Санкт-Петербургский государственный университет

ИПФ РАН

Статистические характеристики отражённого сигнала X-диапазона при зондировании пресноводного и солёного льда в лабораторных условиях

Вичаре А.С. (1), Ковалдов Д.А. (2)

(1) СПбГУ

(2) ИПФ РАН

Актуальность и цель работы

Почему X- и Ka-диапазоны

- Обеспечивают высокое пространственное разрешение и широко используются в спутниковой радиолокации для мониторинг льда.

Цель:

- Сравнить X-диапазона (статистические параметры)в процессе замерзания для пресноводного и соленого льда.
- Угловые зависимости сигналов X-диапазона в процессе замерзания для пресноводного и соленого льда.

Экспериментальная установка

- **Комплексная установка**
  1. **Подводный ультразвуковой сонар**
  2. **Радар X-диапазона**
  3. **Радар Ka-диапазона**
- **Место проведения -** Малый ледовый бассейн ААНИИ
- **Этапы и условия эксперимента**
  - Цикл замерзания и таяния

	Замерзания	Таяния
Пресноводный лед	декабрь 2024 г – январь 2025 г	январь 2025 г – марта 2025г
Соленый лед	октябрь – декабрь 2025 г	декабрь 2025г

Параметр	Пресный лед (2024–2025)	Соленый лед (2025)
Температура воздуха	$-10°C$ (замерзание), $+10°C$(таяние)	$-10°C$ (замерзание), $+10°C$(таяние)
Соленость воды	0‰	~ 35‰
Максимальная толщина	57 см	33 см
Срок замерзания	~ 45суток	~ 48суток
Срок Таяня	~ 45суток	~26 суток

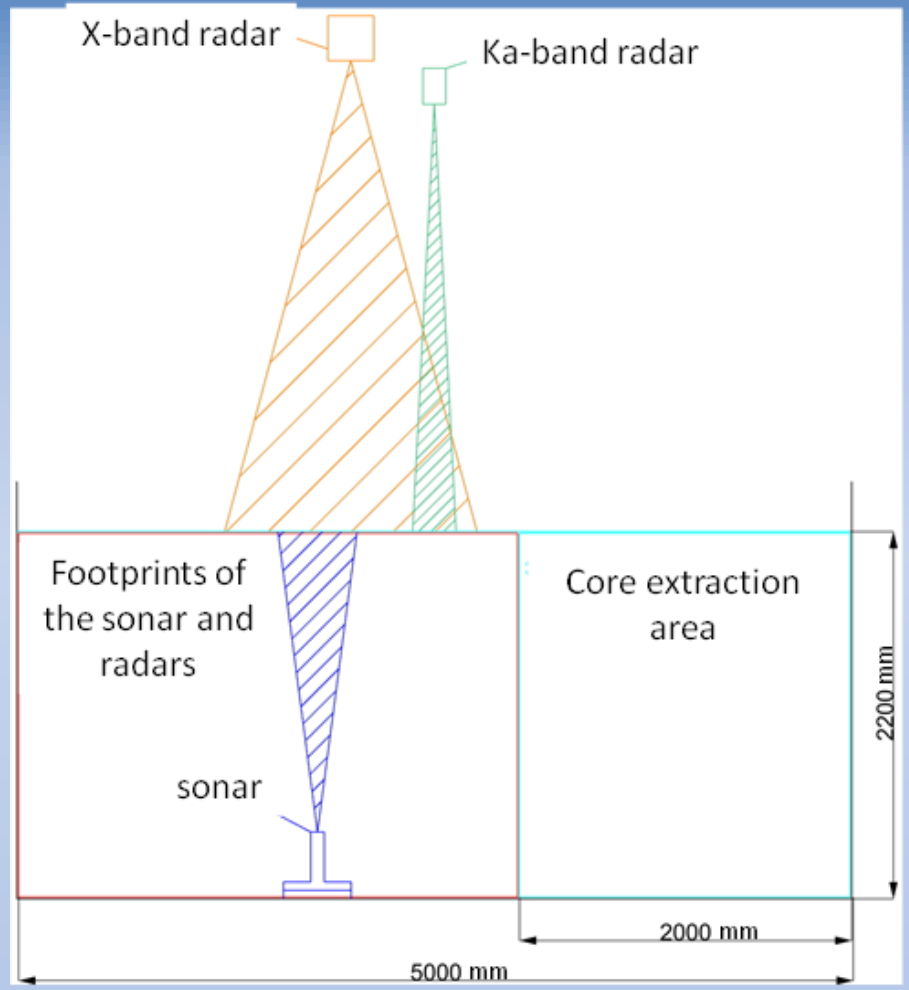


Схема установка

Kovaldov, D., Titchenko, Y., Karaev, V., Meshkov, E., **Vichare, A.,** Likhomanov, V., Chernov, A., & Wang, X. (2026). Laboratory study of ultrasonic pulse reflection from freshwater ice. The Journal of the Acoustical Society of America, 159(6), 5378–5387. https://doi.org/10.1121/10.0044143

Какие статистические характеристики

Что измеряли: Отраженные радиоимпульсы.

- Взвешенное среднее (Weighted Average)
  Среднее значение (центр тяжести отраженного импульса) отражённого сигнала

$$\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i$$

(Средняя амплитуда сигнала)

- Дисперсия (Variance)

$$\sigma^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2$$

- Асимметрия и Эксцесс (Asymmetry, Excess)

$$E = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^4}{\sigma^4} - 3$$

(Острота пика и аномалии)

- Интегральная интенсивность (Integral)

$$I \approx \sum_{i=1}^{N} x_i^2 \cdot \Delta t$$

(Полная энергия импульса)

- Максимальная амплитуда пика (Highest Peak)

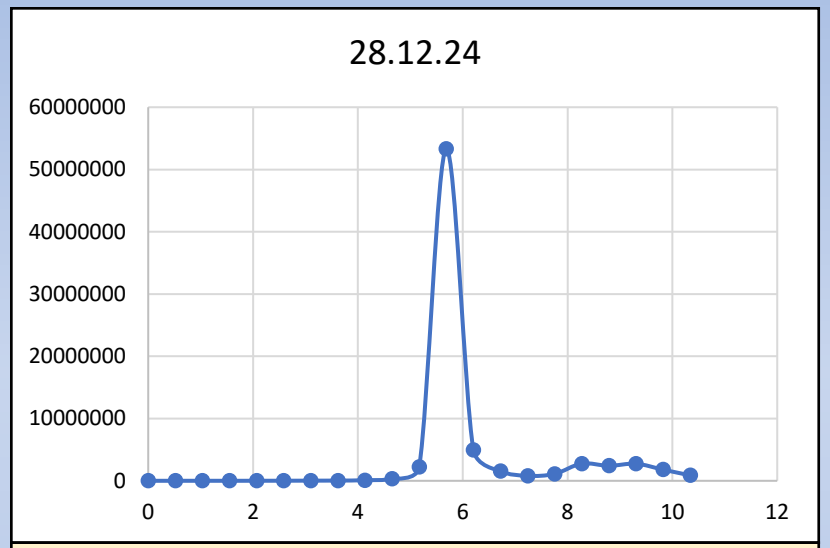
Результаты

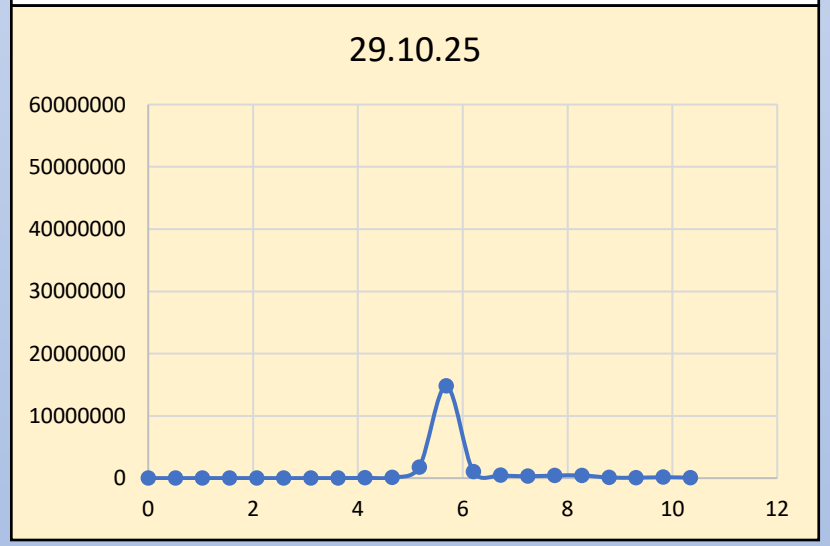
Одиночные Импульсы

Сравнение при одинаковой толщине льда в время замерзания

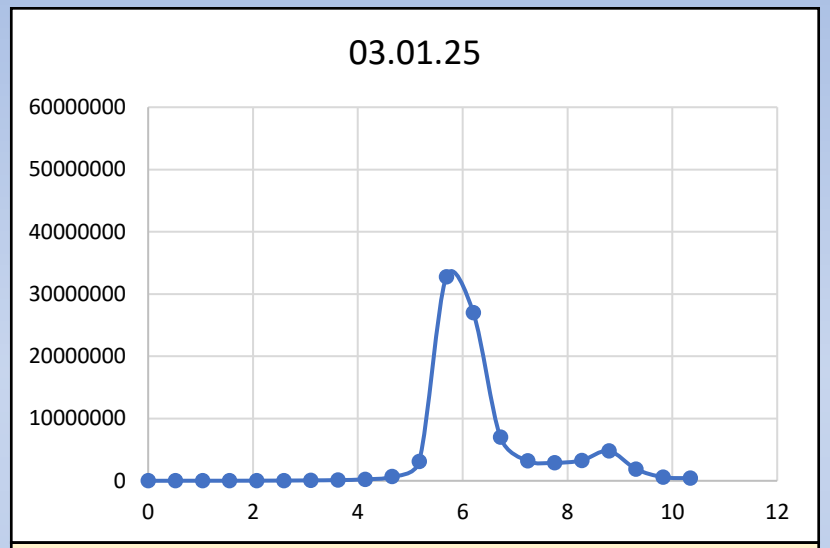
Максимальная толщина
Пресный – 57см
Соленый – 33см

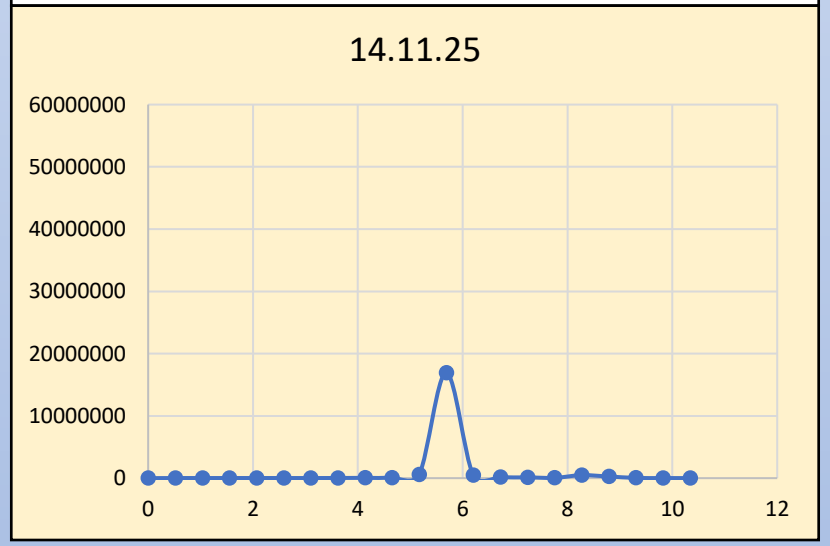
Толщина ~15–16 см

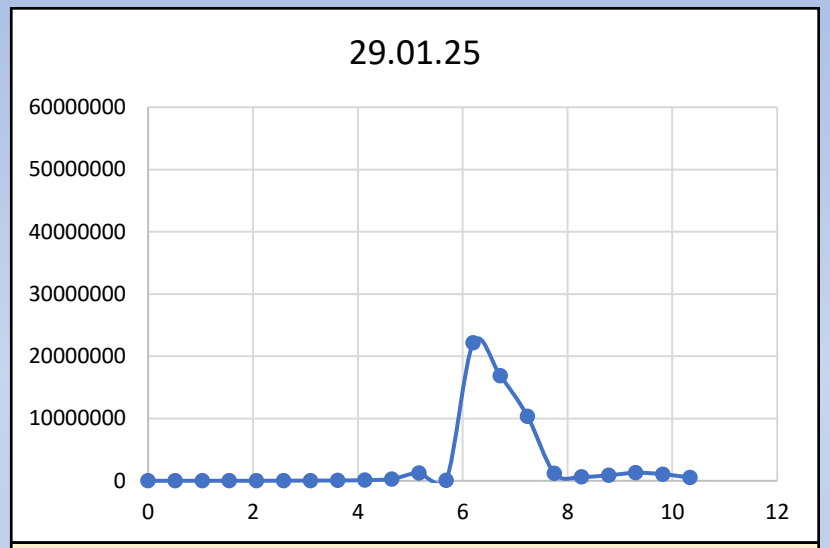


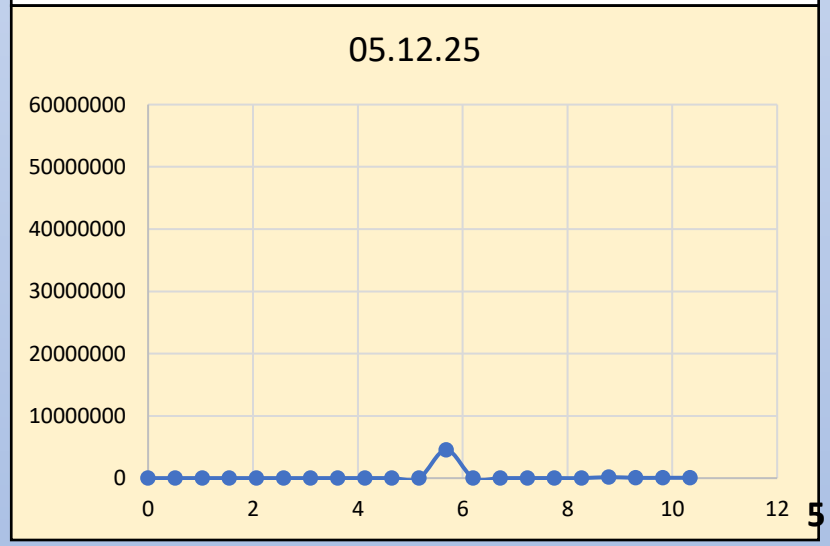


Толщина ~25–27 см:









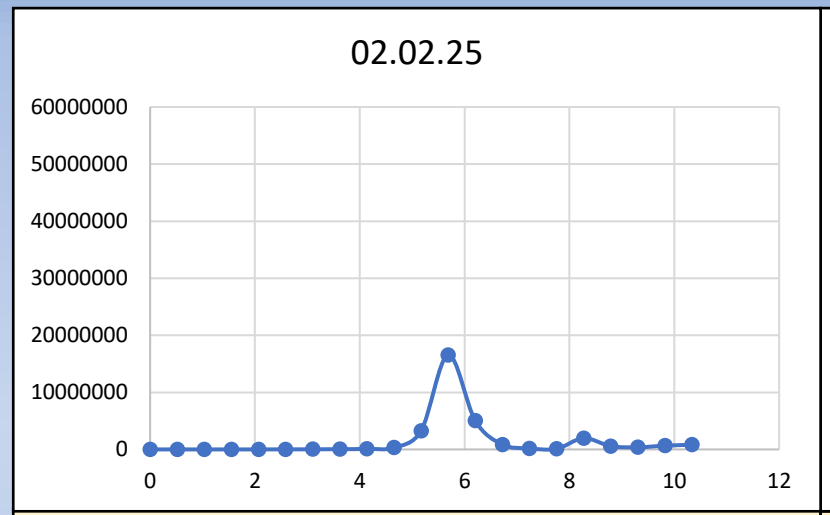
Результаты

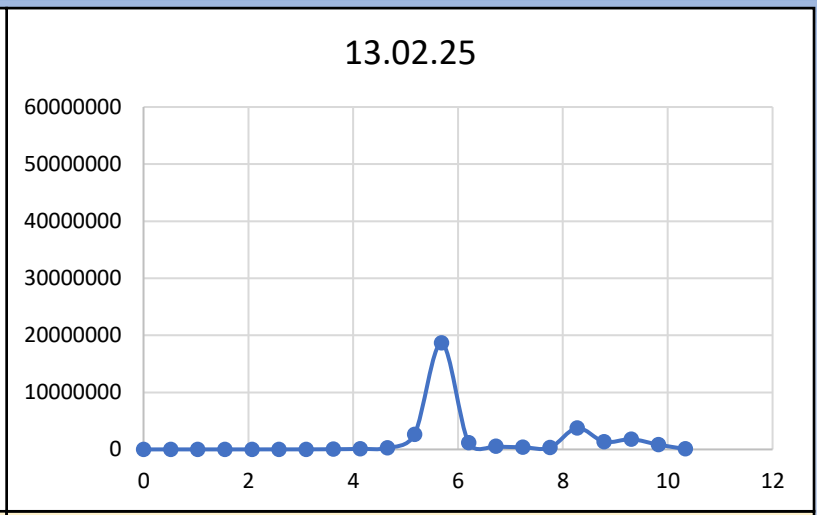
Одиночные Импульсы

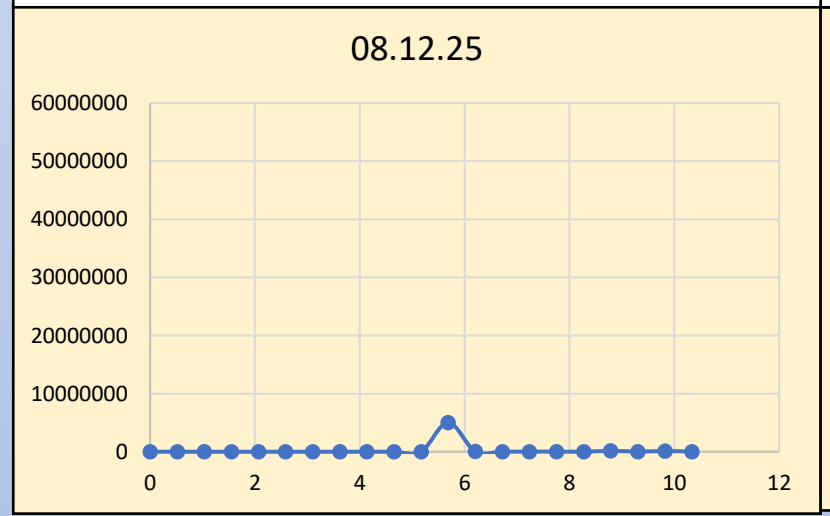
Сравнение при одинаковой толщине льда во время таяния

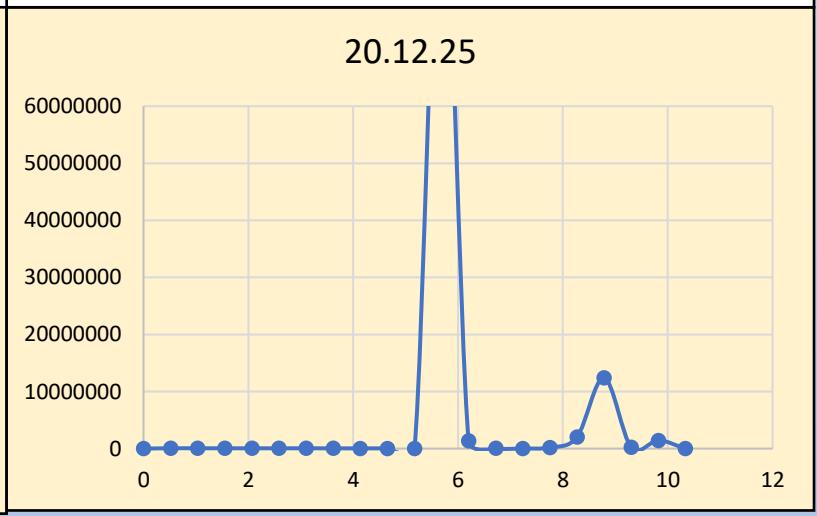
- **Пресный лед :**
  Плавное затухание сигнала при таянии.
- **Соленый лед:**
  Сигнал почти исчезает к началу таяния.
- Появление воды на поверхности











Результаты

Эксцесс

- **Разный масштаб значений:**
  Пресный лед (до **~70**)
  Соленый лед (до **~220**).
- **Разный характер сигнала:**
  Плавные изменения у пресного льда против резких скачков у соленого.
- **Физическая причина:**
  Однородная структура льда против нестабильности рассола и появления воды.



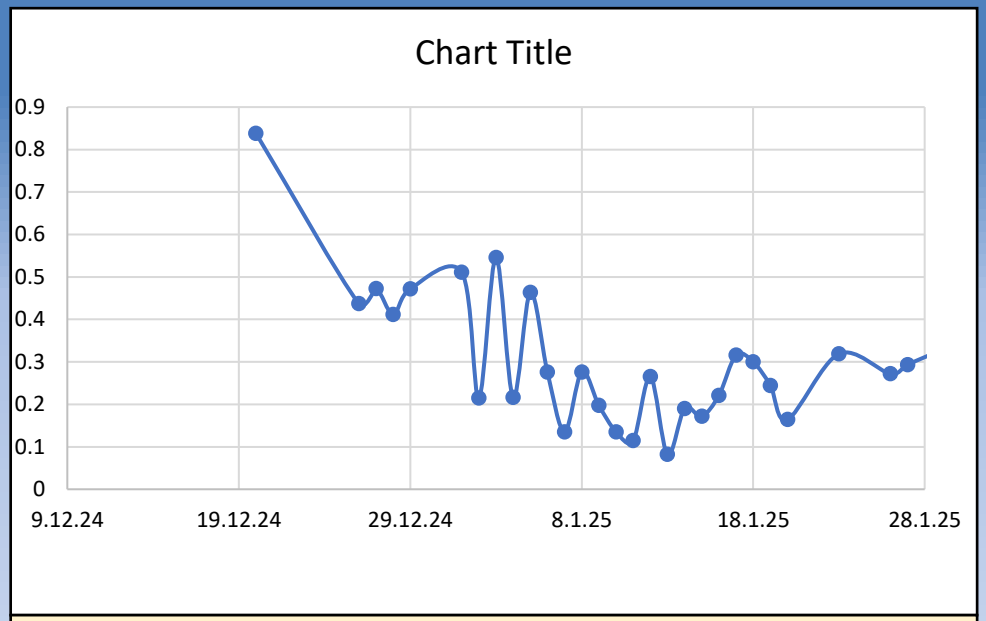


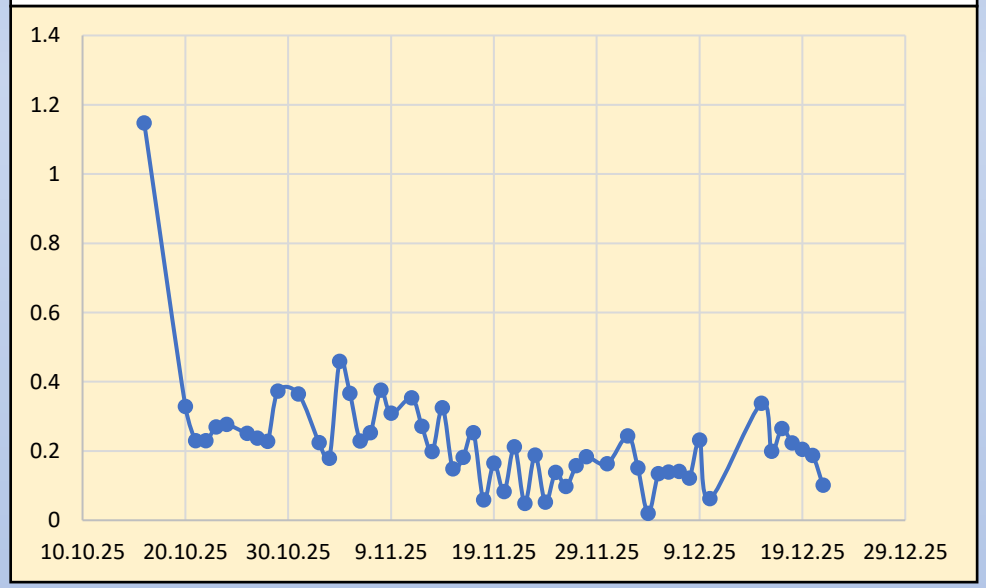
$$E = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4} - 3$$

Результаты

Дисперсия

- **Общая черта:** Высокая дисперсия в начале (открытая вода) и резкое падение при образовании льда.
- **Различие:** Для соленого льда дисперсия изначально выше и сигнал более шумный

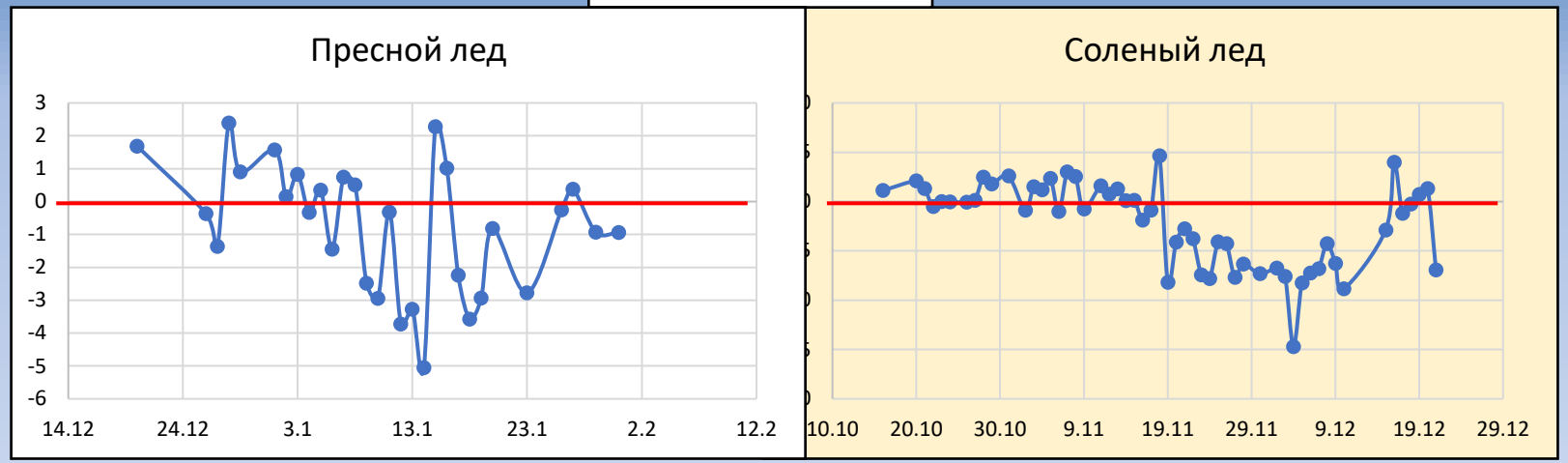




$$\sigma^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2$$

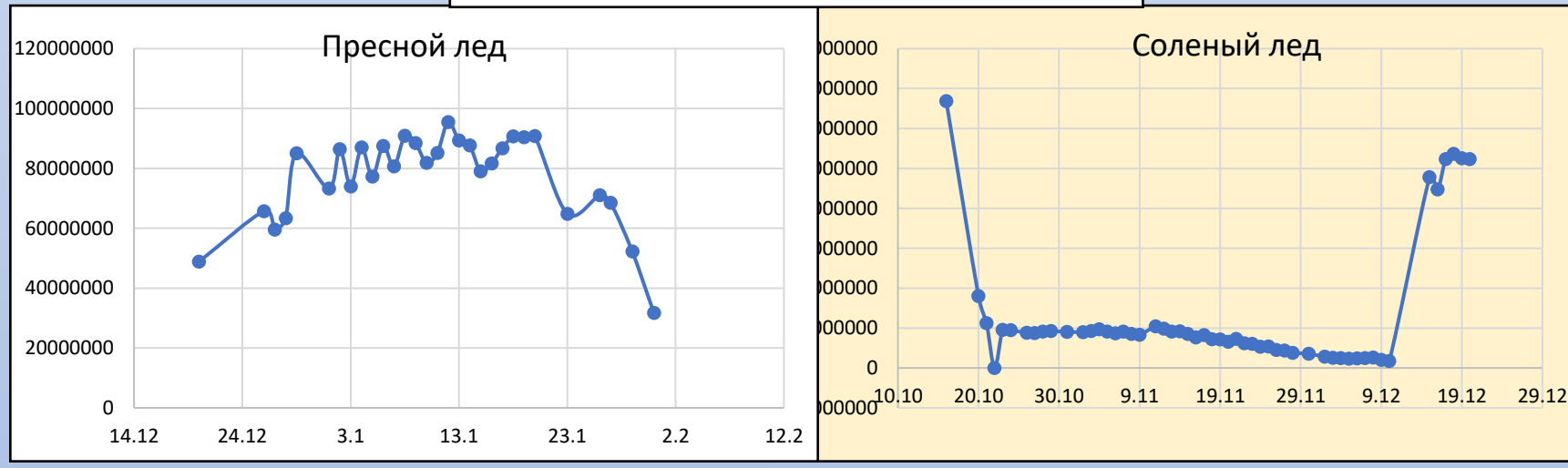
Результаты

Асимметрия



- **Пресный лед**: хаотичные значения (объемное рассеяние).
- **Соленый лед**: уход в отрицательную зону (отражение от поверхности)

Интегральная интенсивность



Пресный лед: высокая энергия и плавное затухание.

Соленый лед: резкое падение из-за поглощения, всплеск при таянии.

$$I = \int_{t_1}^{t_2} |u(t)|^2 dt \approx \sum_{i=1}^{N} x_i^2 \cdot \Delta t$$

Энергия отраженного импульса: плавное затухание в пресном льде (объемное рассеяние) и резкое падение в соленом

Результаты

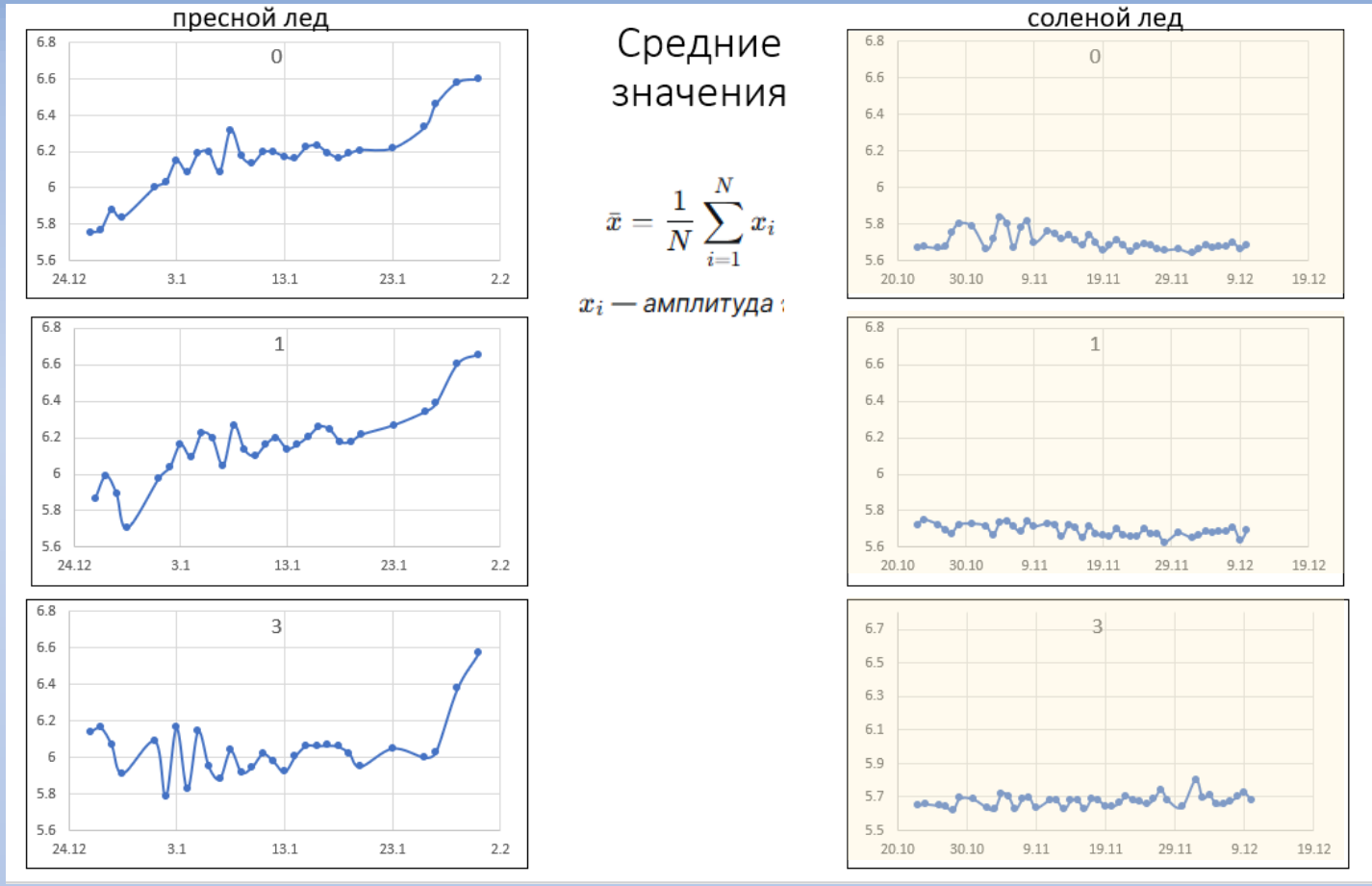
Средние значений

Пресный лед

- Плавное увеличение средних значений
- Почему?
  Снижения диэлектрических потерь

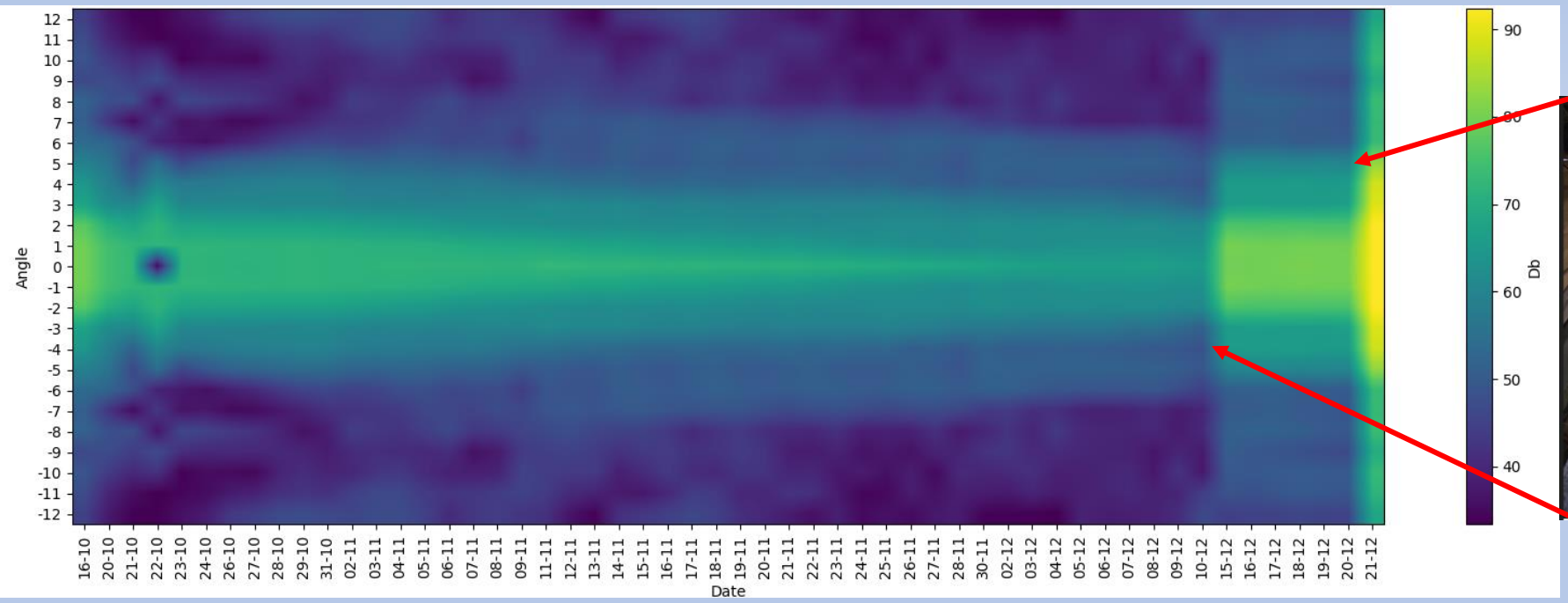
Соленый лед

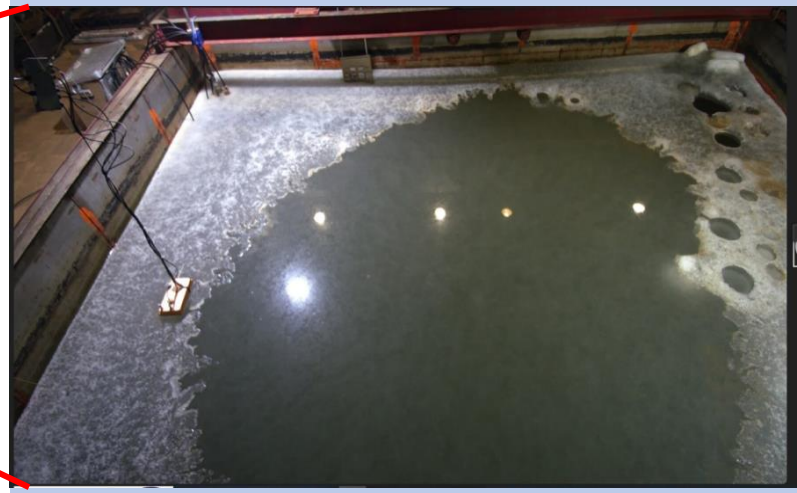
- Средние значения остаются стабильными
- Почему?
  Высокая соленость = высокая удельная электропроводность = сильные диэлектрические потери.



Соленый лед — Угловая зависимость

Построена зависимость сигнала от угла падения





Появление воды на поверхности льда

Выводы

Отражения X диапазона Радара

Пресноводный лед:

- Проникновение сигнала, объемное рассеяние, плавные изменения.
- Сигнал проникает сквозь лед; на обратное рассеяние влияют толщина льда и сглаживание поверхности.

Соленый лед:

- Сильное поглощение, поверхностное рассеяние
- Сигнал быстро затухает из-за электропроводности рассола

Благодарности

- Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда РНФ № 23-77-10064п.
- Благодарность ААНИИ за организацию и помощь.
- Отдельная благодарность В. Лихоманову и А. Чернову за помощь в экспериментах и предоставление данных.

Спасибо за внимание!

Вичаре А.С.

aniket.354@gmail.com

Аспирант, Кафедра Картографии и Геоинформатики

Санкт-Петербургский Государственный Университет (СПбГУ)

Ковалдов Д.А.

Институт прикладной физики РАН (ИПФ-РАН)s