

Спутниковое микроволновое зондирование морского льда в Арктике

План лекции



Что такое морской лёд?



Почему нужно изучать?



Параметры морского льда и
ледяного покрова



Дистанционные методы

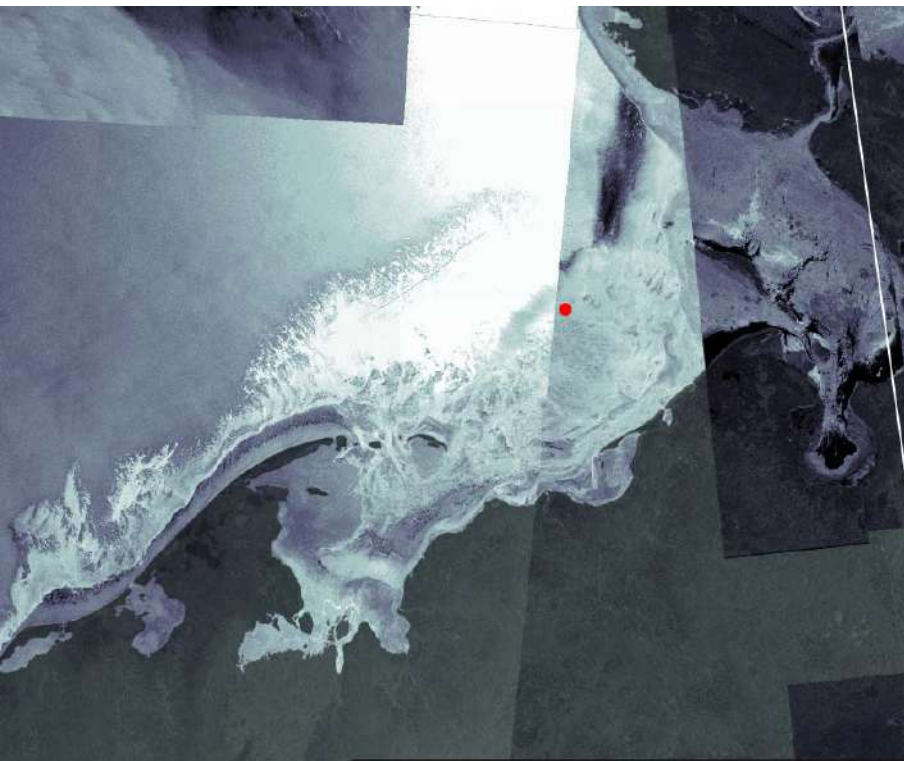


Спутниковые микроволновые
методы

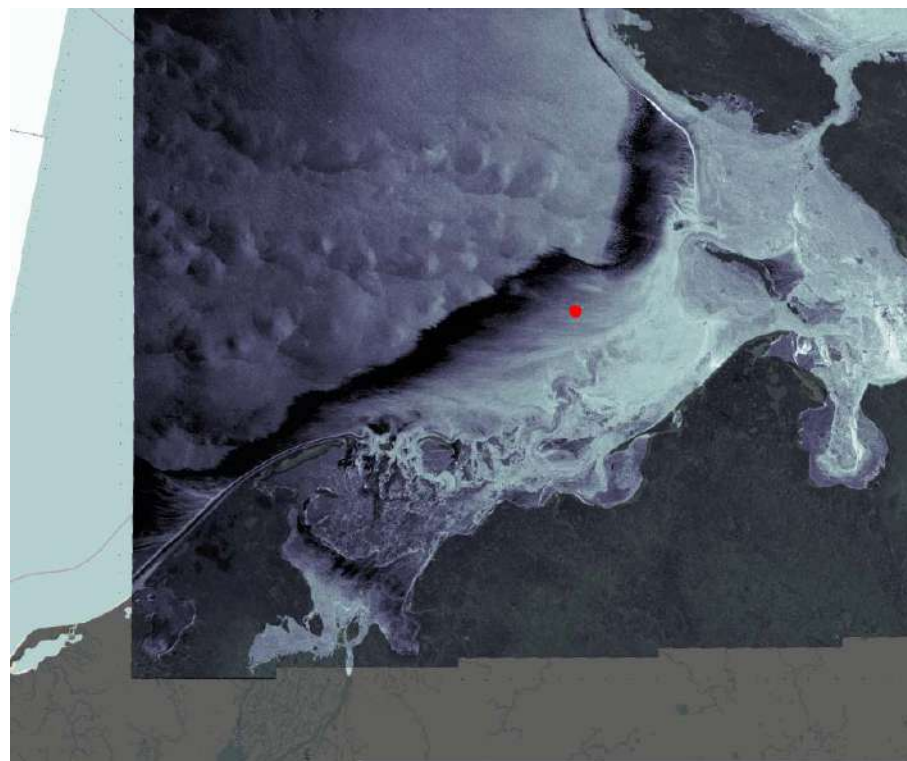


Sentinel-1 A,B

5-6 января 2020

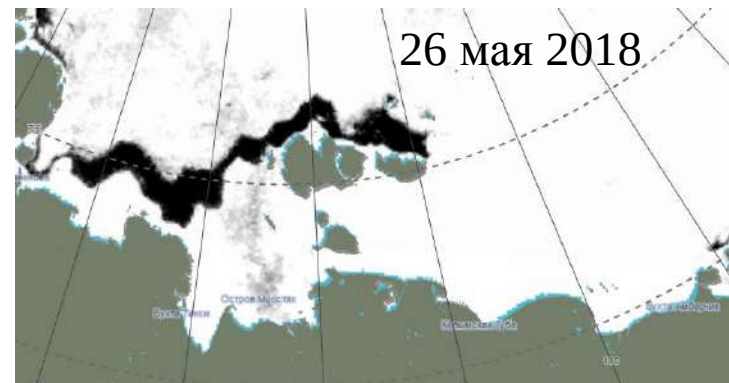
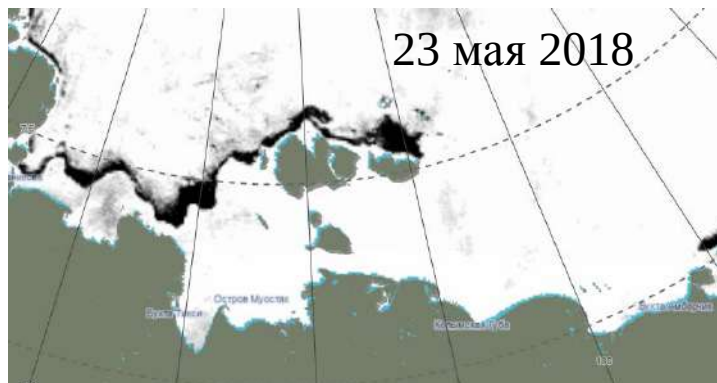
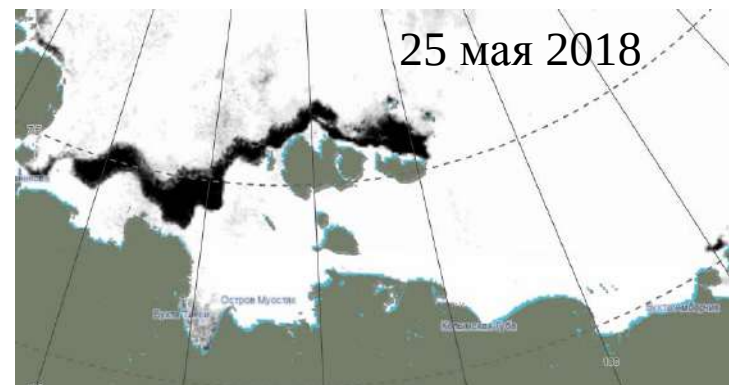
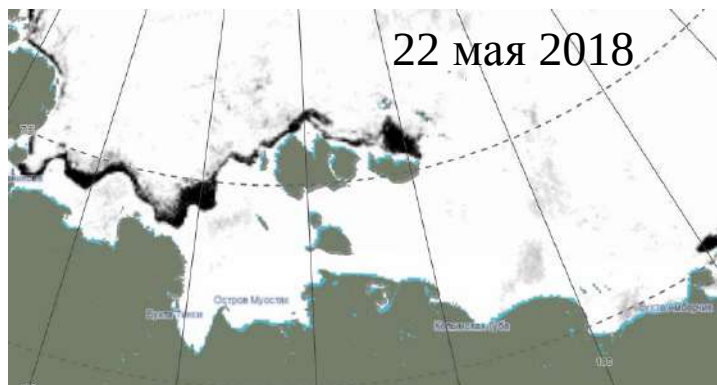
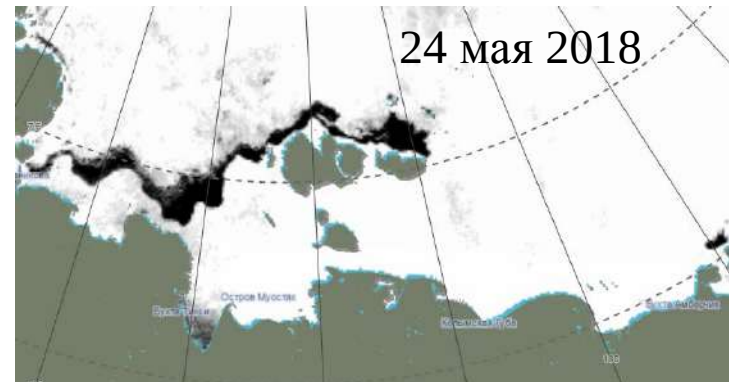


7 января 2020



Изучение мезомасштабной изменчивости морского льда с использованием
высокого разрешения РСА (40 м)

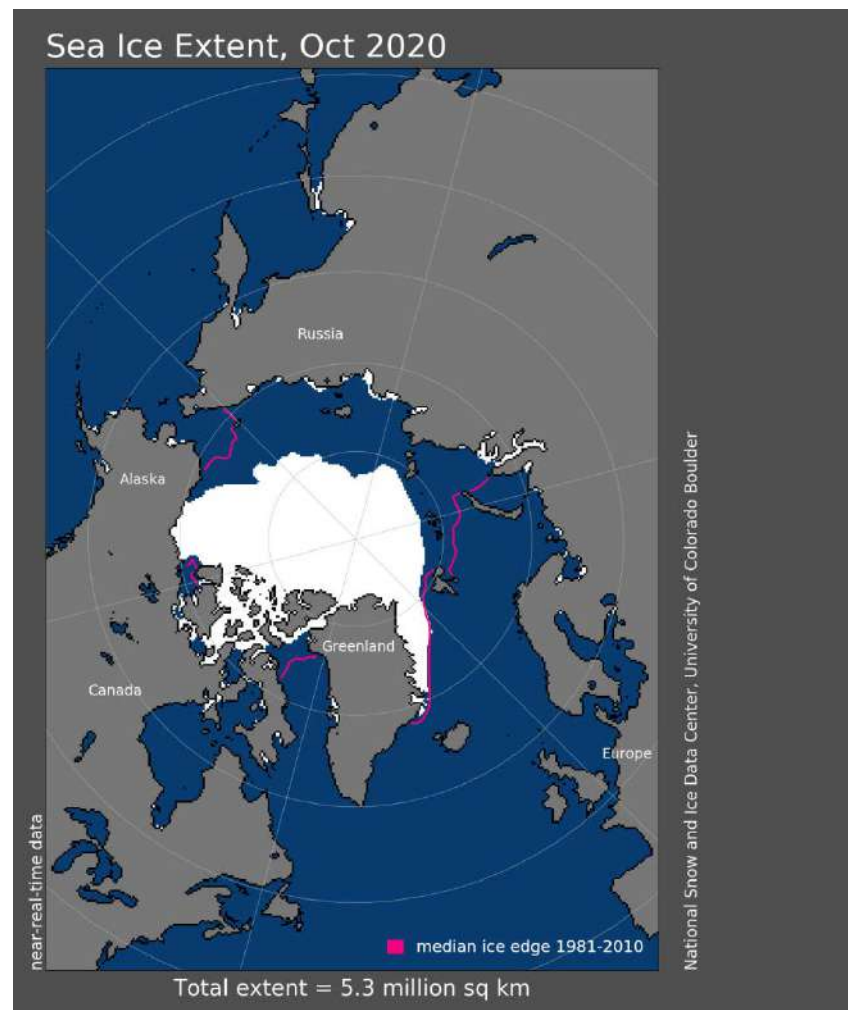
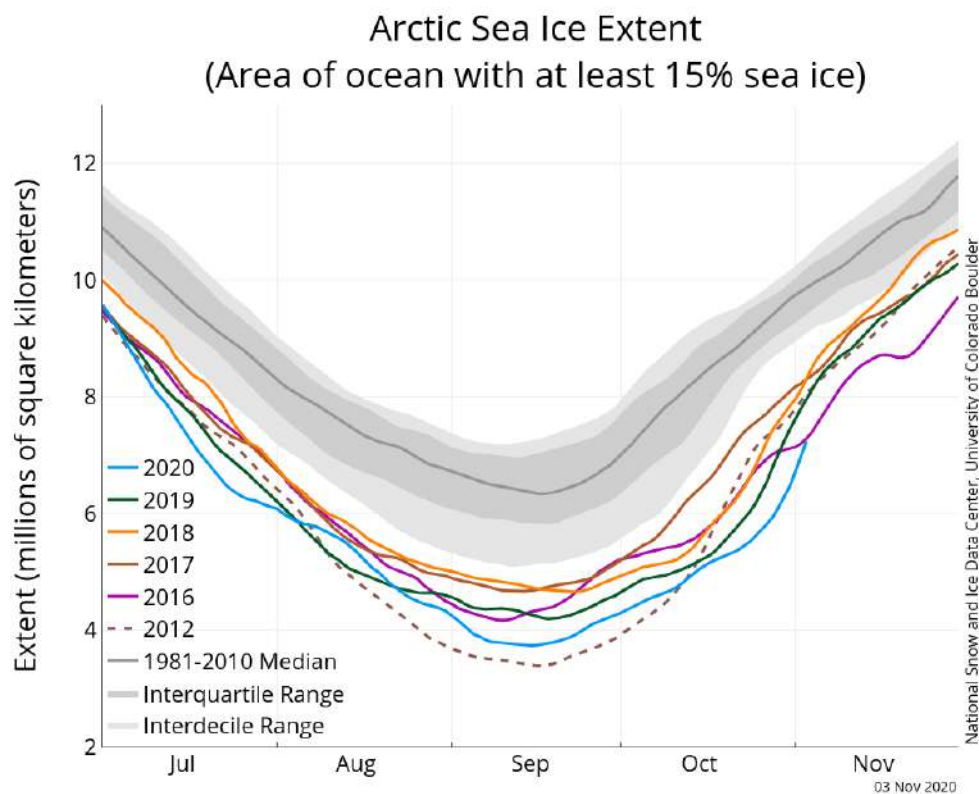
Раскрытие Великой Сибирской полыньи



сплоченность льда по данным AMSR2, разрешение 3 км

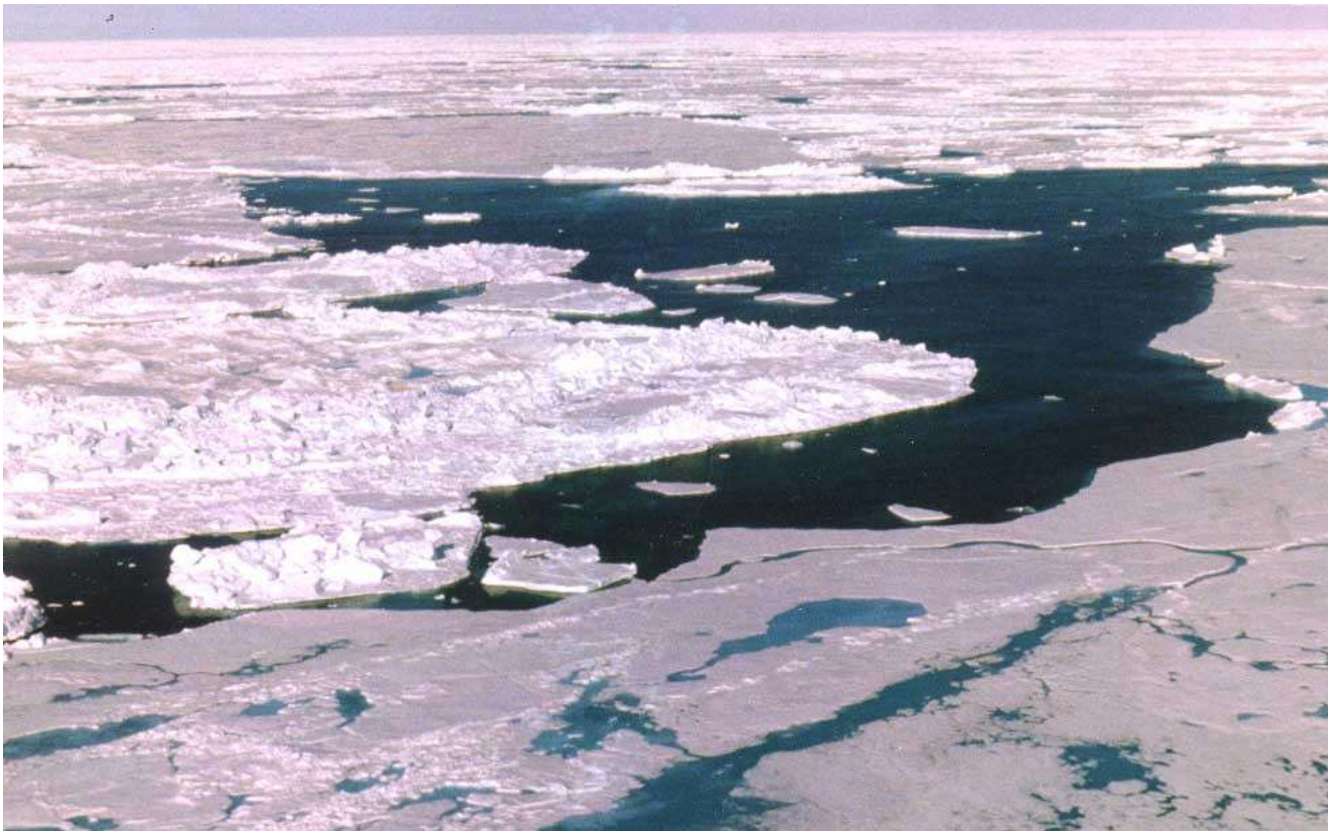
Зачем изучать морской лед?

- Обеспечение безопасной навигации и эффективной народнохозяйственной деятельности в Арктике;
- Параметры ледяного покрова нужны для решения задач прогноза погоды и климата
- Ледяной покров Арктики – главный индикатор климатических изменений



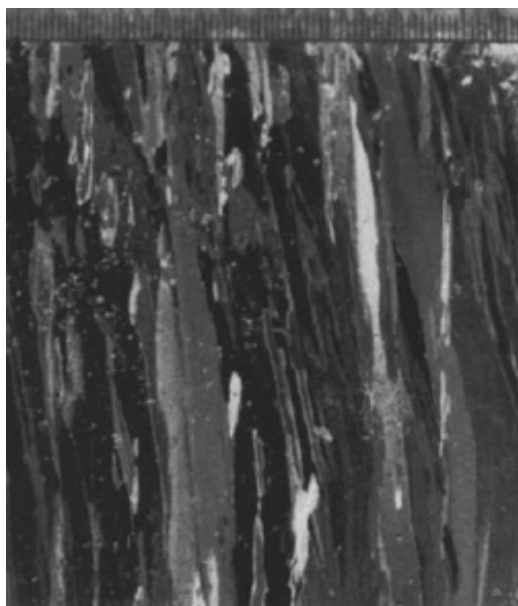
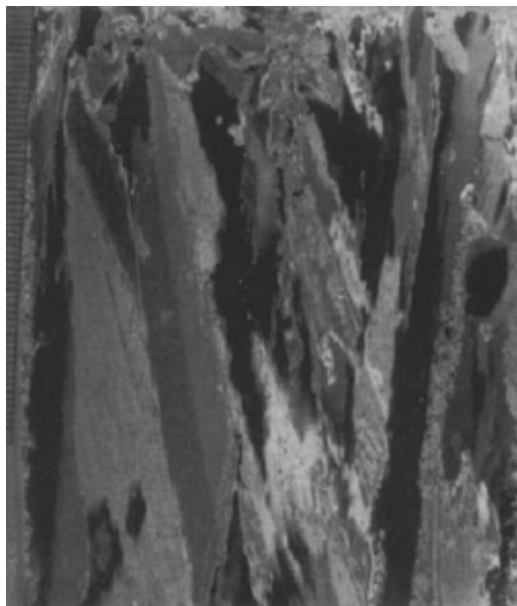
Морской лёд

- Морской лёд — лёд, образовавшийся в море при замерзании воды
- Состав льда: кристаллы пресного льда, рассол, пузырьки воздуха, соли в твердом состоянии

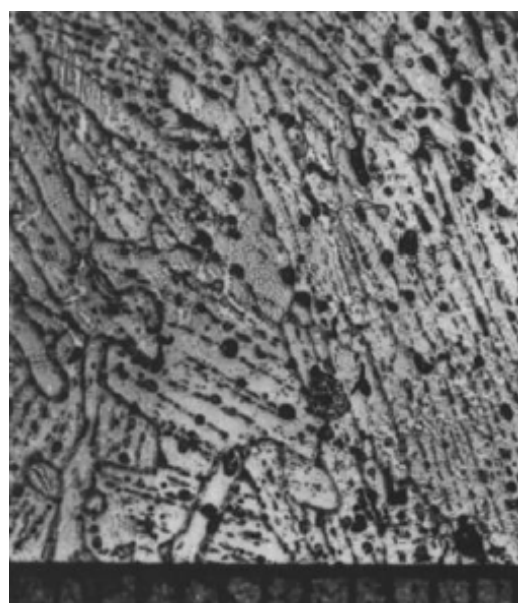


Для дистанционного зондирования первостепенное значение имеют диэлектрические свойства льда

Структура морского льда



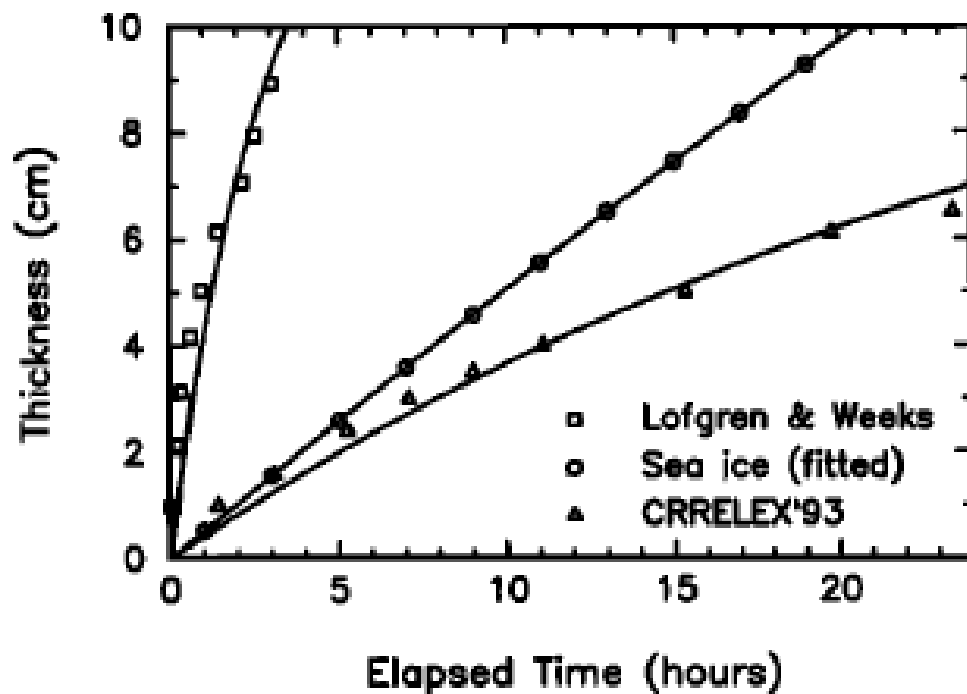
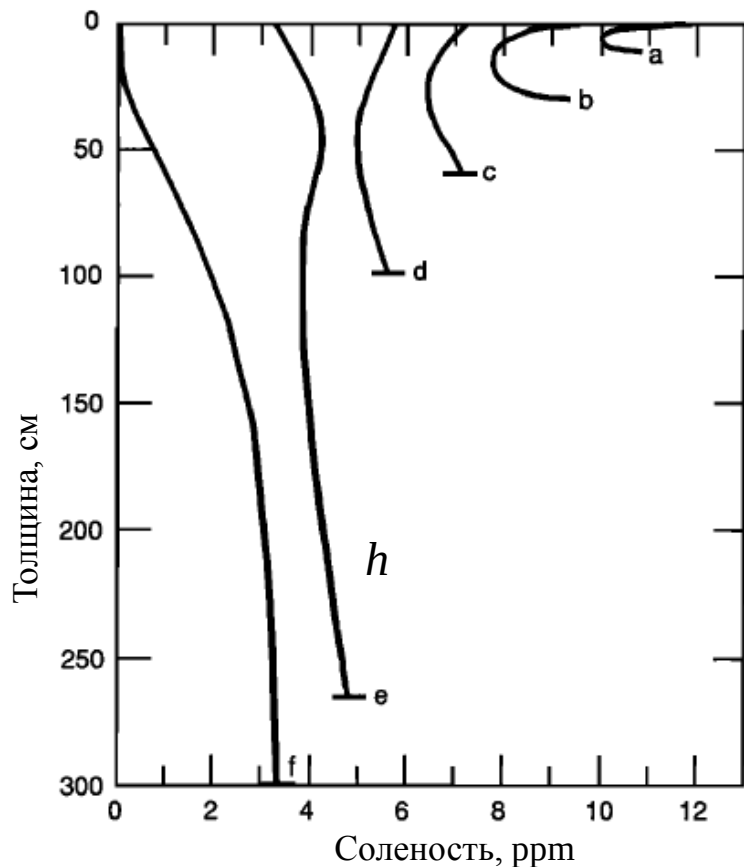
Вертикальный разрез



Разрез в горизонтальной
плоскости

Однолетний и
многолетний льды
обладают разной
структурой

Соленость и толщина морского льда



- лед по строению можно разделить на *игольчатый*, *губчатый* и *зернистый*
- а по глубине образования - на *поверхностный*, *глубинный* и *донный*

Параметры морского льда

- Соленость (профиль)
- Температура (профиль)
- Содержание примесей и воздуха
- Структура (характерные размеры соляных карманов и пузырьков воздуха)
- Толщина (возраст)

Возраст льда

- Начальные виды льда (ледяные иглы, ледяное сало), снежура, шуга)
- Нилае
- Молодой лед (10-30 см)
- Однолетний лед (до 2 м)
- Многолетний лед (старый лед)

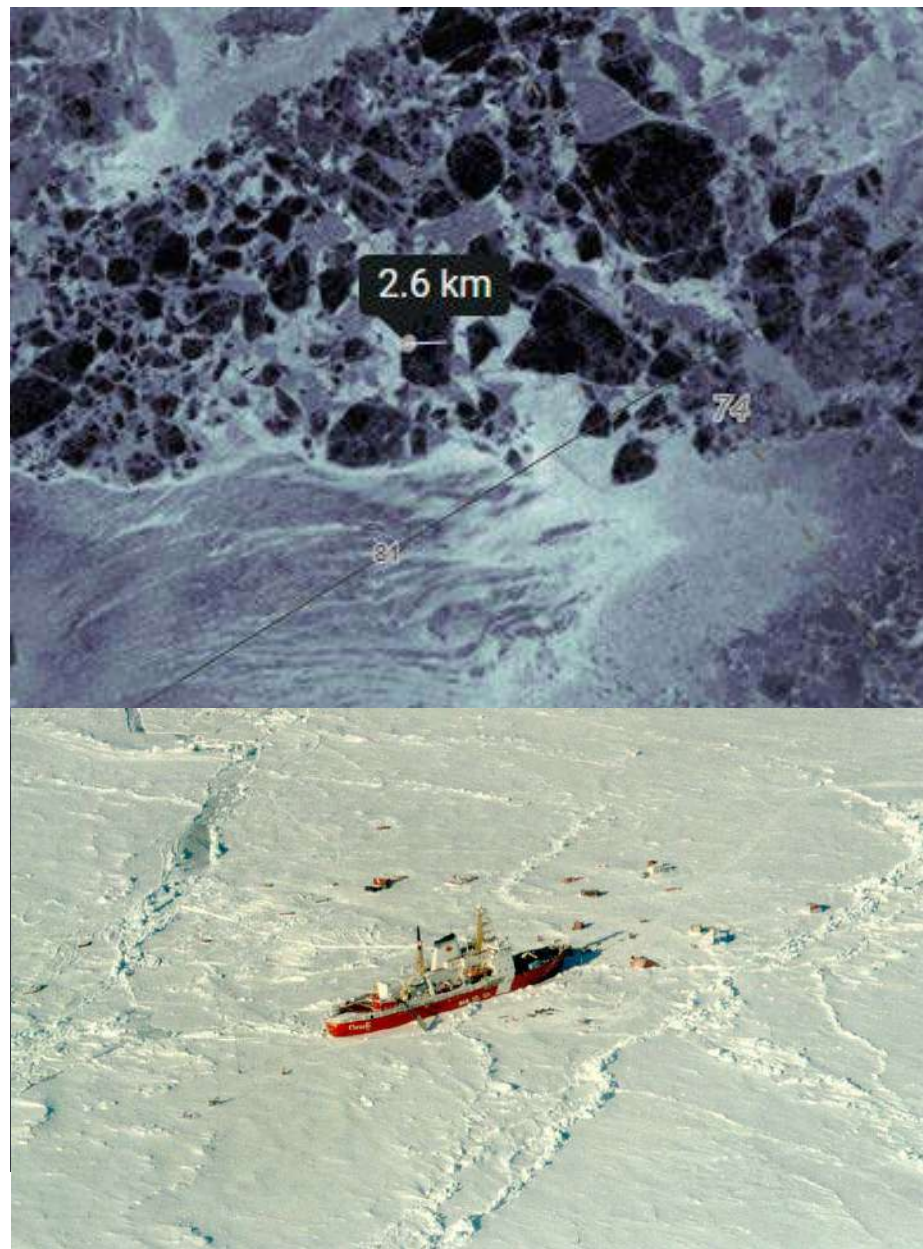


Параметры ледяного покрова

- Общая сплоченность
- Толщина
- Возраст
- Торосистость (шероховатость поверхности)
- Размер ледяных полей
- Дрейф
- Наличие и параметры трещин
- Наличие и параметры снежниц
- Площадь и границы распространения

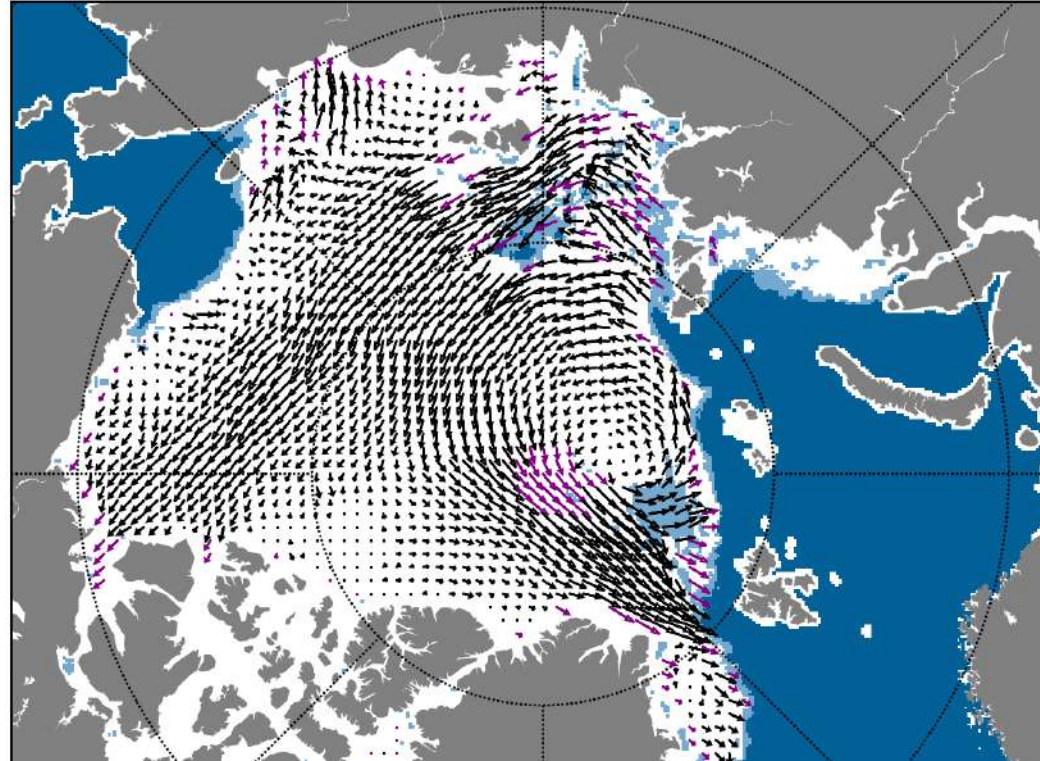
Методы получения информации о морском льде

- Визуальные (1870-е -)
- Самолетные (1924 -)
- Спутниковые (1960 - регулярные с 1978)



Морской лед Арктики

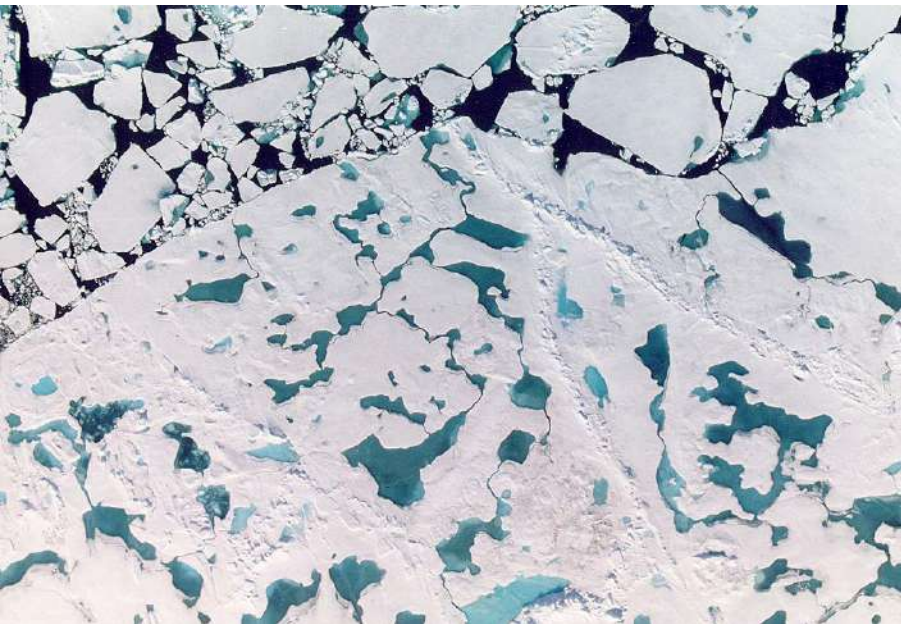
- Площадь – 5- 10 млн км²
- Движущиеся льды
- Толщина до нескольких метров
- Возрастной состав – до десятков лет
- Сильная изменчивость



Поле дрейфа льда OSI SAF

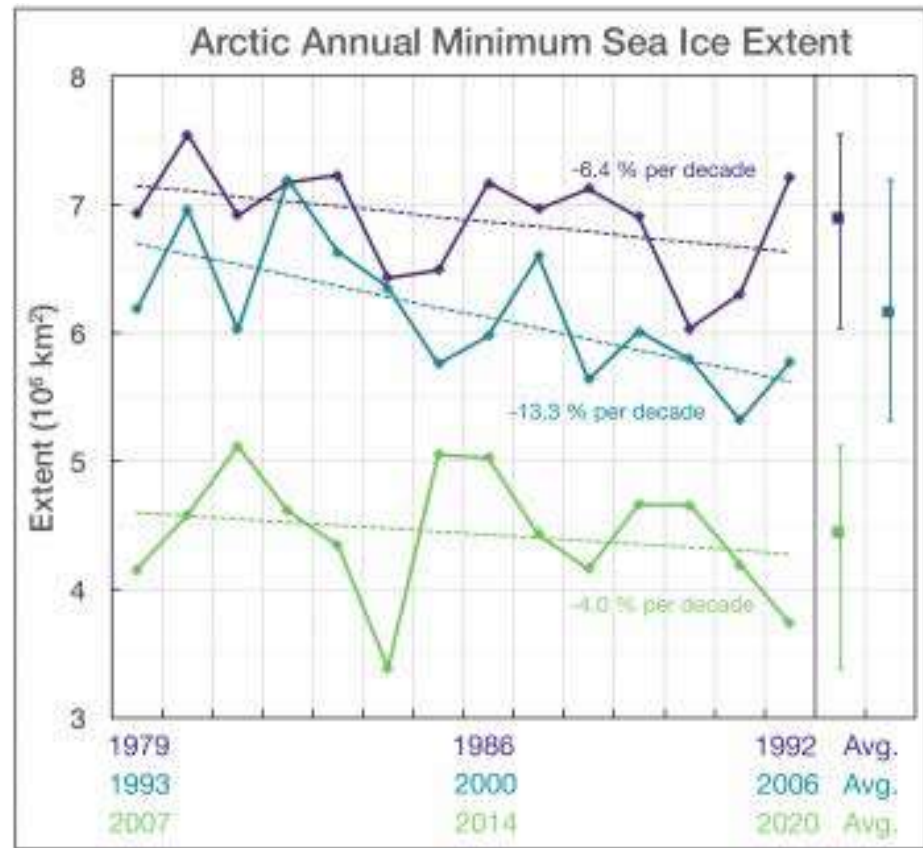
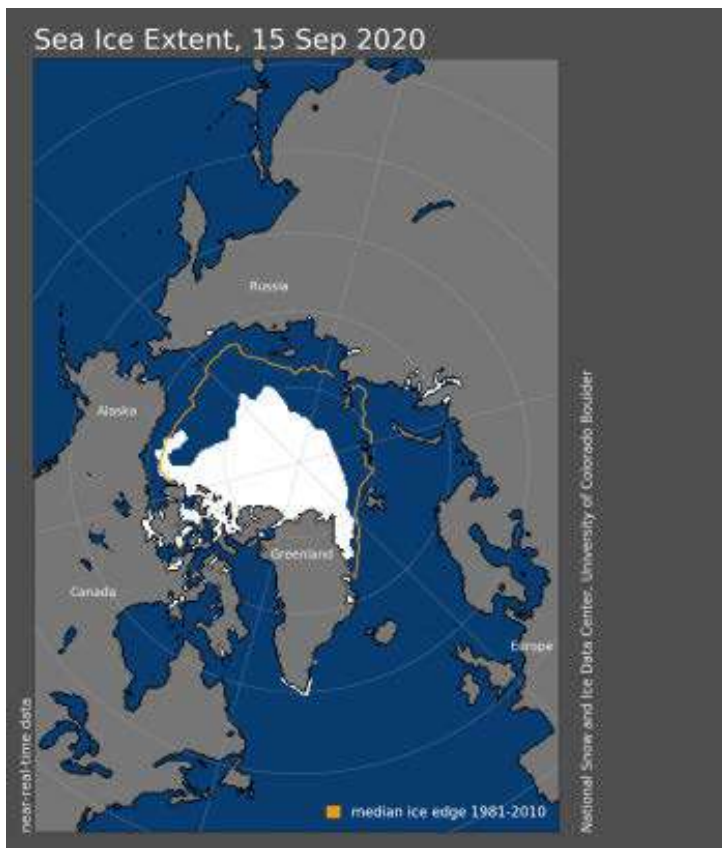
Изменчивость ледяного покрова Арктики

- Горизонтальная изменчивость (мезомасштабная, мелкомасштабная и крупномасштабная)
- Вертикальная изменчивость
- Временная (на разных масштабах)



Спутниковое дистанционное зондирование – основной инструмент мониторинга параметров морского льда и параметров ледяного покрова

- Только дистанционные методы измерений позволяют строить регулярные карты геофизических параметров
- Редкая сеть традиционных наблюдений;
- Удаленность Арктических районов;



Спутниковая система наблюдений сегодня

Запущено и планируется к запуску в течение 15 лет

> 740

спутниковых платформ,

из них ~ 270

функционируют сегодня

> 1000

инструментов

финансируемых и используемых ~ 30

космическими агентствами

Типы спутниковых данных для зондирования морского льда

- Радиолокационные измерения;
пространственное разрешение от низкого – десятки км - до высокого – десятки м;
скаттерометры, альтиметры, радиолокаторы, РСА
- Измерения спектральных радиометров в видимом и ИК диапазоне;
разрешение от умеренного – сотни м – до высокого – десятки м
- Измерения спутниковых микроволновых радиометров
низкое пространственное разрешение – десятки км
 - *регулярность*
 - *независимость от солнечного освещения*
 - *независимость от облачности*
 - *возможность количественной оценки параметров ледяного покрова*

Основные спутниковые инструменты для изучения морского льда сегодня

- **Радиолокаторы, в т.ч. с синтезированной апертурой (РСА)**

- Sentinel-1 A, B
 - RadarSat-2
-

- **Микроволновые радиометры**

- AMSR2
 - SSMI, SSMIS
 - WindSat
 - SMOS
 - SMAP
 - МТВЗА-Гя (на Метеор-М)
-

- **Альтиметры**

- CryoSat-2
- Saral
- Sentinel-3
- IceSat-2
- Jason-2, Jason-3
- HY-2

- **Скаттерометры**

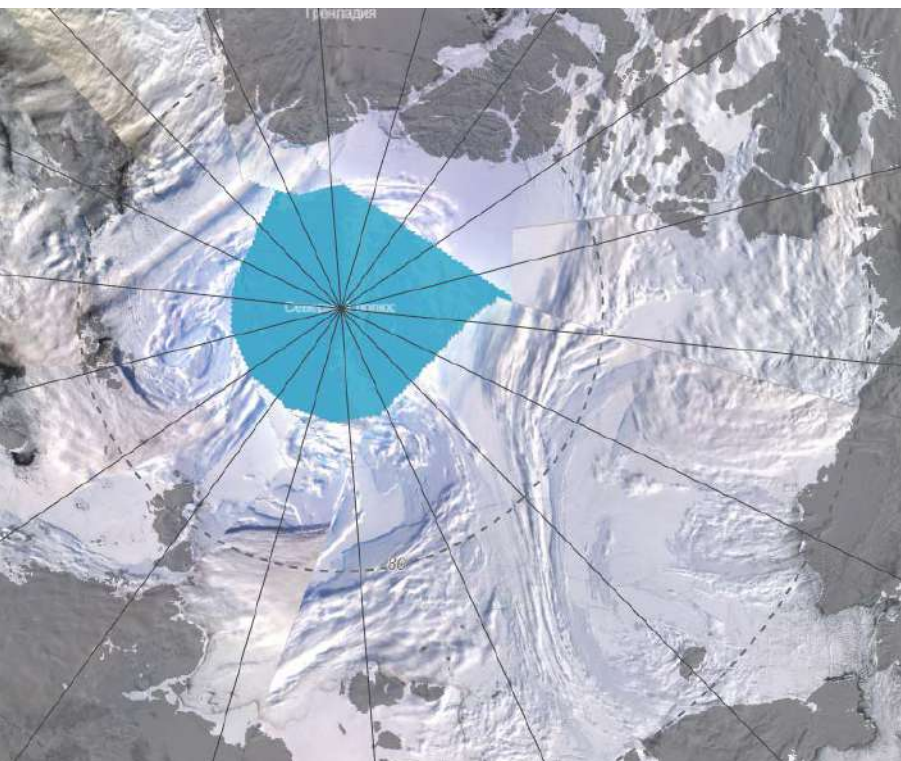
- ASCAT
 - SCAT
 - OSCAT
-

- **Многоспектральные сканирующие комплексы (ИК, видимый)**

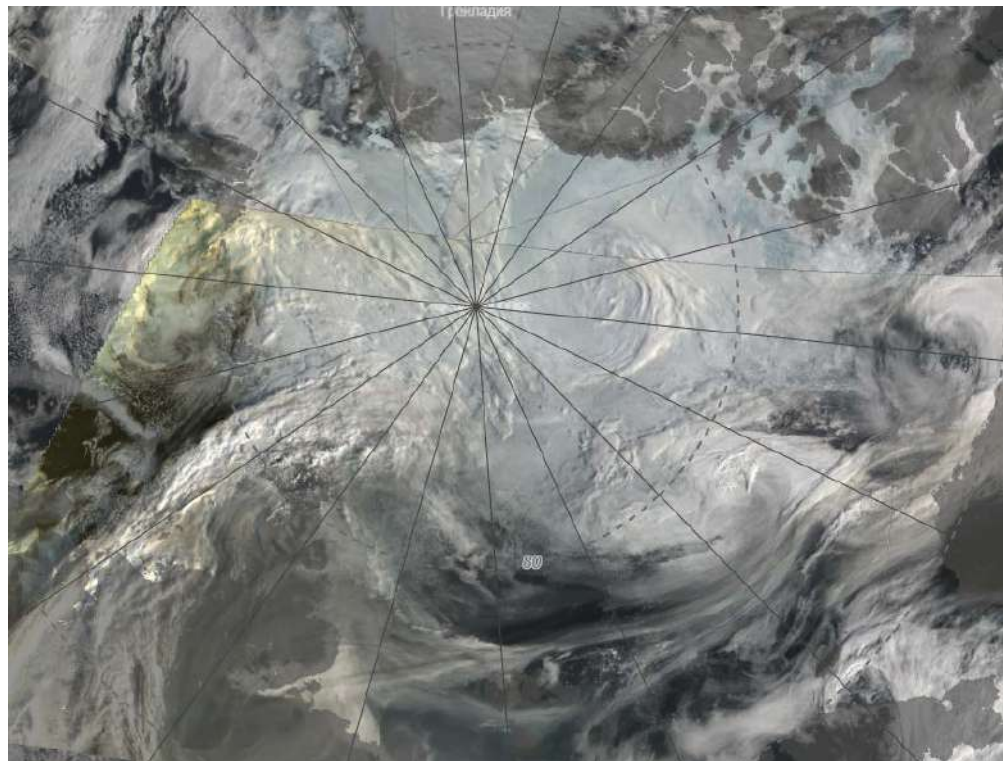
- MODIS
- VIIRS
- AVHRR
- Sentinel-2
- Метеор-М
- Ресурс-П
- Канопус-В

Основные инструменты мониторинга морского льда Арктики – микроволновые инструменты

- Облачность в Арктике - более 65%



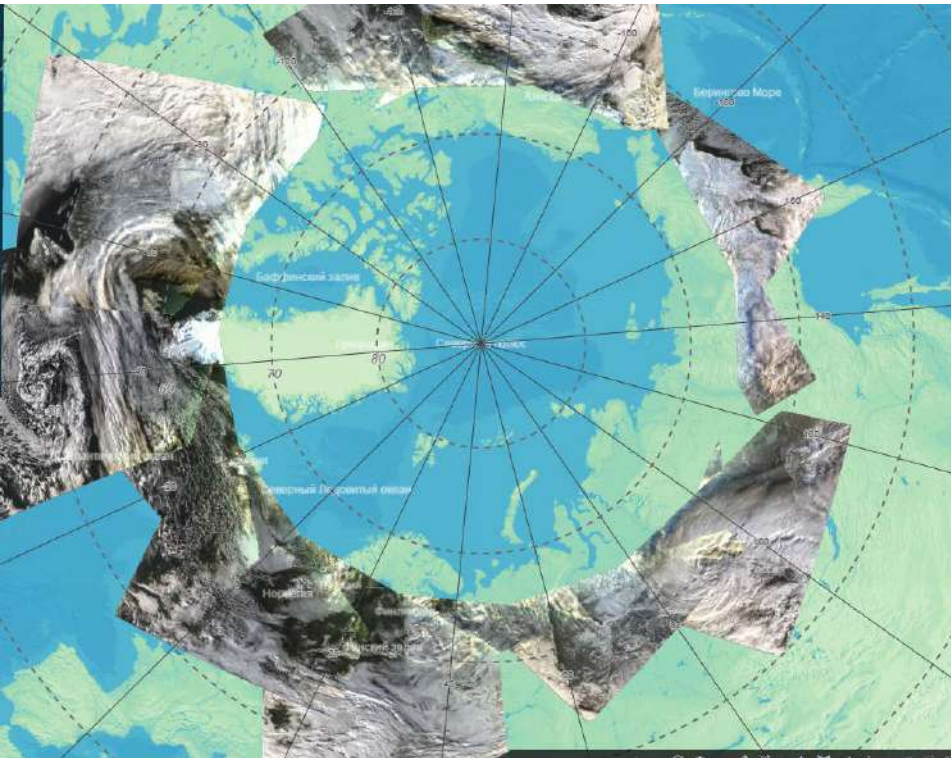
19 марта 2019



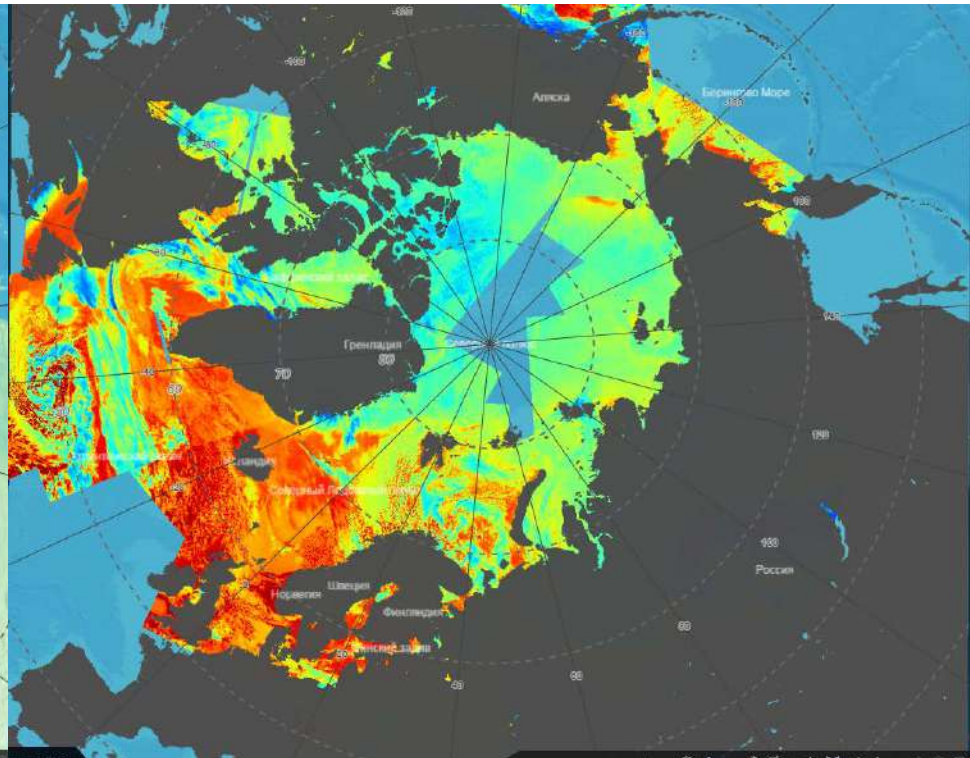
11 августа 2019

Измерения спектральных радиометров для изучения Арктики

25 ноября 2018



видимый MODIS

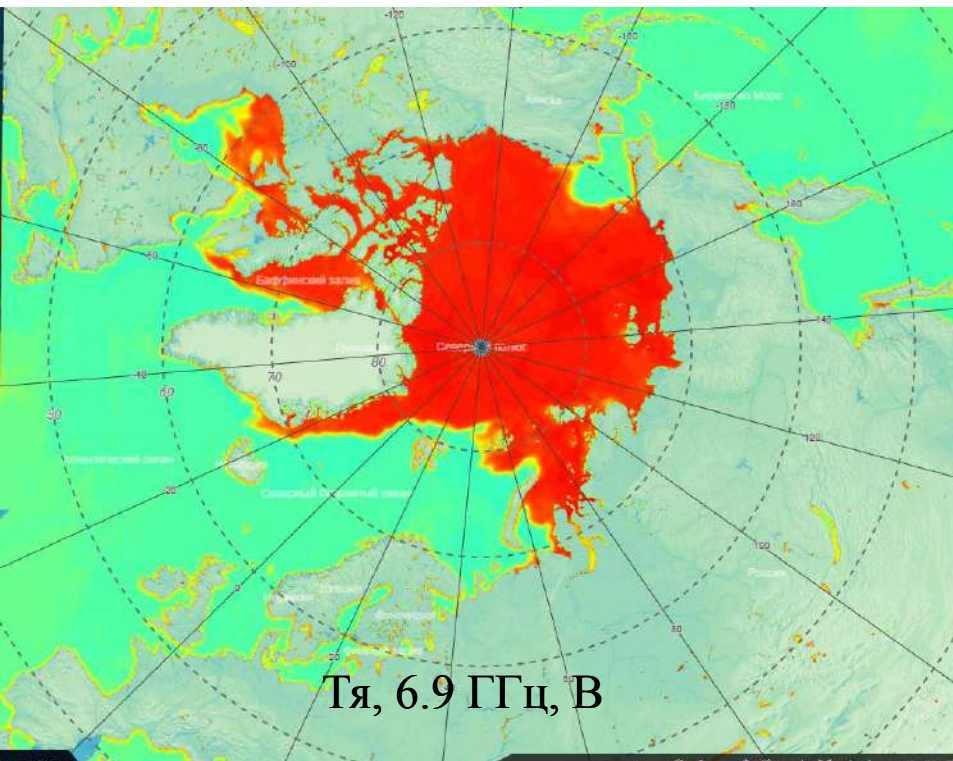


ИК MODIS

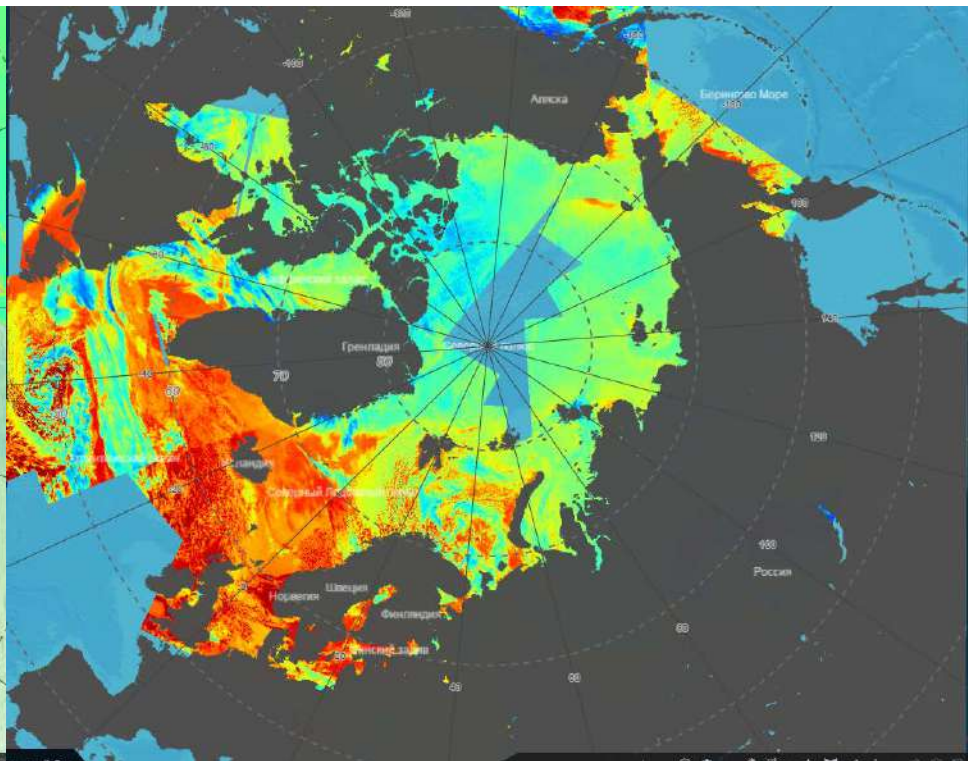
Видимые изображения требуют солнечного освещения, поэтому мало пригодны для изучения Арктики зимой

Микроволновые и ИК измерения

25 ноября 2018



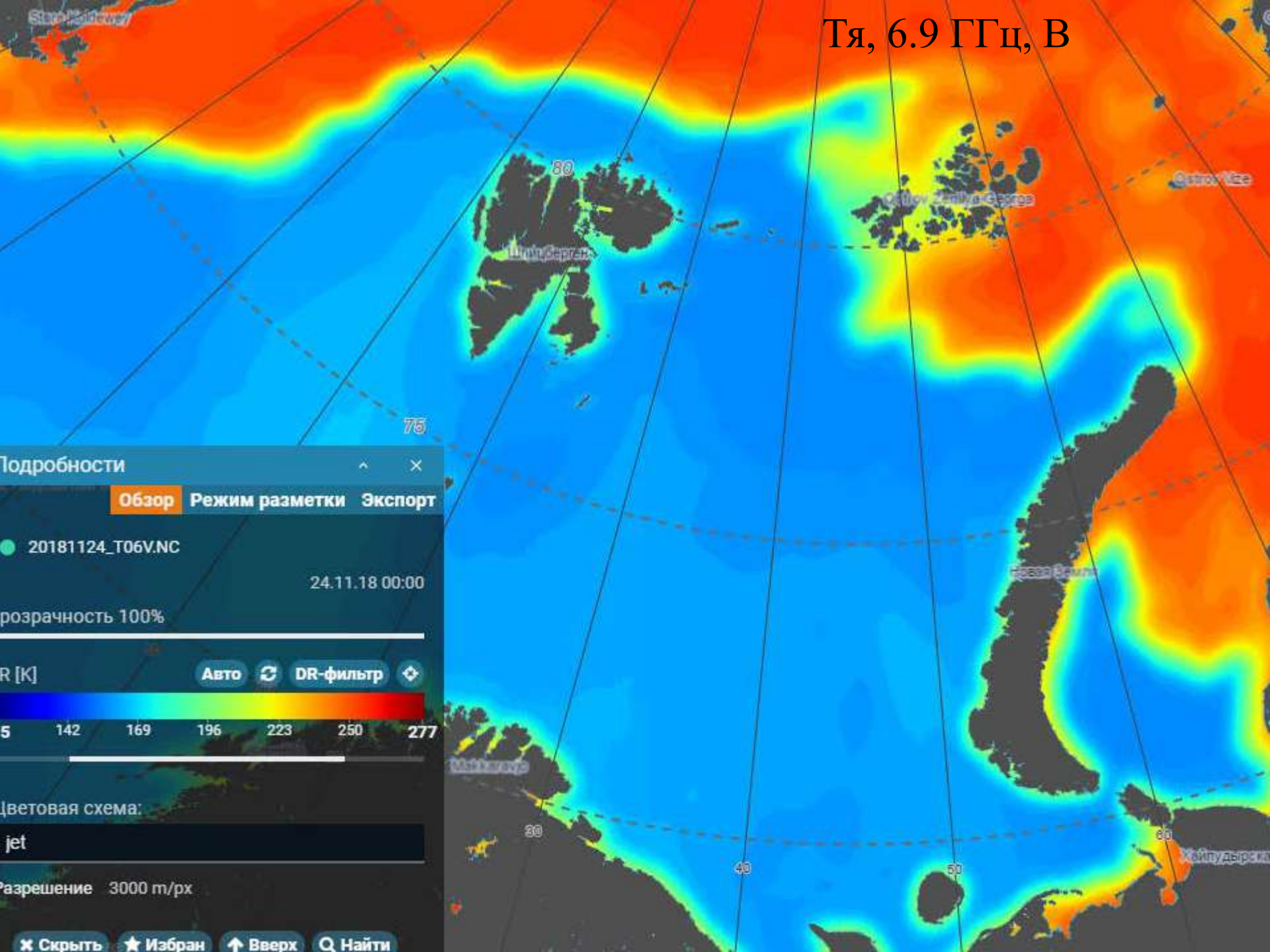
микроволновый AMSR2



Микроволновые и ИК измерения не зависят от солнечного освещения

Микроволновые измерения позволяют получать информацию о подстилающей поверхности в условиях облачности

Тя, 6.9 ГГц, В



Подробности

Обзор Режим разметки Экспорт

20181124_T06V.NC

24.11.18 00:00

прозрачность 100%

R [K]

Авто DR-фильтр

5 142 169 196 223 250 277

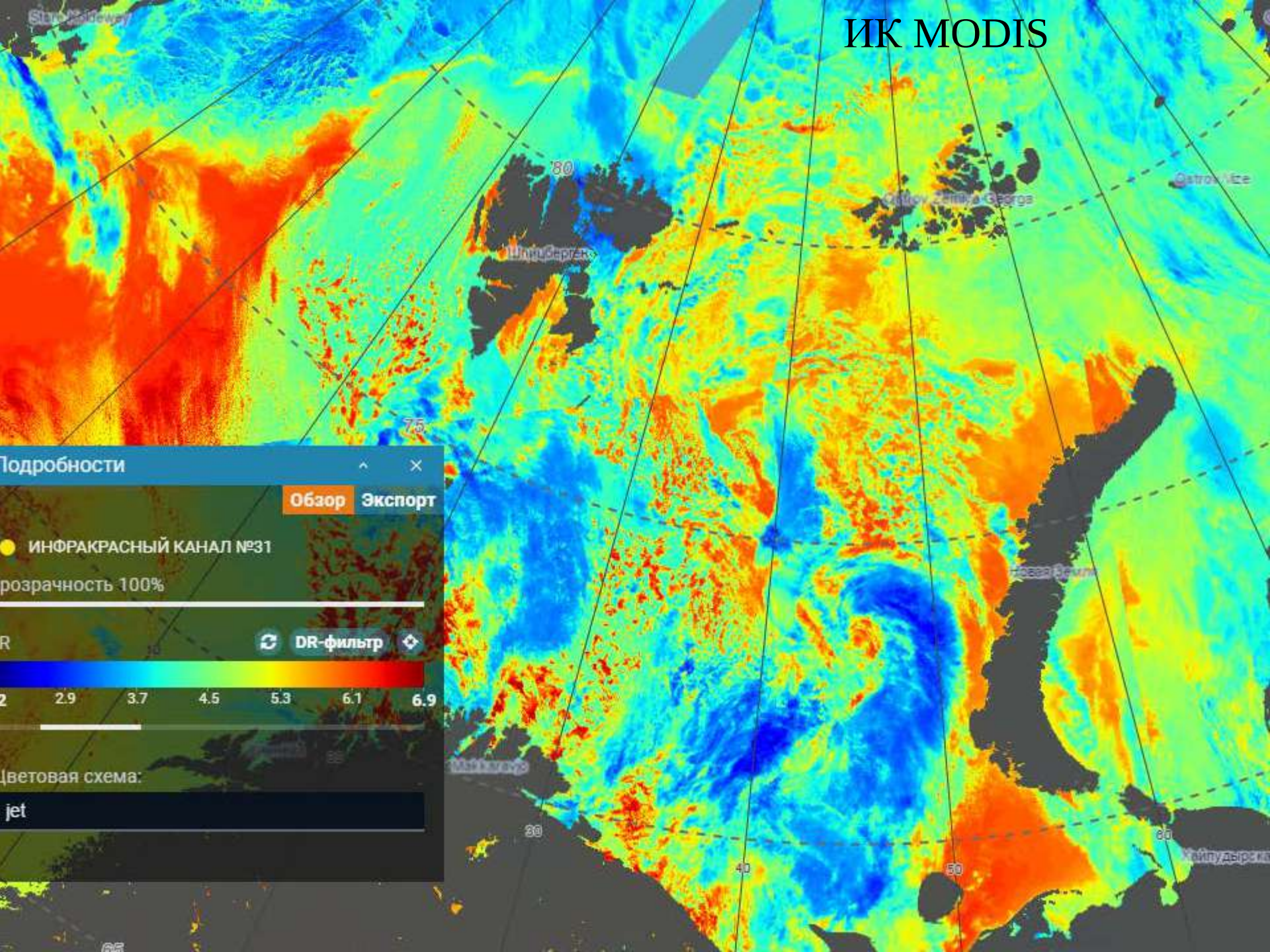
цветовая схема:

jet

Разрешение 3000 m/px

Скрыть Избран Вверх Найти

ИК MODIS



Подобности

Обзор Экспорт

ИНФРАКРАСНЫЙ КАНАЛ №31

прозрачность 100%

R



DR-фильтр



2

2.9

3.7

4.5

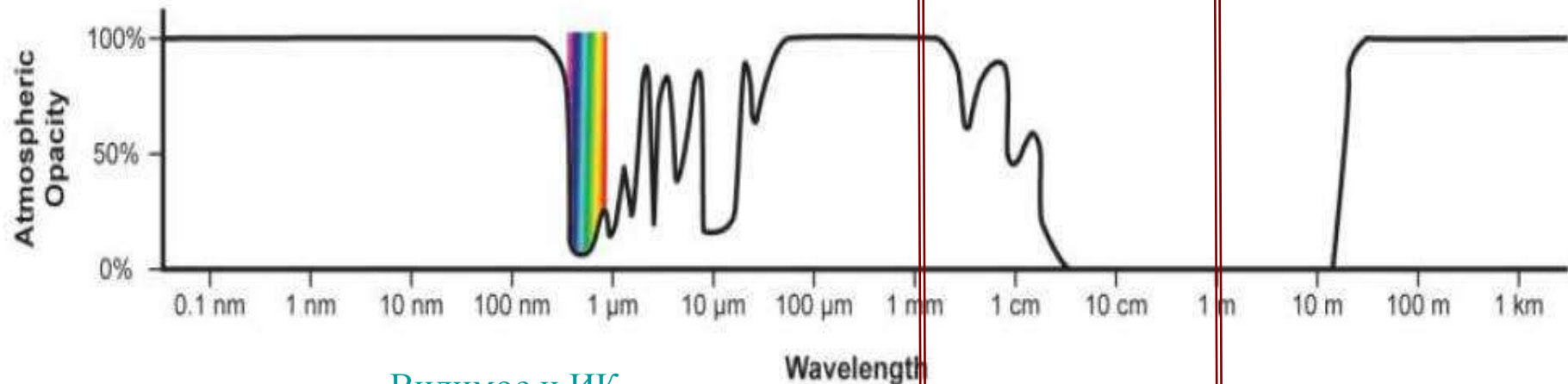
5.3

6.1

6.9

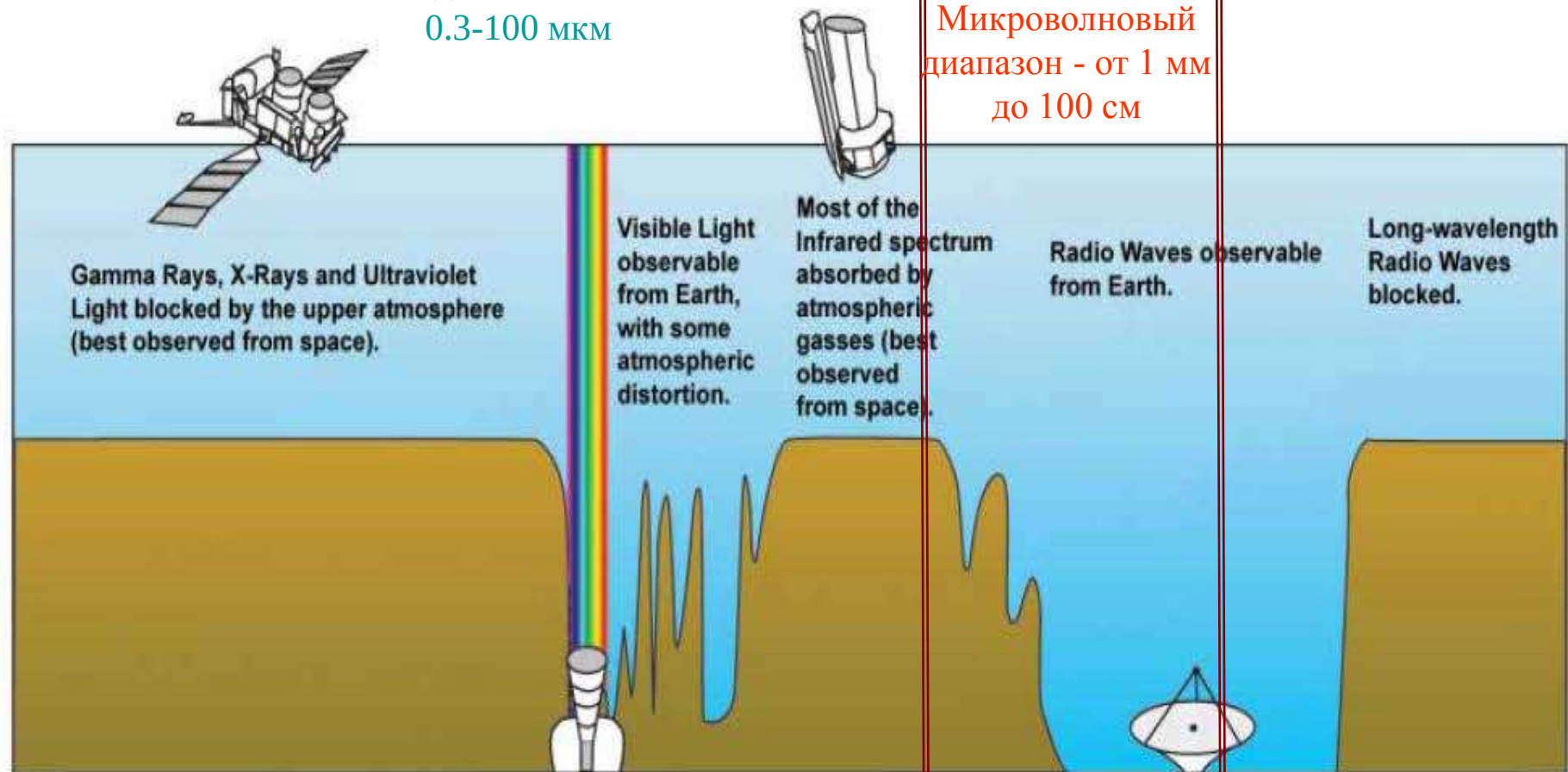
цветовая схема:

jet



Видимое и ИК –
0.3-100 мкм

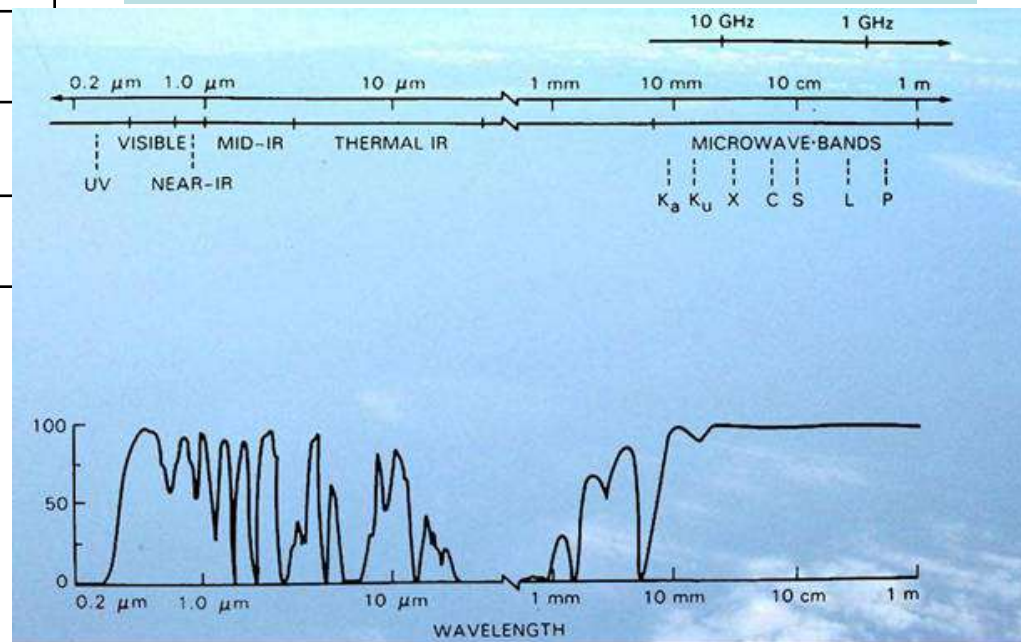
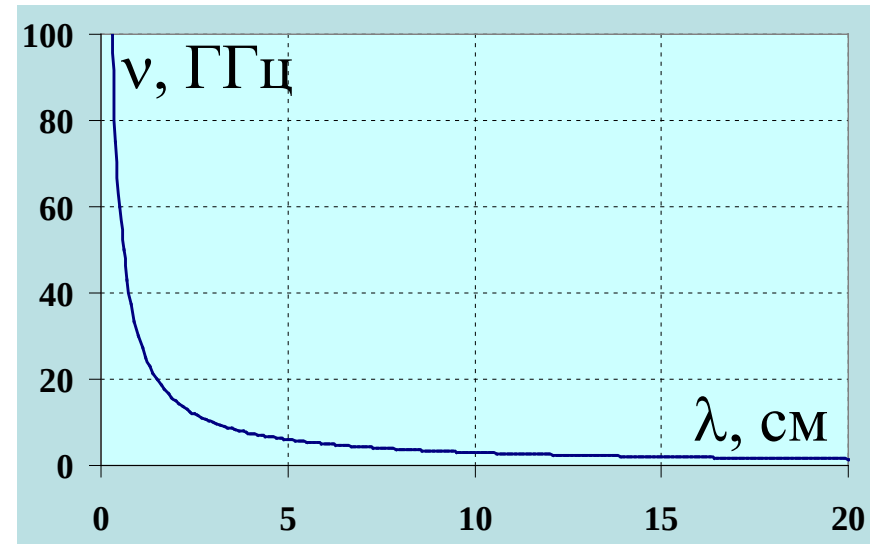
Микроволновый
диапазон - от 1 мм
до 100 см



Микроволновый диапазон электромагнитных волн: *1 мм – 1 м*

$$\lambda(\text{см}) = 30/\nu(\text{ГГц})$$

P		0.3-1 ГГц	30-100 см
L	англ. Long	1—2 ГГц	15—30 см
S	англ. Short	2—4 ГГц	7,5—15 см
C	англ. Compromise	4—8 ГГц	3,75—7,5 см
X		8—12 ГГц	2,5—3,75 см
Ku	англ. under K	12—18 ГГц	1,67—2,5 см
K	нем. kurz — «короткий»	18—27 ГГц	1,11—1,67 см
Ka	англ. above K	27—40 ГГц	0,75—1,11 см
mm		40—100 ГГц	1—7,5 мм
V		40—75 ГГц	4,0—7,5 мм
W		75—100 ГГц	2,7—4,0 мм

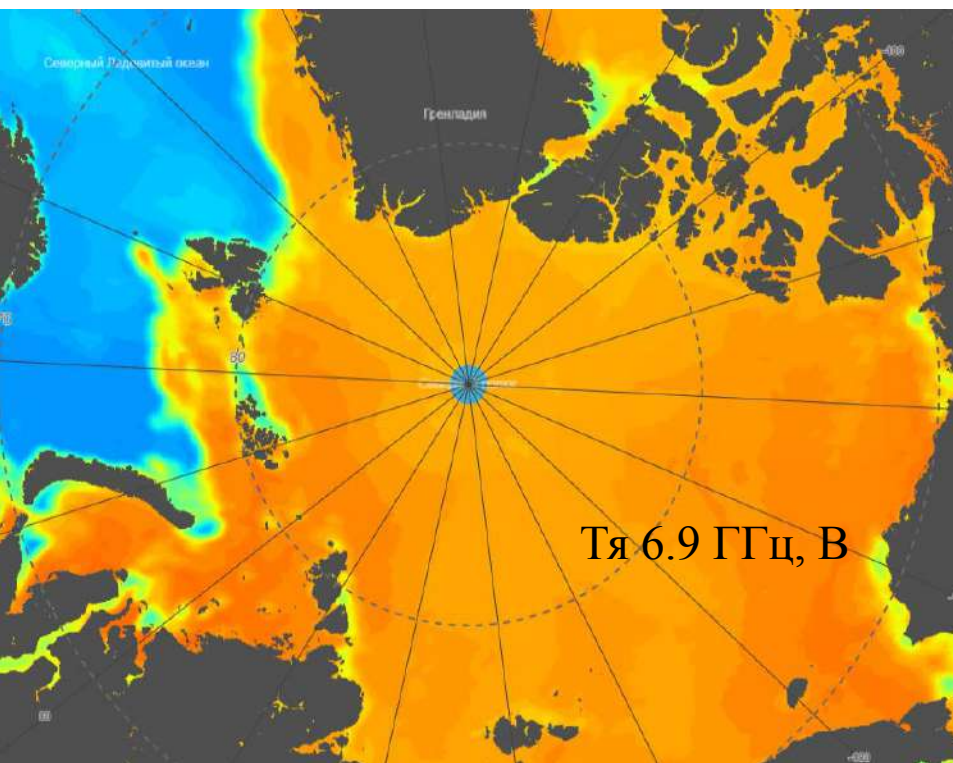


Р – диапазон: в 1979 г.
космический радиотелескоп КРТ-
10 с двумя радиометрами (12 см и
72 см)

Пассивные и активные микроволновые измерения в Арктике

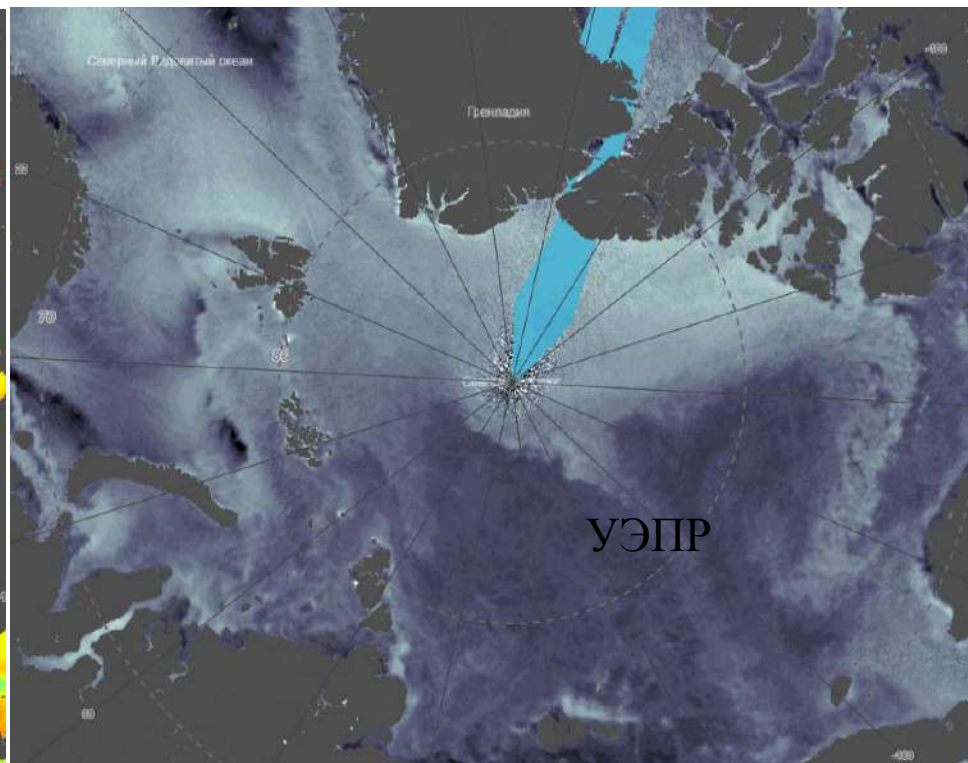
*Измерения спутниковых радиометров и скаттерометров –
регулярные, доступные измерения*

25 марта 2019



пассивный (AMSR2)

разрешение 60 км



активный (ASCAT)

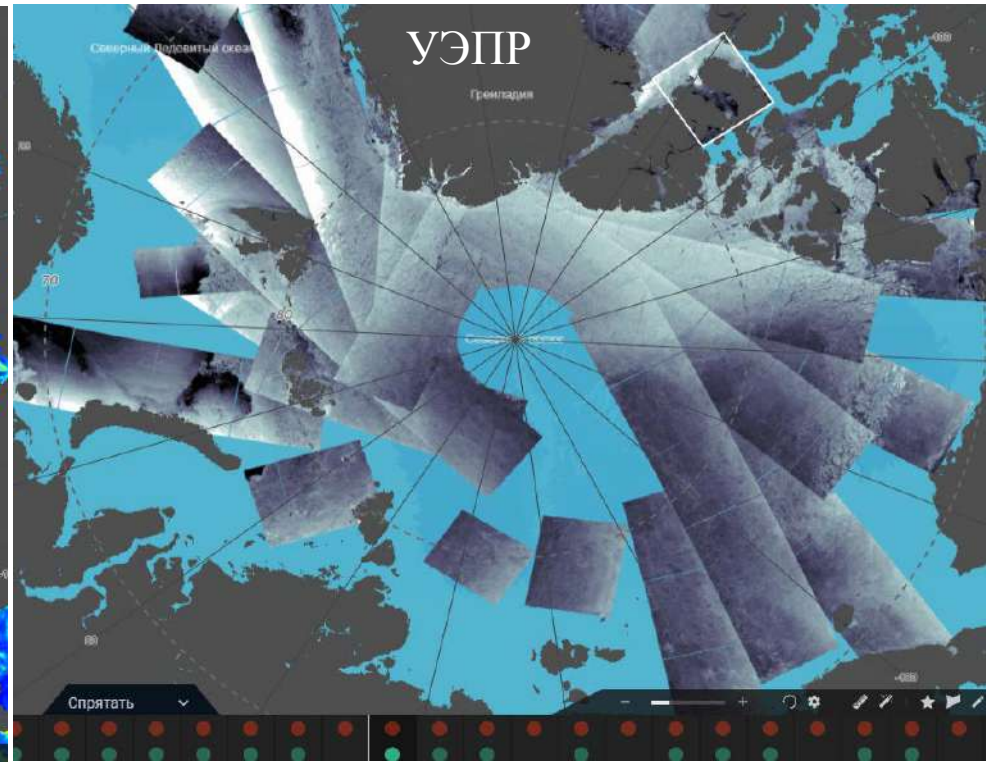
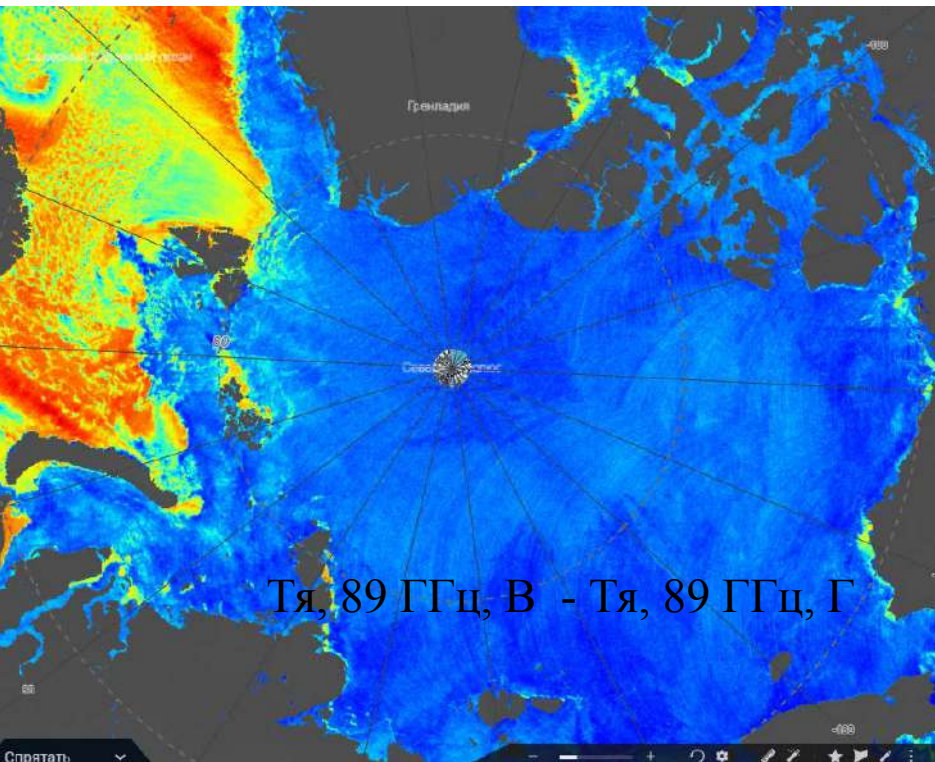
разрешение 6 км

Пассивный (радиометр) и активный микроволновый сигнал (РСА)

регулярные данные

25 марта 2019

нерегулярные данные



пассивный (AMSR2)

разрешение 6 км

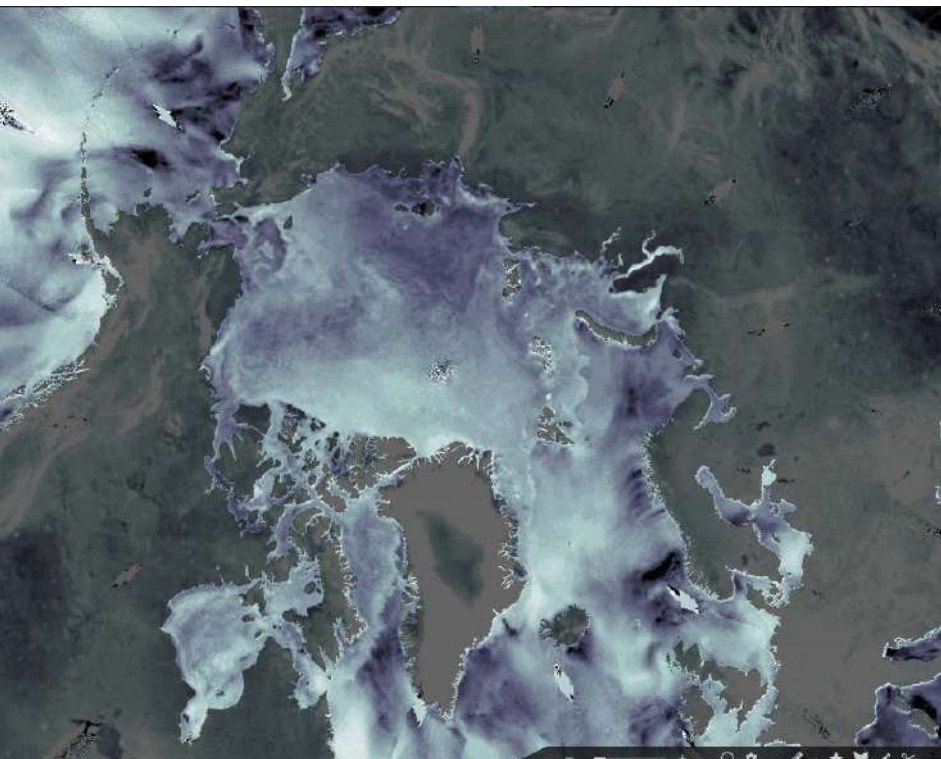
активный (PCA Sentinel-1)

разрешение 40 м

Спутниковые микроволновые инструменты

Пассивные микроволновые	Активные микроволновые
радиометры (сканеры, зондировщики)	радиолокаторы, альтиметры, скаттерометры, РСА
Чаще всего устанавливаются на спутниках с солнечносинхронной наклонной орбитой	
Низкое пространственное разрешение	Низкое пространственное разрешение – скаттерометры, радары, альтиметры Высокое - РСА
чаще – многоканальные (исключение – радиометры L-диапазона)	чаще – одноканальные
измерения позволяют восстанавливать параметры атмосферы и подстилающей поверхности	измерения позволяют восстанавливать параметры подстилающей поверхности

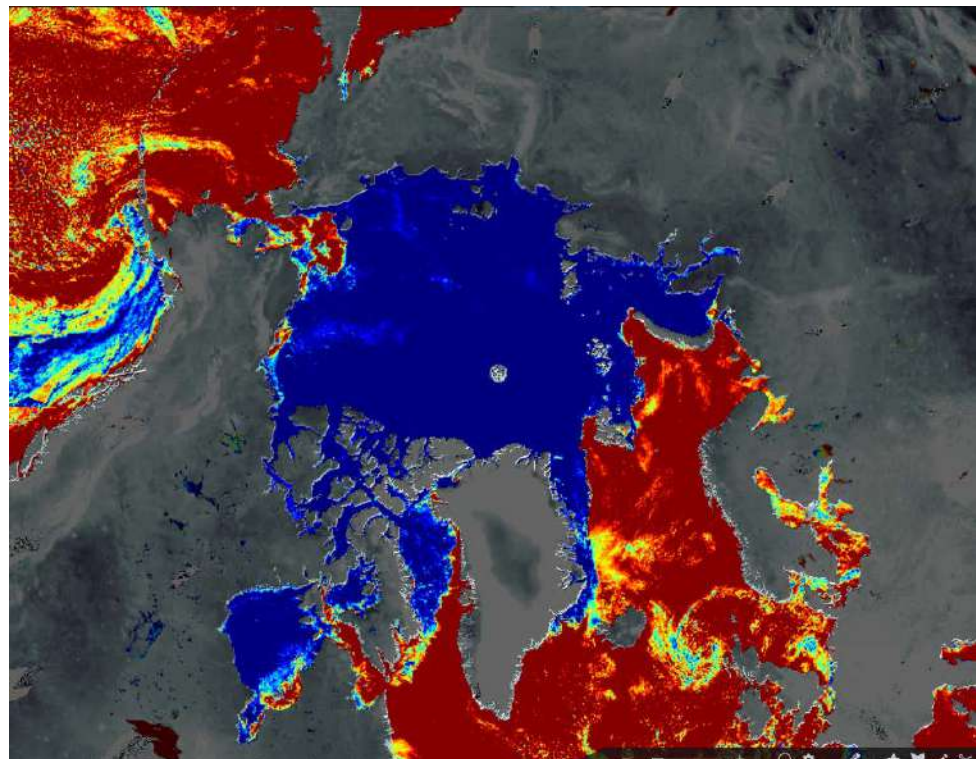
Активные и пассивные микроволновые инструменты



Metop ASCAT

15 декабря 2019

Измеряет сигнал обратного
рассеяния (УЭПР) - σ_0

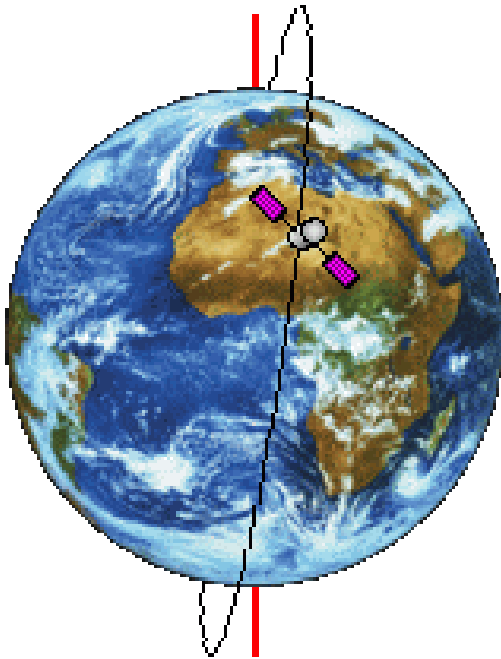


GCOM-W1 AMSR2

Измеряет интенсивность
излучения

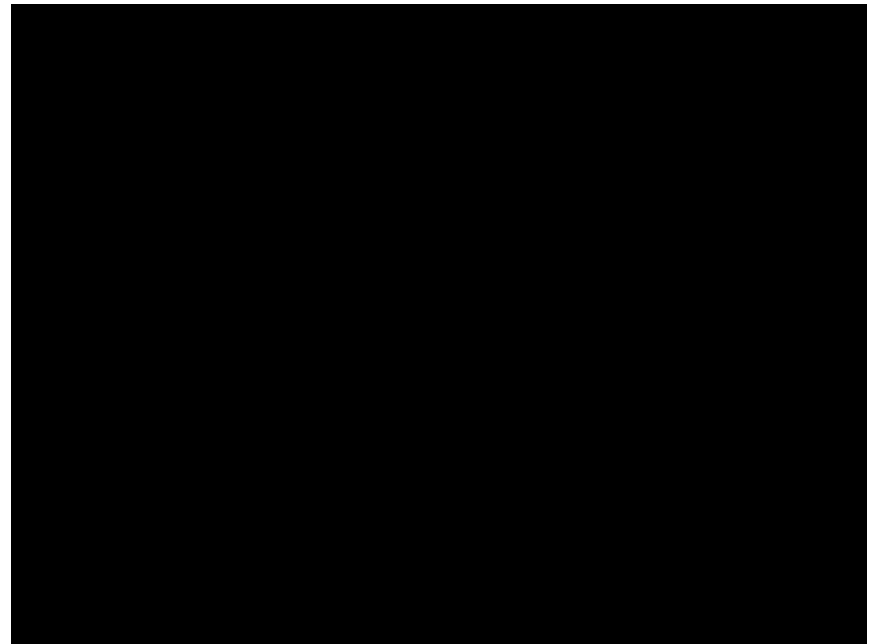
Преимущественный тип орбит спутников с микроволновыми инструментами

- солнечно-синхронные орбиты с небольшими углами наклона



Солнечно-синхронная орбита вид наклонной орбиты с такими параметрами, когда спутник проходит над любой точкой земной поверхности приблизительно в одно и то же местное солнечное время.

В англоязычной литературе –
polar orbiting satellites



Микроволновое зондирование морского льда:

активные микроволновые инструменты

<u>Скаттерометры</u> Разрешение – десятки км регулярные данные	Площадные измерения в рамках полосы обзора
	Граница ледяного покрова, тип (возраст) льда
Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) Разрешение – десятки метров Нерегулярные данные	Площадные измерения в рамках полосы обзора
	Граница ледяного покрова, особенности ледяного покрова высокого разрешения
<u>Альтиметры</u> Разрешение – десятки км регулярные данные	Измерения вдоль трэков
	граница, толщина льда

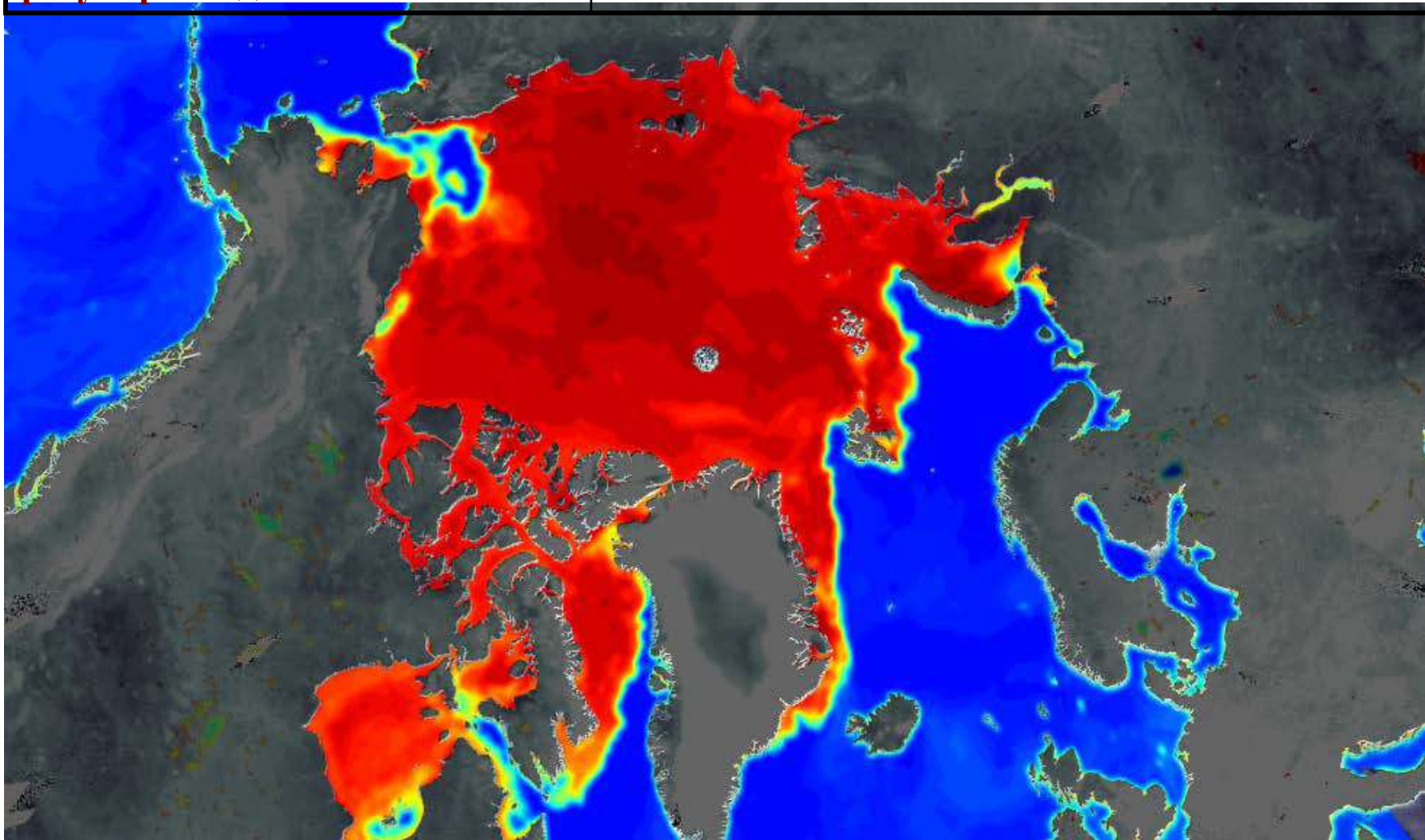
Микроволновое зондирование морского льда: пассивные микроволновые инструменты

Микроволновые радиометры

Разрешение – десятки км
регулярные данные

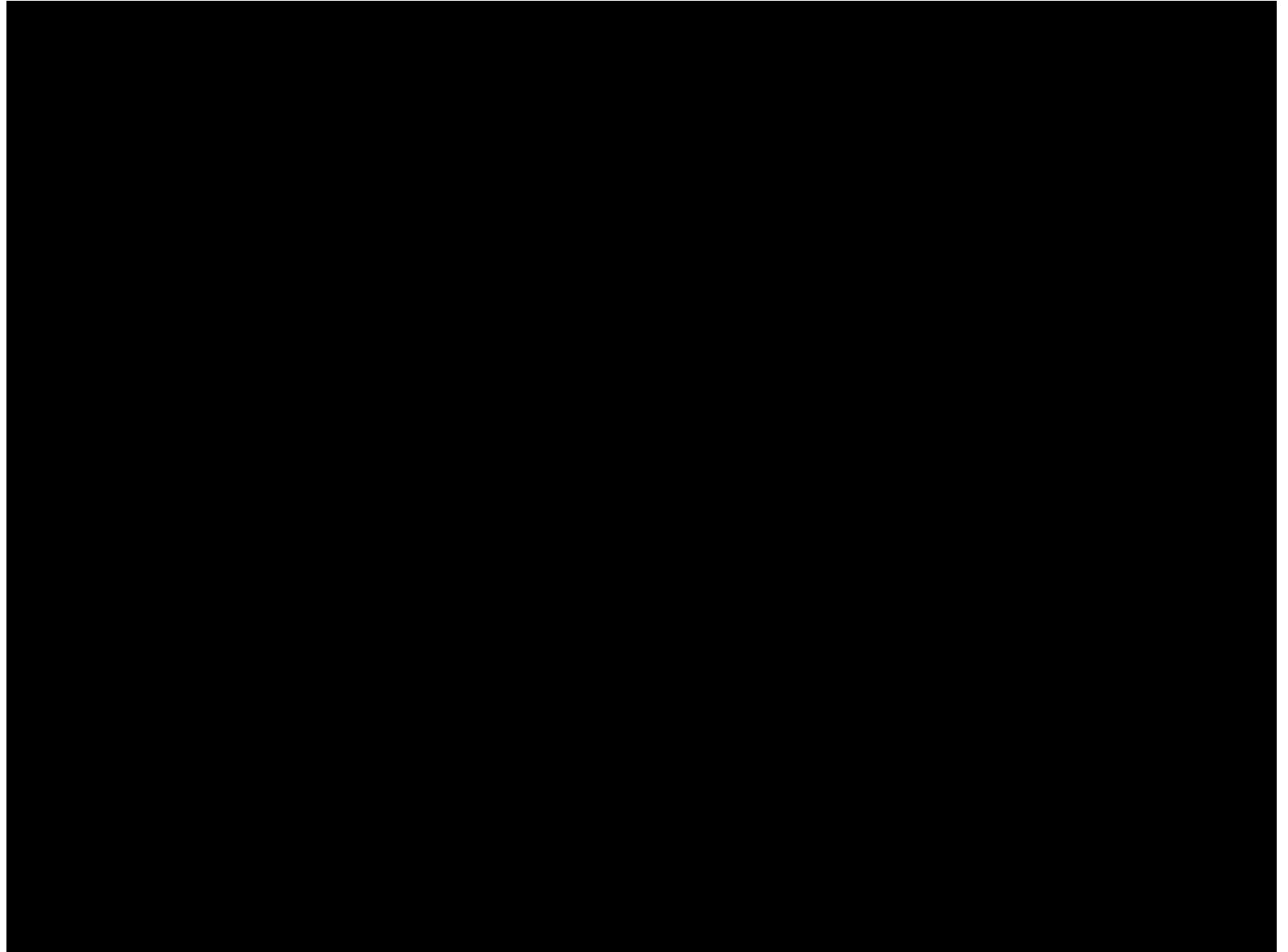
Площадные измерения в рамках полосы обзора

Граница ледяного покрова, тип (возраст) льда,
сплоченность, толщина (?)

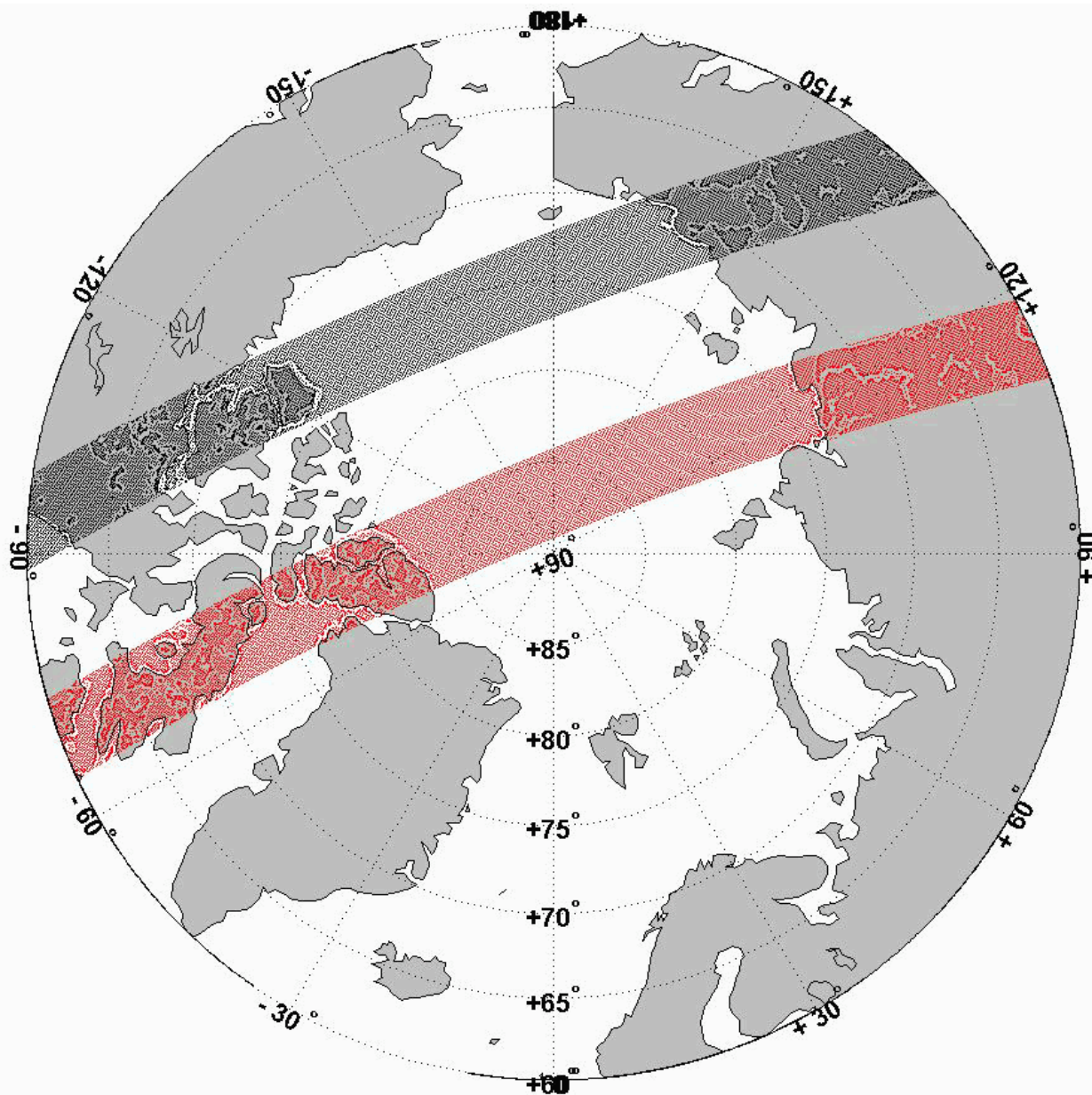


Микроволновое зондирование морского льда с помощью спутниковых скаттерометров

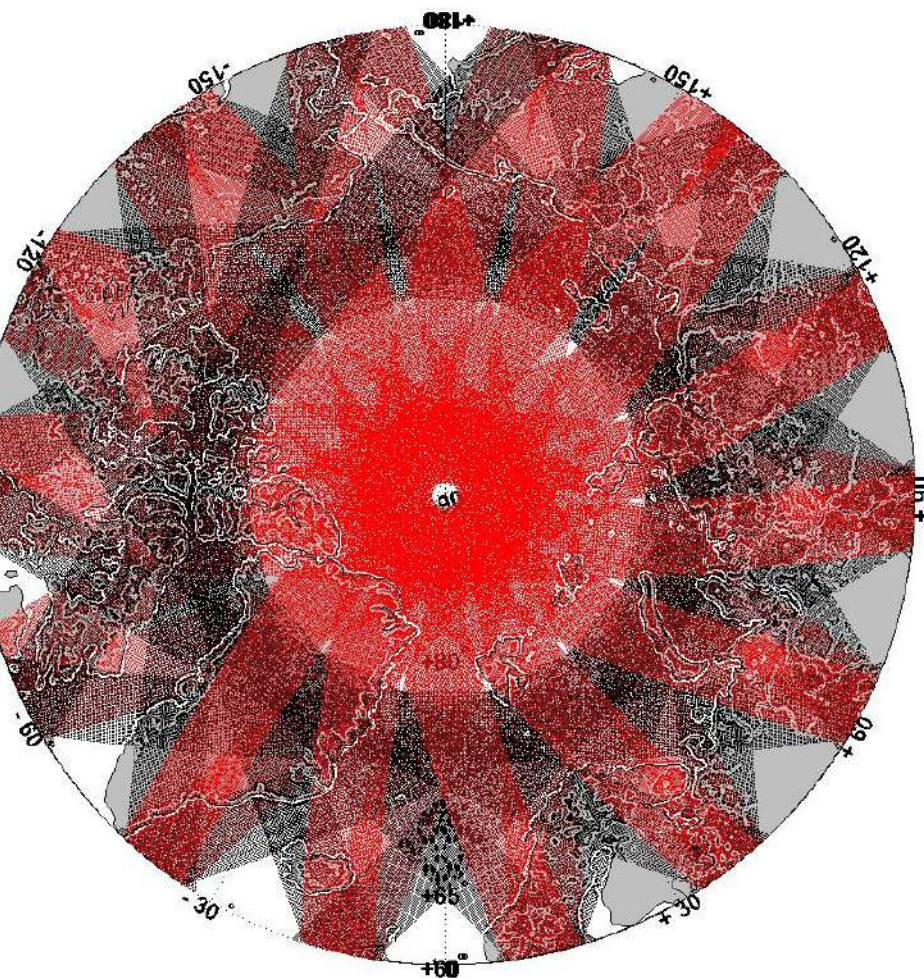
Скаттерометр ASCAT на спутниках Metop



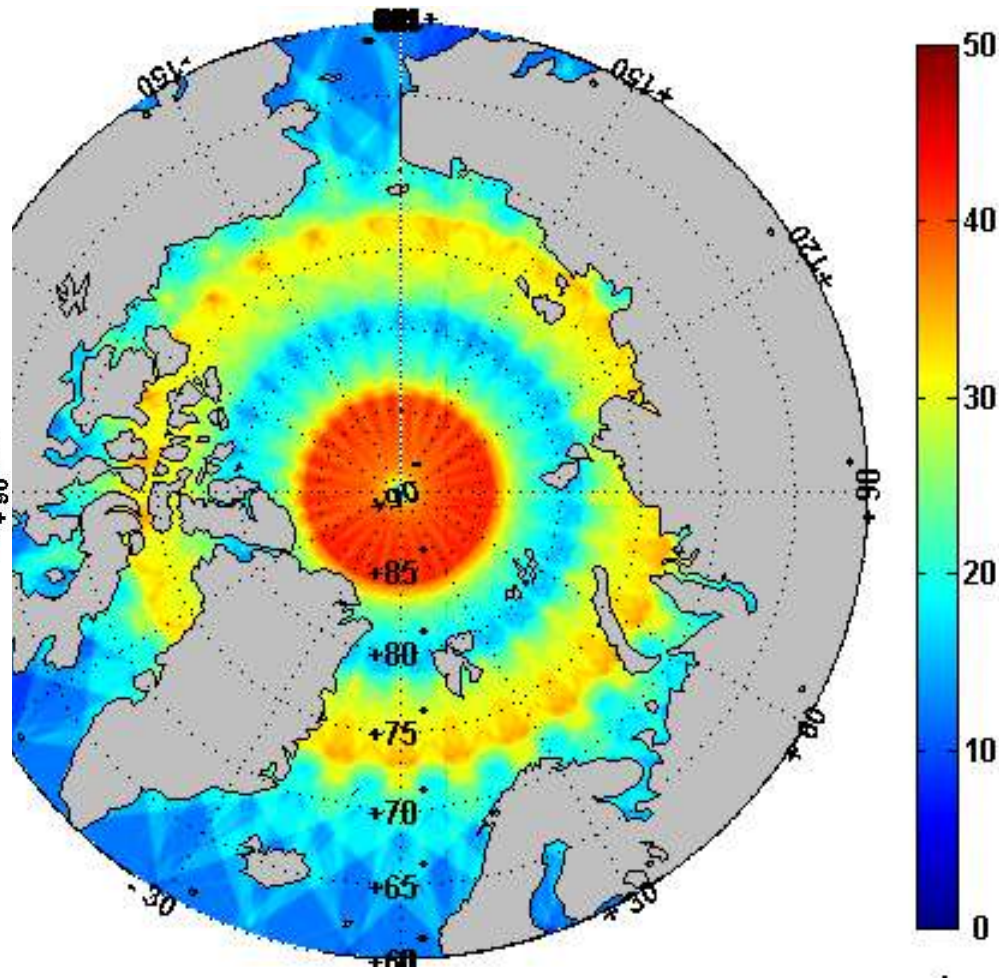
Высокое временное разрешение для квазистационарных процессов
можно использовать для повышения пространственного разрешения



Повышение пространственного разрешения микроволновых инструментов



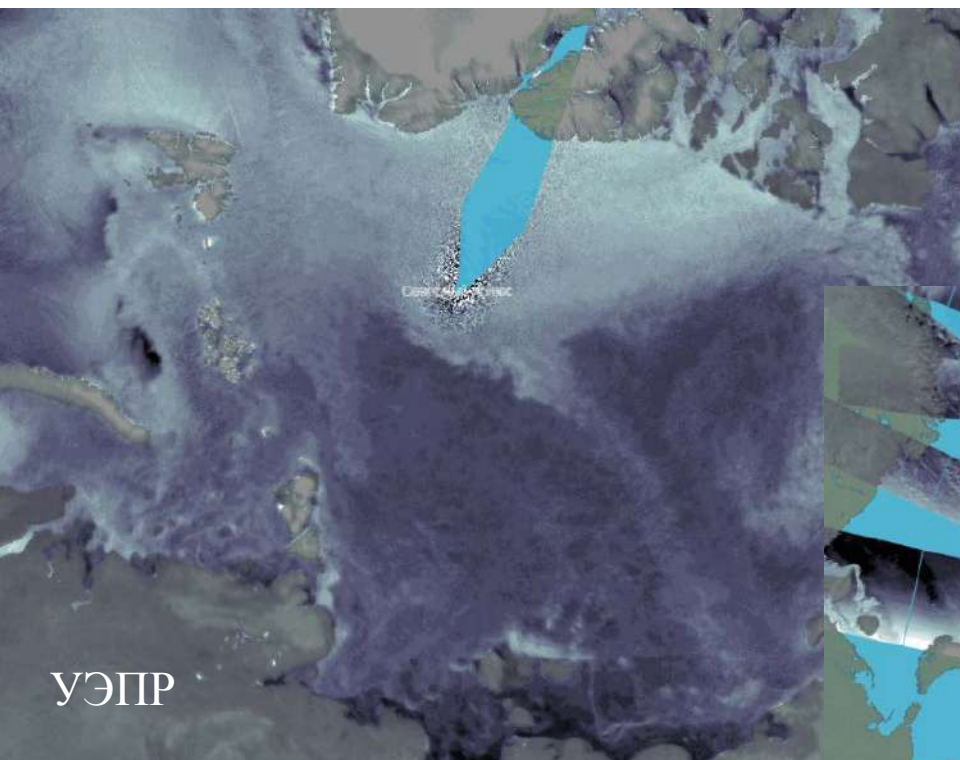
Покрывтие измерениями одного инструмента ASCAT с разрешением 25×25 км



Количество измерений с двух инструментов при размере элемента разрешения 5×5 км

Скаттерометр (ASCAT) и PCA (Sentinel-1)

25 марта 2019

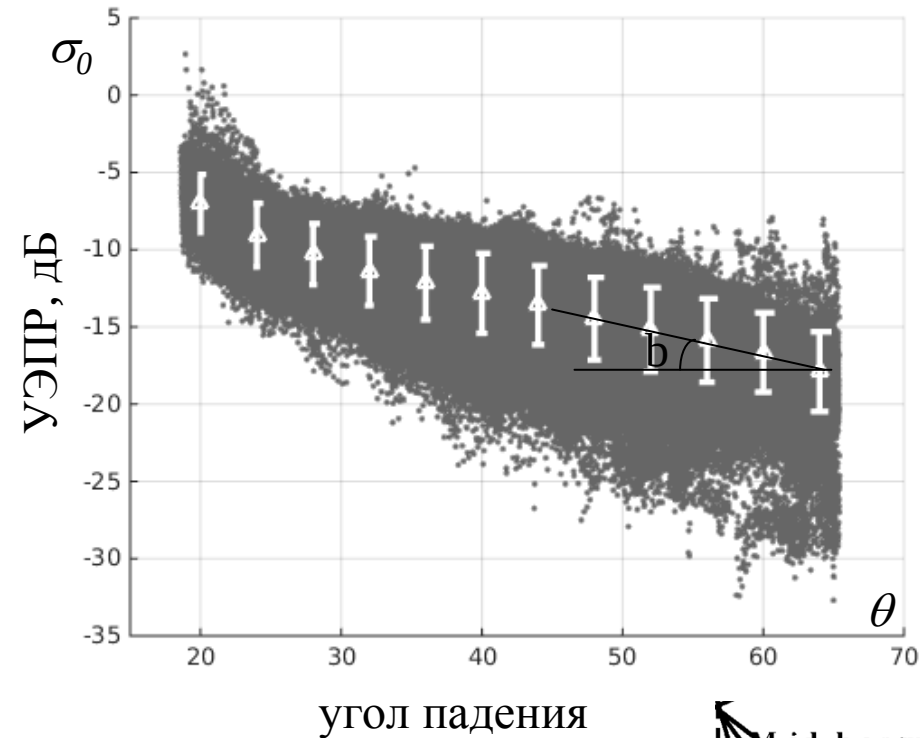


НЕ регулярные данные

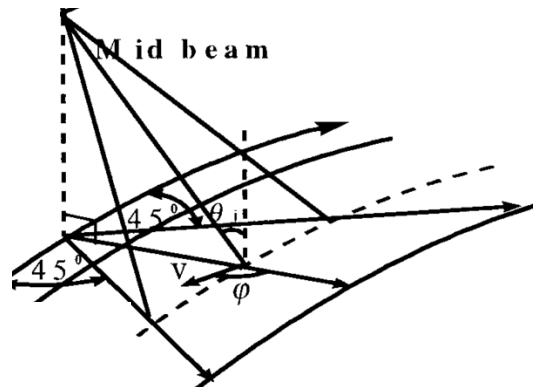
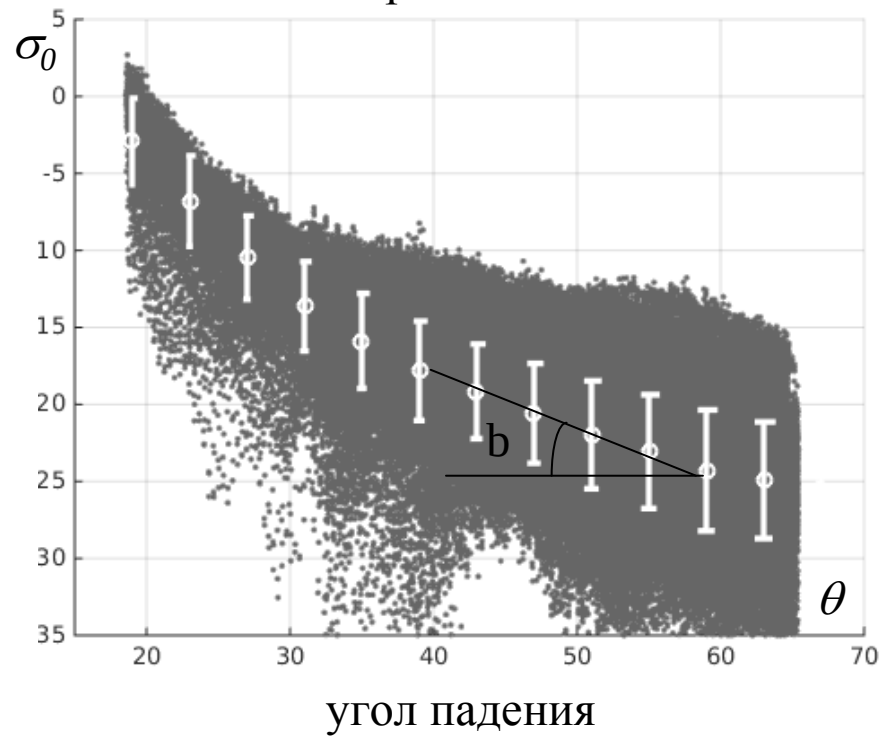


Радиолокационный сигнал от морской воды и от морского льда – зависимость от угла падения

Морской лёд

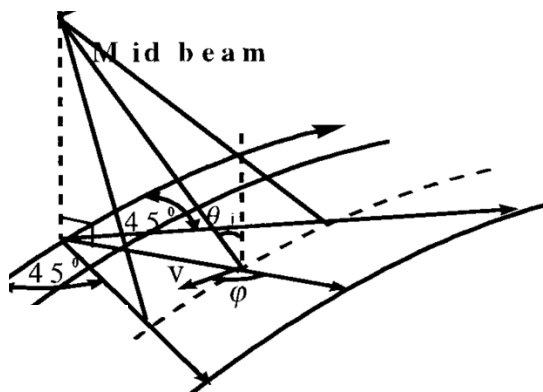
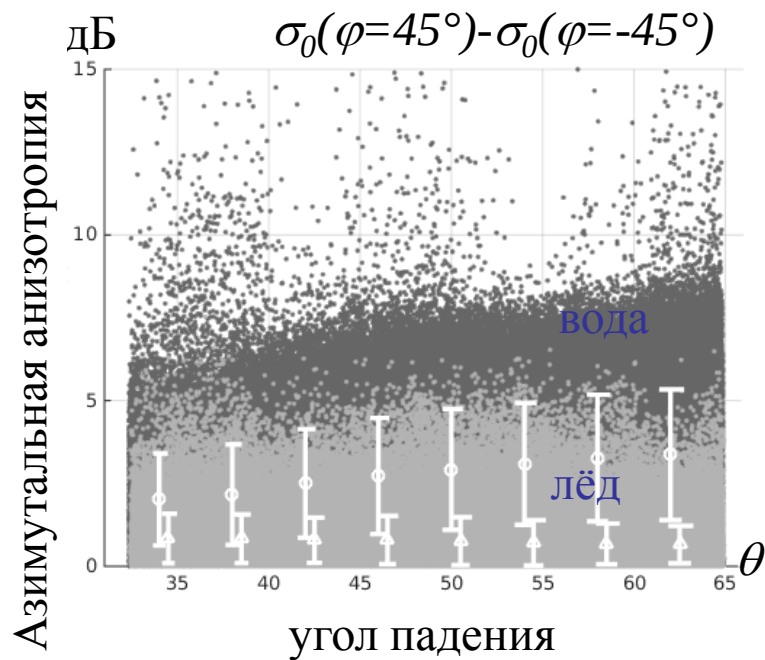


Морская вода

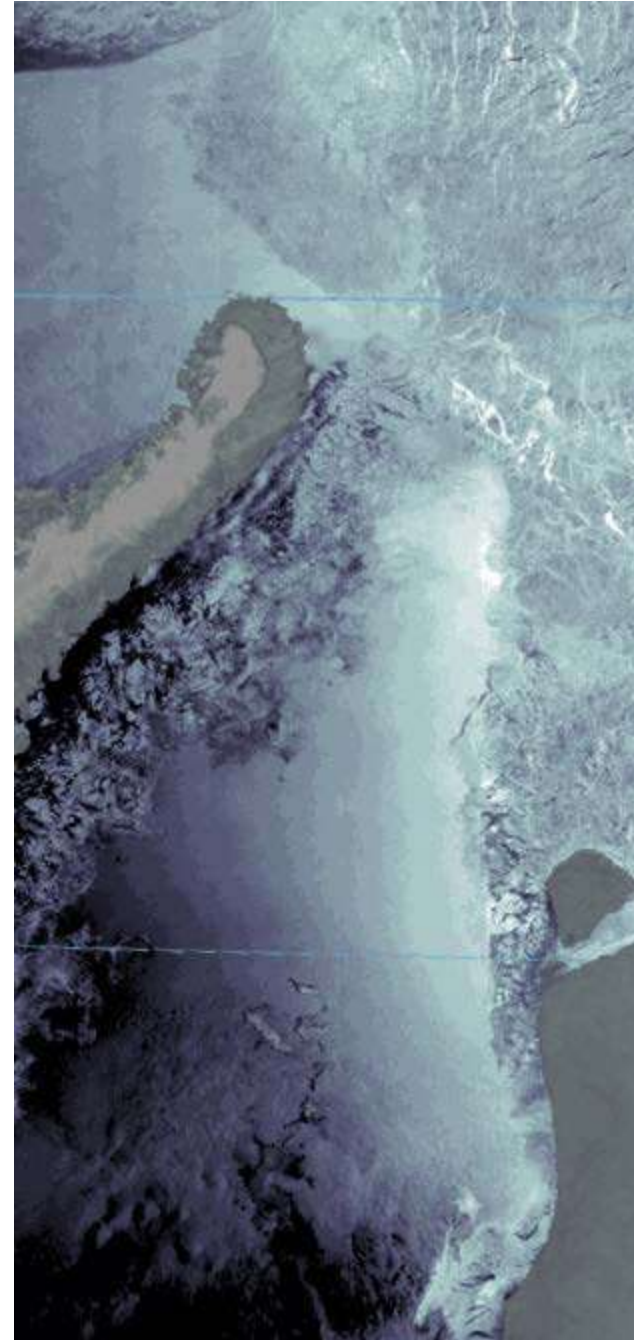


$$\sigma_0 = a - b\theta$$

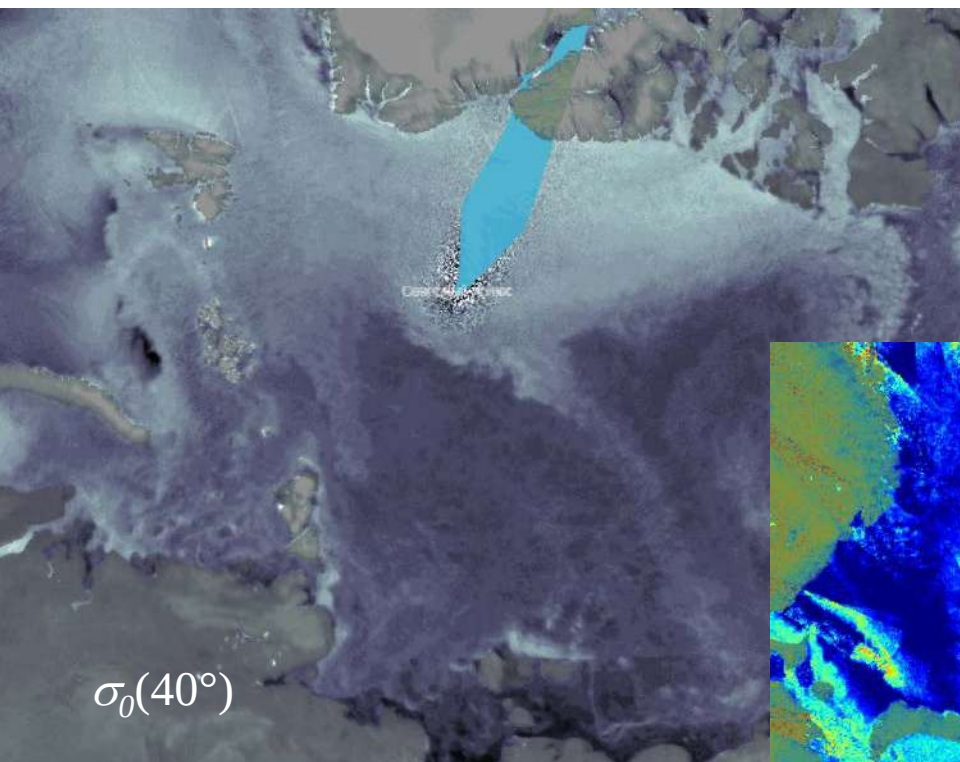
Зависимость от азимутального угла



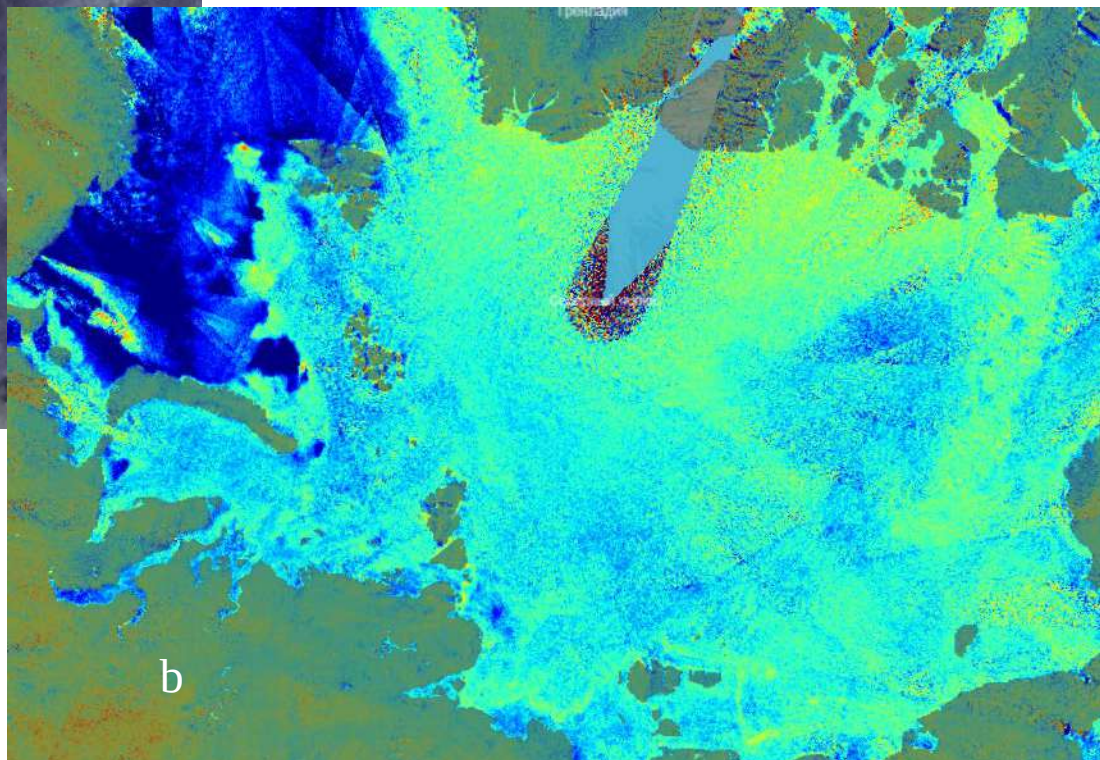
PCA Sentinel-1 10 ноября 2019



Нормирование УЭПР

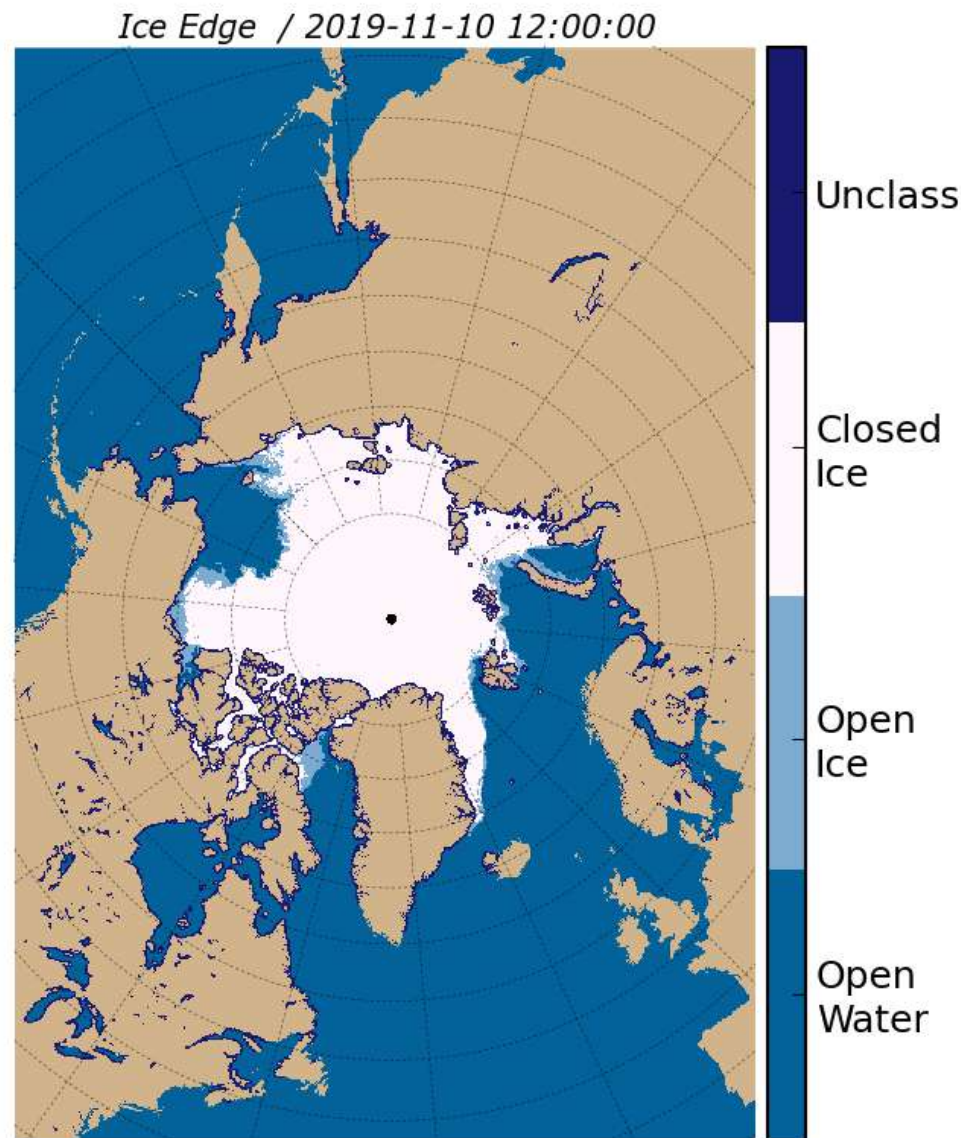


$$\sigma_0 = a - b\theta$$



Скаттерометрические продукты по морскому льду

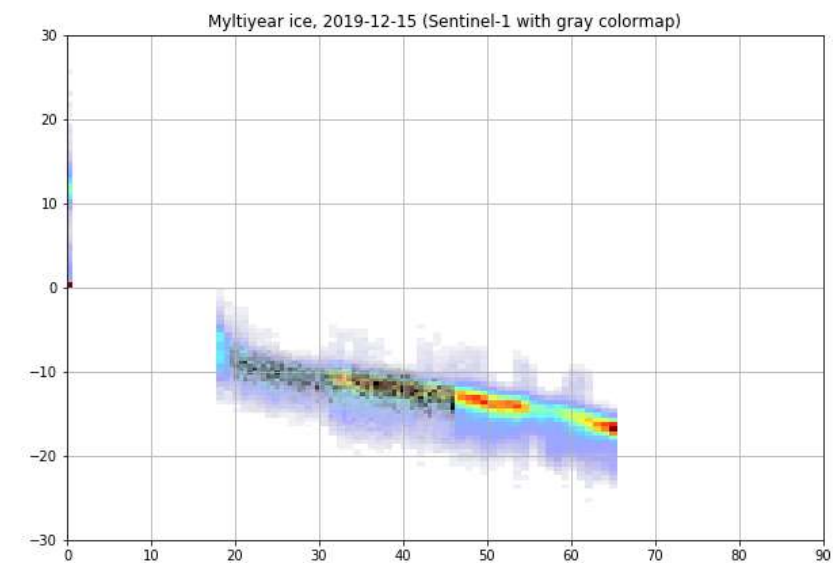
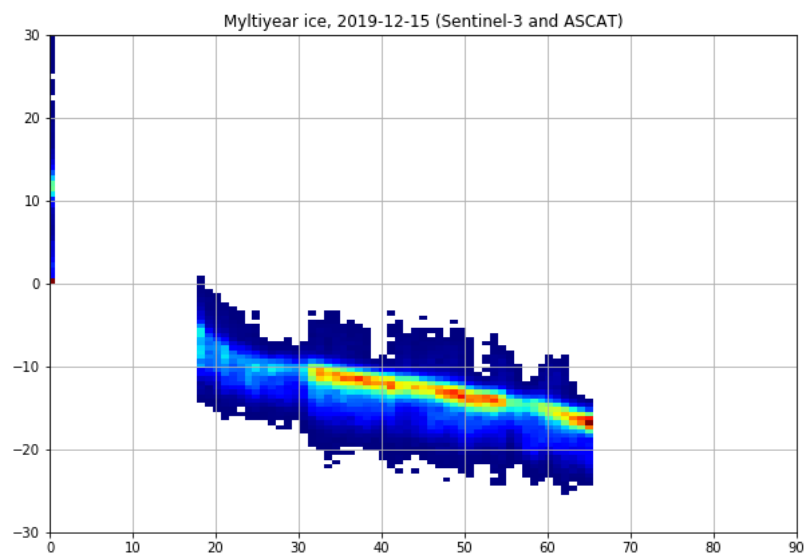
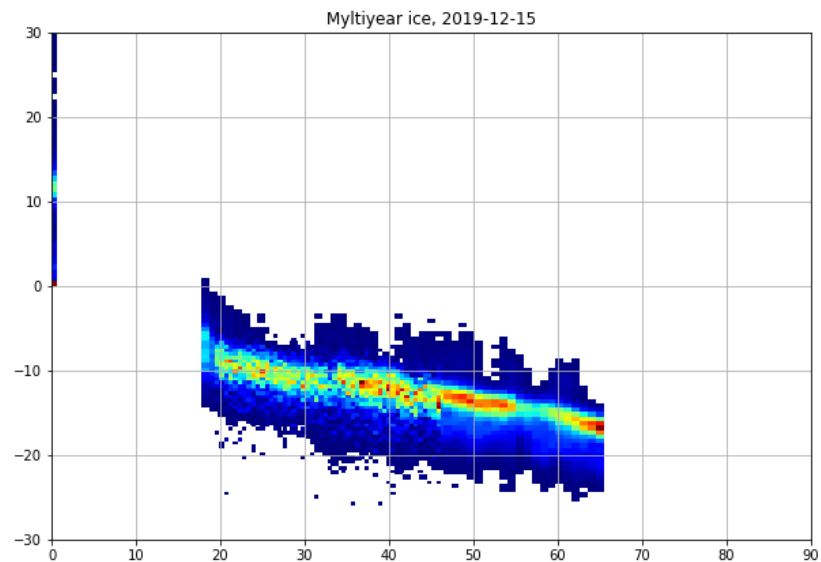
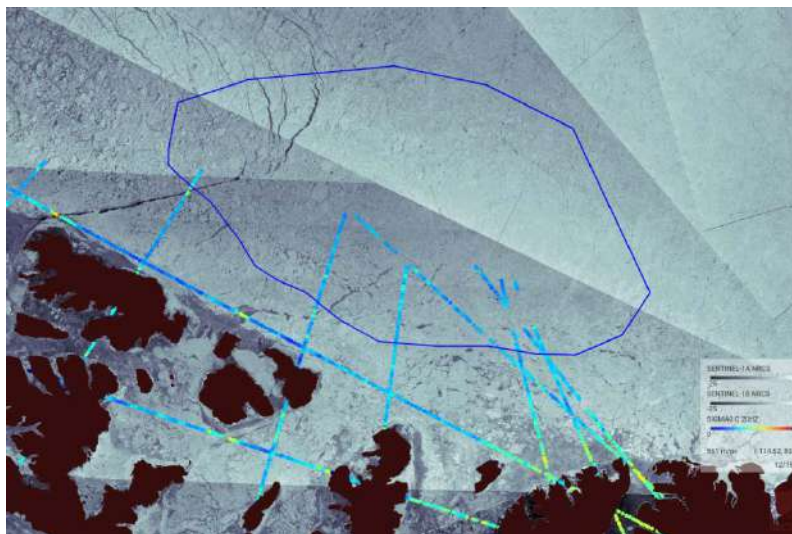
- Разная угловая зависимость УЭПР позволяет разделять лед и воду;
- Разный уровень сигнала УЭПР позволяет выделять однолетний и многолетний арктические льды;
- Традиционно спутниковые продукты по морскому льду на основе данных скаттерометров – граница ледяного покрова и классификация по типу однолетний/многолетний



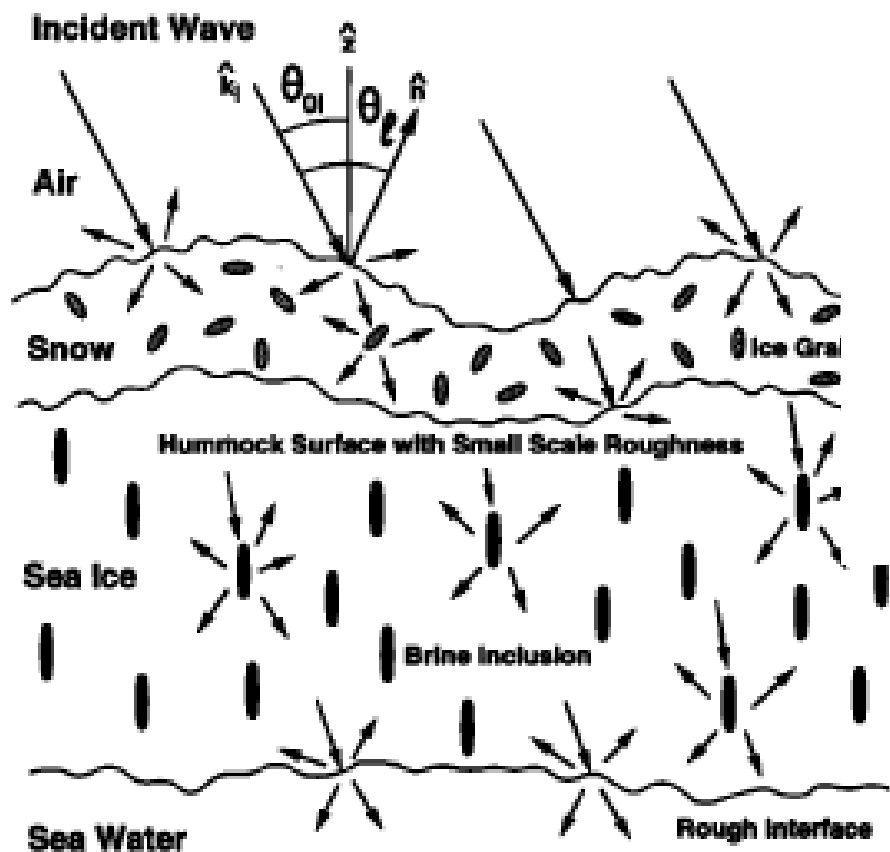
Copyright (2019) EUMETSAT

Многолетний лед

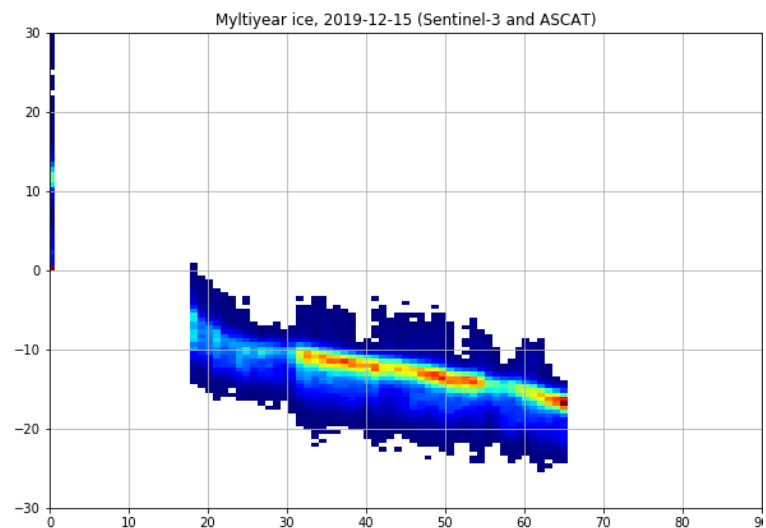
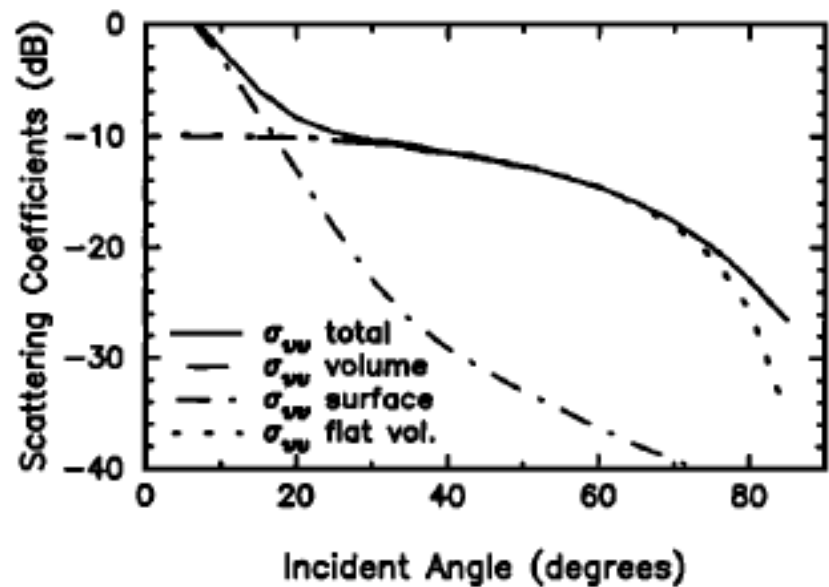




Многолетний лед



Многолетний лед



Микроволновое зондирование морского льда с помощью спутниковых микроволновых радиометров

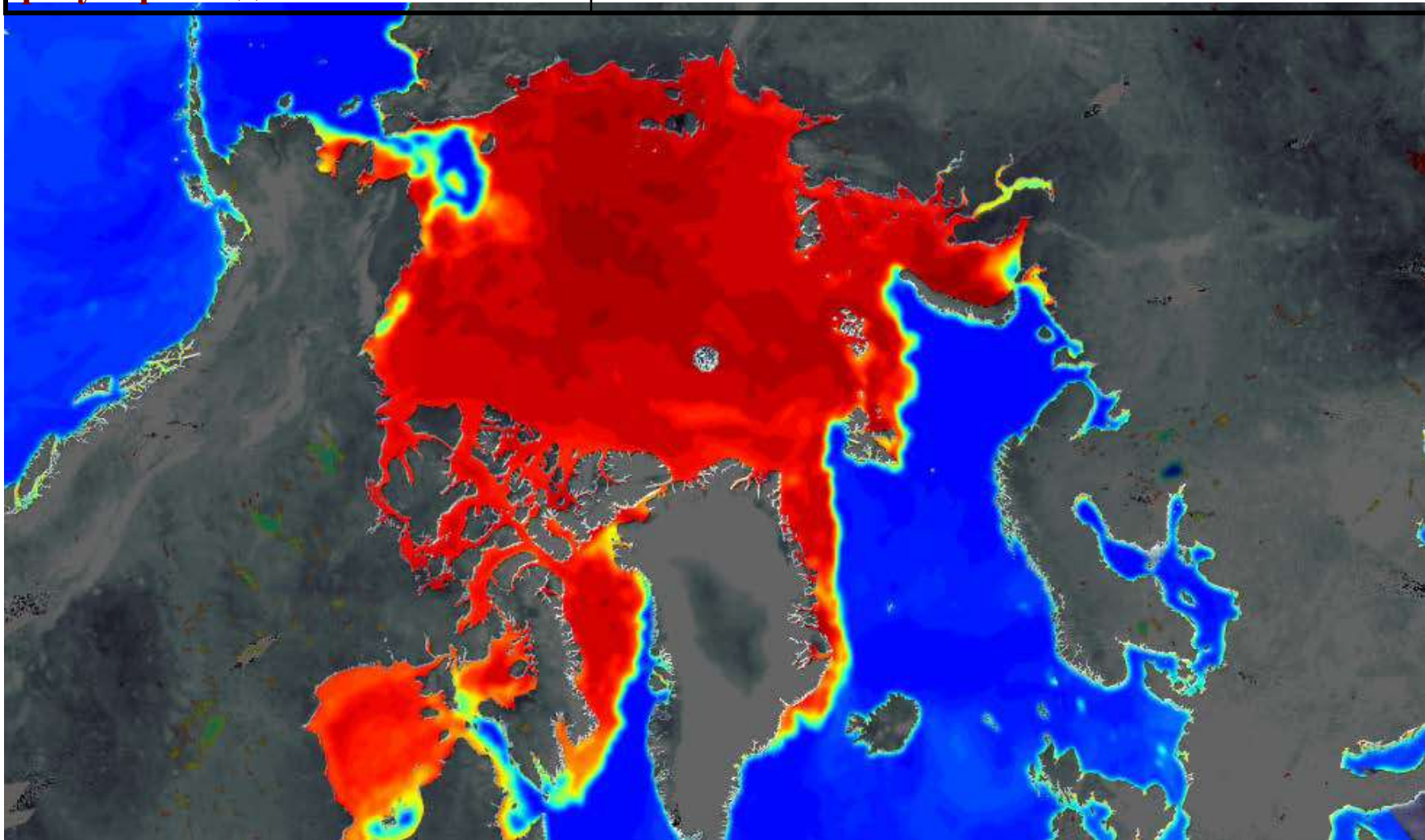
Микроволновое зондирование морского льда: пассивные микроволновые инструменты

Микроволновые радиометры

Разрешение – десятки км
регулярные данные

Площадные измерения в рамках полосы обзора

Граница ледяного покрова, тип (возраст) льда,
сплоченность, толщина (?)



и ^ x

Построить geojson Добавить слой

Маска суши

ТОЛЩИНА ЛЬДА / SMOS/SMAP

Батиметрия

Ландшафт

робоности ^ x

Обзор Просмотр и экспорт Покрытие

ТОЛЩИНА ЛЬДА

рачность 100%

m]

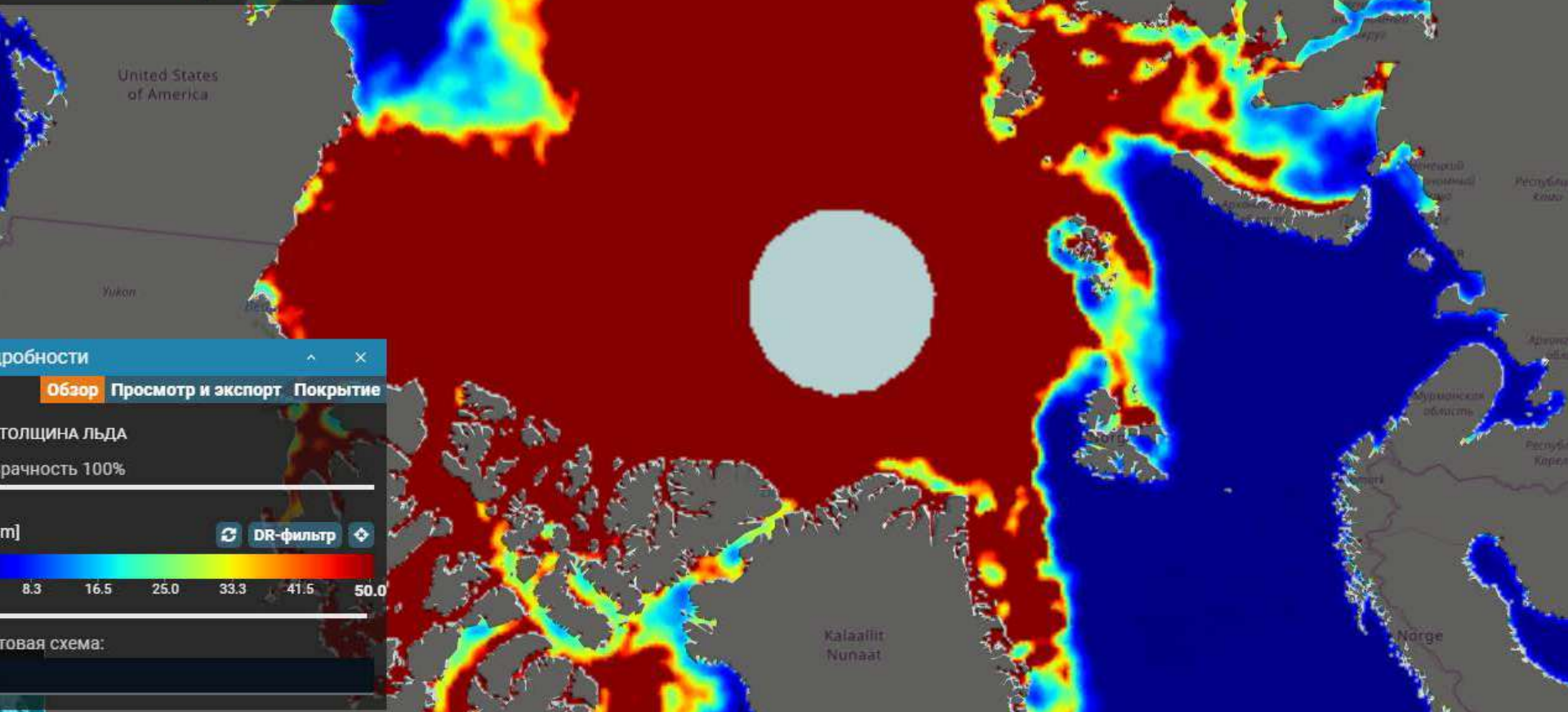
DR-фильтр

8.3 16.5 25.0 33.3 41.5 50.0

товая схема:

5 декабря 2019

Измерения
толщины льда
радиометров SMOS



Достоинства спутниковых микроволновых радиометров

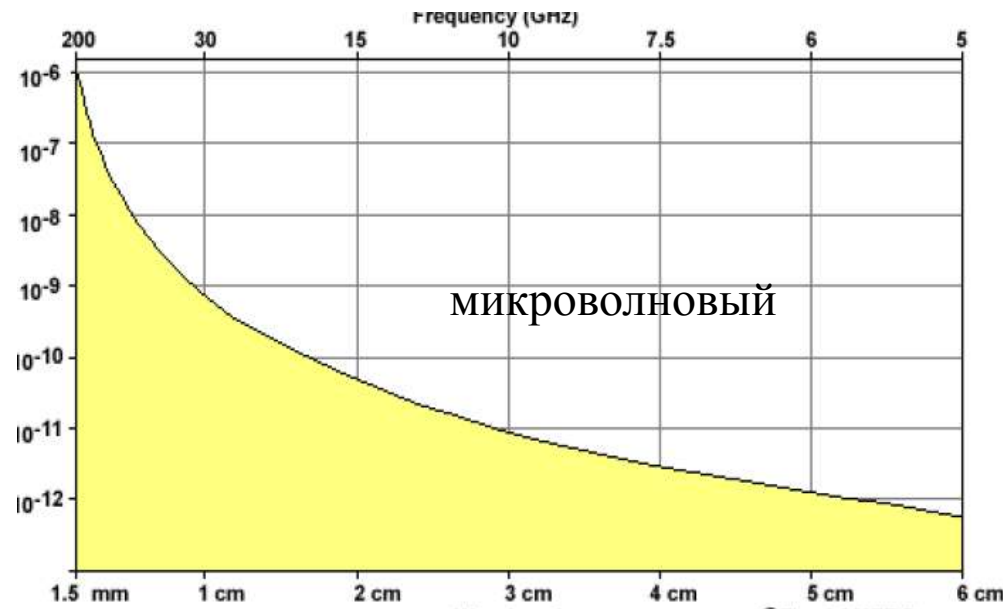
- Глобальность;
- Регулярность;
- Независимость от времени суток;
- Независимость от погодных условий;
- Возможность восстанавливать количественные значения параметров;
- Доступность данных;
- Сравнительно небольшие габариты, масса и энергопотребление радиометров;
- Многоканальность, т.е. возможность одновременно оценивать сразу несколько параметров атмосферы и подстилающей поверхности;
- Возможность построения длинных временных рядов для геофизических параметров и исследования их изменчивости в пространстве и во времени



Ограничения спутниковых микроволновых радиометров

- Низкое пространственное разрешение;
- Необходимость устойчивой абсолютной калибровки микроволновых радиометров;
- Необходимость высокой чувствительности радиометрических приемников,

$$B_{\lambda}(T) = \frac{\nu^2}{c} \cdot B_{\nu}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)}$$

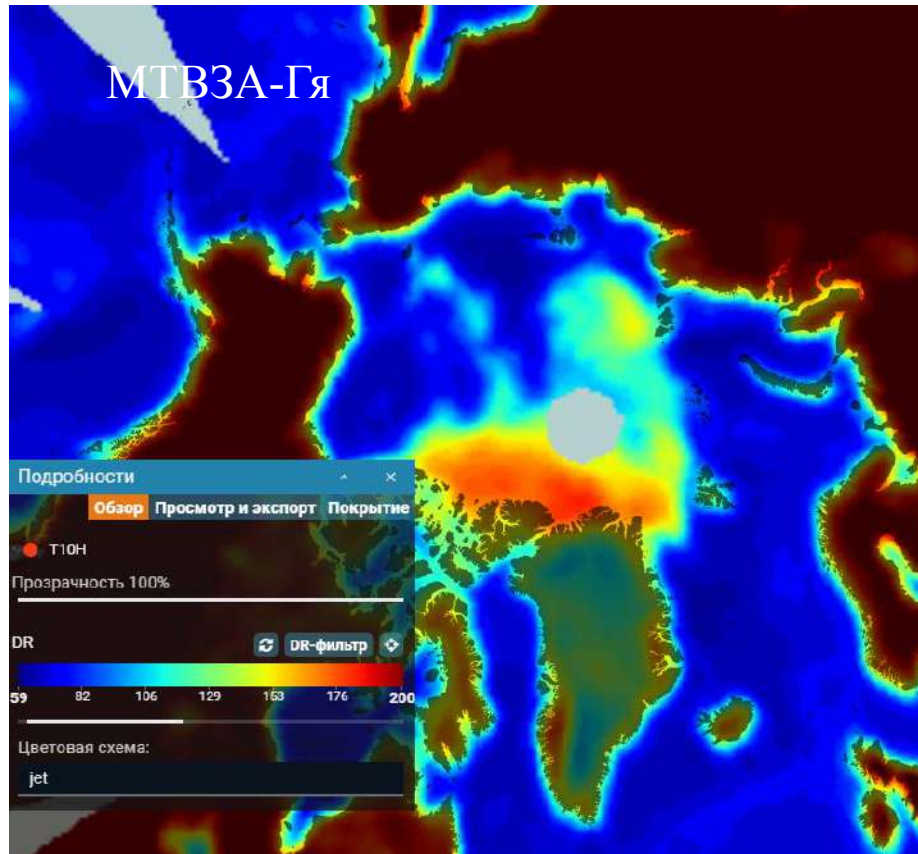


Спутниковые микроволновые радиометры

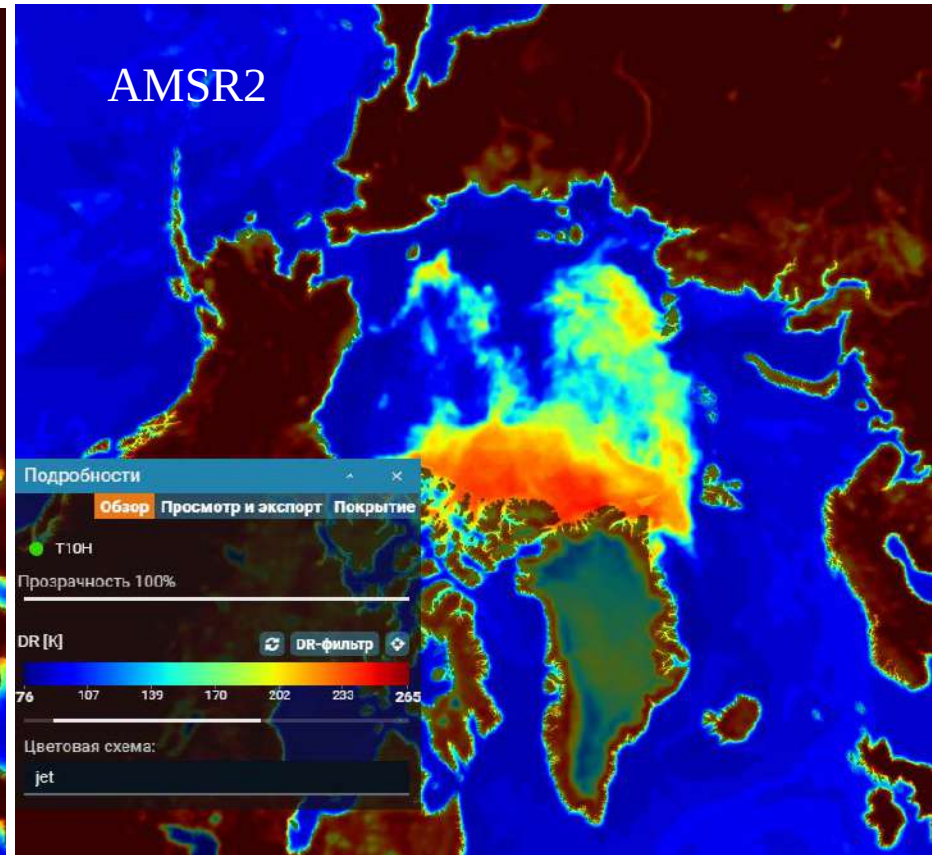
Инструмент	период	Тип прибора	кол-во кан.	Частота (ГГц)	Разр. (км)	Пол. обз. (км)
SSM/I	1987-	сканер	7	19.35-85	15-69	1400
TMI	1997-2015	сканер	9	10.65-85.5	5-50	780
SSMIS	2004-	сканер / зондировщик	24	19-183	12-55	1700
WindSat	2003-	сканер	22	6.8-37	11-55	1025
МТВЗА-ГЯ (Метеор-М №1,2)	2009-2014	сканер / зондировщик	18	10.6-183.31	5-150	1400
SMOS (MIRAS)	2009-	интерферометр	2	1.4	35-150	1000
SMOS (на Aquarius)	2011-	3 сканера + радар	2	1.4	150	407
SMAP	2015-	сканер	2	1.4	35	1000
AMSR-E	2002-2011	сканер	12	6.9-89	5-50	1600
AMSR2	May 2012 -	сканер	14	6.9-89	5-50	1450

MTB3A-Гя и AMSR2

10.6 ГГц, Г

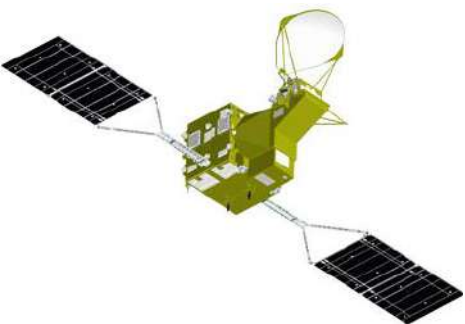


10.65 ГГц, Г



1 сентября 2016

Advanced Scanning Microwave Radiometer 2



18 Мая 2012 Япония запустила новый спутниковый сканирующий многоканальный микроволновый радиометр с самой большой в мире вращающейся антенной - Advanced Microwave Scanning Radiometer (**AMSR2**) на борту спутника Global Change Observation Mission – Water (**GCOM-W1** “Shizuku”)

Дополнительные каналы

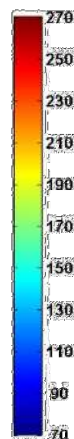
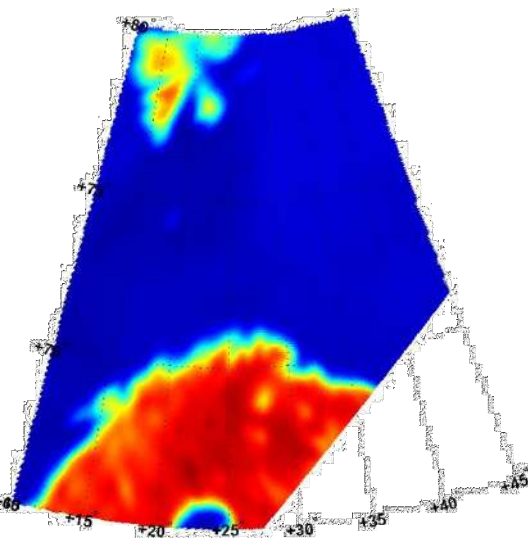
Лучше, чем у AMSR-E

Характеристики каналов				
Центр. частота. [ГГц]	Полоса [МГц]	Поляр.	Угл. разреш. [гр.] (Простр. разреш. [км])	Частота сканир. [км]
6.925 7.3	350	В & Г	1.8 (35 × 61)	10
10.65	100		1.2 (24 × 41)	
18.7	200		0.65 (13 × 22)	
23.8	400		0.75 (15 × 26)	
36.5	1000		0.35 (7 × 12)	
89.0(A&B)	3000		0.15 (3 × 5)	5

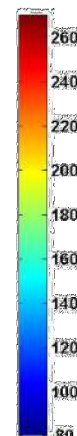
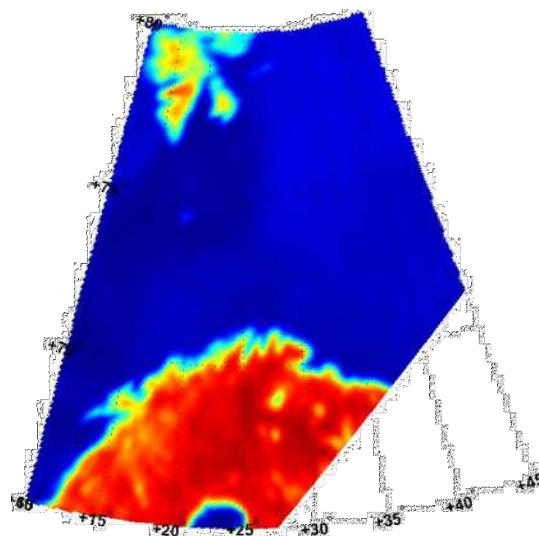
аналогично AMSR-E

Пространственное разрешение AMSR2

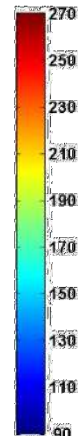
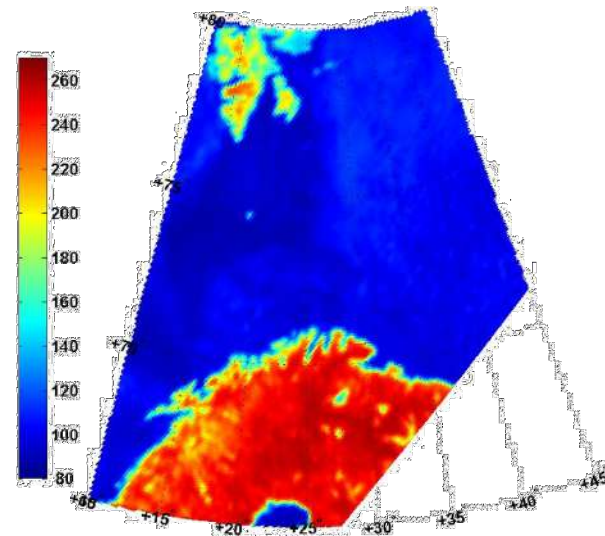
6.9 GHz



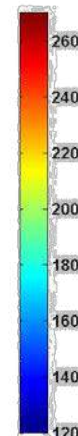
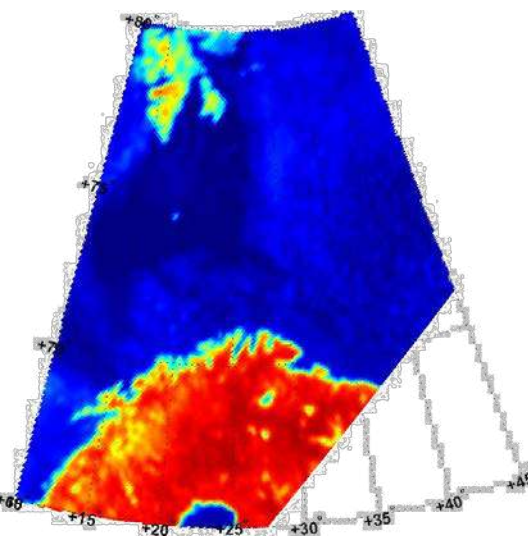
10.65GHz



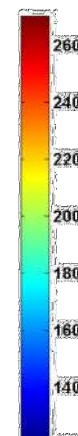
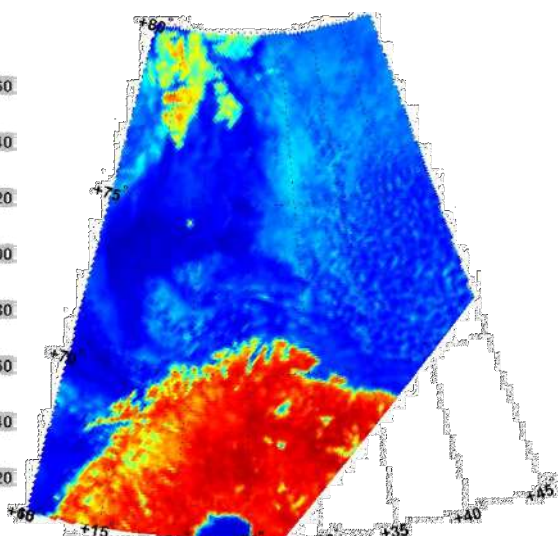
18.7GHz



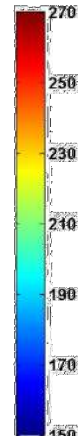
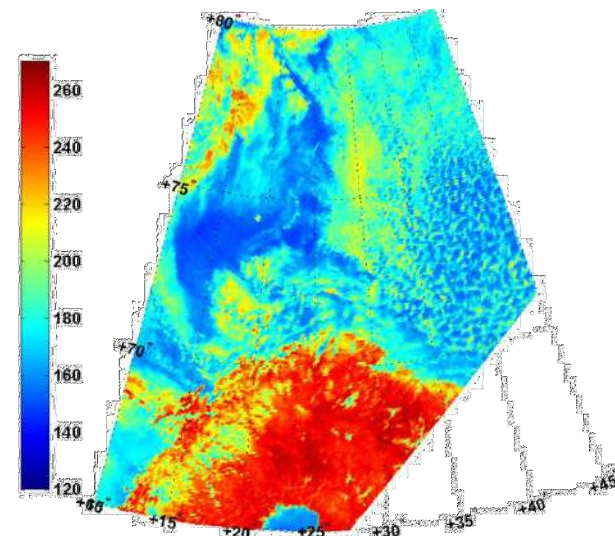
23.8 GHz



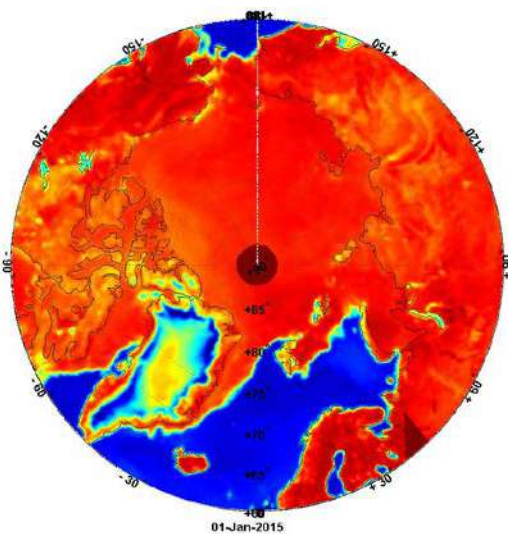
36.5 GHz



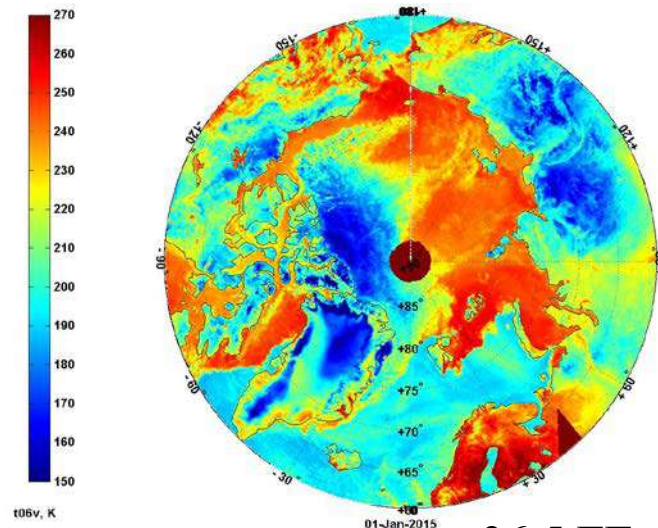
89 GHz



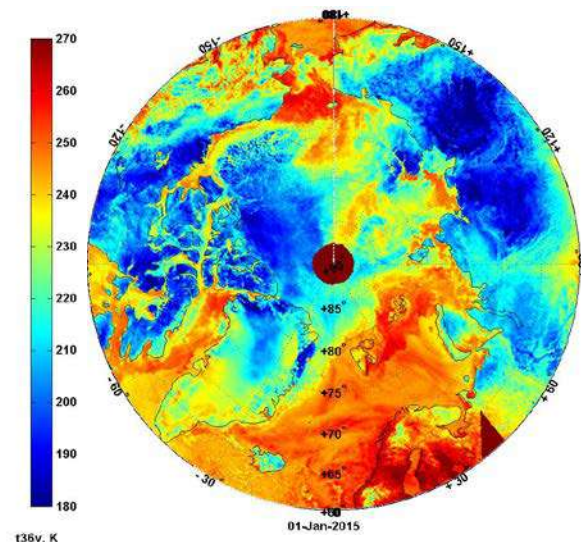
Поля Тя в Арктике



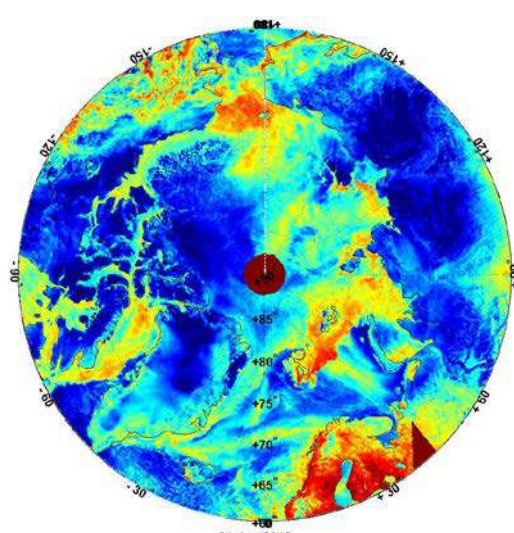
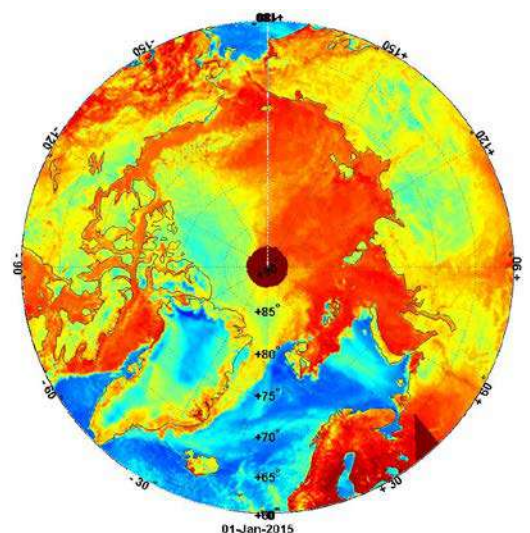
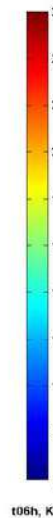
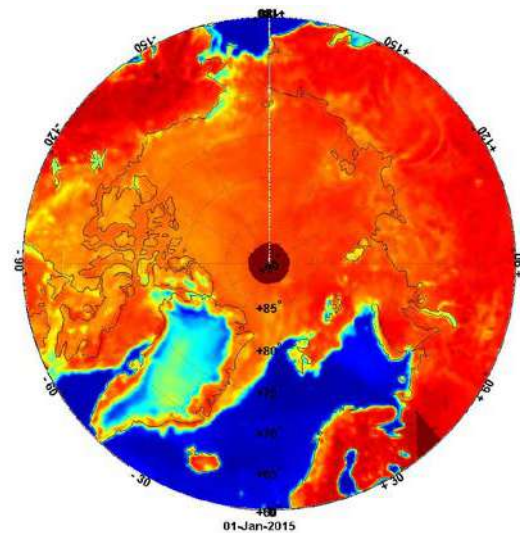
6.9 ГГц



36.5 ГГц



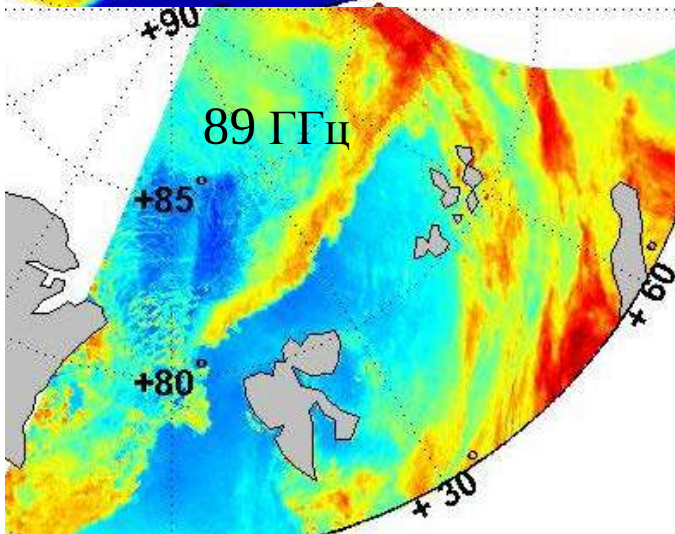
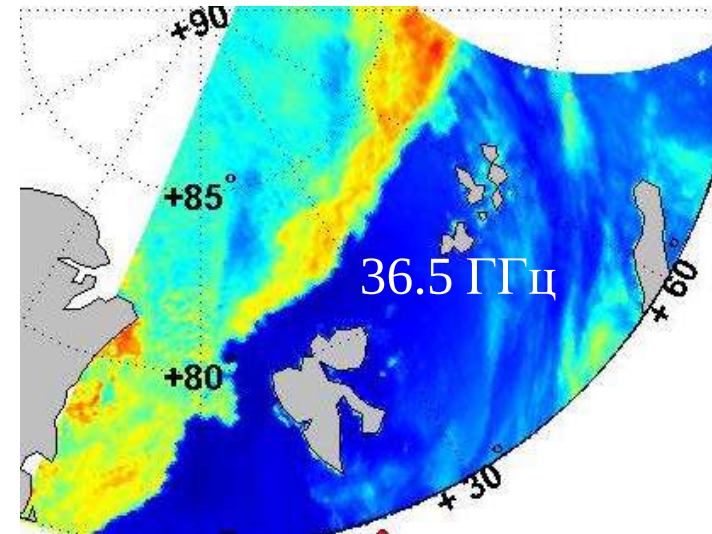
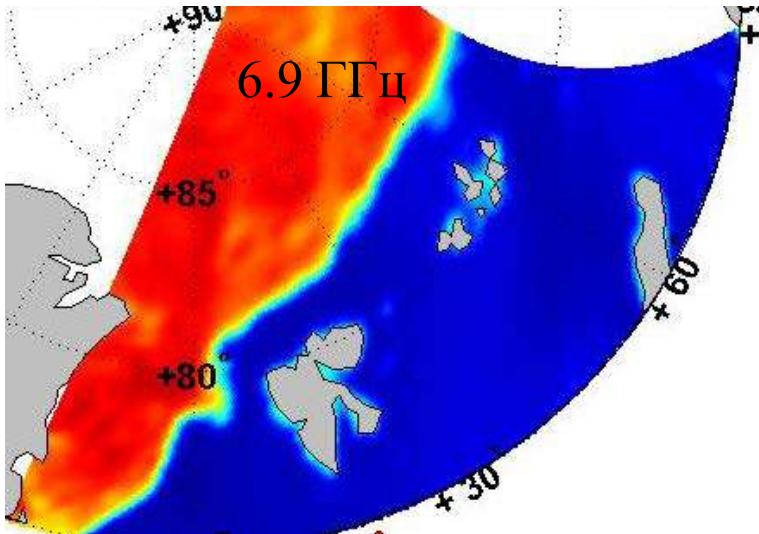
89 ГГц



Пассивное микроволновое зондирование морского льда

- Данные спутниковых пассивных микроволновых радиометров могут быть использованы для оценки сплоченности морского льда;
- Радиояркостные контрасты между морским льдом и открытым океаном $\sim 50\text{-}100\text{K}$;
- Микроволновое излучение морского льда неполяризовано и зависит от типа льда ;
- Коэффициент излучения однолетнего морского льда близок к 1;
- Коэффициент излучения многолетнего морского льда 0.7 - 0.8;
- Плохая погода (сильный ветер, облачность и осадки) ведет к росту погрешностей алгоритмов определения сплоченности морского льда.

Радиояркостные контрасты между водой и морским льдом

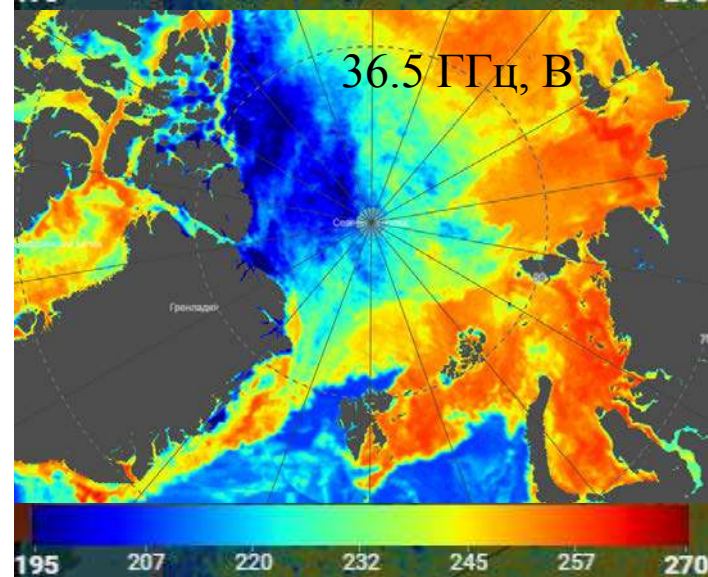
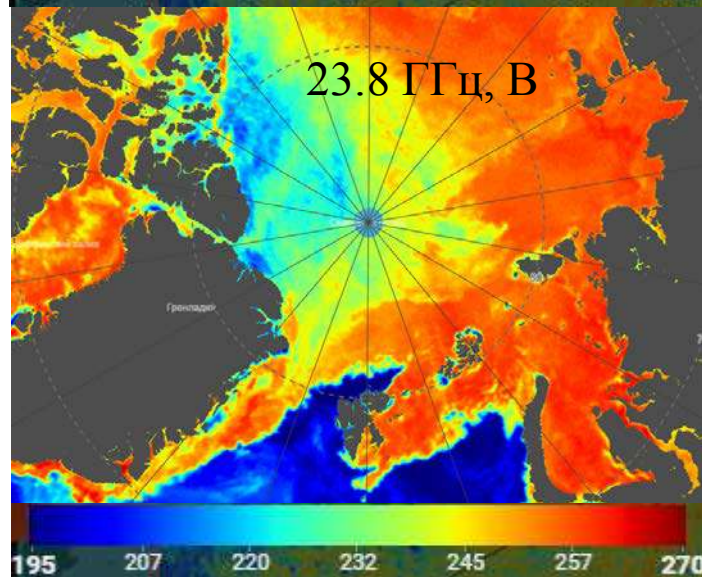
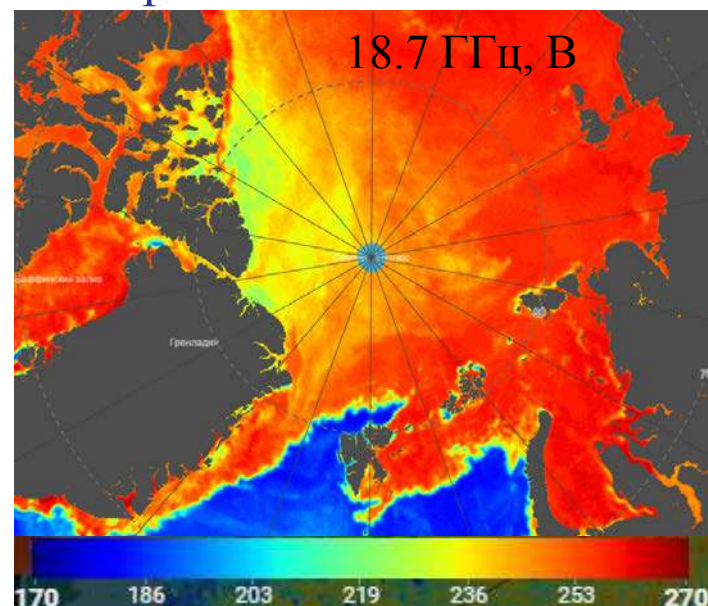
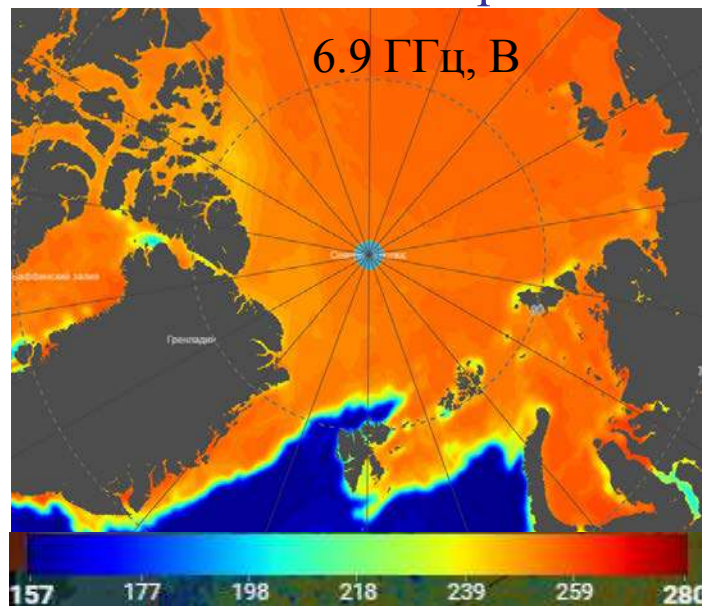


Чем выше частота, *тем выше пространственное разрешение:*

Чем выше частота, *тем меньше радиояркостный контраст между льдом и водой.*

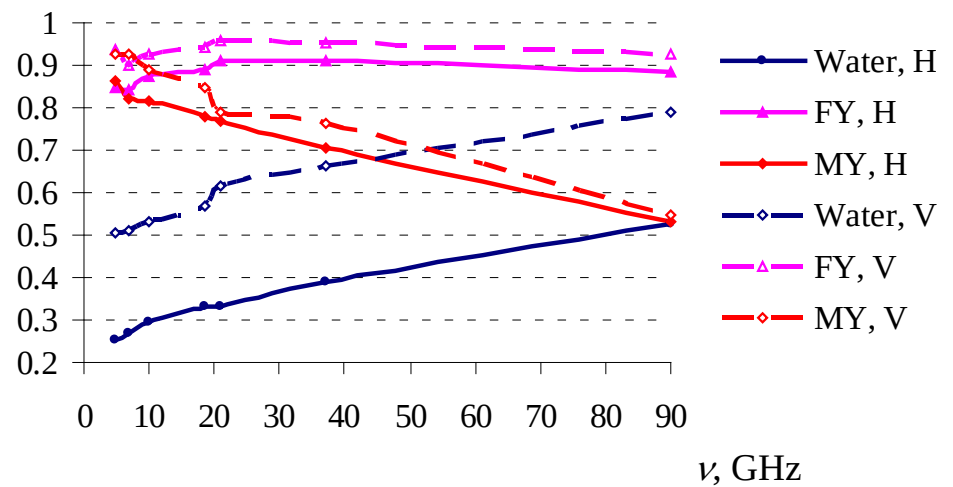
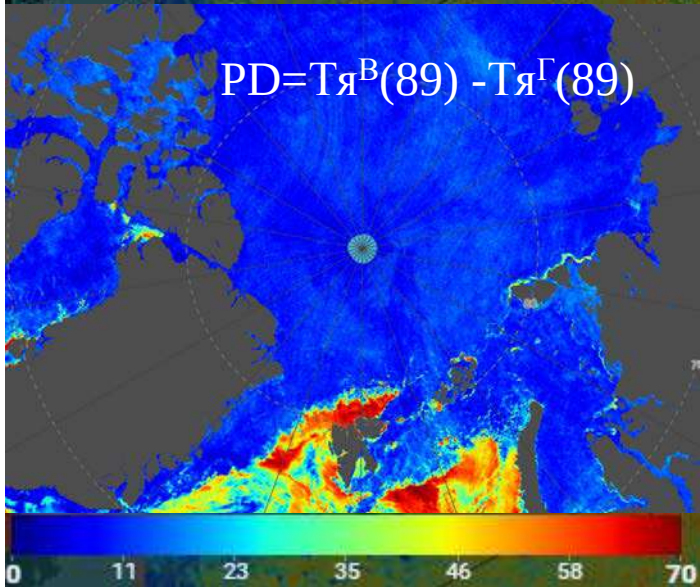
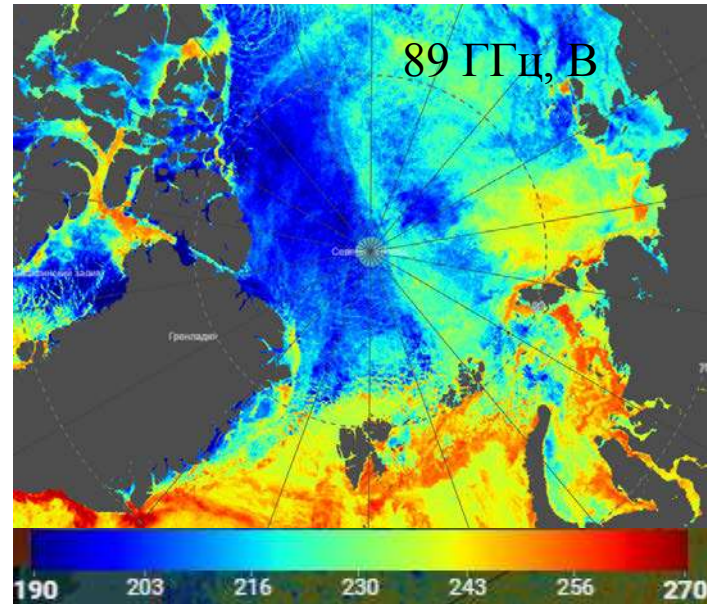
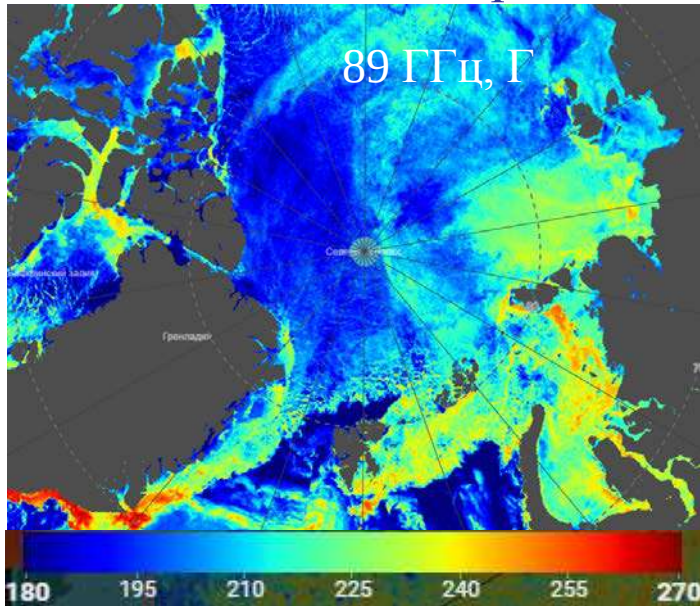
Типы алгоритмов

- 1) на основе измерений в Ка, К и Ку диапазонах (18-37 ГГц);
измерения AMSR2 11 апреля 2018

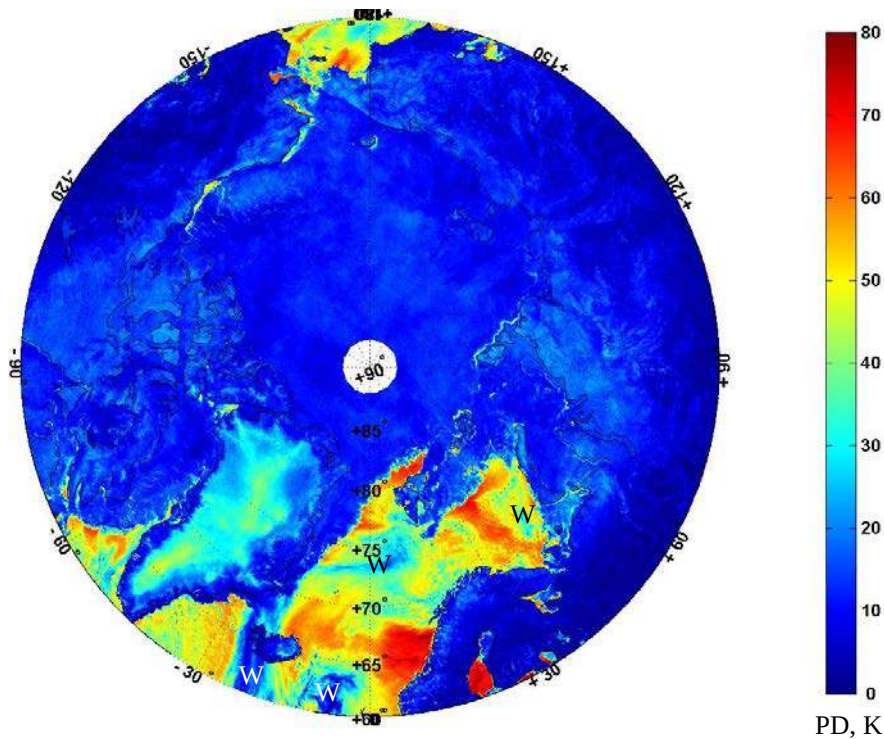


Типы алгоритмов

– 2) на основе измерений в W диапазоне (~ 90 ГГц)
измерения AMSR2 11 апреля 2018



Алгоритмы восстановления сплоченности льда, основанные на использовании PD

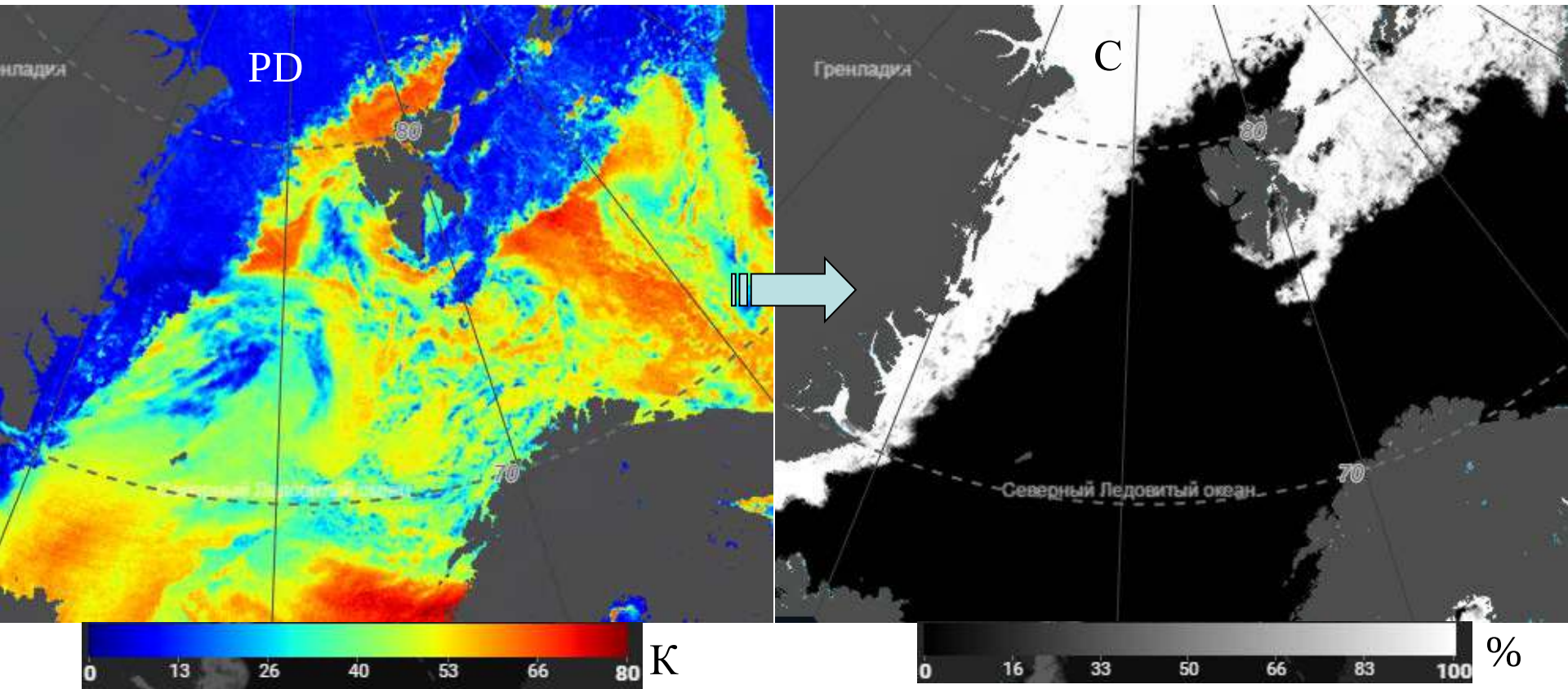


Карта среднедневных значений PD по данным измерений AMSR2 на частоте 89 ГГц для всей Арктики 11 апреля 2018 г.

1. Все алгоритмы, основанные на измерениях вблизи 90 ГГц, используют значения PD и точки привязки – PD_W PD_{SI} ;
2. Низкие значения PD могут быть обусловлены высокими значениями не только S , но и атмосферных параметров;
3. Для идентификации областей низких значений PD, обусловленных атмосферными эффектами, используются атмосферные фильтры, основанные на использовании измерений на более низких частотах

Различия алгоритмов

1. Выбор точек привязки PD_W и PD_{SI} ;
2. Тип используемой интерполяции значений C между $C=0$ и $C=100\%$;
3. Тип атмосферных фильтров.

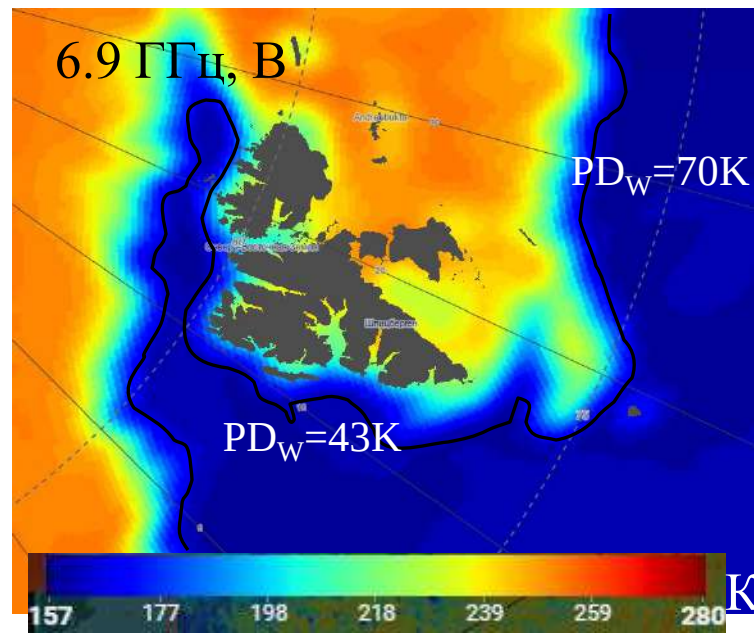
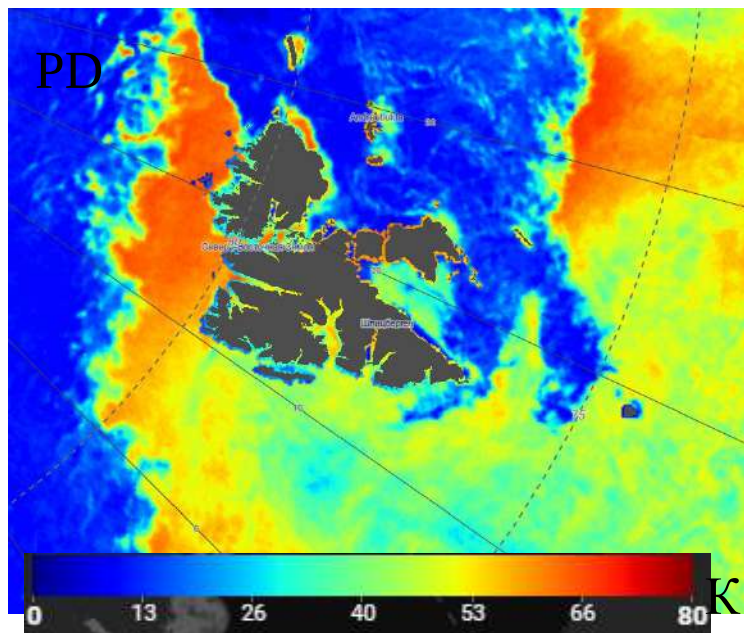


Алгоритм ЛСО

Основан на анализе модельных и измеренных значений PD

$PD_{SI} = 9.7 \text{ K}$; для PD_W используется переменное значение. На расстоянии $< 100 \text{ км}$ от кромки льда используется PD_W , измеренное над элементом морской поверхности, ближайшим к кромке. Вдали от кромки льда, используется $PD_W = 65 \text{ K}$.

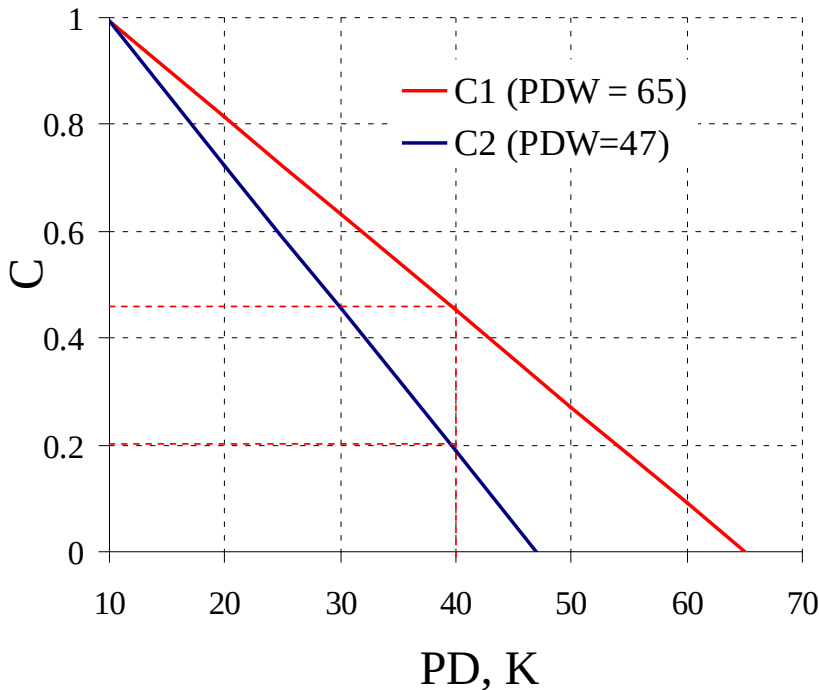
$$C = (PD - PD_W) / (PD_{SI} - PD_W)$$



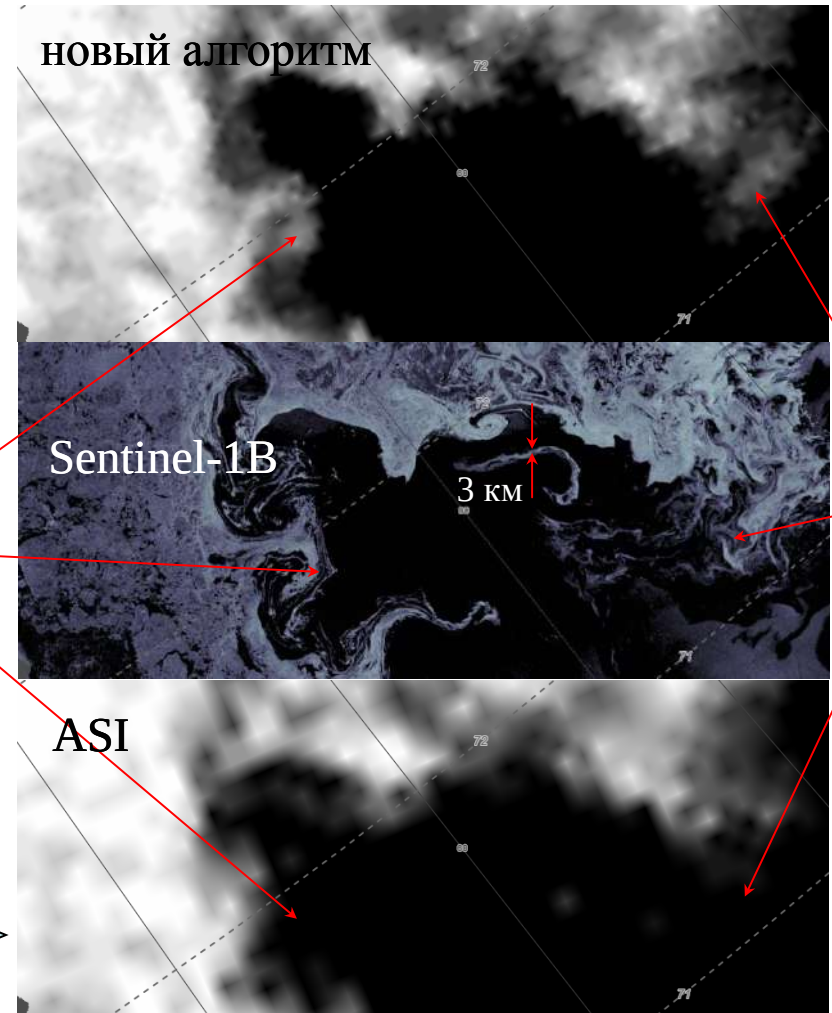
Кромка льда определяется по пороговым значениям T_v на канале 6.9 ГГц вертикальной поляризации 170 K

Что дает новый алгоритм?

1. Увеличение оцениваемой сплоченности в области сухих атмосфер (центральная Арктика, зимние условия), более сплоченная кромка льда. Наличие льда там, где другие алгоритмы демонстрируют его отсутствие

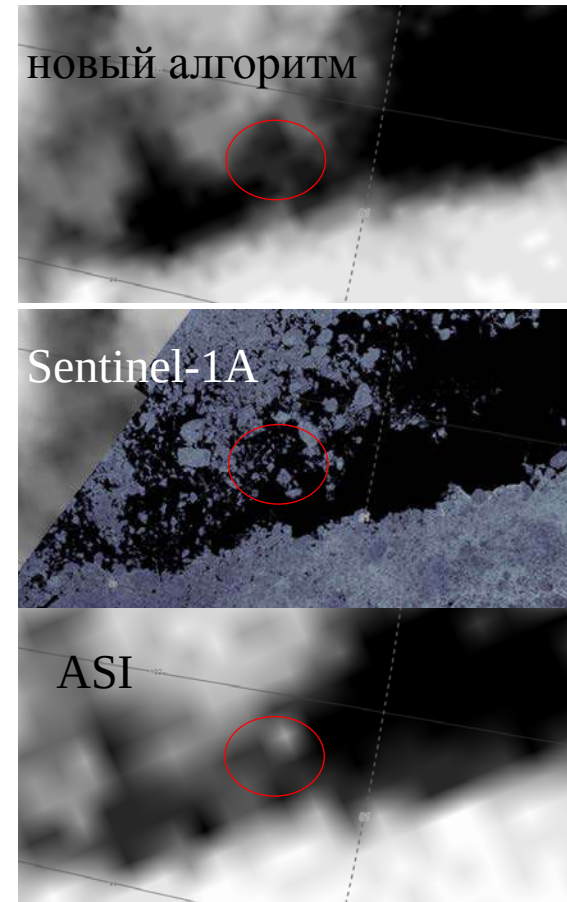
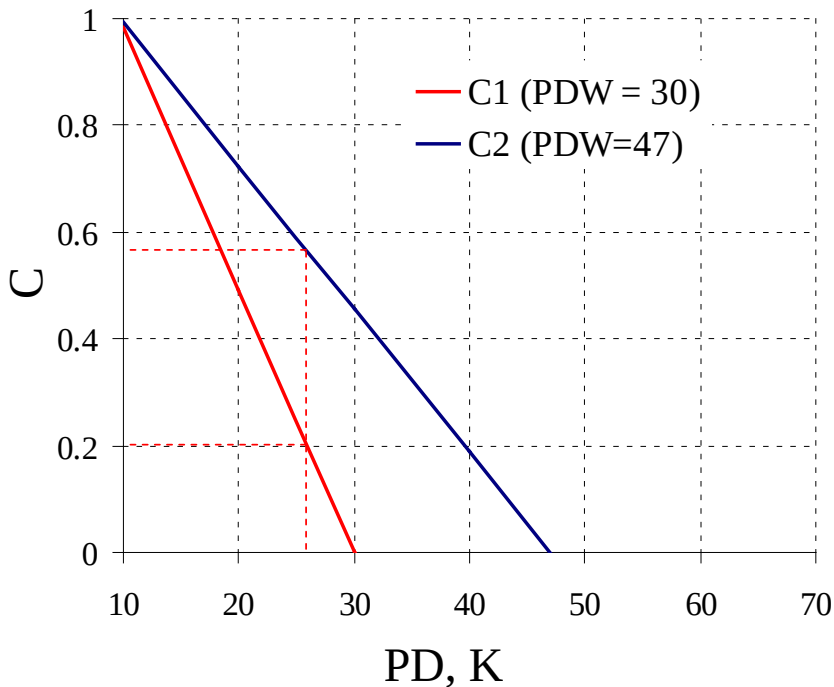


лед в Карском море 5 января 2018

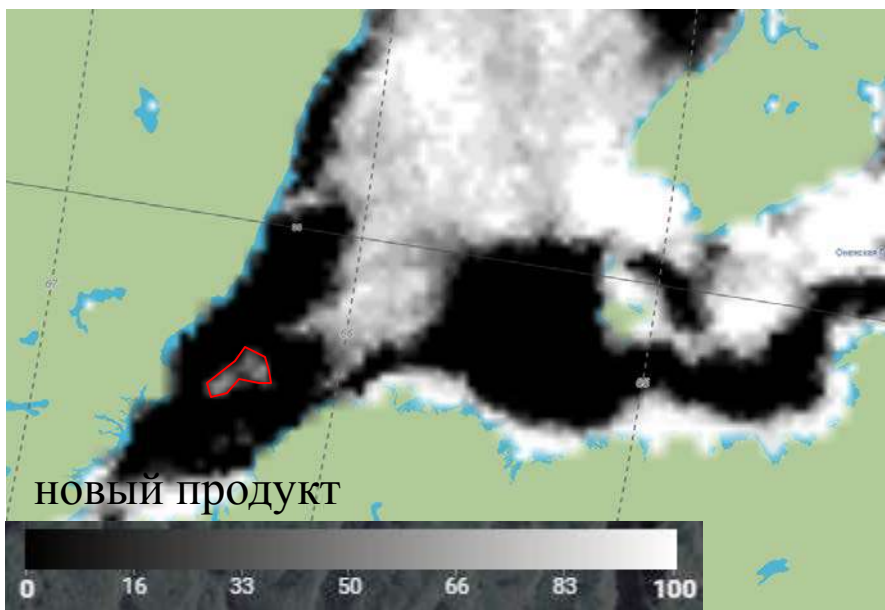
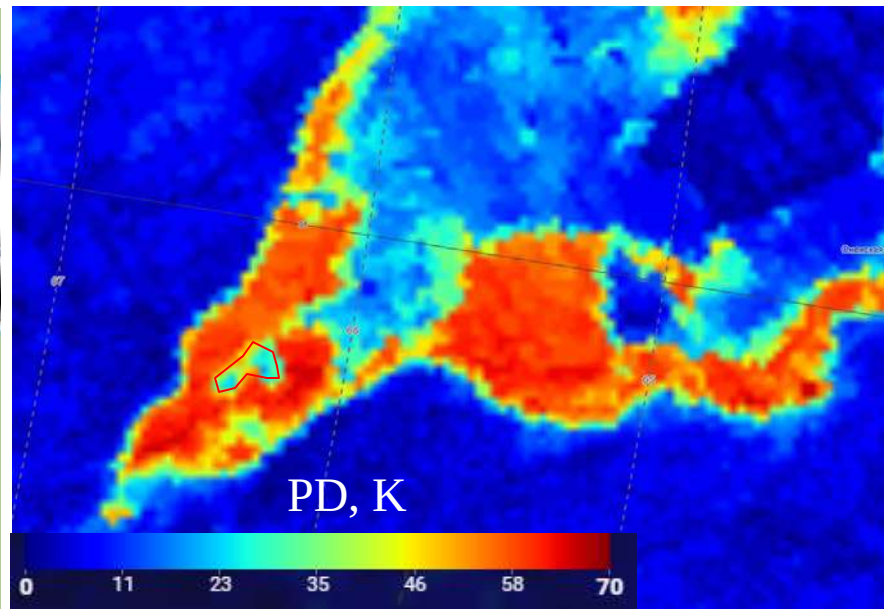


Что дает новый алгоритм?

1. Уменьшение оцениваемой сплоченности в области влажных/облачных атмосфер (летние условия), разреженная кромка льда. Отсутствие льда там, где другие алгоритмы демонстрируют его наличие



лед в Кандалакшском заливе 11 апреля 2018



Сплоченность льда по данным AMSR2, %

Aqua MODIS 10:30 Гр.