



# **К вопросу об обратном рассеянии электромагнитных волн СВЧ-диапазона ледяным покровом в Охотском море при малых углах падения на примере данных дождевого радиолокатора**

**В.Караев , М.Панфилова, Л.Митник,  
Ю.Титченко, Е.Мешков, З.Андреева\*, Р.Волгутов\***

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

*\* НИЦ «Планета», Москва*

# Введение

Важность оперативного и глобального мониторинга морского льда обусловлена его влиянием на климат Земли. В климатической системе морской ледяной покров занимает уникальное положение, выступая в качестве ключевого предвестника глобального потепления. Развитие дистанционного зондирования делает эту задачу решаемой.

Данные с высоким пространственным разрешением (от метров - десятков метров) предоставляют радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) и изображения в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн.



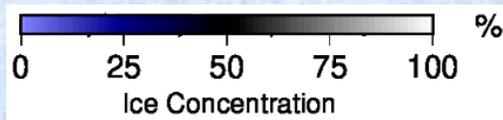
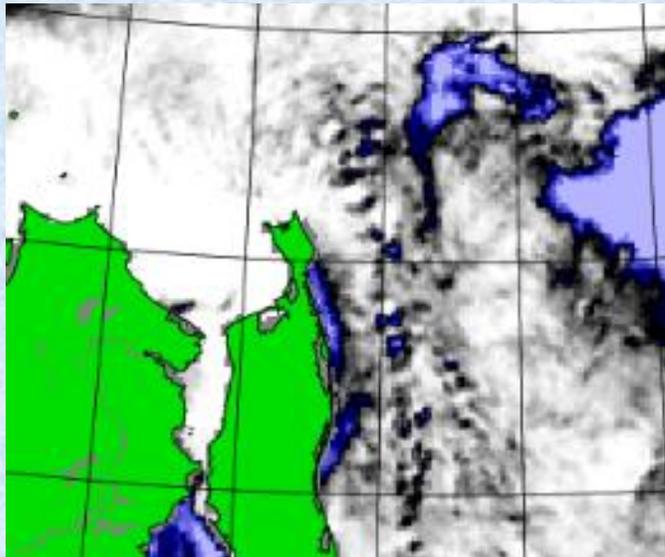
Снимок MODIS



РСА изображение Sentinel-1

# Введение

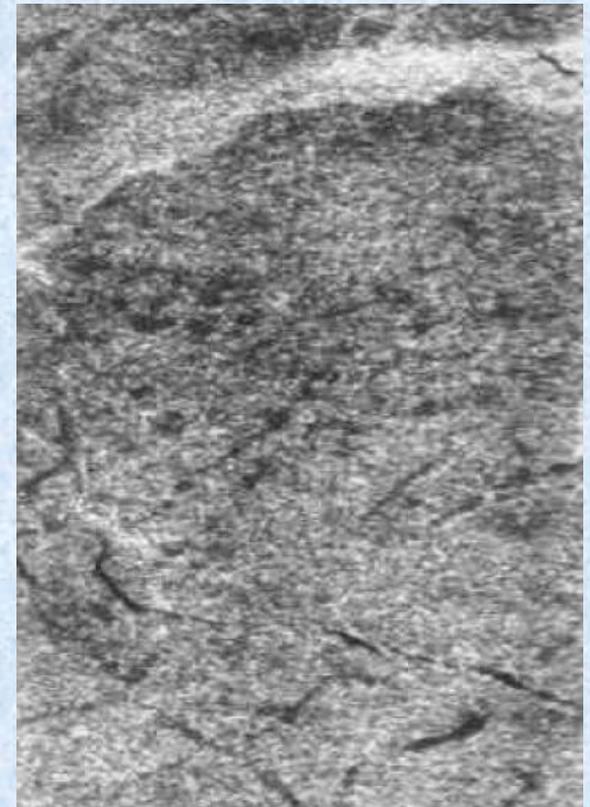
Регулярная информация о состоянии ледяного покрова с низким разрешением (от нескольких километров) может быть получена микроволновыми радиометрами и скаттерометрами.



Сплоченность ледяного покрова по данным AMSR2 (данные университета Бремен)

С 1983 по 2000 г. для мониторинга ледовой обстановки использовалась радиолокационная станция бокового обзора (РЛС БО) X-диапазона (9,6 ГГц), которая устанавливалась на ИСЗ Космос-1500 и последующих, имела разрешение 1-3 км.

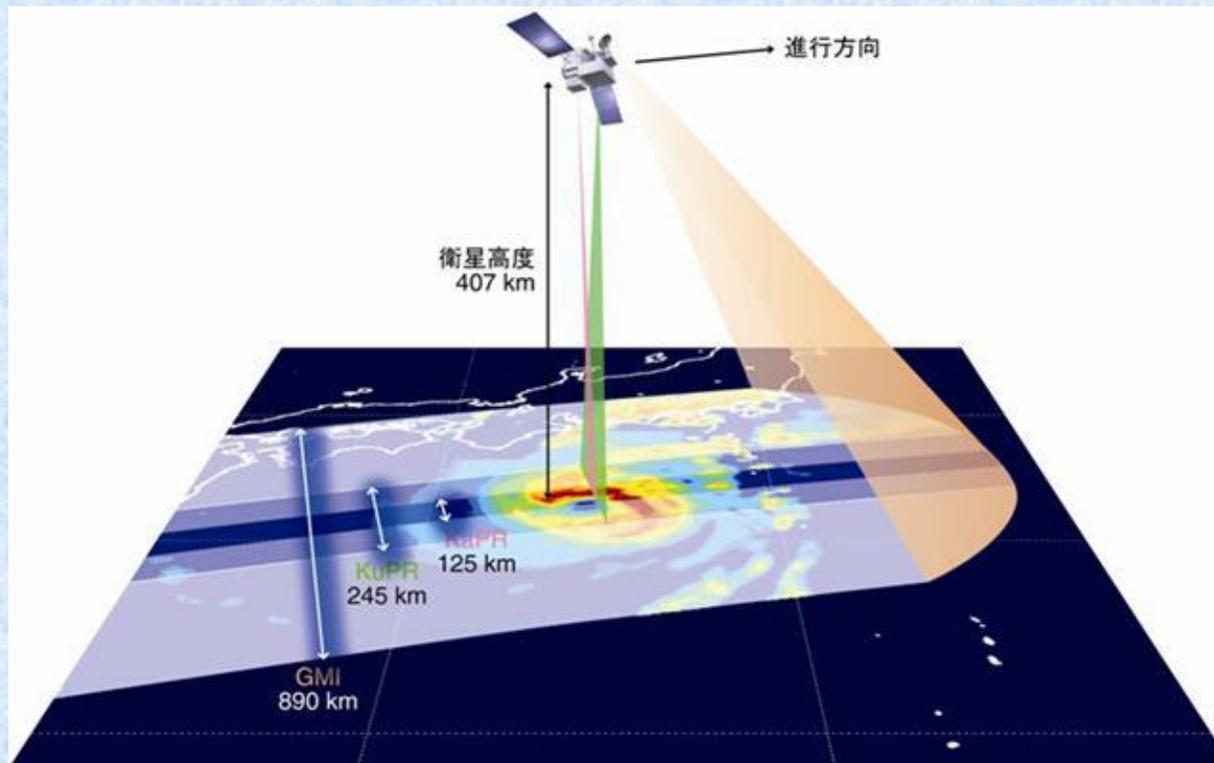
В 2021 на орбиту будет выведен РЛС БО «МетеоСар» с разрешением около 1 км.



Радиолокационное изображение морского льда РЛС БО

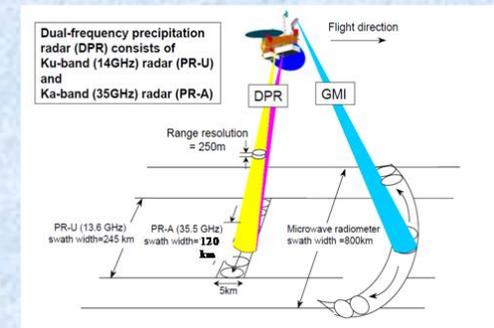
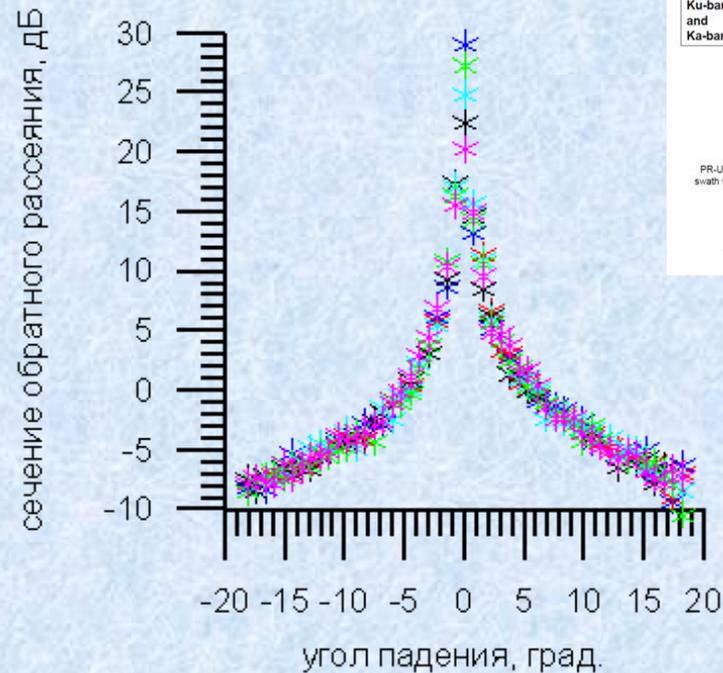
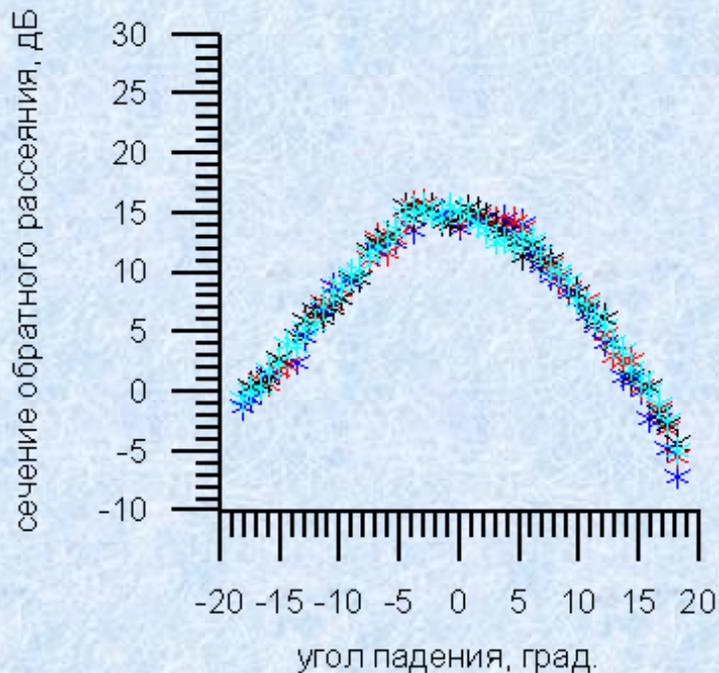
# Двухчастотный дождевой радиолокатор (DPR)

DPR установлен на спутнике GPM (Global Precipitation Measurement), выведенном на орбиту JAXA в 2014 году. Радиолокатор предназначен для измерения вертикального профиля осадков в полосе обзора шириной  $\approx 240$  км в Ku-диапазоне (длина волны  $\lambda = 2,2$  см) и  $\approx 125$  км в Ka-диапазоне,  $\lambda = 0,8$  см с пространственным разрешением  $\approx 5$  км. Углы падения меняются в пределах  $\pm 18,3^\circ$  в Ku- и в  $\pm 9,1^\circ$  в Ka-диапазоне. Последний отсчет по дальности относится к отражению от поверхности и измеряется сечение обратного рассеяния.



# Двухчастотный дождевой радиолокатор (DPR)

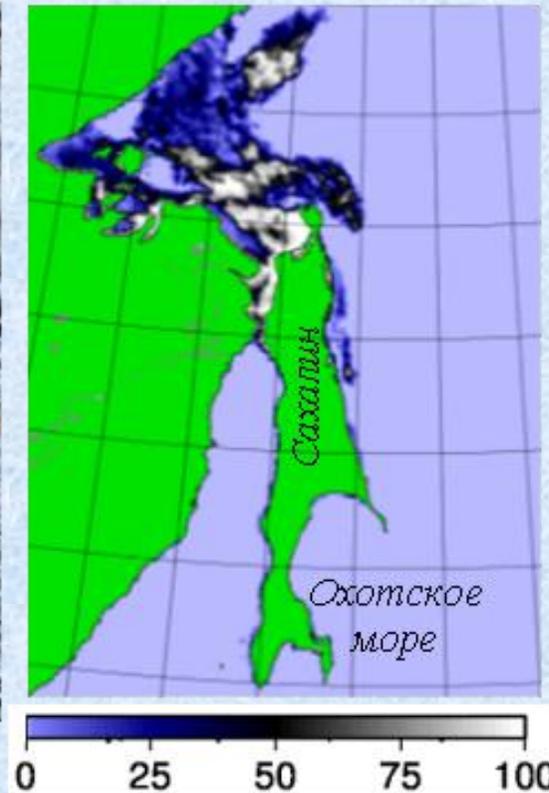
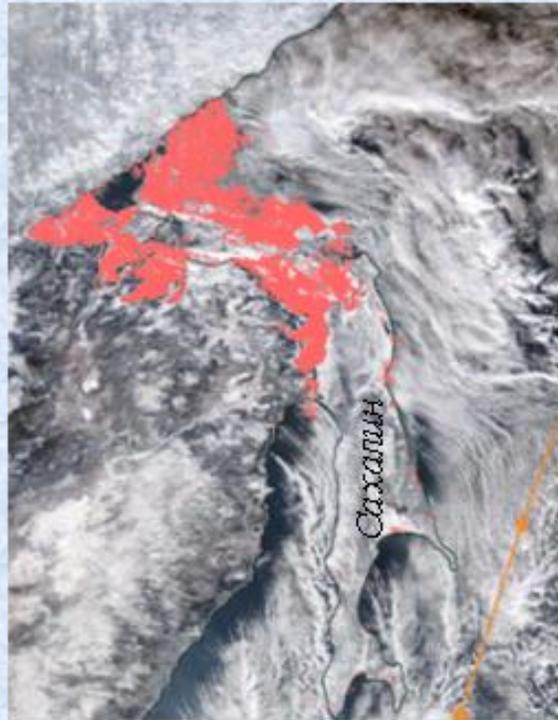
При движении дождевого радиолокатора происходит сканирование по углу падения в направлении перпендикулярном направлению полета. На рисунке приведены типичные зависимости сечения обратного рассеяния в Ku-диапазоне от угла падения для водной поверхности (слева) и сплошного ледяного покрова при отрицательной температуре воздуха (справа). Звездочками разного цвета показаны сечения обратного рассеяния для нескольких последовательных сканов. Расстояние между сканами  $\approx 5$  км, что примерно равно размеру рассеивающей площадки.



Характерный вид зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения для водной поверхности (слева) и ледяного покрова (справа) в Ku-диапазоне.

# Формирование ледяного покрова (ноябрь 2016)

На примере ледяного покрова Охотского моря рассмотрим влияние типа рассеивающей поверхности (лед/вода) на сечение обратного рассеяния при фиксированном угле падения. Можно ли разделить морскую поверхность и ледяной покров не используя угловую зависимость?



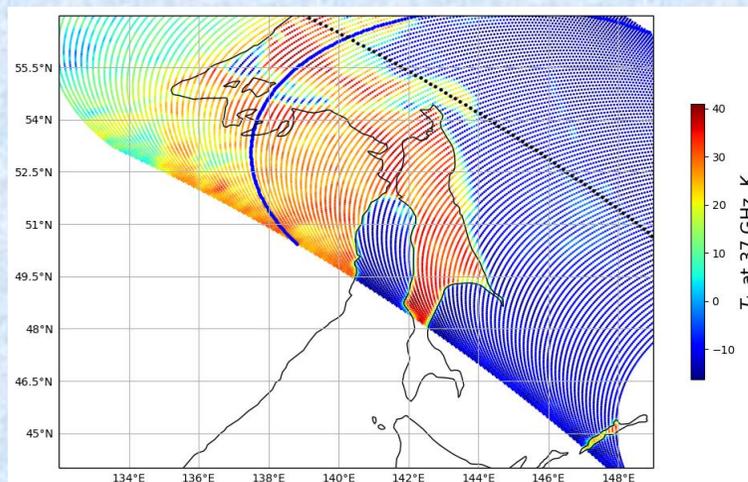
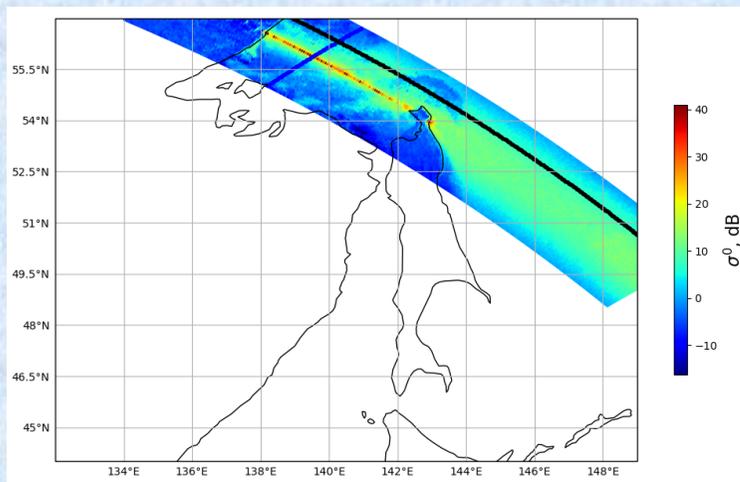
**а**

**б**

**в**

Видимое изображение MODIS 29 ноября 2016 01:22 UTC с маской льда (красный цвет) (а), карта сплоченности льда (цветовая шкала в процентах) по данным университета Бремена за 29 ноября (б) и фрагмент карты-схемы ледовой обстановки НИЦ "Планета" за 26-28 ноября 2016 (в).

# Формирование ледяного покрова (ноябрь 2016)



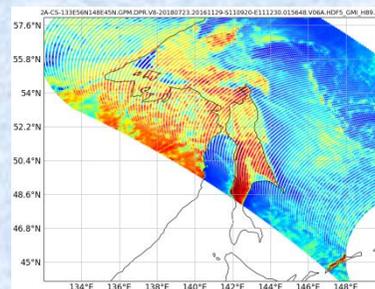
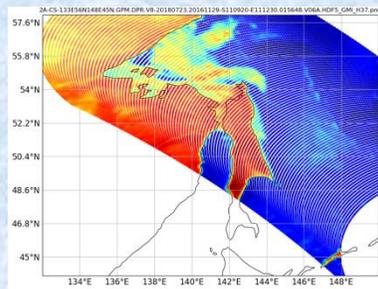
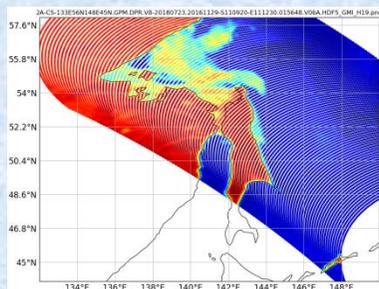
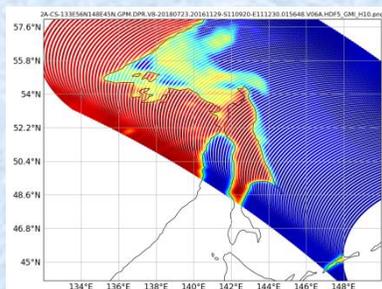
Радиолокационное изображение в Ку-диапазоне (слева), яркостная температура на вертикальной поляризации частот 36,5 ГГц (справа) по данным GPM 11:10 UTC 29 ноября 2016.

10,65 Г

18,7 Г

36,5 Г

89 Г

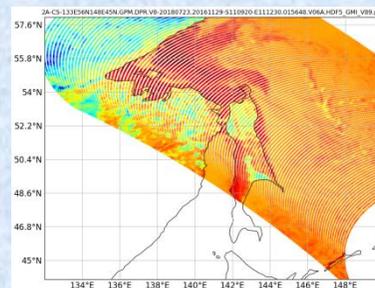
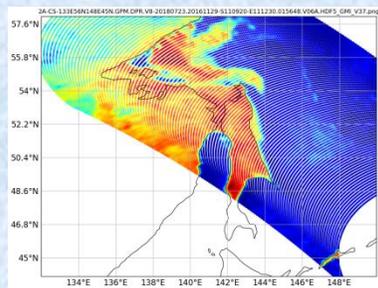
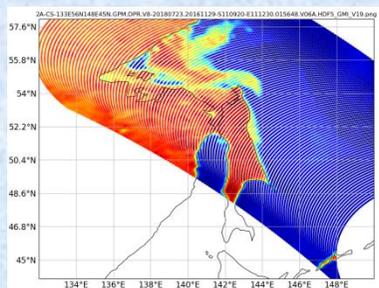
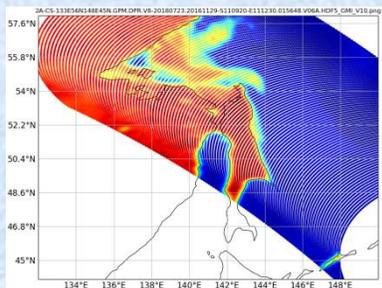


10,65 В

18,7 В

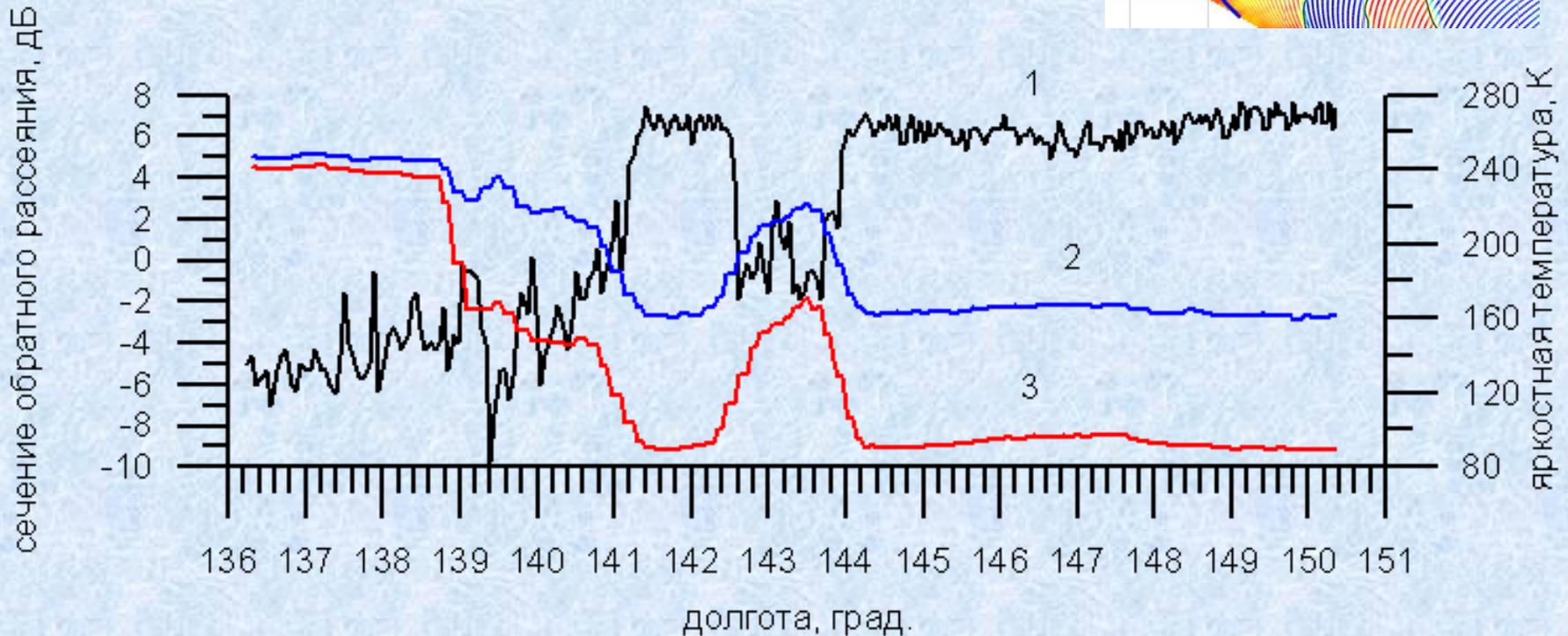
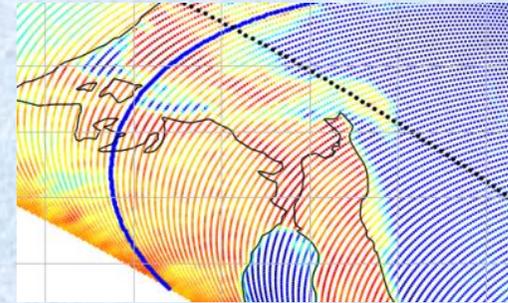
36,5 В

89 В



# Формирование ледяного покрова (ноябрь 2016)

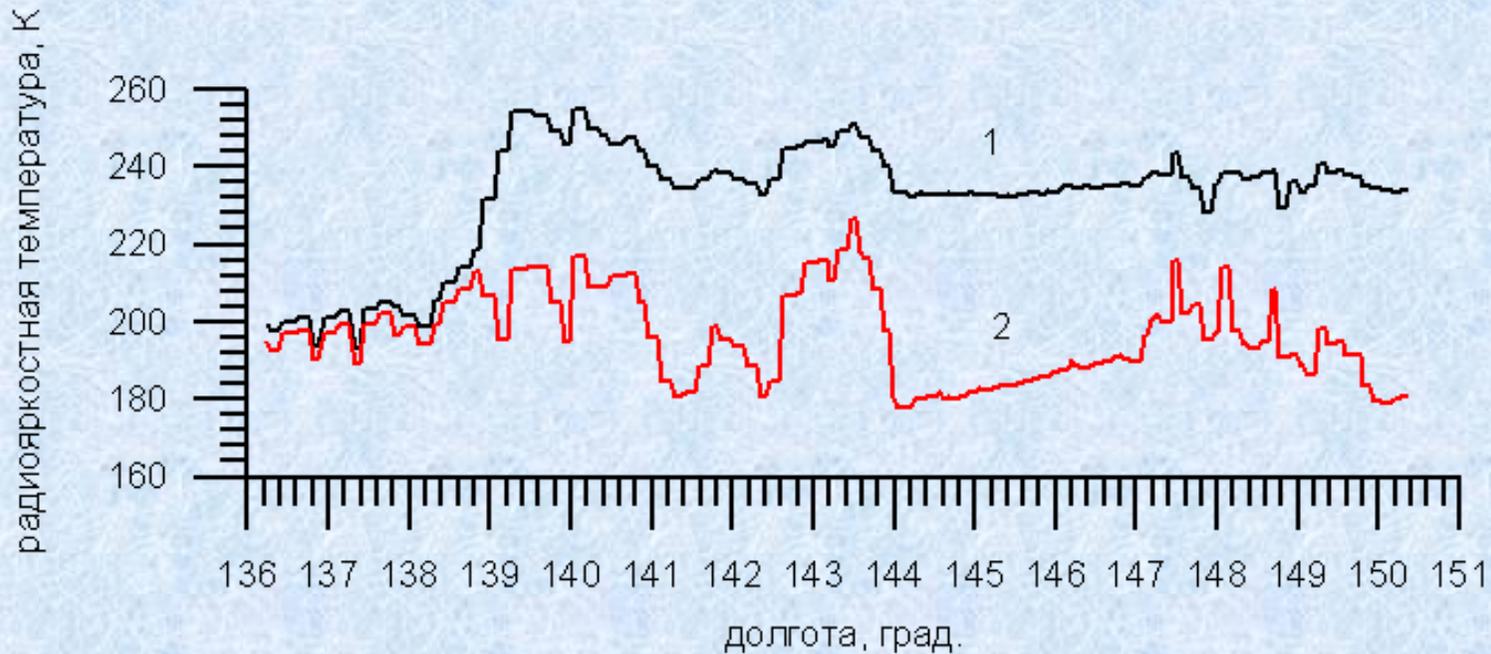
Изменение сечения обратного рассеяния и яркостной температуры вдоль разрезов хорошо коррелирует с картами ледовой обстановки университета Бремен и НИЦ Планета.



Зависимость сечения обратного рассеяния от долготы – черная кривая и зависимость яркостной температуры от долготы на частоте 10,6 ГГц: синяя кривая – вертикальная поляризация (В), красная кривая – горизонтальная поляризация (Г).

# Формирование ледяного покрова (ноябрь 2016)

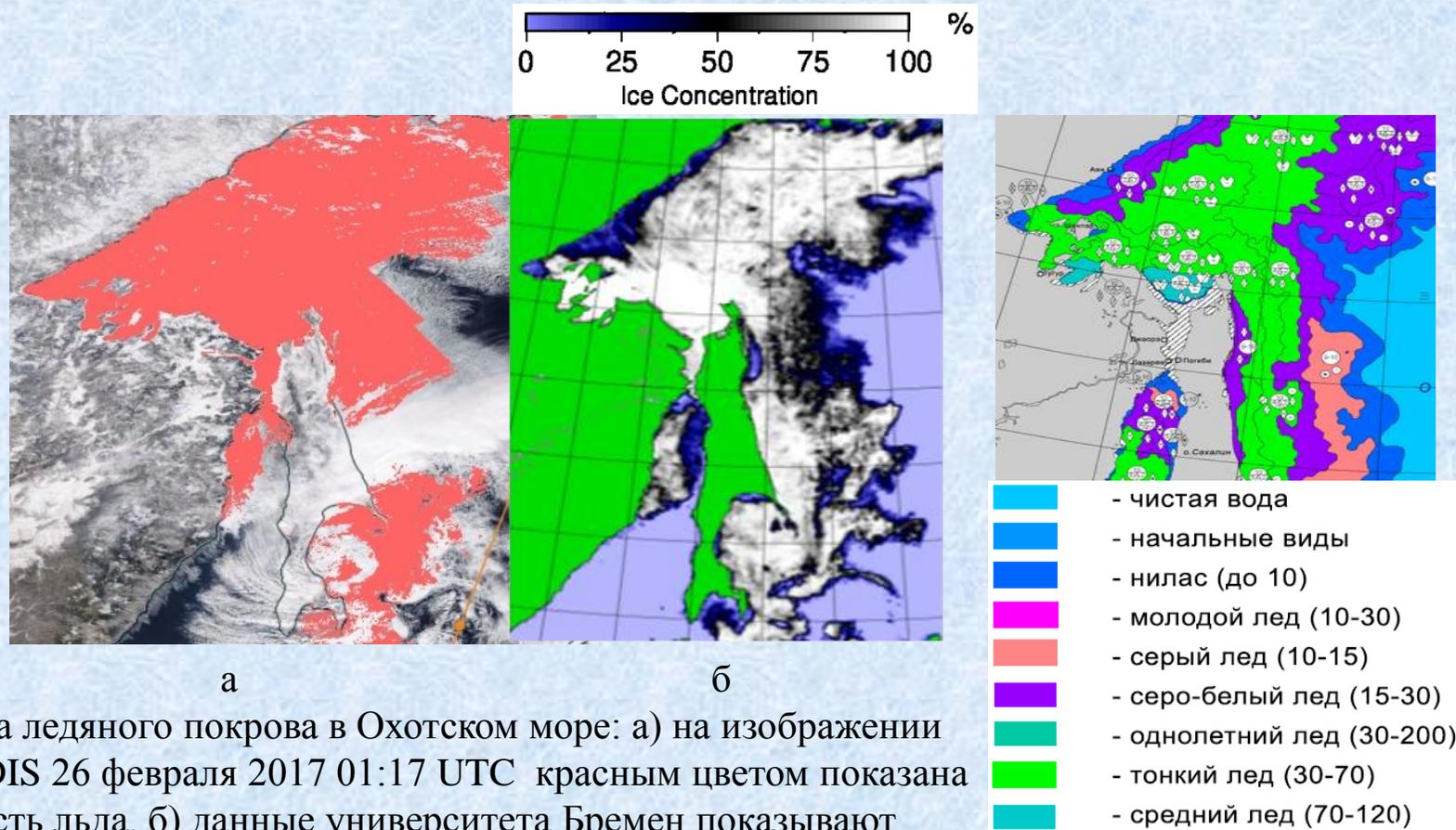
Измерения на частоте 89 ГГц позволяют улучшить пространственное разрешение до 6 км и алгоритмы позволяют определить сплоченность ледяного покрова.



Зависимость яркостной температуры от долготы на частоте 89 ГГц: черная кривая - вертикальная поляризация и красная кривая - горизонтальная поляризация.

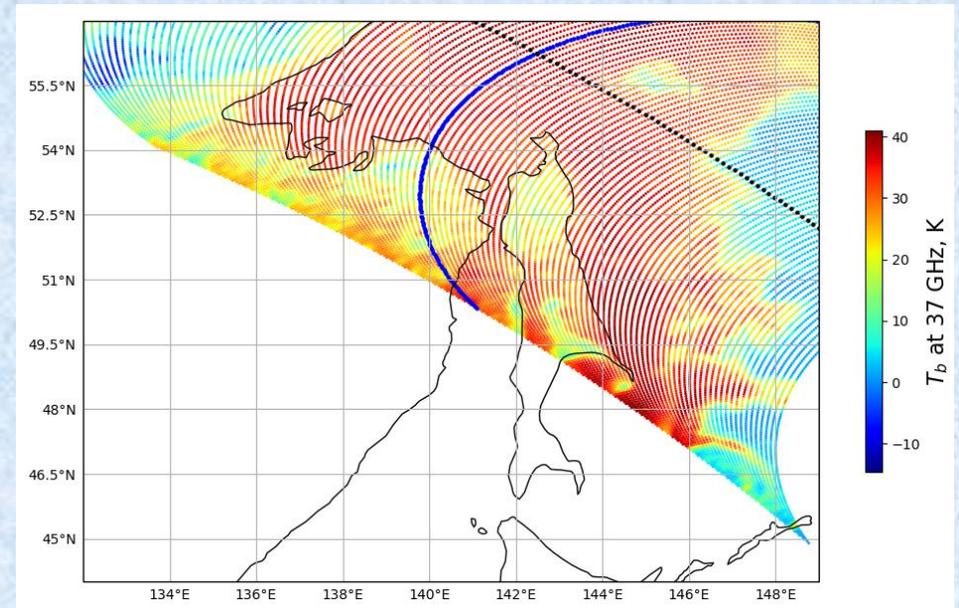
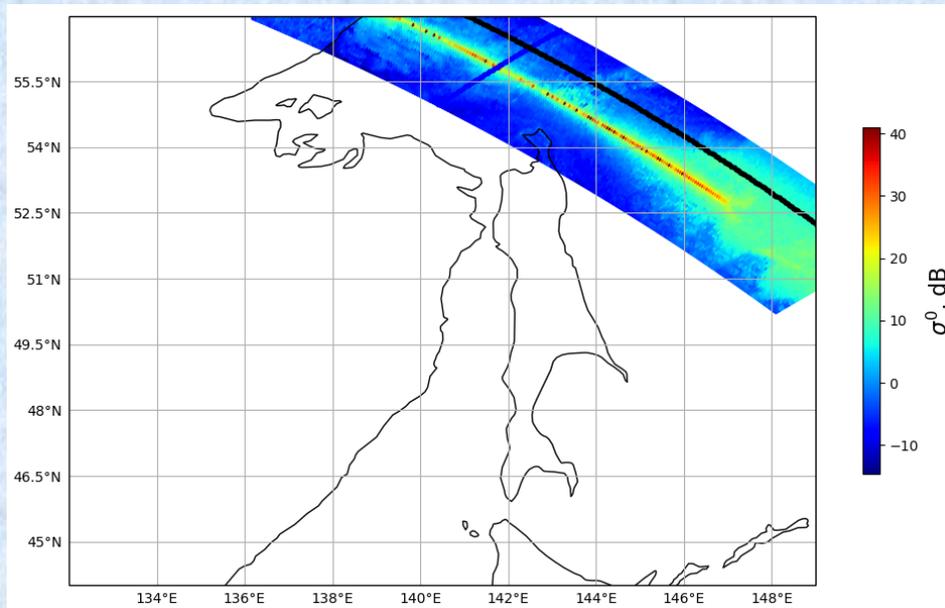
# Зимний ледяной покров (февраль 2017)

В феврале устанавливается низкая среднесуточная температура, что способствует увеличению толщины ледяного покрова. Снежный покров остается сухим.



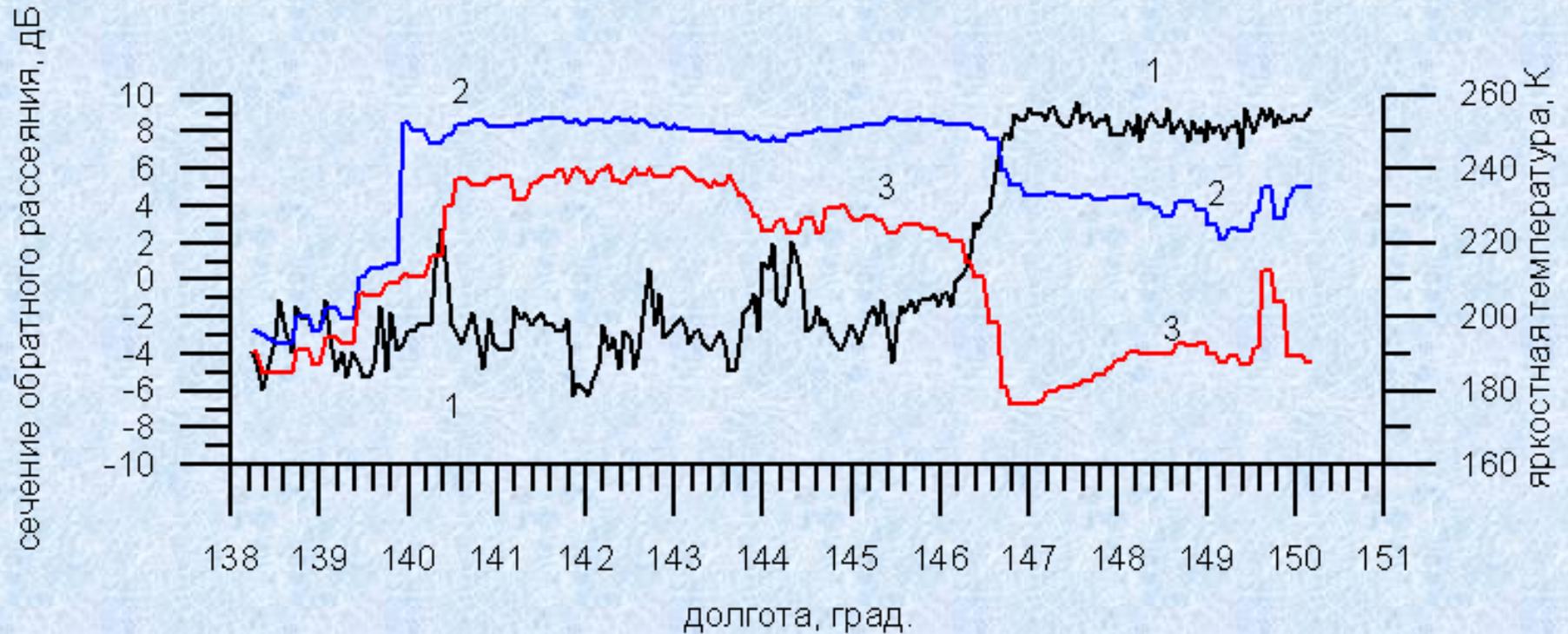
Карта ледяного покрова в Охотском море: а) на изображении MODIS 26 февраля 2017 01:17 UTC красным цветом показана область льда. б) данные университета Бремен показывают сплоченность ледяного покрова 26 февраля 2017. На карте-схеме ледовой обстановки НИЦ «Планета» (в) дана классификация ледяного покрова (26.02-28.02.2017).

# Зимний ледяной покров (февраль 2017)



Радиолокационное изображение в Ку-диапазоне (слева), поле яркостной температуры на частотах 36,5 ГГц на В-поляризации (справа) по измерениям GPM в 9:00 UTC 26 февраля 2017 г. Черная кривая на радиолокационном изображении – сечение для фиксированного угла падения.

# Зимний ледяной покров (февраль 2017)



Зависимость сечения обратного рассеяния (кривая 1, угол падения  $9,8^\circ$ ) и яркостной температуры на частоте 89 ГГц на В- (кривая 2) и Г-поляризации (кривая 3) от долготы

# Сплоченность ледяного покрова

Для вычисления сплоченности ледяного покрова  $C$  по данным радиометра GMI за основу взят алгоритм ASI, разработанный для радиометра AMSR-E на спутнике Aqua. В алгоритме используется поляризационная разность яркостных температур  $P$  на вертикальной (В) и горизонтальной (Г) поляризациях на частоте 89 ГГц.

$$P = T_{я}(89B) - T_{я}(89Г)$$

$$C = 1.64 \cdot 10^{-5} P^3 - 0.0016P^2 + 0.0192P + 0.9710$$

Для «грубой» классификации поверхности (да/нет) можно использовать дополнительные фильтры, которые разделяют свободную ото льда морскую поверхность и ледяной покров разной сплоченности. В формуле используются яркостная температура на частотах 36,5 и 18,7 ГГц на В и Г поляризациях.

$$GR(36,5/18,7) = \frac{T_{я}(36,5B) - T_{я}(18,7B)}{T_{я}(36,5B) + T_{я}(18,7B)}$$

Если  $GR(36,5/18,7) < 0,045$ , то присутствует лед.

# 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  $\sigma_{0в}$ :

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

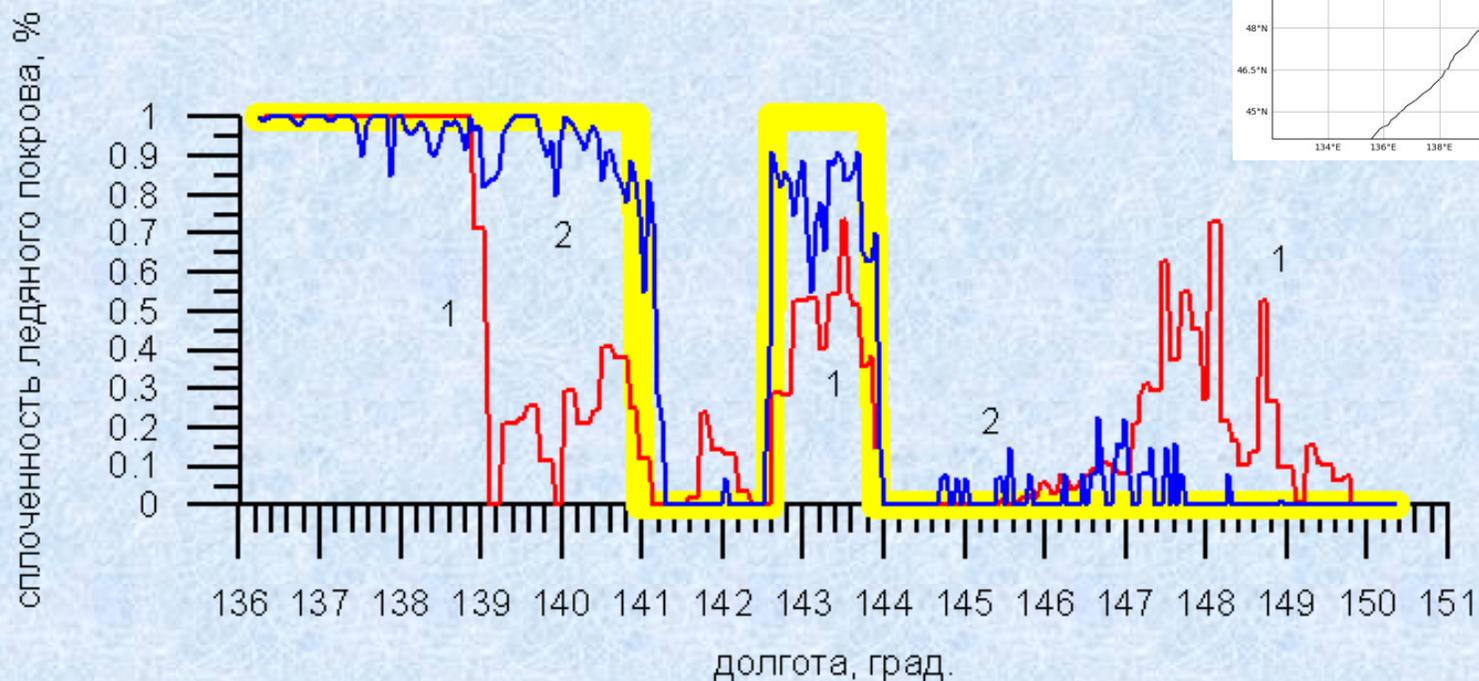
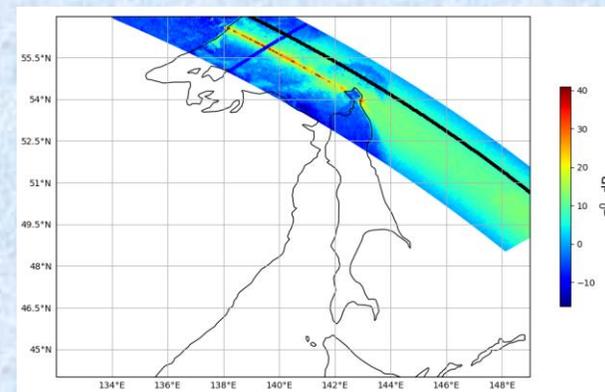
где  $S_l$  площадь ледяного покрова. Тогда сплоченность ледяного покрова  $C$  можно вычислить по следующей формуле

$$C = \frac{\sigma_{0в} - \sigma_0}{\sigma_{0в} - \sigma_{0л}}$$



# Сплоченность ледяного покрова (ноябрь)

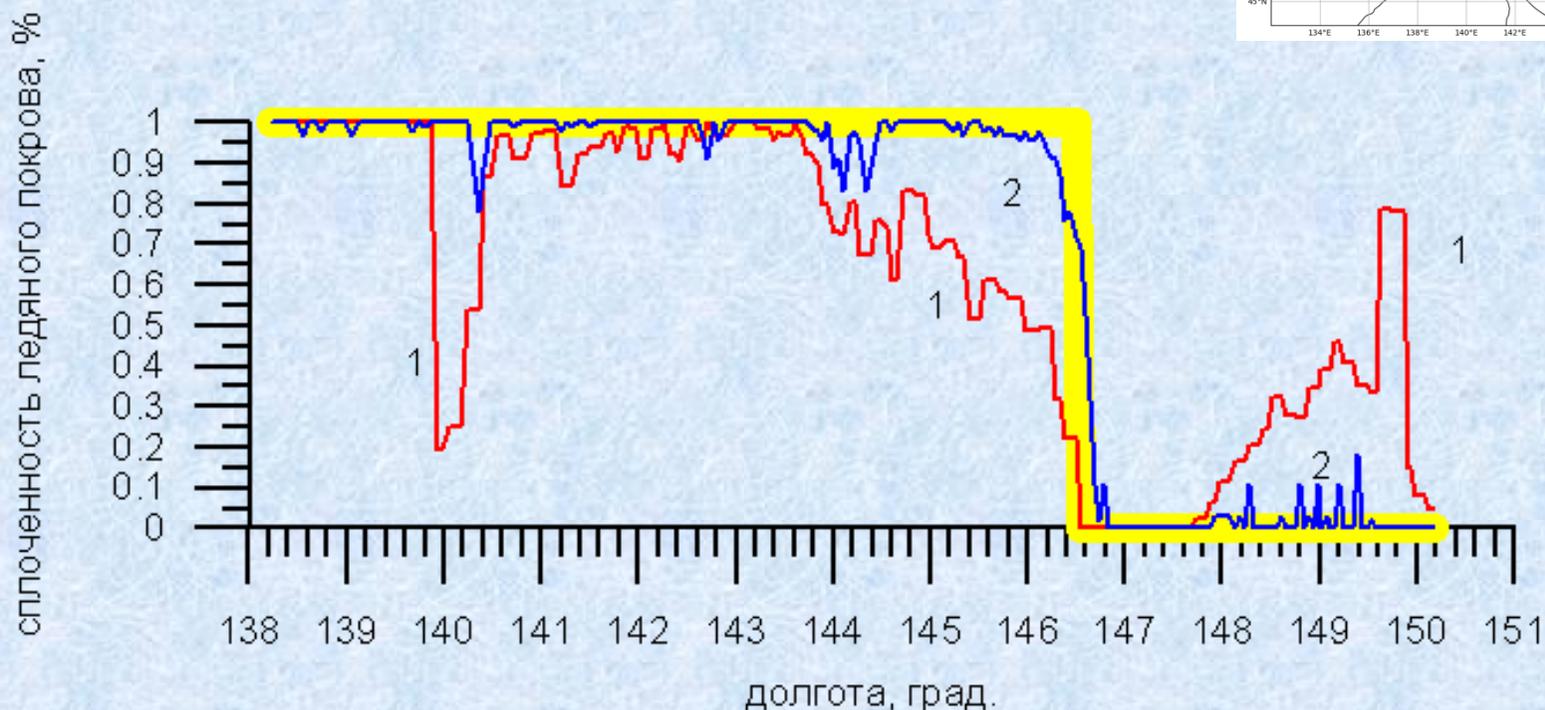
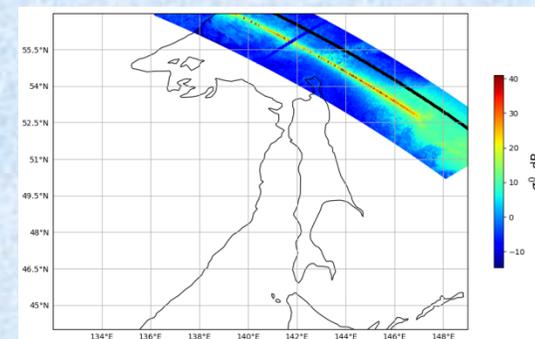
Толстая желтая линия показывает участки открытой воды (значение 0) и ледяного покрова (значение 1). Для льда сплоченность может принимать любые значения. Фильтр не может разделить лед и сушу.



Пример работы алгоритмов классификации типа рассеивающей поверхности (жирная желтая кривая) и сплоченности ледяного покрова: красная кривая вычислена по радиометрическим данным (формула (4)). Синяя кривая - по радиолокационным данным.

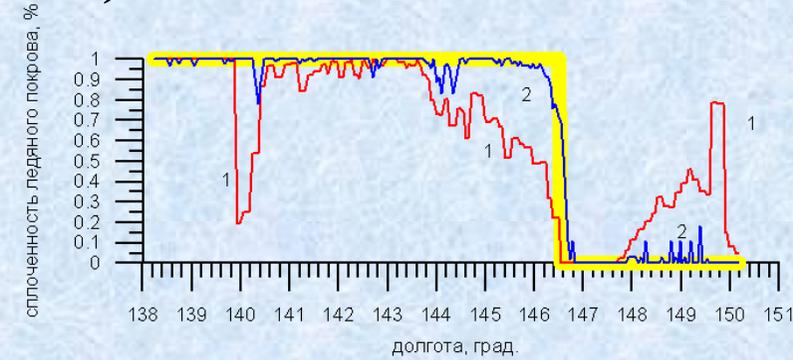
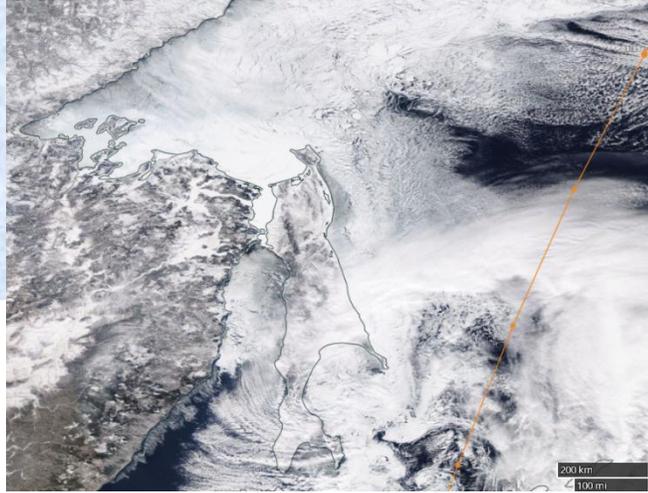
# Сплоченность ледяного покрова (февраль)

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



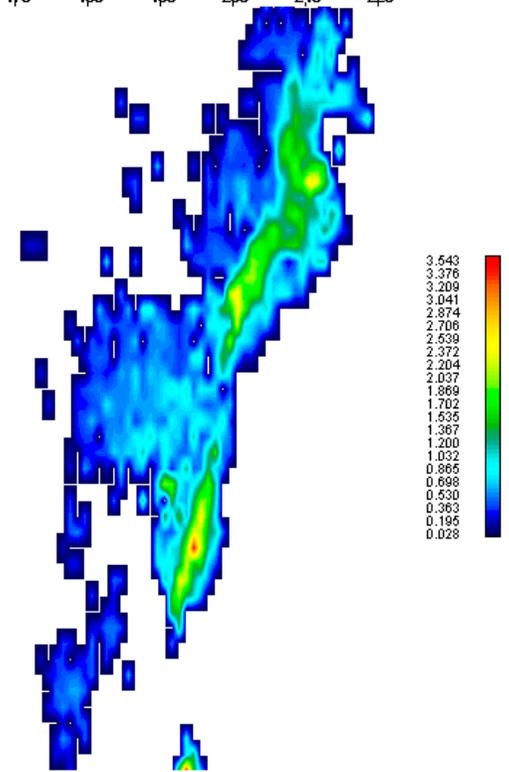
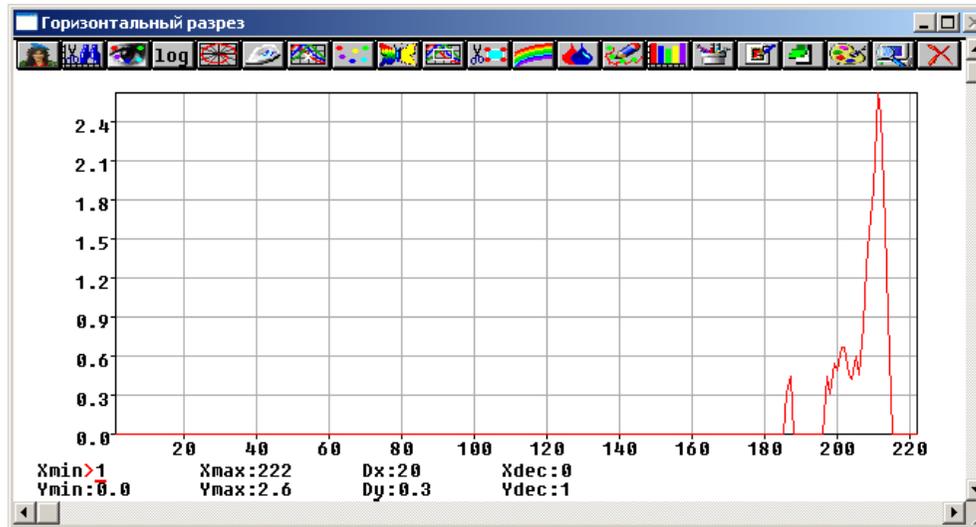
Пример работы алгоритмов классификации типа рассеивающей поверхности (жирная желтая кривая) и сплоченности ледяного покрова: красная кривая вычислена по радиометрическим данным, синяя кривая - по радиолокационным данным.

# Сплоченность ледяного покрова (февраль)



-18.00-  
-17.00-  
-16.00-  
-15.00-  
-14.00-  
-13.00-  
-12.00-  
-11.00-  
-9.00-  
-8.00-  
-7.00-  
-6.00-  
-5.00-  
-4.00-  
-3.00-  
-2.00-  
-1.00-  
0.00-  
1.00-  
2.00-  
3.00-  
4.00-  
5.00-  
6.00-  
7.00-  
8.00-  
9.00-  
10.00-  
11.00-  
12.00-  
13.00-  
14.00-  
15.00-  
16.00-  
17.00-  
18.00-

190 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200 210 220



Преимущество дождевого радиолокатора состоит в том, что он измеряет интенсивность осадков и эта информация может использоваться при обработке.

## Выводы

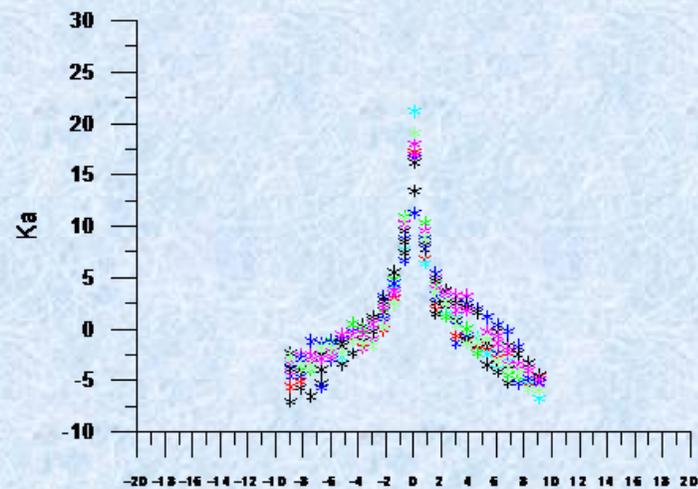
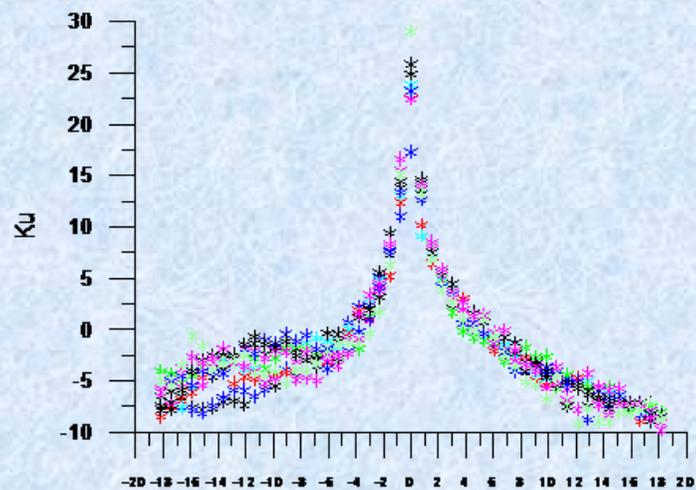
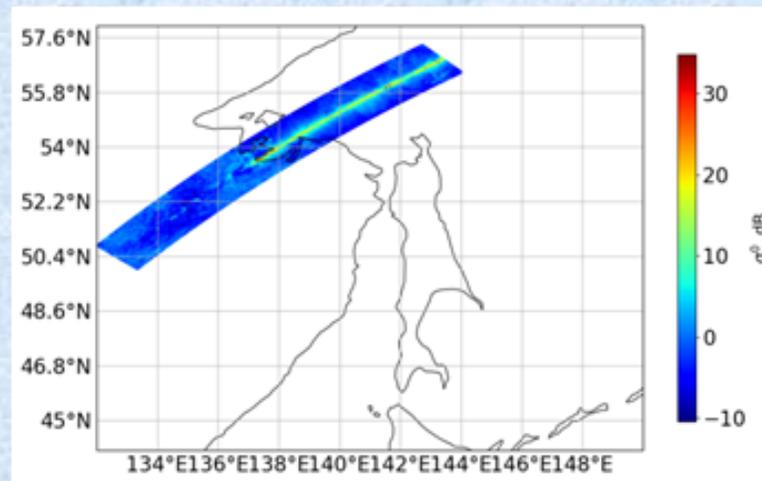
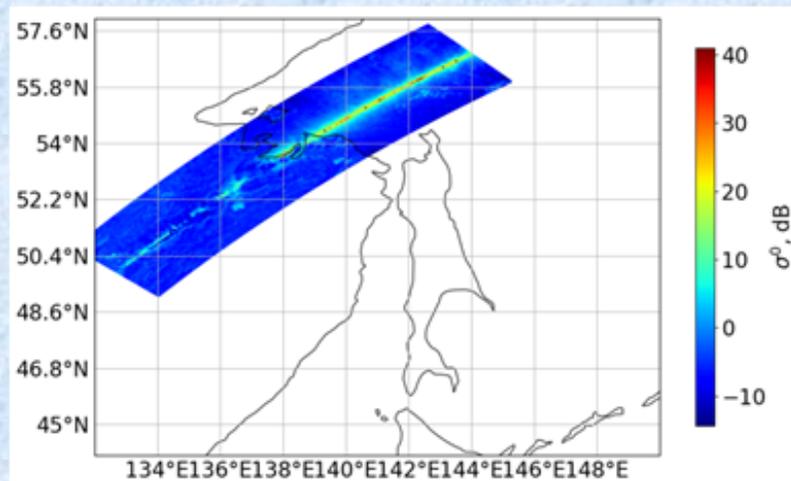
Проведена обработка данных двухчастотного дождевого радиолокатора в осенне-зимний сезон 2016-2017 года в Охотском море. Уникальность использованных данных обусловлена тем, что измерения сечения обратного рассеяния выполняются при малых углах падения ( $< 19$ ).

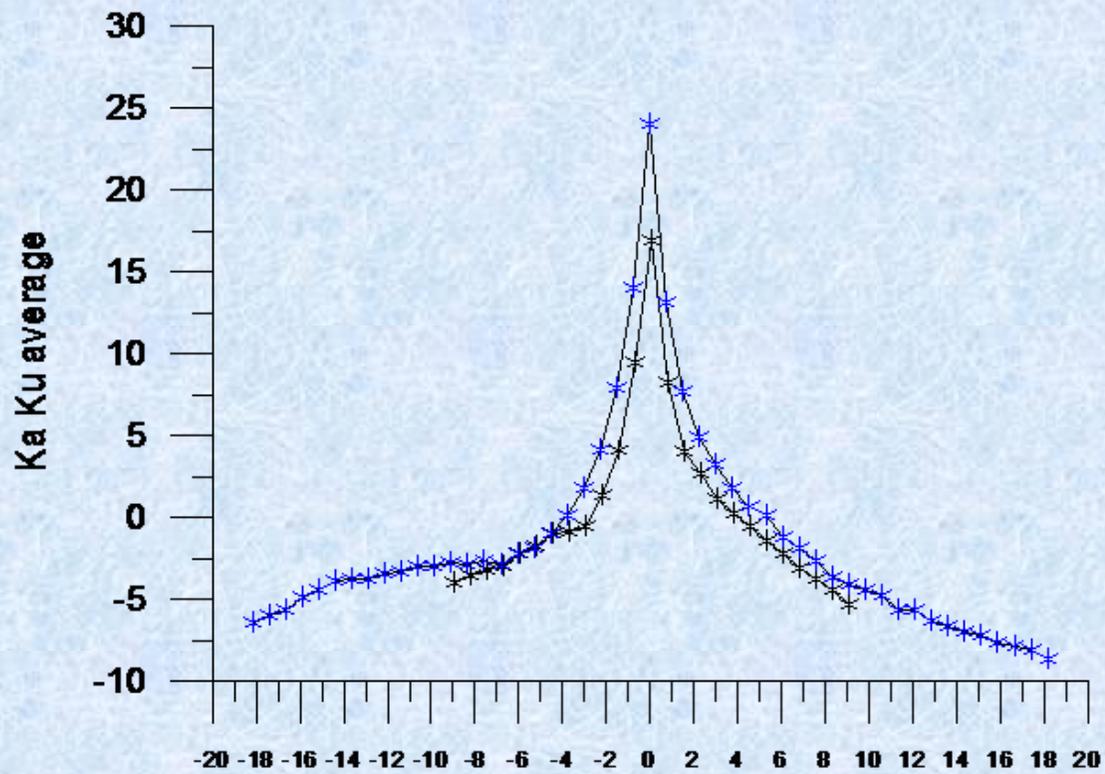
Предложен новый алгоритм определения сплоченности ледяного покрова по сечению обратного рассеяния, измеренному при малых углах падения. Сравнение со стандартным алгоритмом, использующим данные многочастотного радиометра, показало его работоспособность.

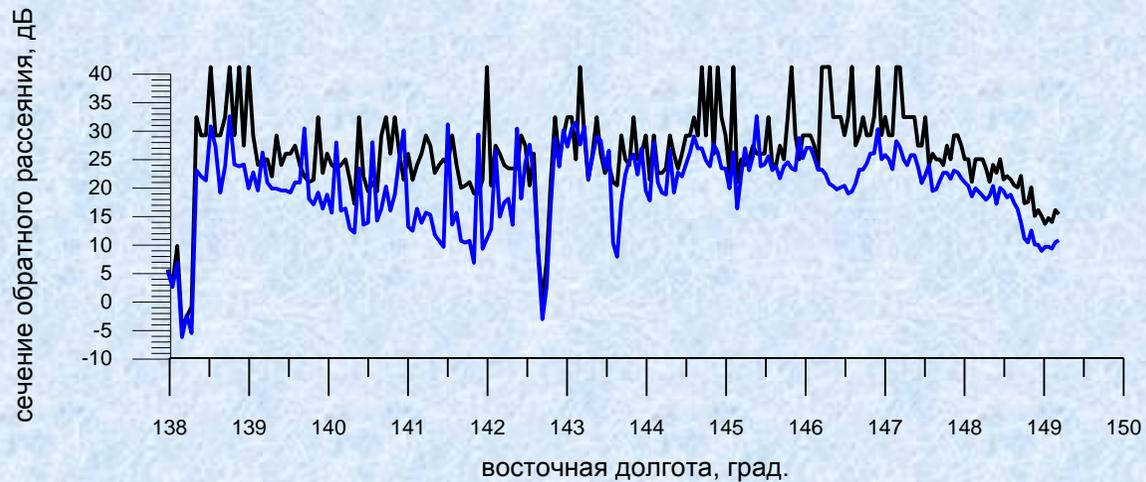
Включение в алгоритмы данных дождевого радиолокатора об осадках позволит минимизировать ошибки, связанные с состоянием атмосферы.

Для оценки эффективности нового подхода исследования будут продолжены.

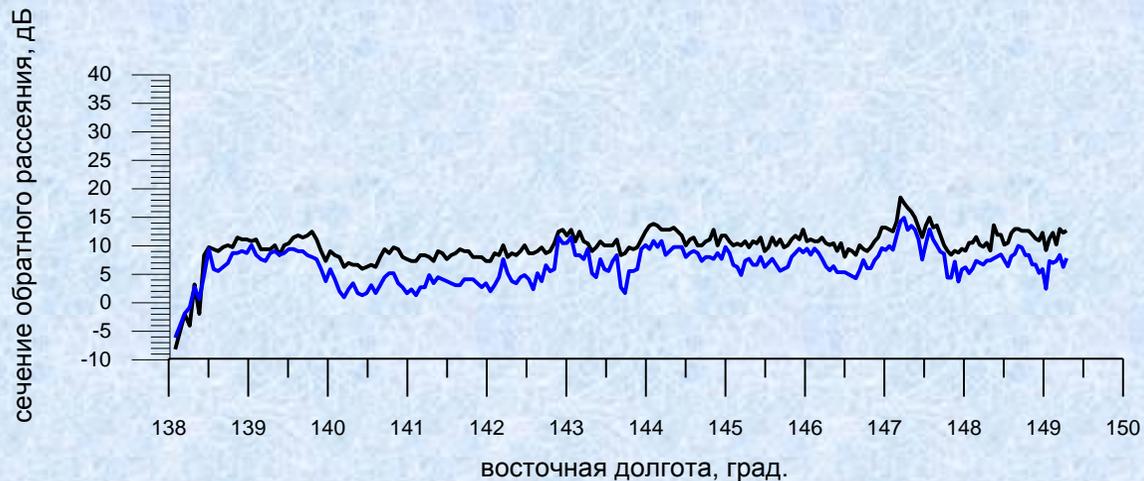
**Спасибо за внимание!**



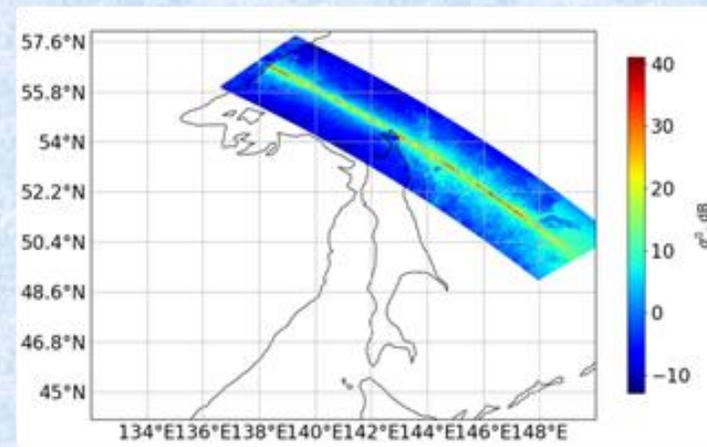




Угол падения = 0



Угол падения = 1.5



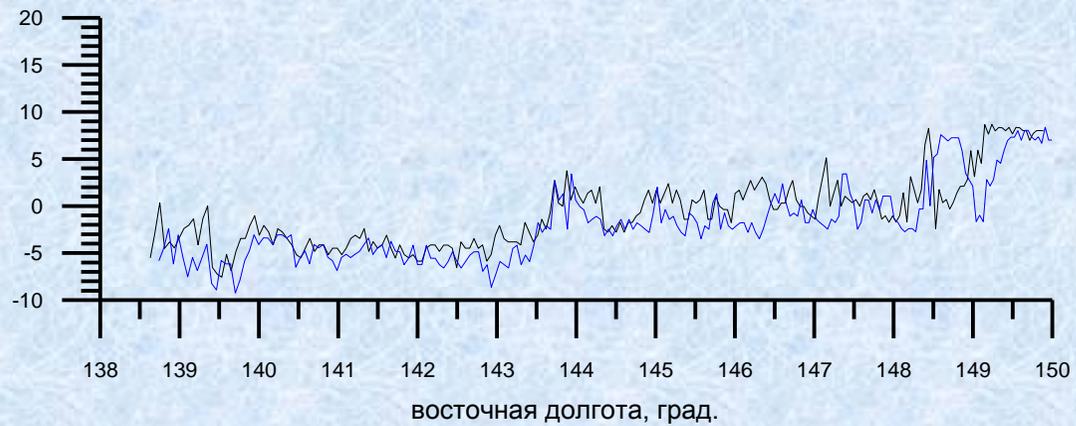
10/03/2017

сечение обратного рассеяния, дБ



угол падения 6 град.

сечение обратного рассеяния, дБ



угол падения 9 град.