



# **Определение сплоченности ледяного покрова по измерениям сечения обратного рассеяния при малых углах падения**

**Караев В.Ю., Панфилова М.А., Титченко Ю.А., Рябкова  
М.С., Баландина Г.Н., Понур К.А, Мешков Е.М.**

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*



## **Аннотация**

**Актуальность задачи мониторинга состояния и площади ледяного покрова обусловлена происходящими климатическими изменениями. Размещение измерительной аппаратуры на спутниках позволяет проводить мониторинг поверхности Мирового океана в оперативном режиме. Проведенные исследования показали, что при малых углах падения по сечению обратного рассеяния можно классифицировать подстилающую поверхность по критерию «лед-вода». Одной из важнейших характеристик ледяного покрова является сплоченность, которая меняется в интервале от 0 (открытая вода) до 1 (сплошной лед). Основным источником информации о сплоченности являются многочастотные радиометры, которые измеряют яркостную температуру, однако облачность и осадки приводят к большим ошибкам при оценке сплоченности ледяного покрова особенно в летний период. В данной работе обсуждается оригинальный метод определения сплоченности ледяного покрова по данным дождевого радиолокатора. Разработанный алгоритм использует значительную разницу сечений обратного рассеяния ледяного покрова и морской поверхности при малых углах падения. Была разработана программа для определения сплоченности ледяного покрова в полосе обзора дождевого радиолокатора и сравнение с данными радиометра подтвердило эффективность нового алгоритма.**



## Введение

Актуальность задачи оперативного и глобального мониторинга состояния и площади ледяного покрова обусловлена его влиянием на климат Земли. Для ее решения применяются разнообразные датчики в оптическом, ИК и микроволновом диапазонах, установленные на спутниках.

В последние годы орбитальная группировка пополнилась радиолокаторами, которые выполняют измерения при малых углах падения. Это двухчастотный дождевой радиолокатор DPR (Dual-frequency Precipitation Radar), установленный на спутнике GPM (Global Precipitation Measurement) и волновой скаттерометр SWIM (Surface Waves Investigation and Monitoring) на спутнике CFOSAT (Chinese-French Oceanography Satellite).

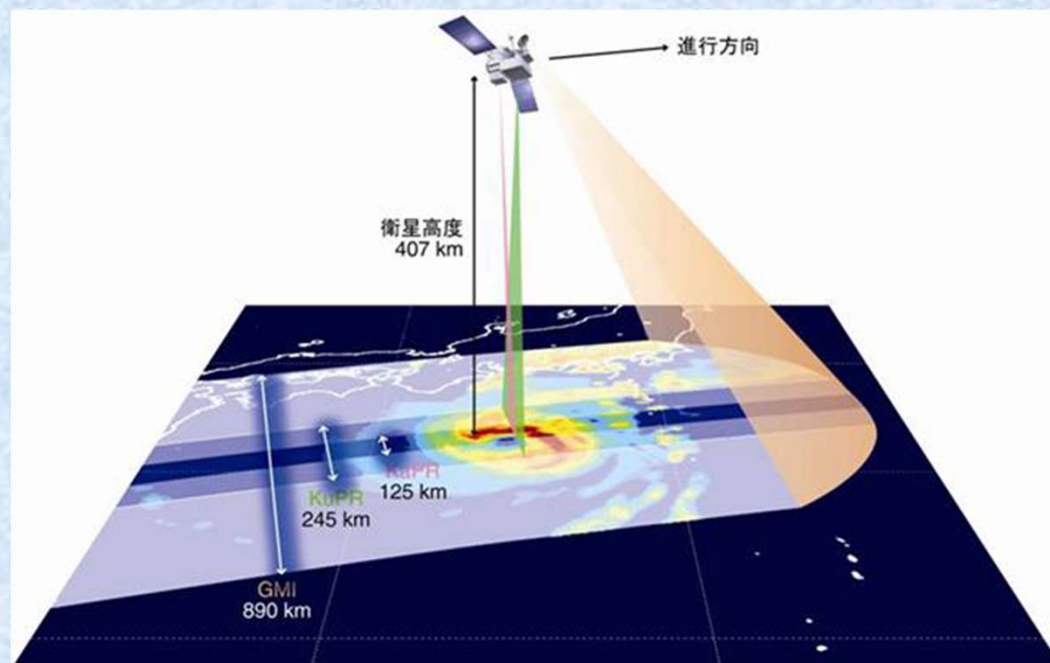


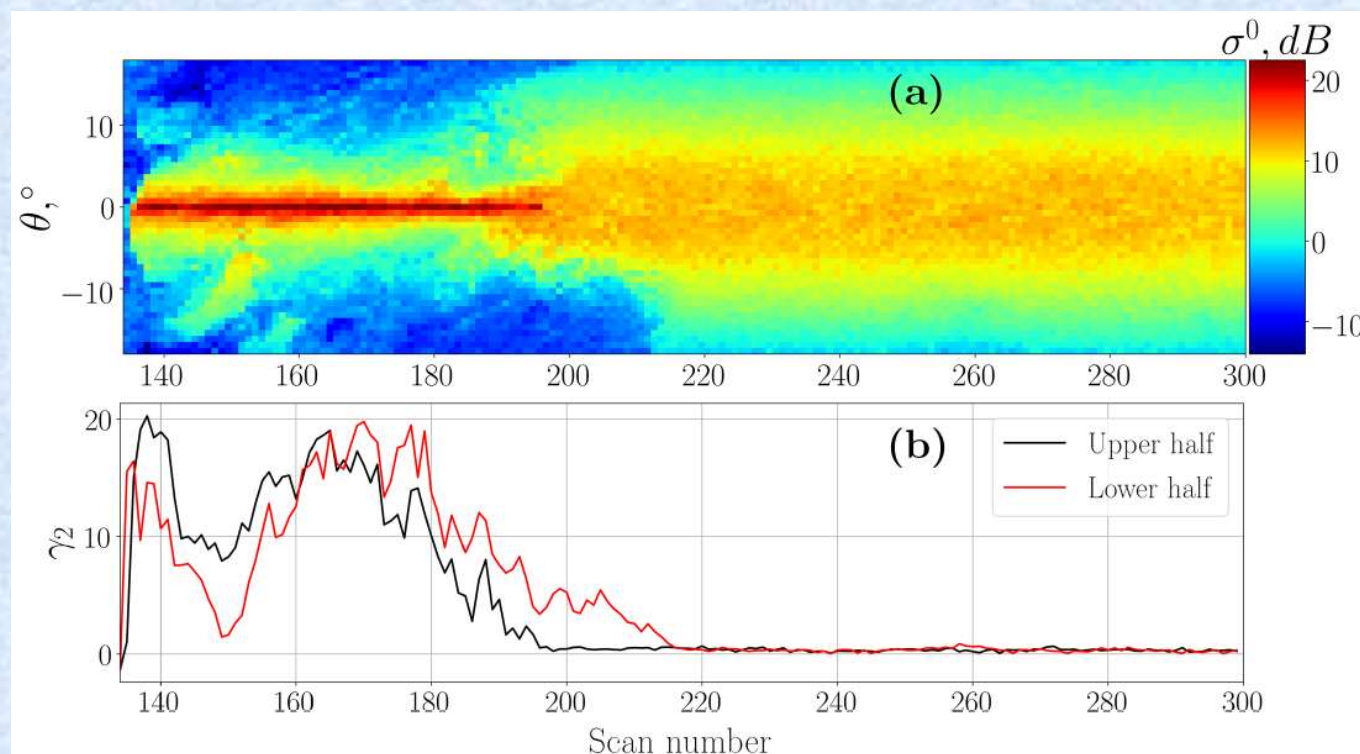
Схема измерения спутника GPM. Полоса обзора DPR в Ku-диапазоне 245 км и в Ka-диапазоне 125 км



## Введение

Проведенные исследования показали, что при малых углах падения по сечению обратного рассеяния можно классифицировать подстилающую поверхность по критерию «лед-вода» [1, 2]. В разработанном алгоритме анализируется зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения и вычисляется коэффициент эксцесса.

Для поверхности воды коэффициент эксцесса принимает значения около нуля, а для ледяного покрова достигает 20.

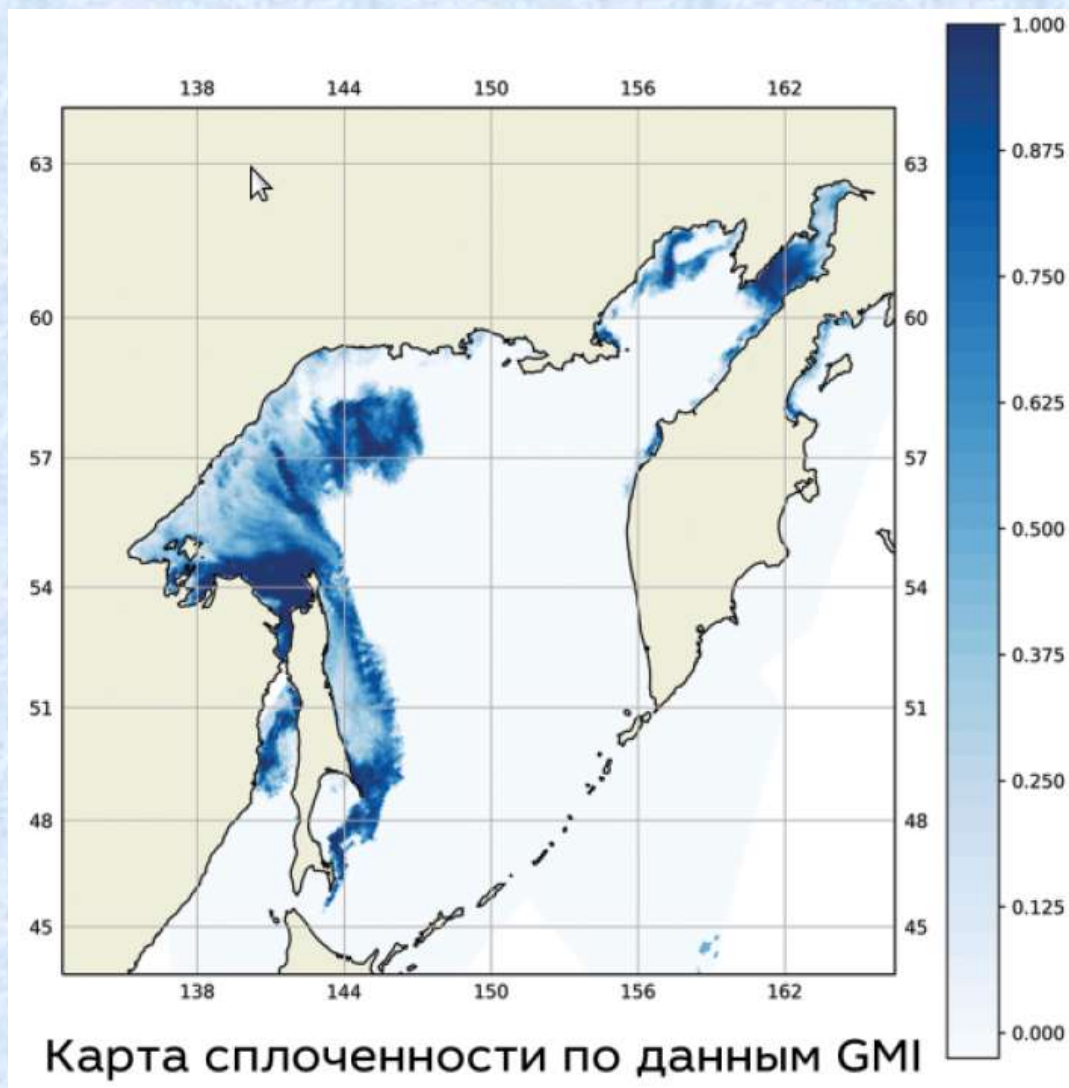


Распределение УЭПР в полосе обзора DPR (a), коэффициент эксцесса, вычисленный для каждой дополненной половины скана (b).

## Введение

Одной из важнейших характеристик ледяного покрова является сплоченность, которая меняется в интервале от 0 (открытая вода) до 1 (сплошной лед). Основным источником информации о сплоченности являются многочастотные радиометры, которые измеряют яркостную температуру, однако облачность и осадки приводят к большим ошибкам при оценке сплоченности ледяного покрова особенно в летний период.

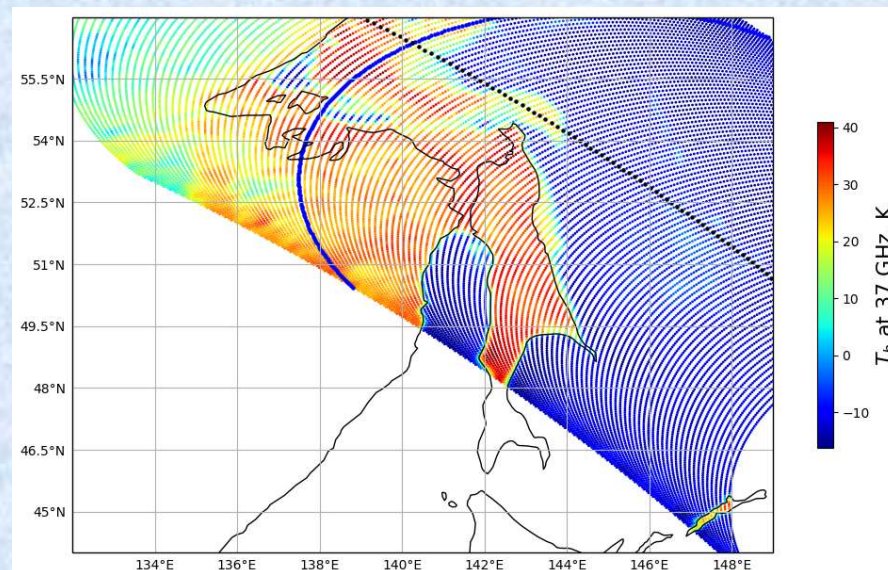
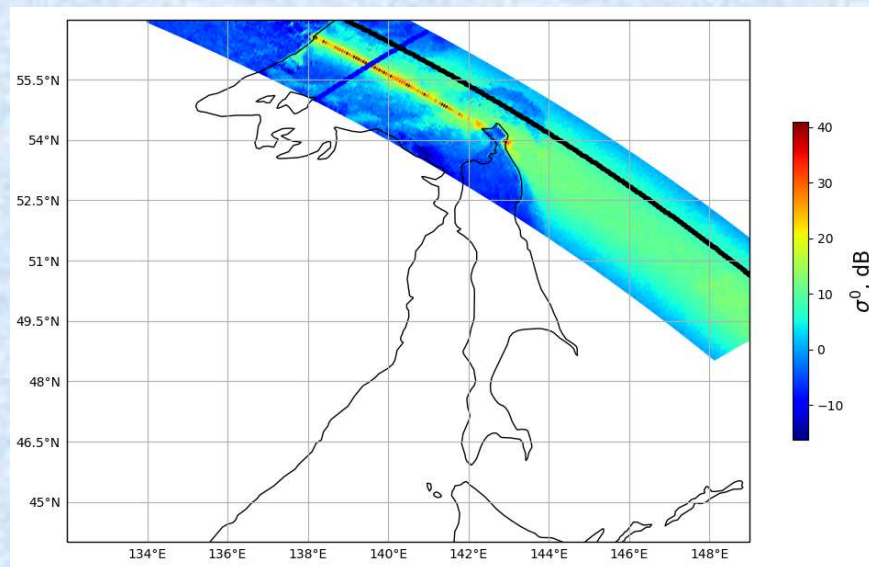
Пример распределения сплоченности ледяного покрова в Охотском море по данным GMI показан на рисунке.





# Активный и пассивный каналы спутника GPM

Кроме двухчастотного радиолокатора на спутнике GPM установлен многочастотный радиометр GMI, поэтому измерения в активном и пассивном каналах выполняются одновременно.



Радиолокационное изображение в Ku-диапазоне (слева), яркостная температура на вертикальной поляризации частот 36,5 ГГц (справа) по данным GPM 11:10 UTC 29 ноября 2016. Черная кривая – линия разреза.

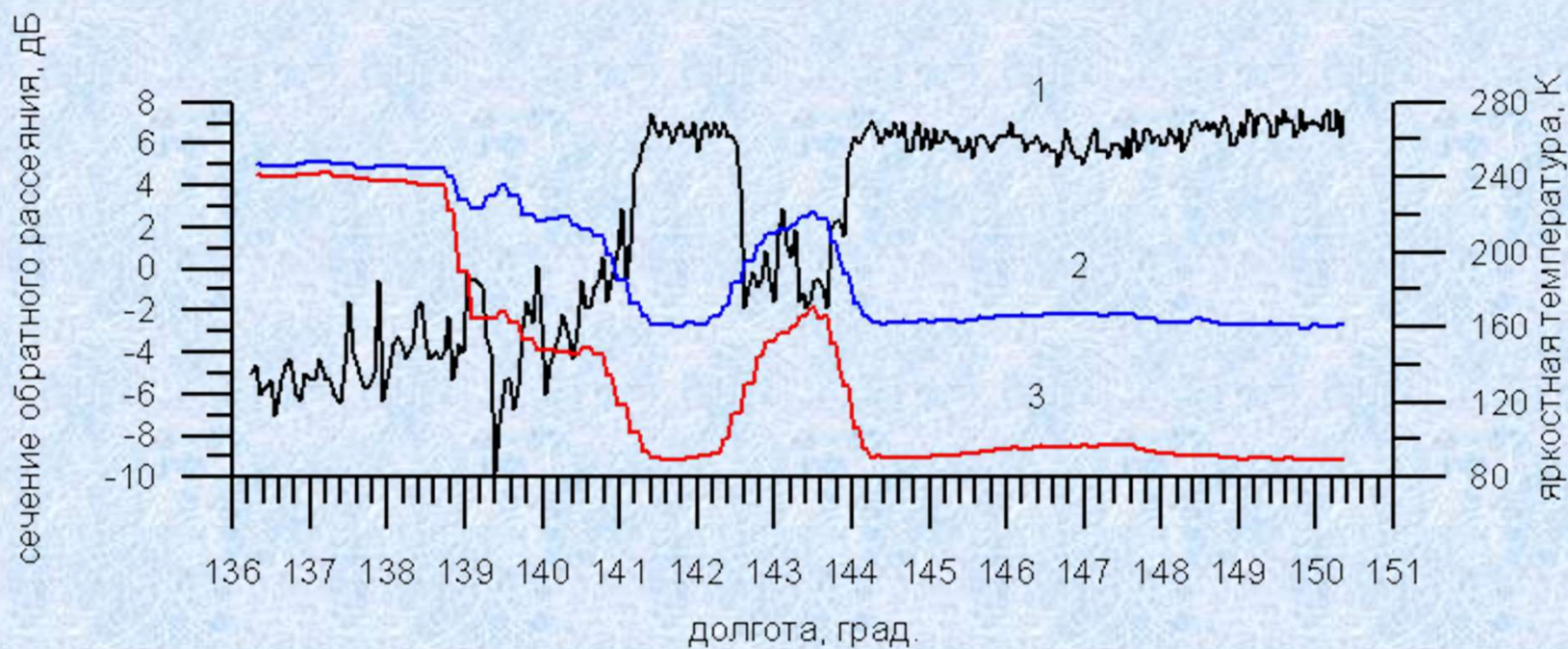


## Активный и пассивный каналы спутника GPM

На рисунке черная кривая является разрезом радиолокационного изображения в К-диапазоне. Синяя и красные кривые - разрезы поля яркостных температур на частоте 10,6 ГГц.

До 139 в.д. разрез проходит по суше. Потом появляется ледяной покров, а восточнее 141 в.д. происходит переход на открытую воду. Затем снова лед и восточнее 144 в.д. переходим на морскую поверхность.

Эти изменения хорошо просматриваются в радиолокационных данных и в яркостных температурах на частоте 10,6 ГГц. Сечение обратного рассеяния и яркостные температуры идут в противофазе.





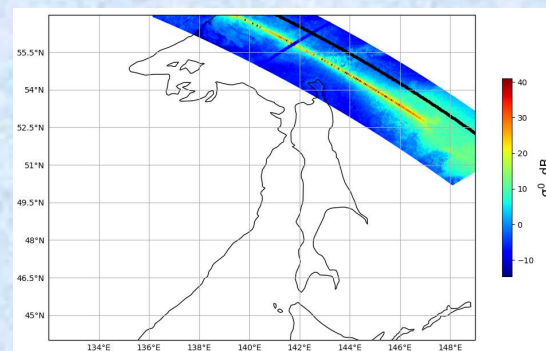
# Сплоченность ледяного покрова

Пространственное разрешение дождевого радиолокатора составляет примерно 5 км, и в элементе разрешения (пикселе) одновременно могут оказаться лед и вода. В этом случае сечение обратного рассеяния  $\sigma_0$  можно представить в виде суммы сечения обратного рассеяния ледяного покрова  $\sigma_{0л}$  и сечения обратного рассеяния воды  $\sigma_{0в}$  :

$$\sigma_0 = S_l \cdot \sigma_{0л} + (1 - S_l) \cdot \sigma_{0в}$$

где  $S_l$  площадь ледяного покрова. Тогда сплоченность ледяного покрова можно вычислить по следующей формуле

$$C = \frac{\sigma_{0в} - \sigma_0}{\sigma_{0в} - \sigma_{0л}} \quad (1)$$



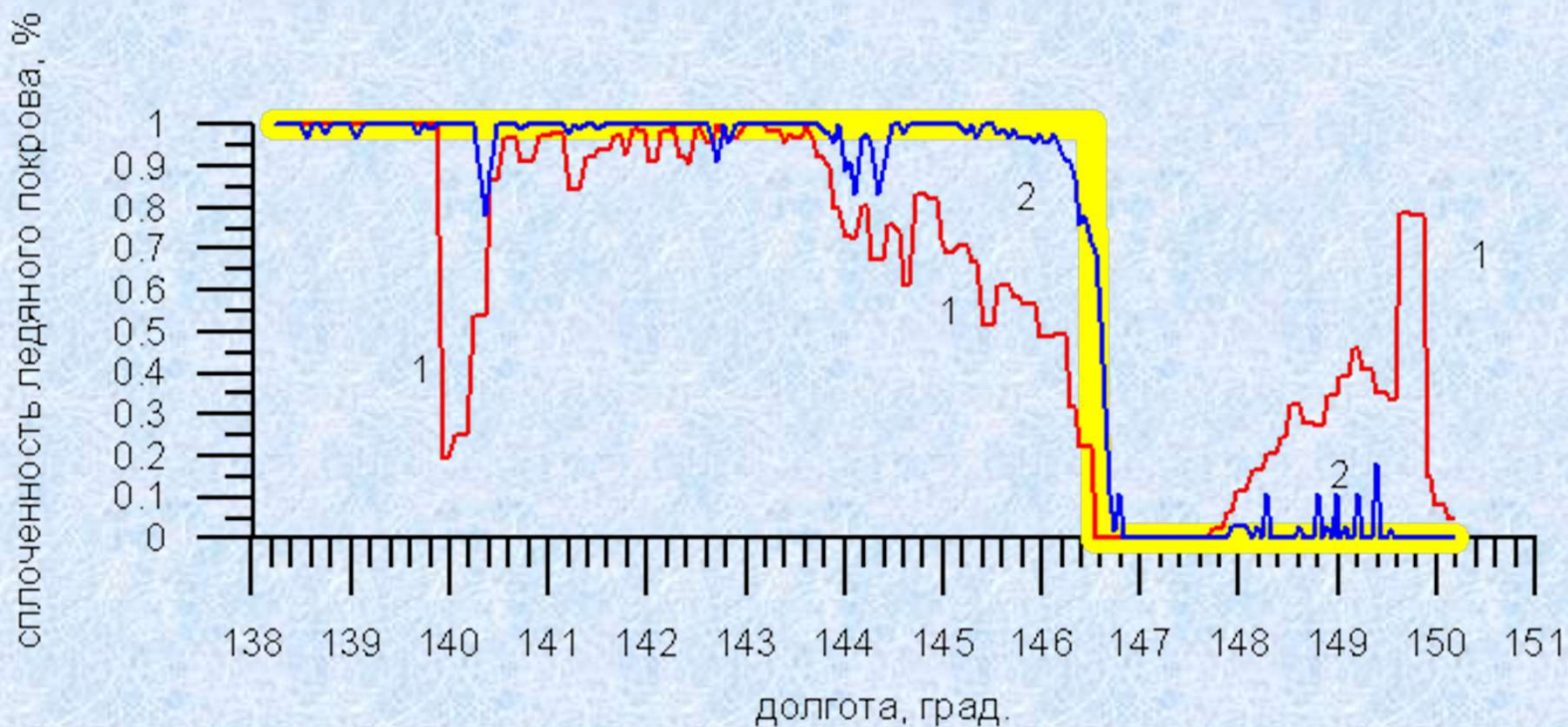


## Сплоченность ледяного покрова

Желтая кривая показывает работу фильтра по критерию «лед-вода» на низких частотах радиометра (низкое пространственное разрешение – 20 км).

Красная кривая показывает сплоченность ледяного покрова, вычисленную по данным радиометра на частоте 89 ГГц. Наблюдаются сильные флуктуации сплоченности ледяного покрова вдоль разреза и скачок сплоченности в конце разреза.

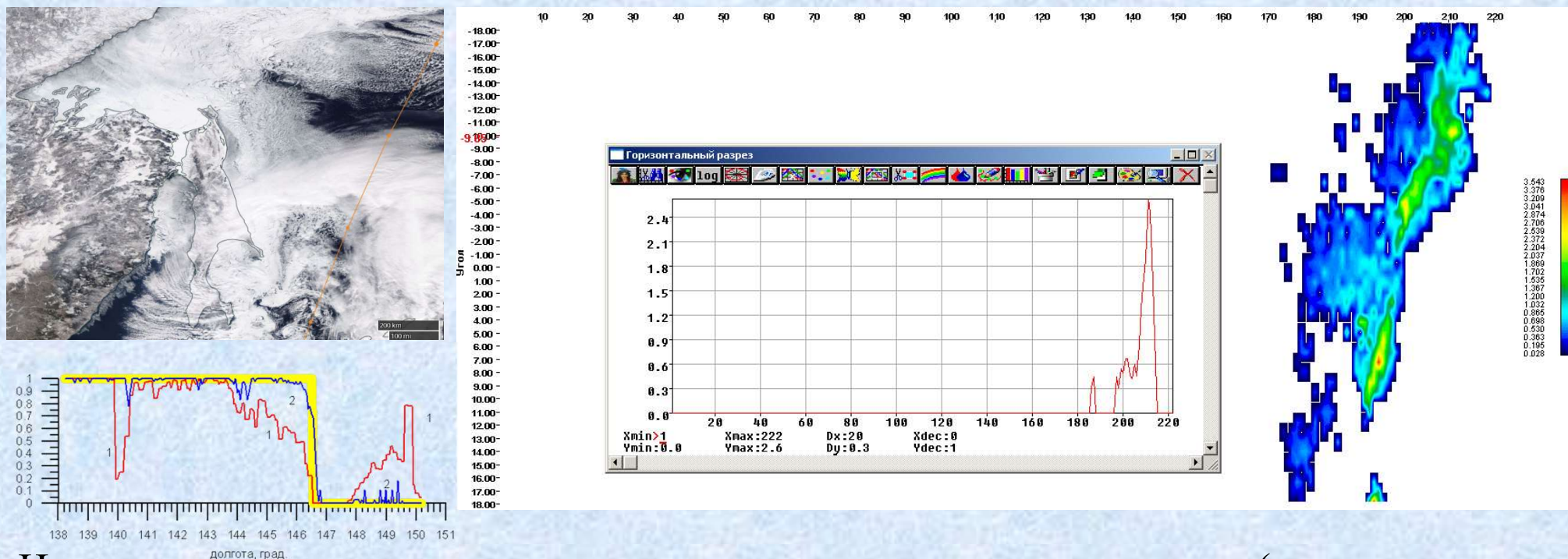
Синяя кривая построена по данным радиолокатора Ku-диапазона (формула (1)). Она хорошо отслеживает переходы от ледяного покрова к открытой воде.





# Сплоченность ледяного покрова

На изображении MODIS видна структура облаков. Западнее острова Сахалин чистое небо, а восточнее острова Сахалин наблюдается облачность. На правом рисунке показана интенсивность осадков в полосе обзора. Несмотря на облачность, осадки появляются только в конце радиолокационного изображения.



На центральном рисунке показано сечение поля осадков (красная кривая), совпадающее с линией радиолокационного разреза и из рисунка видно, что появление «ледяного» покрова в алгоритме, использующим данные радиометра, связано с осадками. На частоте 89 ГГц осадки оказывают сильное влияние на яркостную температуру и приводят к ошибкам в оценке сплоченности.



## Выводы

Предложен оригинальный метод оценки сплоченности ледяного покрова по данным дождевого радиолокатора (малые углы падения) с учетом региональных особенностей, включающий следующие этапы:

- 1) решается задача классификации типа подстилающей поверхности по критерию «лед-вода». Для этого используются разработанные алгоритмы [1, 2];
- 2) вычисляется среднее значение сечения обратного рассеяния для открытой воды (сплоченность = 0) и для сплошного ледяного покрова (сплоченность = 1);
- 3) полученные значения используются для вычисления сплоченности ледяного покрова в переходной области по формуле (1);
- 4) использование информации об осадках, измеряемых радиолокатором, позволяет минимизировать ошибки, связанные с состоянием атмосферы.

Таким образом, разработанный метод учитывает региональные и сезонные особенности, а сам алгоритм становится «настраиваемым».

1. M. Panfilova, A. Shikov, V. Karaev, Sea ice detection using Ku-band radar onboard GPM satellite, URSI GASS 2020, Rome, Italy, 29 August - 5 September 2020, pp.1-3, <https://www.ursi.org/proceedings/procGA20/papers/URSI2020Ppanfilovanew.pdf>

2. М. Панфилова, Восстановление параметров волнения, скорости приводного ветра и положения ледяного покрова по данным дистанционного зондирования в СВЧ-диапазоне при малых углах падения, Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, Н.Новгород, ИПФ РАН, 2022, 112 с.