



ФИЦ КНЦ СО РАН
Лаборатория космических систем и технологий

Рефлектометрия динамики сезонных состояний ледовых покровов с использованием сигналов L1-диапазона навигационных спутников.

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

**Восемнадцатая Всероссийская Открытая конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА
(Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально
опасных явлений и объектов)»**

16 - 20 ноября 2020 г., г. Москва, Институт космических исследований РАН



Содержание

Введение

- Диэлектрические свойства льда.
- Рефлектометрия с использованием Глобальных Навигационных Спутниковых Систем (ГНСС-Р, GNSS-R).
- Измерительная аппаратура и обработка данных: антенны, приемники, программное обеспечение.
- Примеры интерференционных рефлектограмм ледовых покровов пресноводного водоема.
- Мониторинг состояния ледового покрова.

Итоги и выводы



Введение

- Длительность цикла формирования ледовых покровов рек и озер Сибири в естественных состояниях от ледостава до полного завершения процесса таяния длится 5-6 и более месяцев.
- Практическое использование ледовых покровов достаточно развито: ледовые переправы, зимники, наледи на реках, профессиональный и любительский подледный лов.
- Известно, что весной ледовый покров даже при значительной зимней толщине становится менее прочным, его кристаллическая структура насыщается водой.
- Задача бесконтактного мониторинга состояния ледовых покровов представляется востребованной и актуальной.
- Решение данной задачи возможно с использованием доступных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС, GPS и GALILEO методом ГНСС-рефлектометрии. Регистрация амплитудных вариаций отраженных сигналов навигационных спутников от ледового покрова позволяет восстанавливать динамику электрофизические характеристик льда.



Образцы сухого и влажного льда

Кристалл

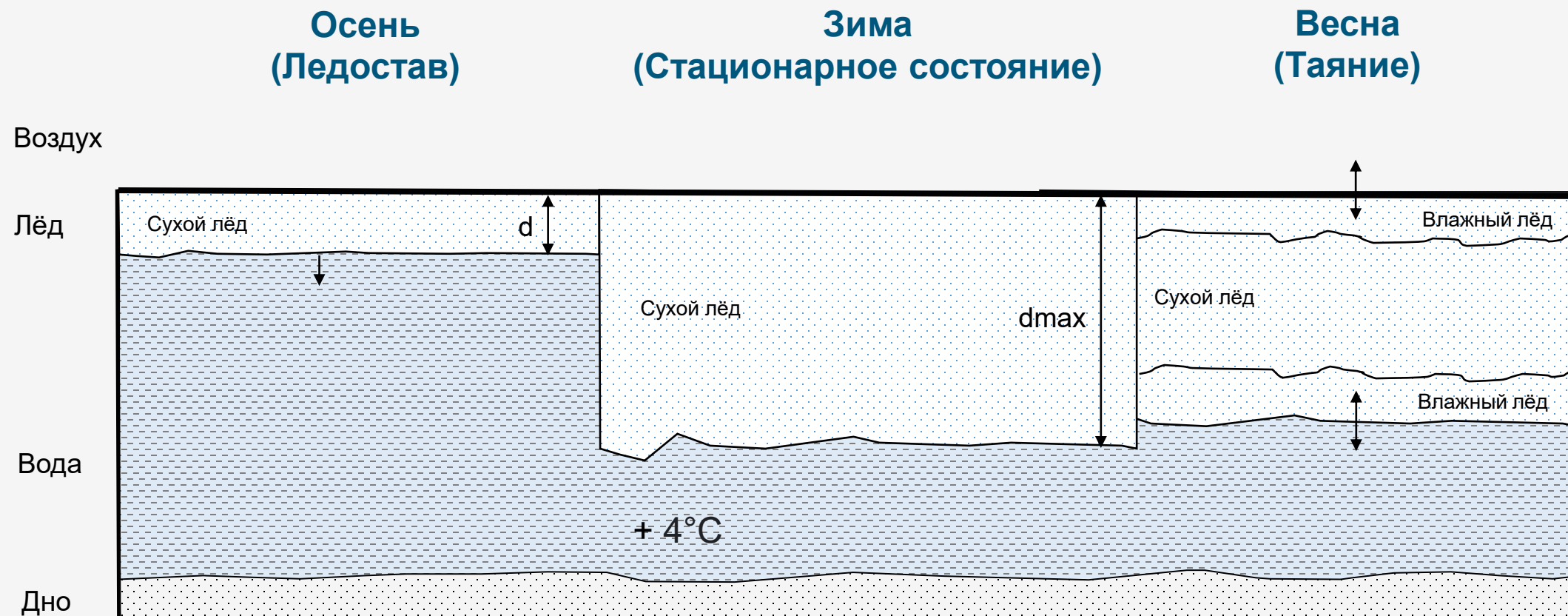


Кристалл + вода





Динамика озерного состояния льда



*Богородский В. В., Гаврило В. П. «Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии», Гидрометеоиздат, 1980 г.



Комплексная диэлектрическая проницаемость льда и воды $\epsilon = \epsilon' + i \epsilon''$

Сухой лед (Частоты 1,5 - 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 1,5 -1,6 ГГц)

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

Композитные среды: влажный лед как смешанные диэлектрики (вода + лед)

$$(\epsilon'_{\text{вл}})^\alpha = W_{\text{л}}(\epsilon'_{\text{л}})^\alpha + W_{\text{в}}(\epsilon'_{\text{в}})^\alpha$$

где $W_{\text{л}}$, $W_{\text{в}}$ объемные доли компонент смеси, α – коэффициент, варьируется от 0,3 до 1,; определяется экспериментально или из теоретических предпосылок



Сигналы ГНСС

- Сигналы ГНСС относятся к классу сигналов с расширенным спектром. Такие сигналы называют широкополосными или шумоподобными.
- В качестве «расширяющих» (порождающих) псевдослучайных последовательностей (ПСП) используются бинарные М-последовательности (511, ГЛОНАСС) и коды Голда (1023, GPS). Период ПСП: 1 мс.
- Вид модуляции: фазовая манипуляция (BPSK) и BOC-модуляция (частный случай BPSK, при умножении порождающих последовательностей на меандр).
- Частотные диапазоны: L1 (~ 1,5 ГГц), L2 (~1,2 ГГц) и другие.
- Поляризация: правая круговая.
- Различия длины **когерентности** сигнала: ГЛОНАСС – 600 м, GPS – 300 м.

Соотношения средних размеров структуры льдов пресноводных водоемы России

$$a / \lambda \ll 1, \quad d / \lambda < \text{или} > 1$$

элементы льда (d): толщины ледовых покровов водоемов - $1\text{см} < d < 1-2\text{ м}$;

размеры микрокристаллов льда и микрообъемов воды - $a \leq 1\text{см}$:

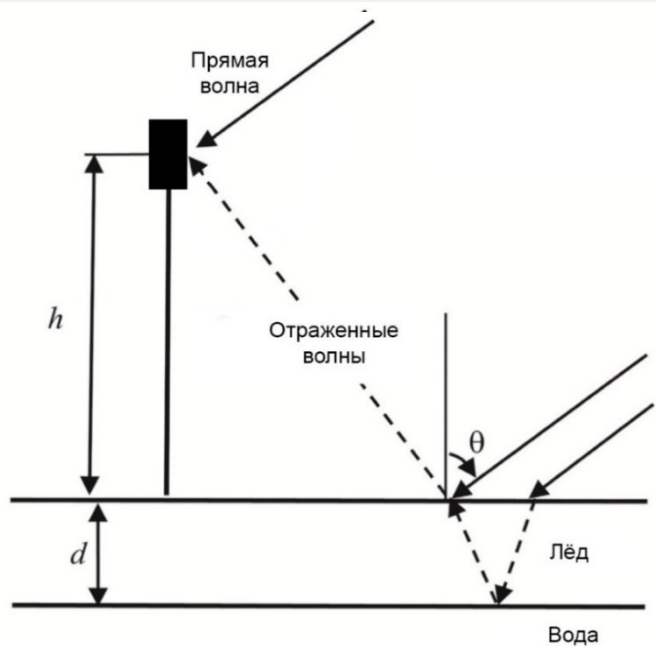
длины волн диапазона L 1 ГЛОНАСС и GPS $\lambda \sim 19\text{ см}$



Общие характеристики группировок ГНСС

Система/ Параметры	GPS USA	ГЛОНАСС СССР, РФ	Galileo ESA	Бэйдоу КНР	IRNSS Индия	QZSS Япония
Количество спутников	24	24	26	5 – геостац 27 – кругов 3 геосинх	7	4
Кол-во орбитальных плоскостей	6	3	3	1 геостац 3 круговые 1 геосинх	2 геосинх 1 геостац	2 квазизенит 1 геостац
Орбиты: угол наклона	55°	64,8°	56°	55°	29° геосинх 5° геостац	40° ... 47°
Высота орбит, км	20180	19100	23230	Гео- (стац, синх) 35786 Круговые 21528	Перигей 35712 Апогей 35876	Перигей 32000 Апогей 40000

Схема формирования интерференционного сигнала от ледового покрова 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 – лед» и «лед – 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



Рефлектометрия ледовых покровов



- 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 поляризаций;
- Ноутбук;
- Мачта размещения антенн и приемника НСРП-04.



МРК-32. Формат регистрируемых 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



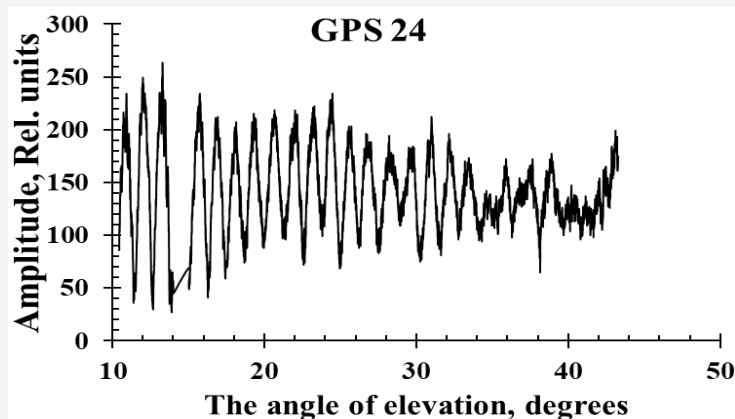
Серия экспериментов

#	Дата	Толщина льда, см	Приемника/Антенна	Время сеанса	Высота Антенны, м	Расположение относительно берега
1	02.04.17	64	МРК, штатная	04:08:16	3,9	7м от кромки берега,
2	03.11.18	4,2	МРК, дипольная	02:55:51	4,4	5 м от кромки берега,
3	31.03.19	105	МРК, дипольная	03:29:39	Дип Ан - 4,1	12 м от кромки берега
			ЧПР, АМ475 правокруговая, МРК штатная	04:45:35	АМ475 - 3,8 МРК - 3,4	
4	20.04.19	90	МРК, дипольная	03:04:17	3,9	На кромке берега, на деревянном настиле, глубина воды 0,5 м

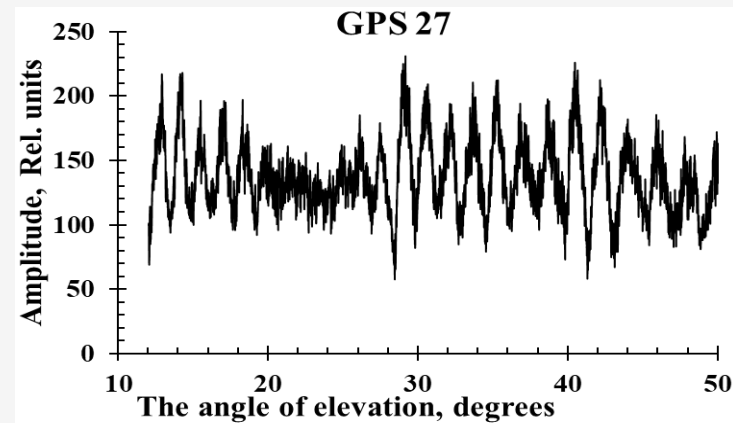


Интерференционные рефлектограммы

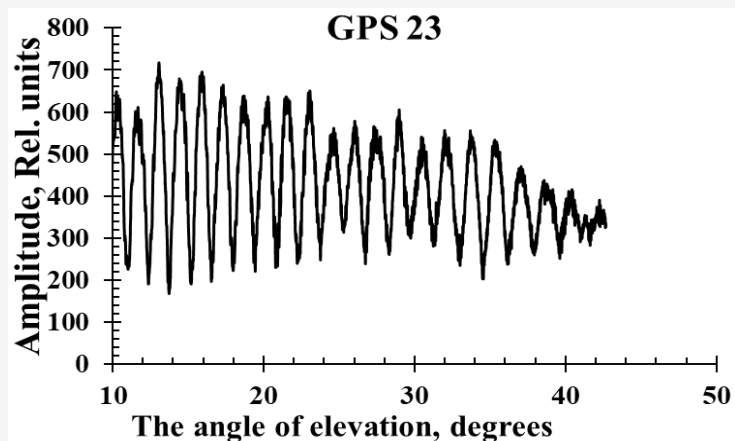
03.11.2018, толщина льда 4.2см (новообразованный лёд)



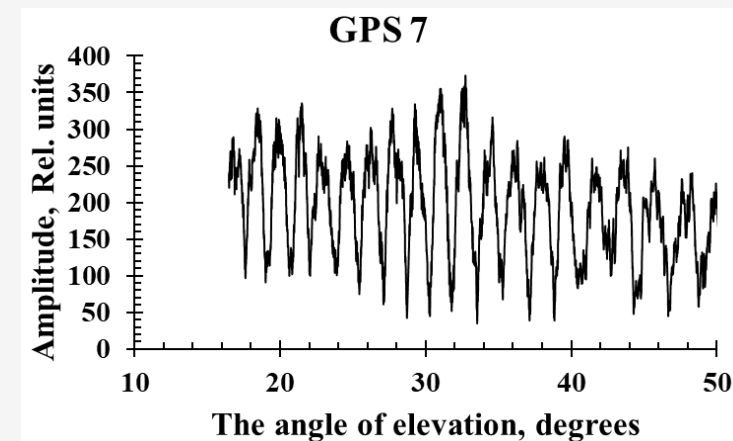
31.03.2019, толщина льда 105см (влажный лёд)



02.04.2017, толщина льда 64см(сухой лёд)



20.04.2019, толщина льда 80см (Сухой лёд + Вода)





Мониторинга состояние ледового покрова

<i>Измеряемые 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 и времени.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 и показателем поглощения 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.



Итоги и выводы

- Проведена серия регистраций интерференционных рефлектограмм (ИР) сигналов навигационных спутников от участка озера с ледовым покрытием в стадии ледостава, стационарном зимнем состоянии, а также в период прогрева и таяния.
- Выявлены особенности интерференционных эффектов в периоды ледостава, стационарного состояния льда (зимний период) и во время таяния (весенний период).
- Существенные различия комплексной диэлектрической проницаемости воды и льда проявляются в характеристиках ИР и могут быть использованы в качестве чувствительных параметров для восстановления прочностных характеристик льда.



ФИЦ КНЦ СО РАН
Лаборатория космических систем и технологий

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!