием антенн, принимающих сигналы линейной и правой круговой поляризации. Приемные антенны устанавливались на льду вблизи берега. Высота расположения фазового центра антенн варьировалась в интервале 3,8 - 4,4 м.
- Выявлена зависимость контраста и ширины интерференционных полос рефлектограмм от влажности льда, связанной с весенним прогревом ледяного покрова.
- Предложен вариант мониторинга состояния весеннего льда на основе регистрации интерференционных рефлектограмм и восстановления объемной влажности тающего («весеннего») льда с координатной привязкой.



ФИЦ КНЦ СО РАН
Лаборатория космических систем и технологий

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!