Спутниковая микроволновая радиометрия для изучения системы морской лед –океан - атмосфера

Методы ДЗЗ для решения задач наук о Земле

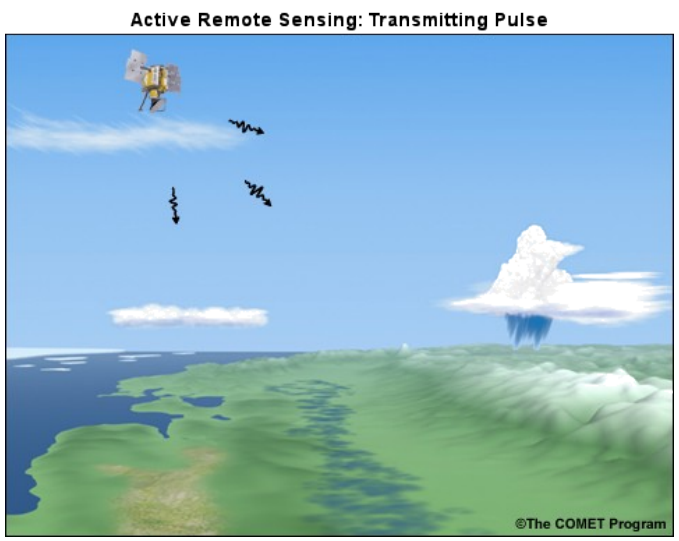
Суть методов дистанционного зондирования заключается в определении параметров и характеристик объектов бесконтактным способом на основании измерений сигнала, изменяемого объектами или средой.

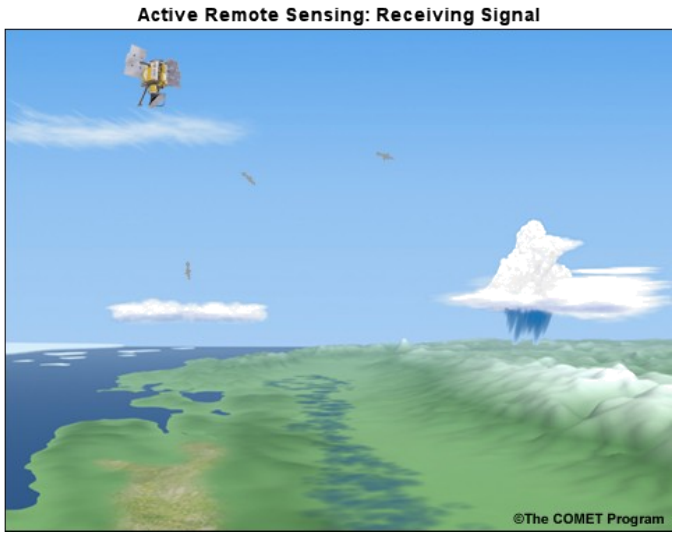
различают *сейсмические, геомагнитные, акустические и* ***электромагнитные*** *методы*.

Физическая основа большинства методов ДЗ - регистрация изменений характеристик электромагнитного излучения, вызванных взаимодействием излучения с исследуемым объектом.

Классификация спутниковых инструментов

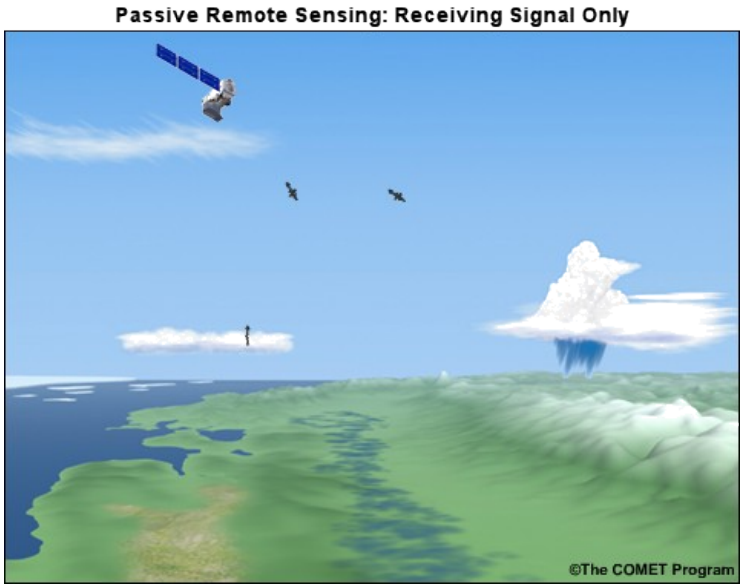
- По наличию внешнего источника: активные, пассивные;





Активные микроволновые системы должны иметь источник излучения.

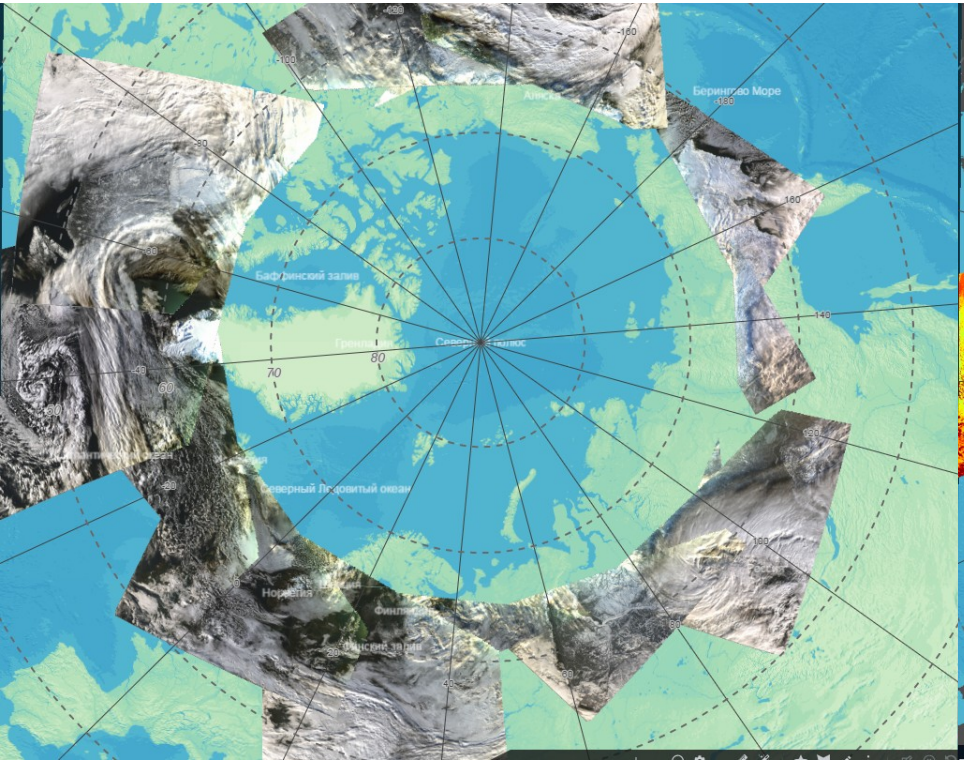
Пассивные микроволновые системы не посылают импульсов излучения, а только измеряют радиацию. Следовательно, пассивные системы не требуют столько мощности, как активные, и являются более дешевыми и малозатратными



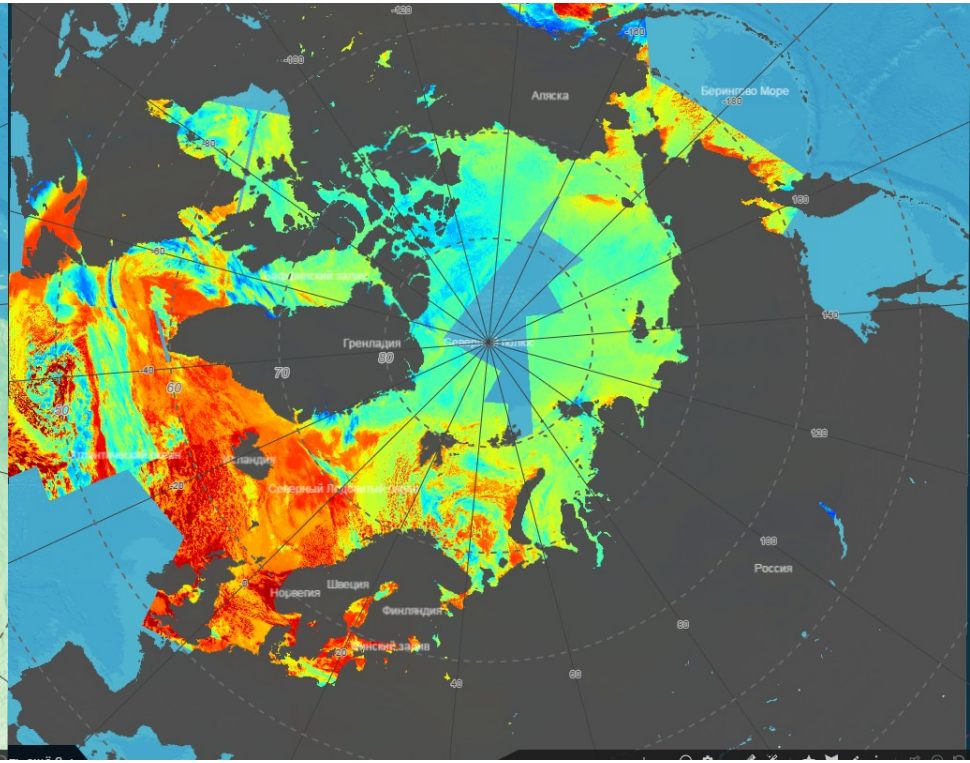
Классификация спутниковых инструментов

- По диапазону спектра: видимый, инфракрасный (ИК) и микроволновый (СВЧ, радио-диапазон);

25 ноября 2018



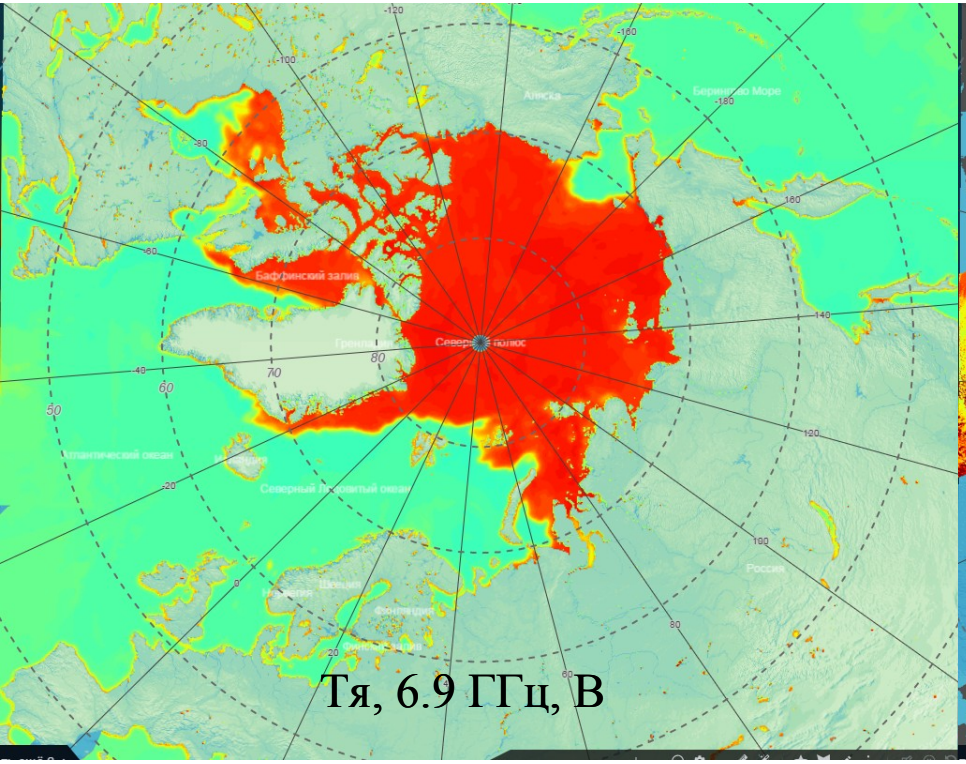
видимый MODIS

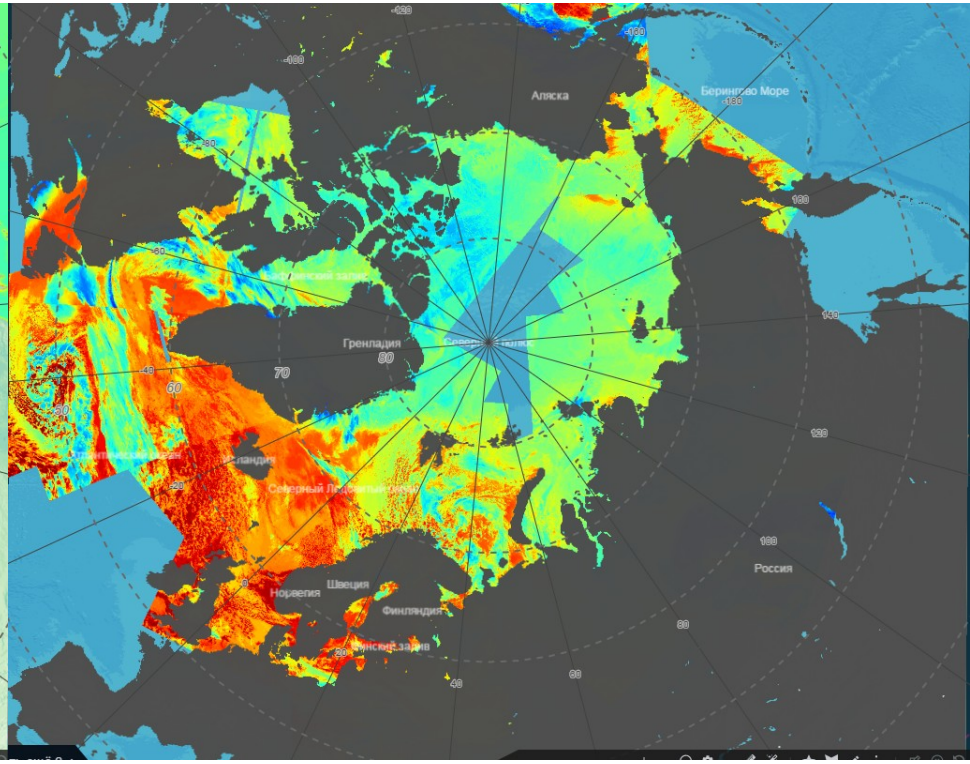


ИК MODIS

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

25 ноября 2018

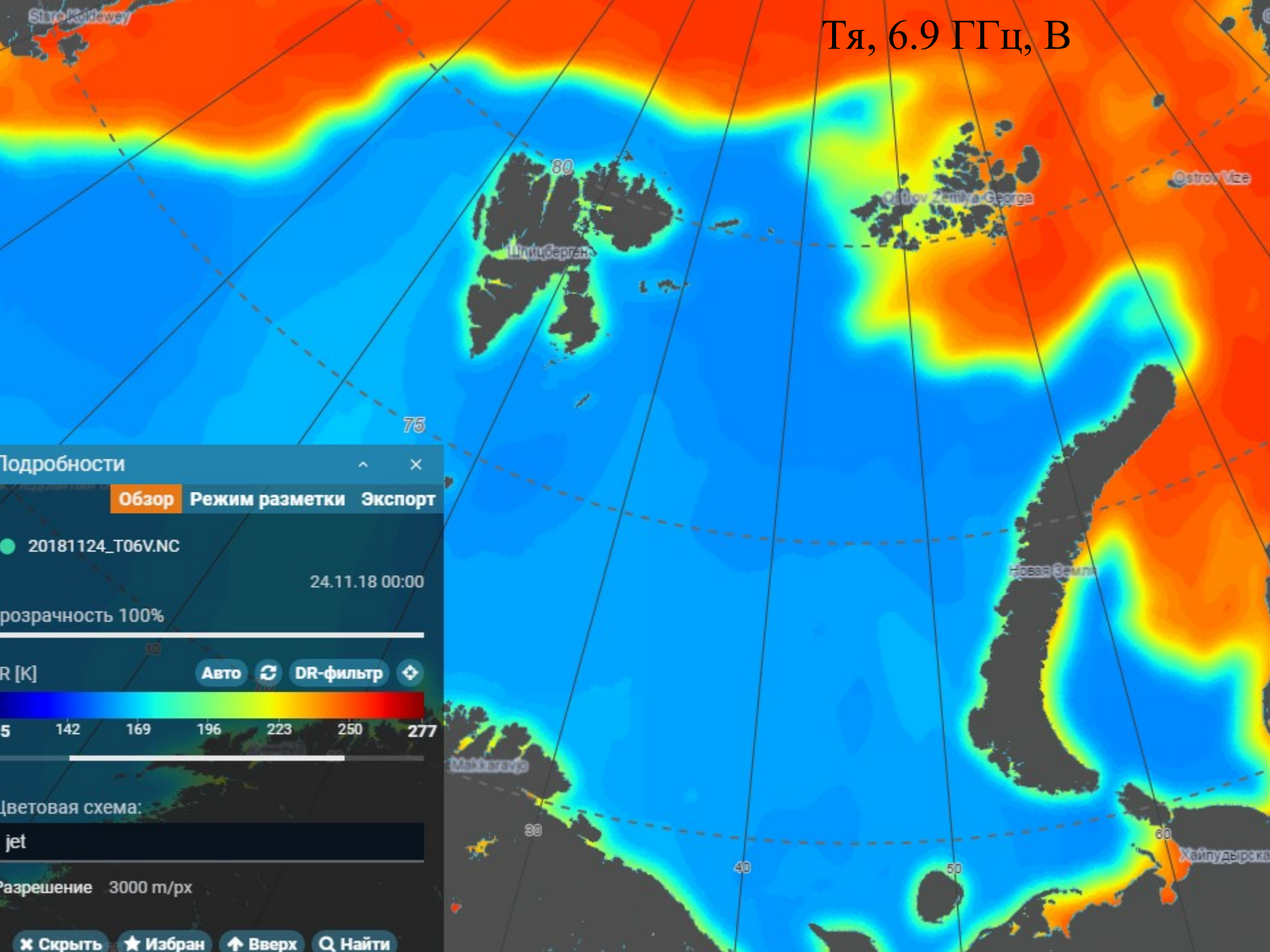


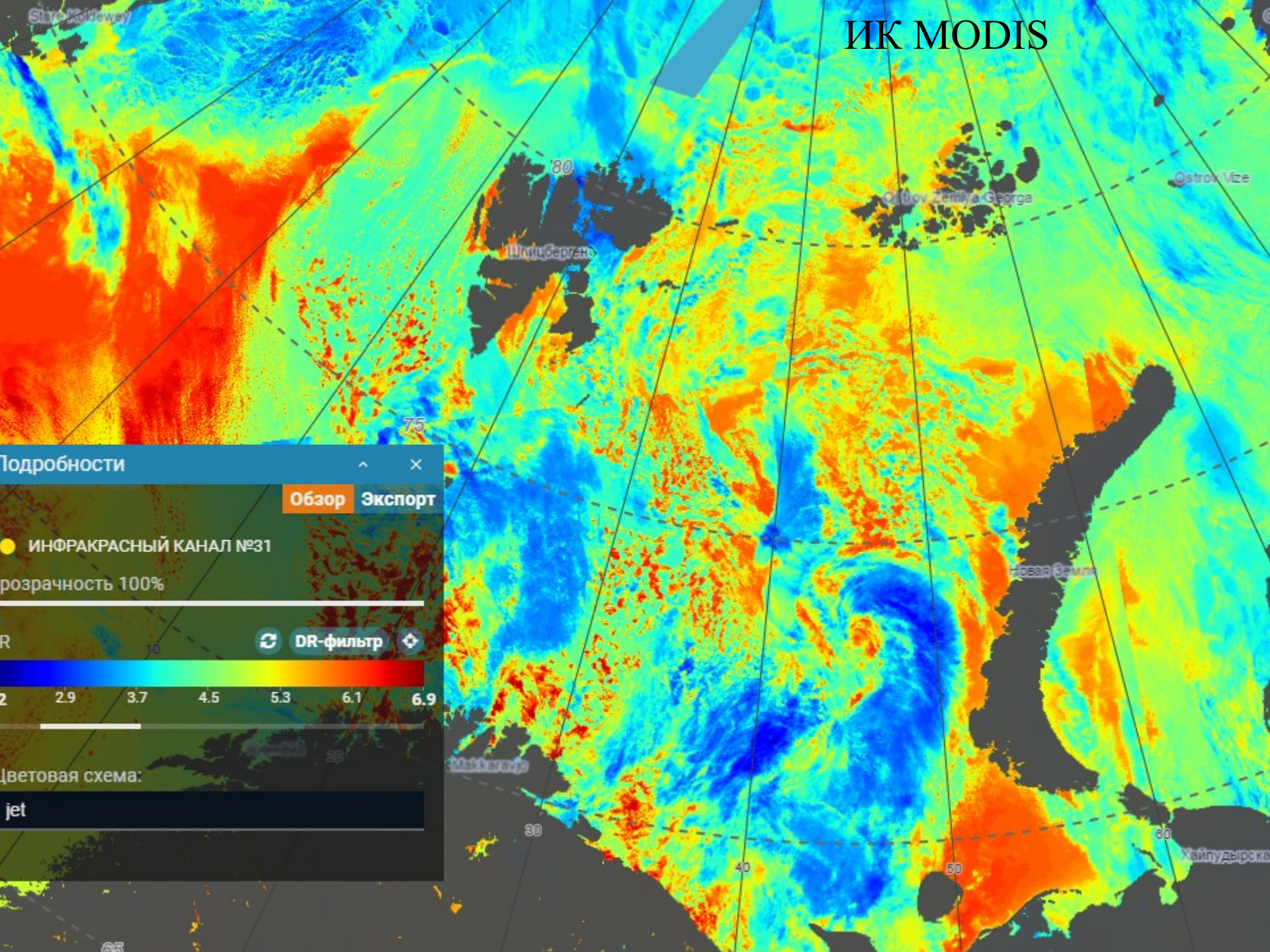


микроволновый AMSR2

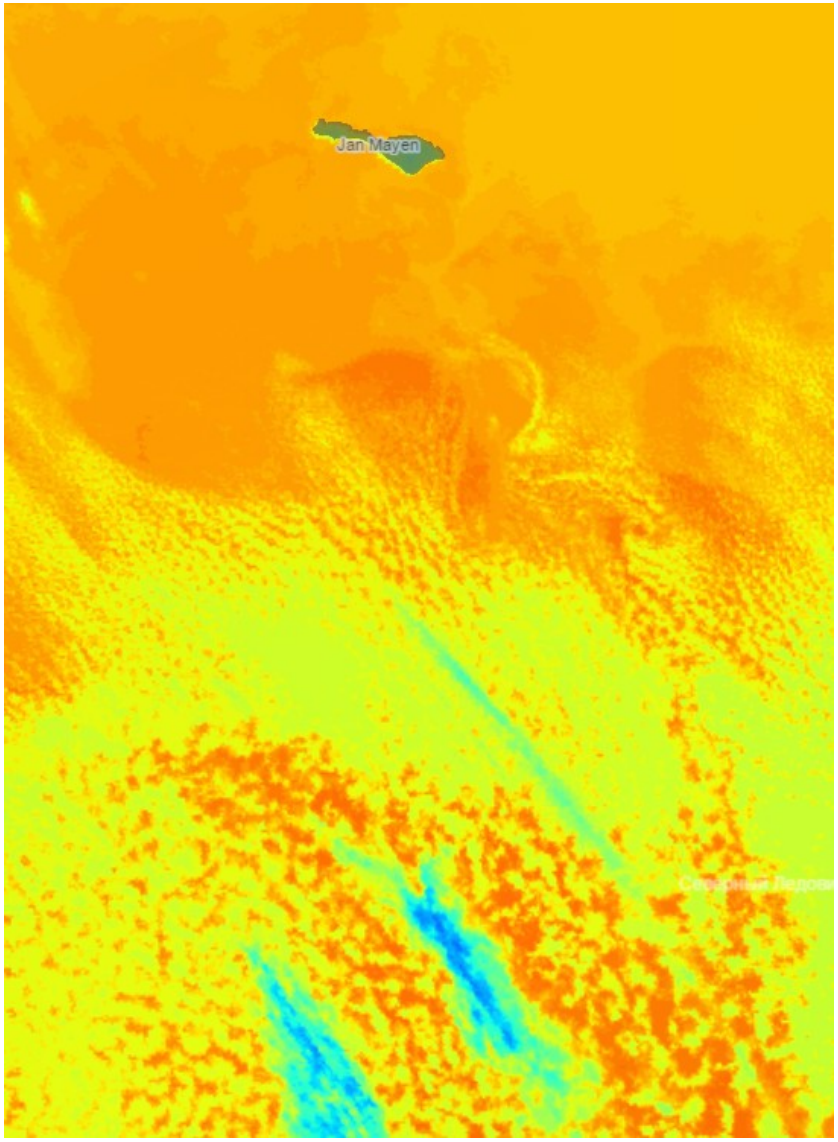
ИК MODIS

Микроволновые и ИК измерения не зависят от солнечного освещения

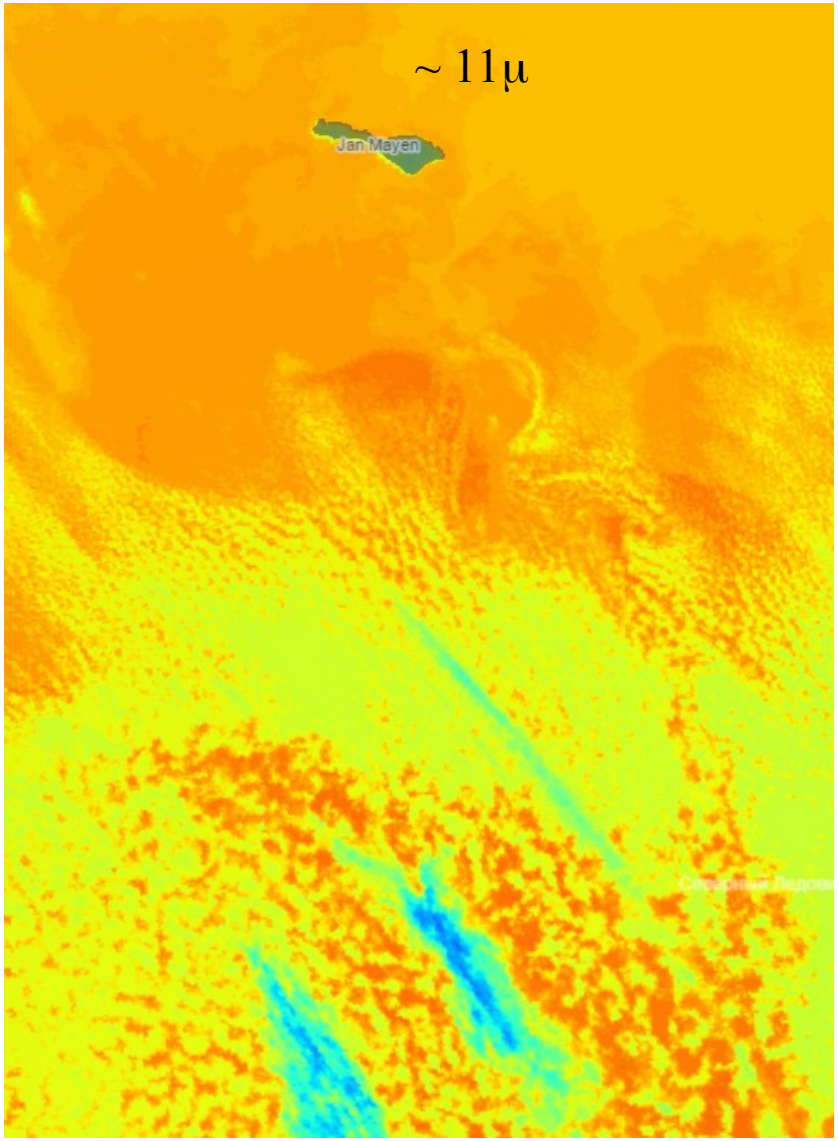

Тя, 6.9 ГГц, В
Подробности
Обзор
Режим разметки
Экспорт
20181124_T06V.NC
24.11.18 00:00
розрачность 100%
R [K]
Авто
DR-фильтр
5
142
169
196
223
250
277
Цветовая схема:
jet
Разрешение 3000 m/px
Скрыть
Избран
Вверх
Найти
80
75
70
60
50
40
30
Шпицберген
Новая Земля

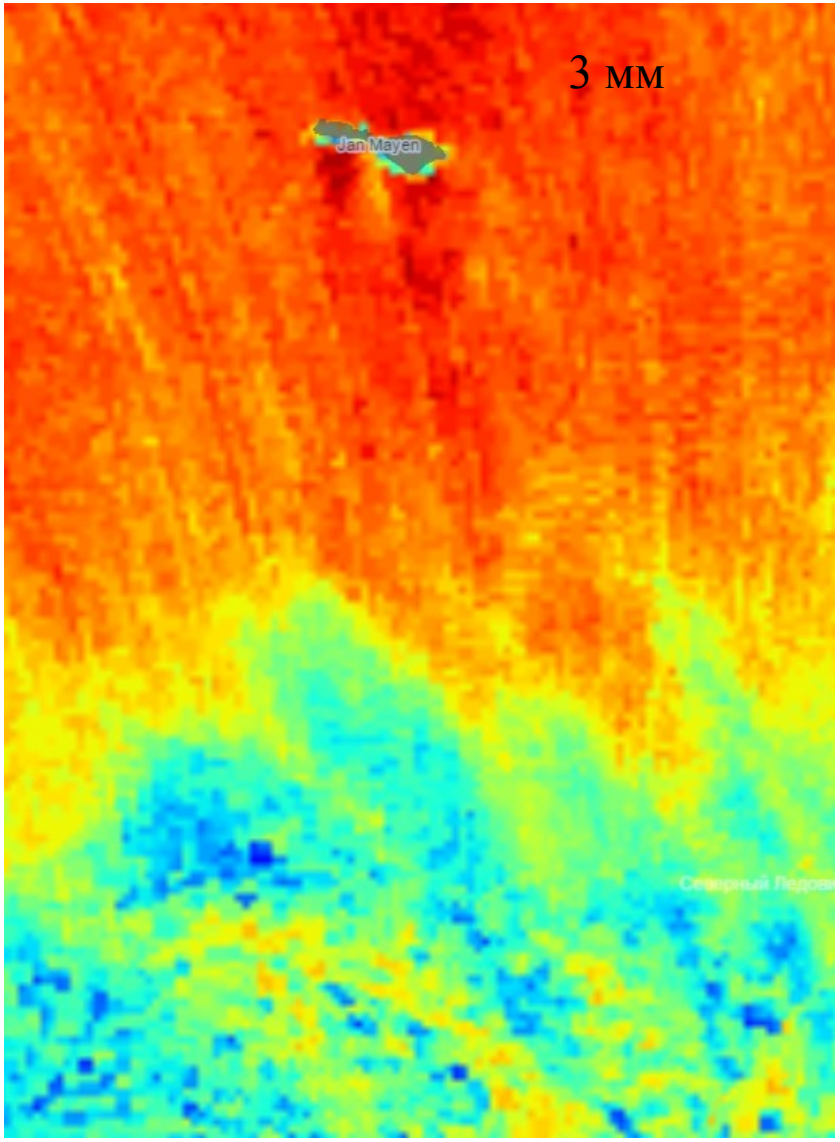

ИК MODIS
Подробности
Обзор
Экспорт
ИНФРАКРАСНЫЙ КАНАЛ №31
розрачность 100%
R
DR-фильтр
2
2.9
3.7
4.5
5.3
6.1
6.9
Цветовая схема:
jet
Шпицберген
Новая Земля
80
75
70
65
60
50
40
30

11:45 Гр. ИК MODIS 7:05 Гр. Sentinel-1

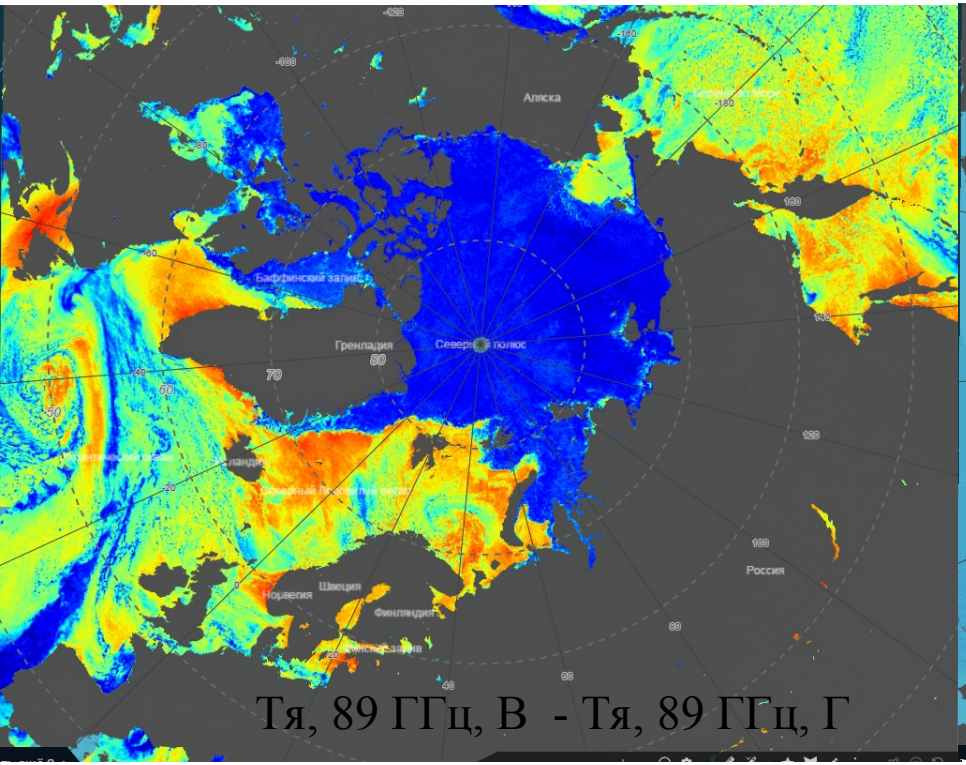


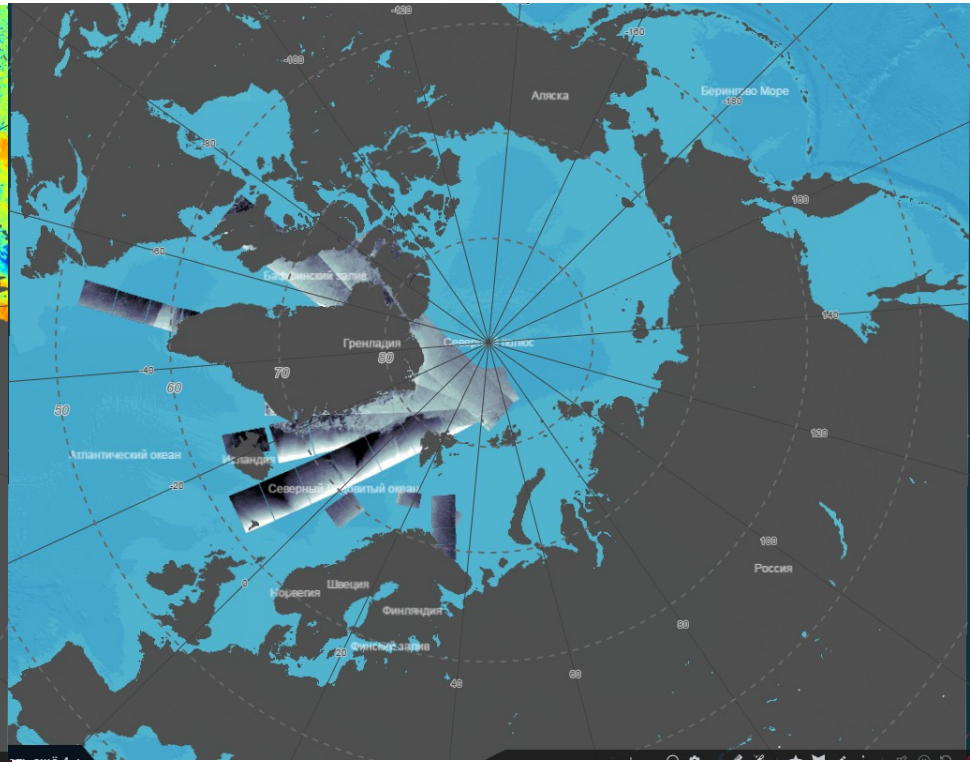
11:45 Гр. ИК MODIS 11:48 Гр. AMSR2





25 ноября 2018





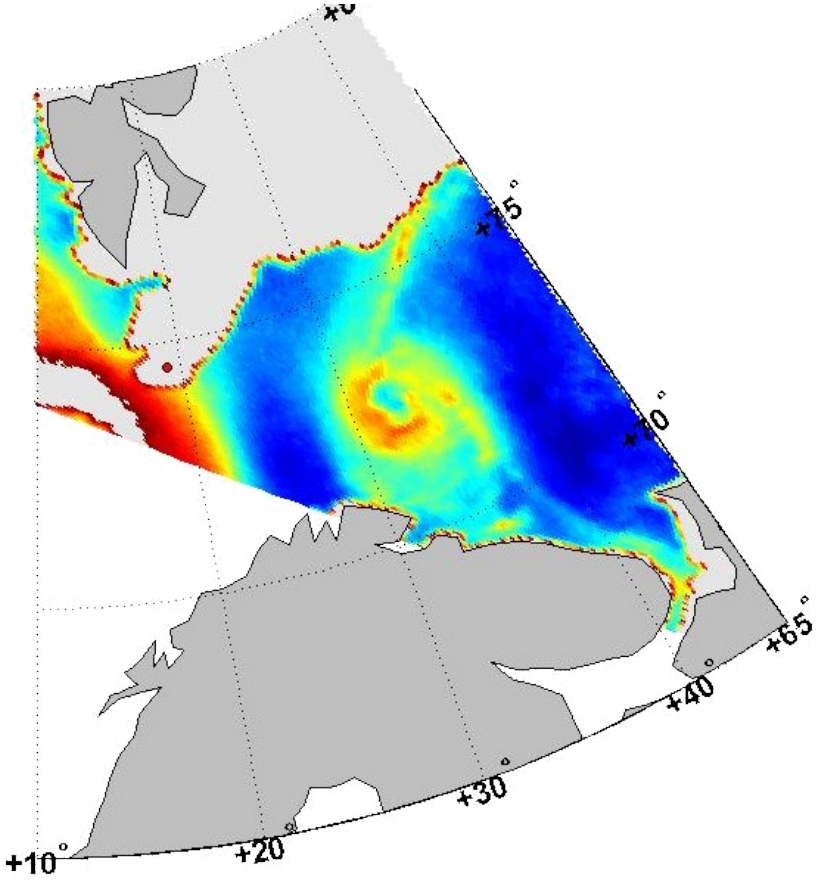
микроволновый AMSR2

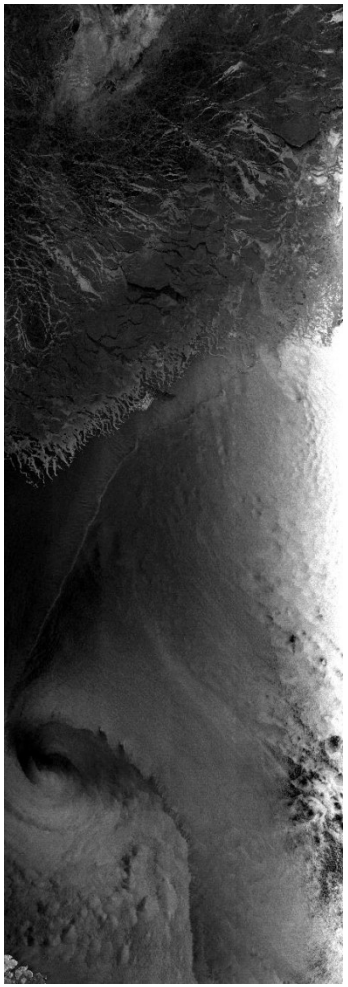
PCA Sentinel-1

Пассивные микроволновые - Активные микроволновые РСА

низкое разрешение (десятки и сотни км)

высокое разрешение (метры)

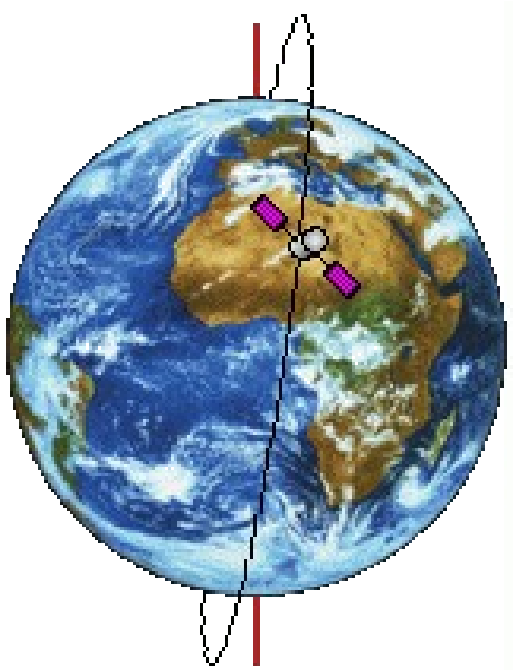




полярный циклон в Баренцевом море 8 января 2009

Глобальность данных

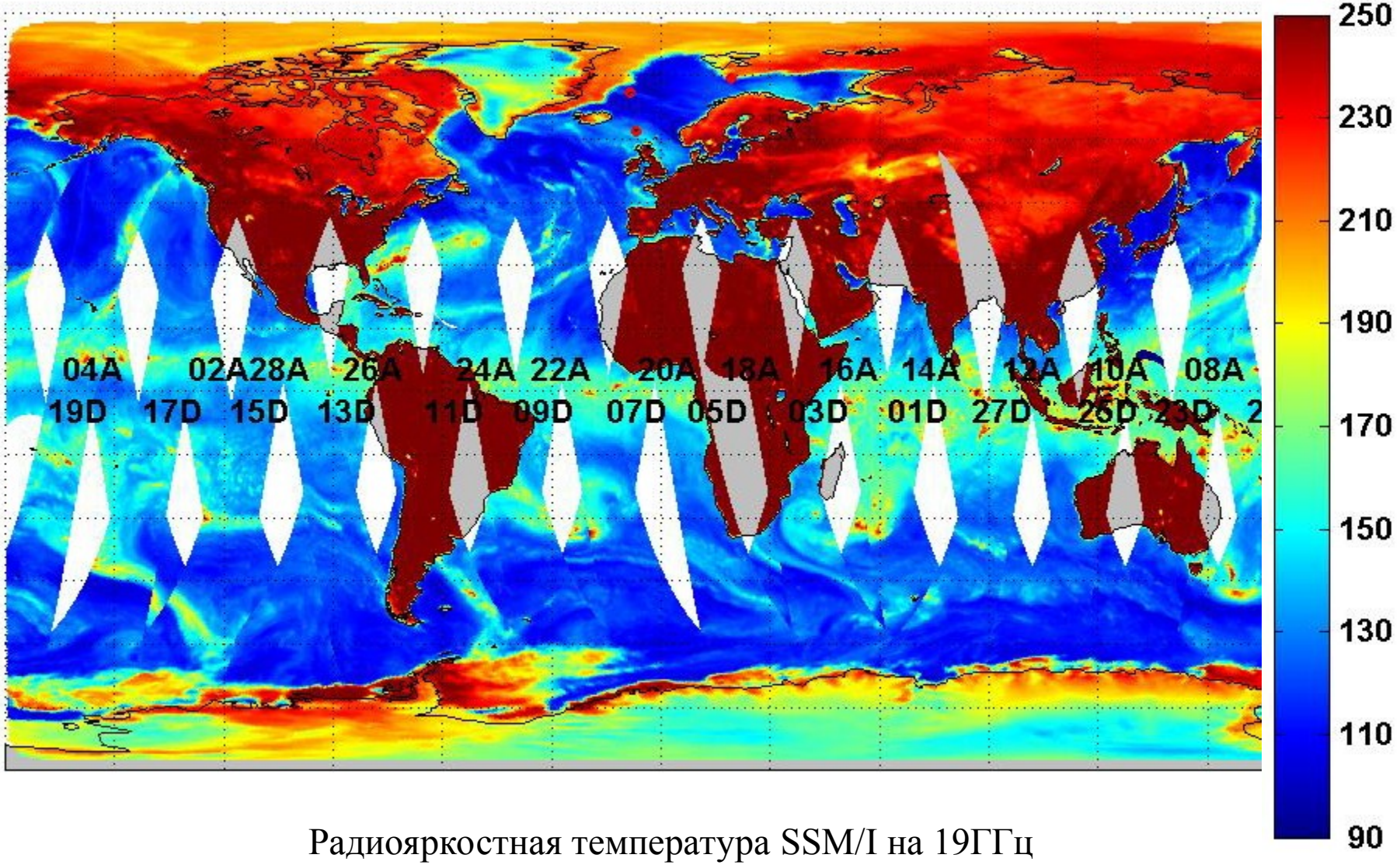
обеспечивается расположением радиометров на платформах с солнечно-синхронной орбитой с небольшими углами наклона



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.

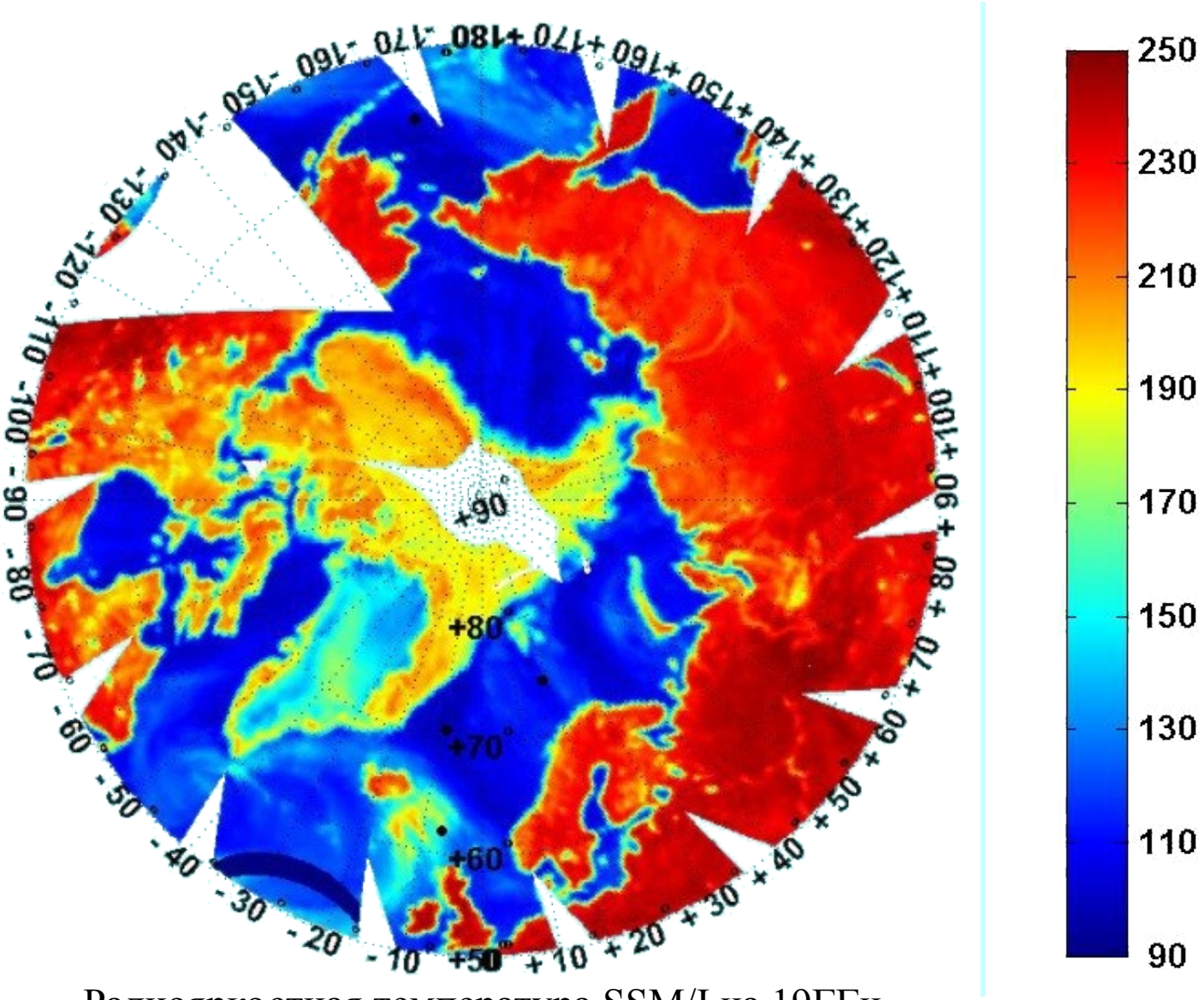
В англоязычной литературе – polar orbiting satellites

Глобальные поля радиояркостных температур



Радиояркостная температура SSM/I на 19ГГц
горизонтальной поляризации

Полярное покрытие



Радиояркостная температура SSM/I на 19ГГц
горизонтальной поляризации

Физические основы

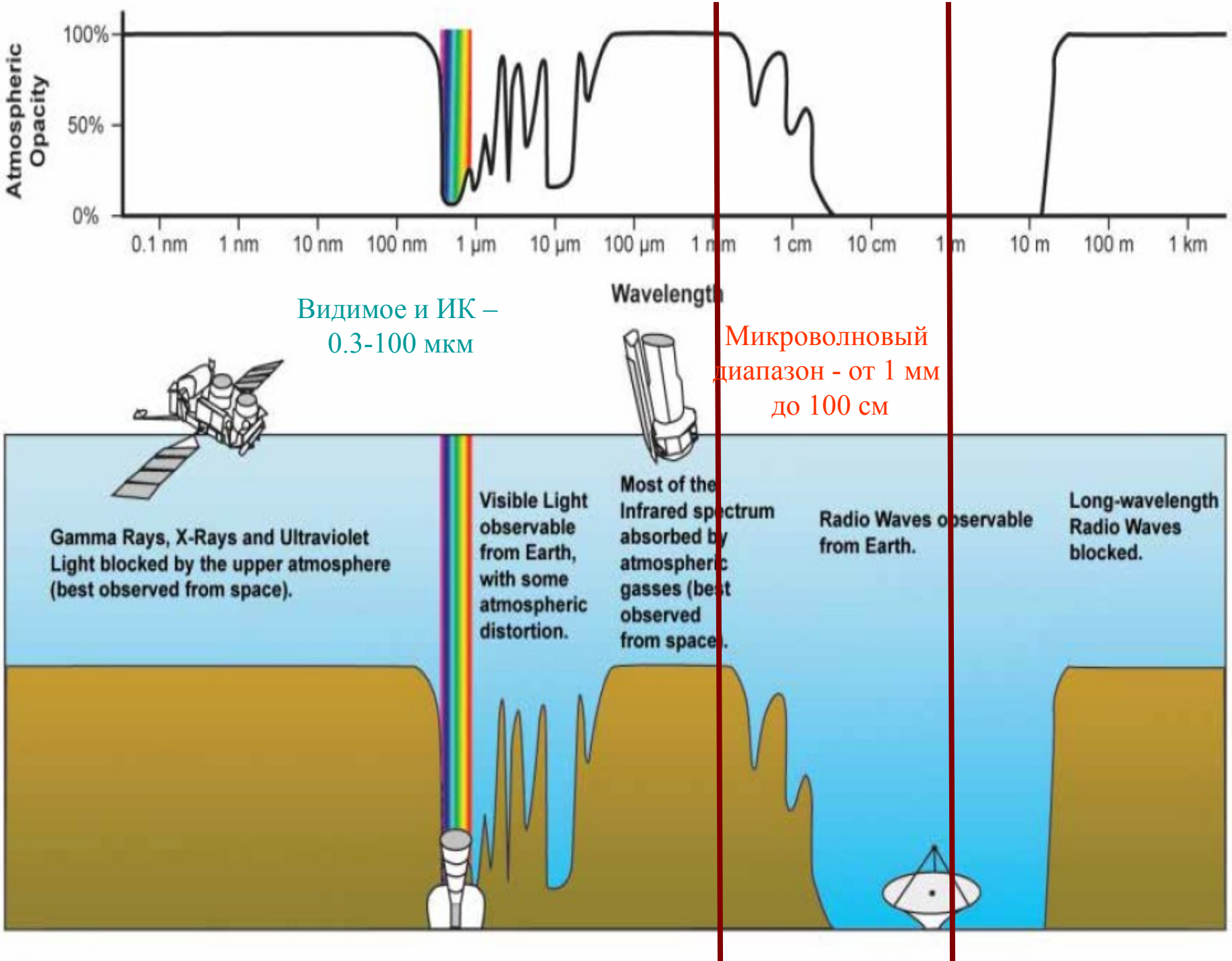
Основа пассивного микроволнового зондирования - *измерение радиометрами собственного излучения объектов в микроволновом диапазоне электромагнитного спектра и интерпретация этих измерений*;

Классификация методов спутниковой микроволновой радиометрии:

По частотному диапазону

- В окнах прозрачности атмосферы данные радиометров позволяют оценивать свойства поверхности;
- на частотах, где атмосфера является оптически плотной, восстанавливаются свойства самой атмосферы;

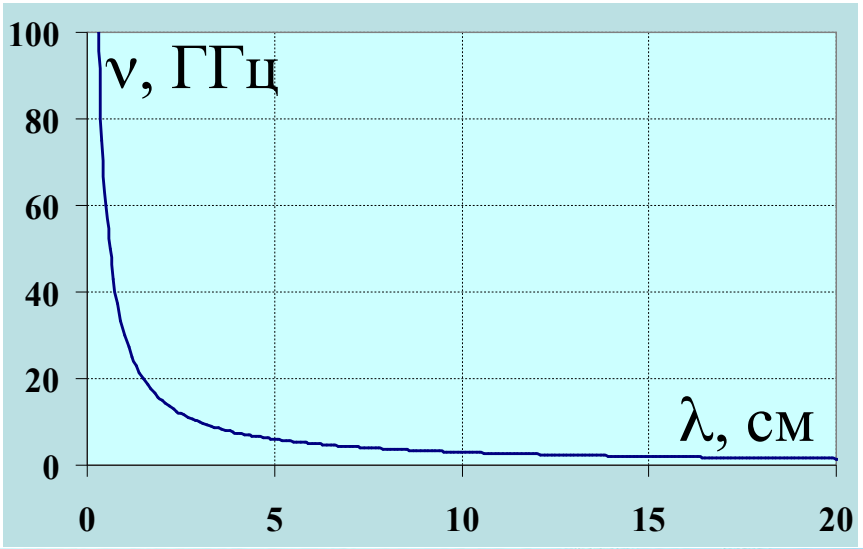
По объекту исследований – по конкретным параметрам суши; океана, морского льда атмосферы

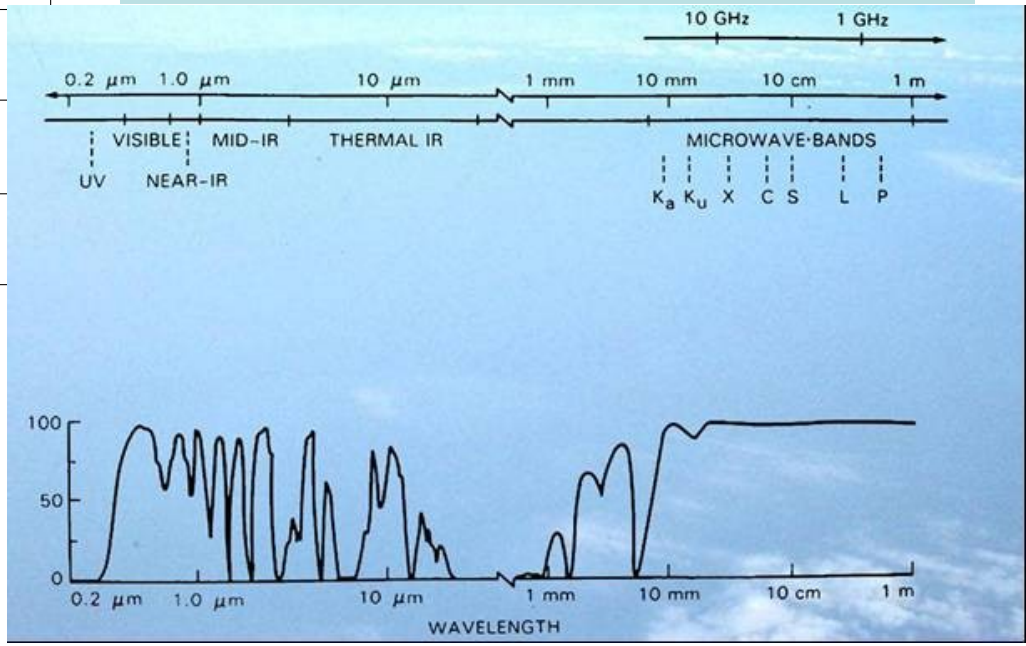

Atmospheric Opacity
100%
50%
0%
0.1 nm
1 nm
10 nm
100 nm
1 μm
10 μm
100 μm
1 mm
1 cm
10 cm
1 m
10 m
100 m
1 km
Wavelength
Видимое и ИК – 0.3-100 мкм
Микроволновый диапазон - от 1 мм до 100 см
Gamma Rays, X-Rays and Ultraviolet Light blocked by the upper atmosphere (best observed from space).
Visible Light observable from Earth, with some atmospheric distortion.
Most of the Infrared spectrum absorbed by atmospheric gasses (best observed from space).
Radio Waves observable from Earth.
Long-wavelength Radio Waves blocked.

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

λ(см) = 30/ν(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

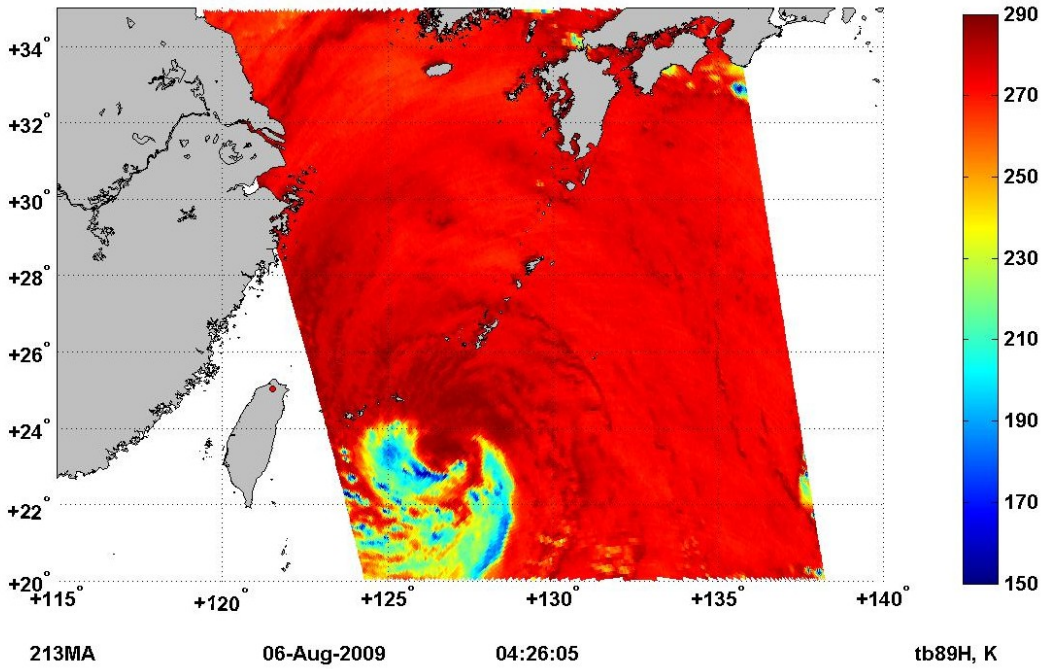




P – диапазон: в 1979 г. космический радиотелескоп КРТ-10 с двумя радиометрами (12 см и 72 см)

Достоинства спутниковой микроволновой радиометрии

- Глобальность;
- Регулярность;
- Независимость от времени суток;
- Независимость от погодных условий;
- Возможность восстанавливать цифру! – количественные значения параметров;
- Доступность данных;

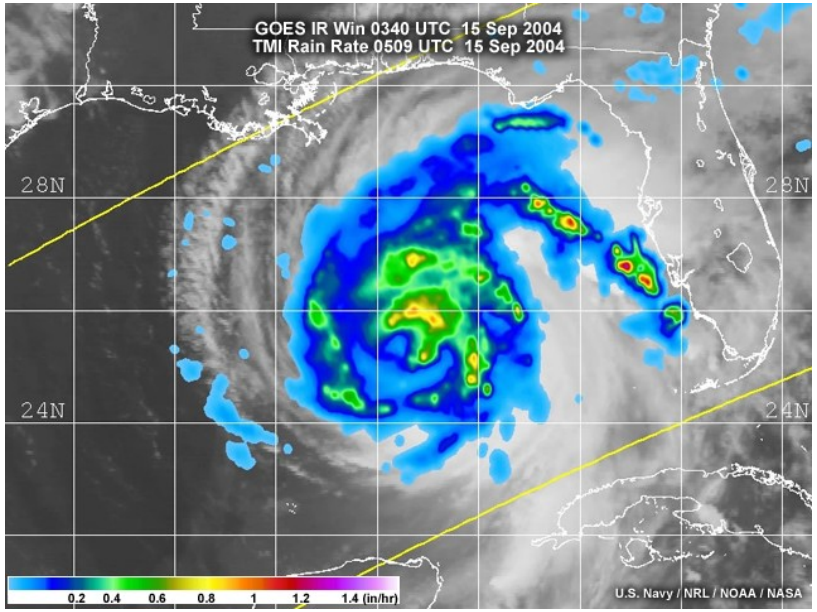


Тайфун Моракот в поля Тя AMSR-E

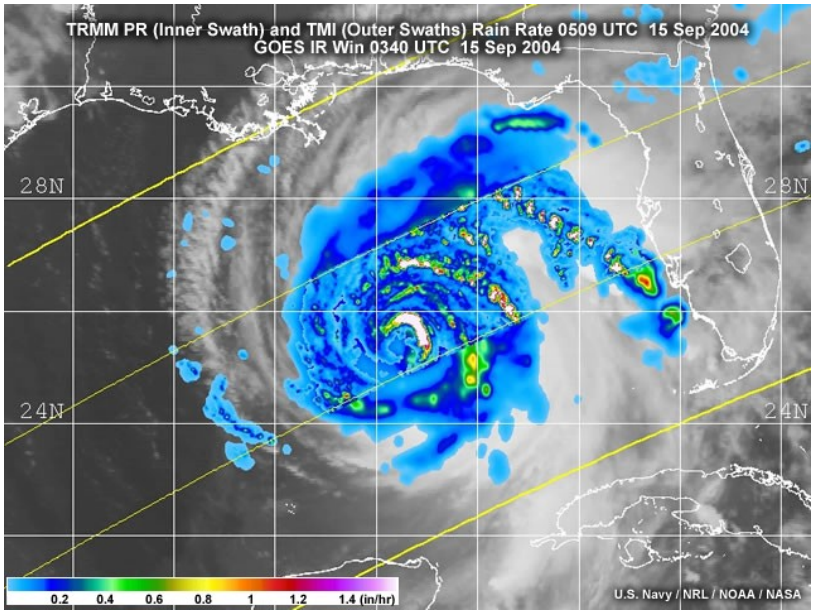
- Сравнительно небольшие габариты, масса и энергопотребление радиометров;
- Многоканальность, т.е. возможность одновременно оценивать сразу несколько параметров атмосферы и подстилающей поверхности;
- Возможность построения длинных временных рядов для геофизических параметров и исследования их изменчивости в пространстве и во времени

Ограничения спутниковой микроволновой радиометрии

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



Интенсивность дождя по данным микроволнового радиометра



Интенсивность дождя по данным микроволнового радара

Параметры, восстанавливаемые по данным спутниковых микроволновых радиометров

Параметры океана:

- Температура поверхности океана;
- Скорость приводного ветра;
- Сплоченность и тип ледяного покрова;
- Соленость верхнего слоя морских поверхностей;

Параметры земной поверхности:

- Водозапас снежного покрова;
- Влажность почвы;

Параметры атмосферы:

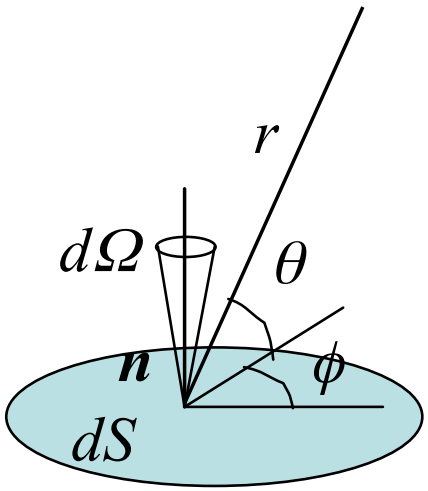
- Содержание водяного пара в атмосфере;
- Содержание жидкокапельной влаги в облаках;
- Интенсивность осадков;
- Характеристики гидрометеоров;
- Вертикальные профили температуры и влажности атмосферы;

Перенос микроволнового излучения в системе морской лед-океан-атмосфера

- Основные характеристики микроволнового излучения
- Основные законы равновесного излучения
- Приближения микроволнового диапазона

Основные характеристики электромагнитного излучения

- Интенсивность излучения $J=J(x, y, z, \boldsymbol{n}, t)$
- Поляризация



$$dE = J_\lambda \, dS \, d\lambda \, d\Omega \, dt$$

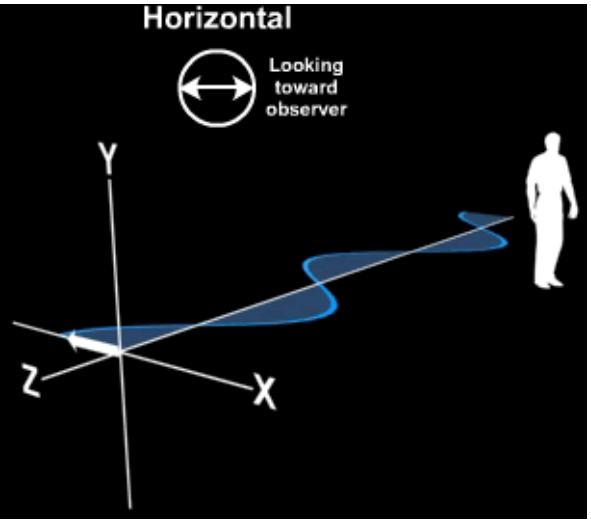
Монохроматической интенсивностью излучения J называется количество электромагнитной энергии dE с длиной волны λ, приходящее на единичную площадку перпендикулярно к ней из единичного телесного угла за единицу времени

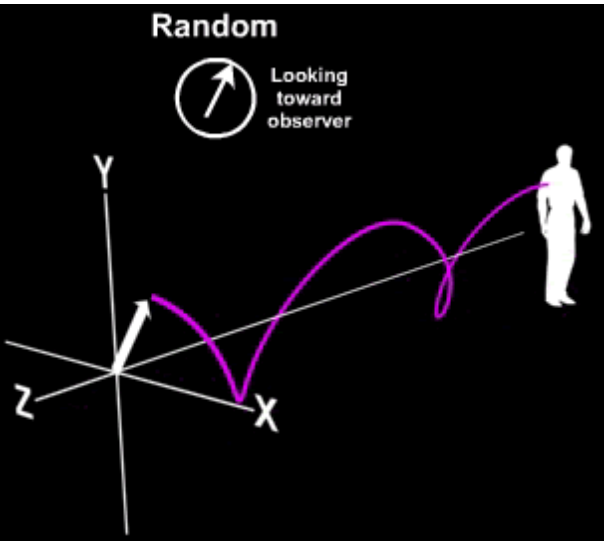
$$J(\nu) = J(\nu; x, y, z; r; t)$$

Интегральная интенсивность:

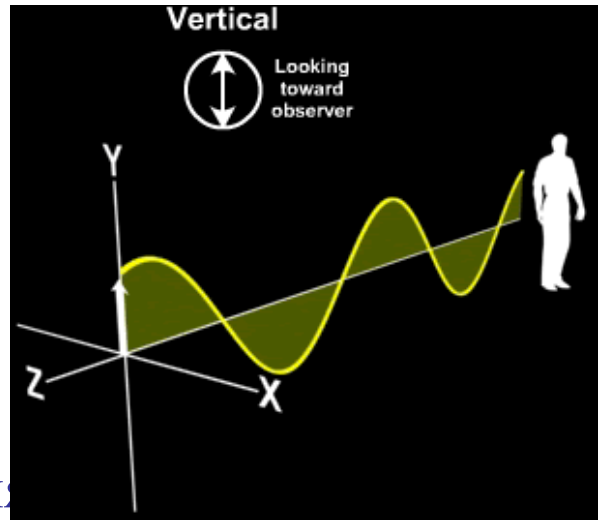
$$J = \int_0^\infty J(\nu) d\nu$$

Поляризация излучения





- Поляризация определяется ориентацией вектора электрического поля;
- Поляризованная (когерентная) микроволновая радиация может быть линейной, круговой или эллиптической поляризации;



- Большинство объектов и сред в естественных условиях излучает неполяризованные электромагнитные волны;
- Взаимодействие э/м радиации со средой может приводить к поляризации излучения.

Равновесное излучение

- Термодинамическое равновесие - состояние среды, при котором температура вещества везде постоянна, отсутствуют движения его масс, и оно перемешано таким образом, что в нем не может возникнуть диффузия или какое-либо иное движение вещества

- Физические законы, описывающие перенос излучения в атмосферах планет, справедливы в условиях локального термодинамического равновесия;

- Понятие абсолютно черного тела (АЧТ) введено в 1859 Г. Р. Кирхгофом (G. R. Kirchhoff). АЧТ- тело, которое при любой температуре полностью поглощает весь падающий на него поток излучения, независимо от длины волны. Коэффициент поглощения А. ч. т. (отношение поглощаемой энергии к энергии падающего потока) равен 1

- Равновесное тепловое излучение однородно, изотропно и неполяризовано, перенос энергии в нём отсутствует, все его характеристики зависят только от температуры абсолютно чёрного тела излучателя

Закон Кирхгофа

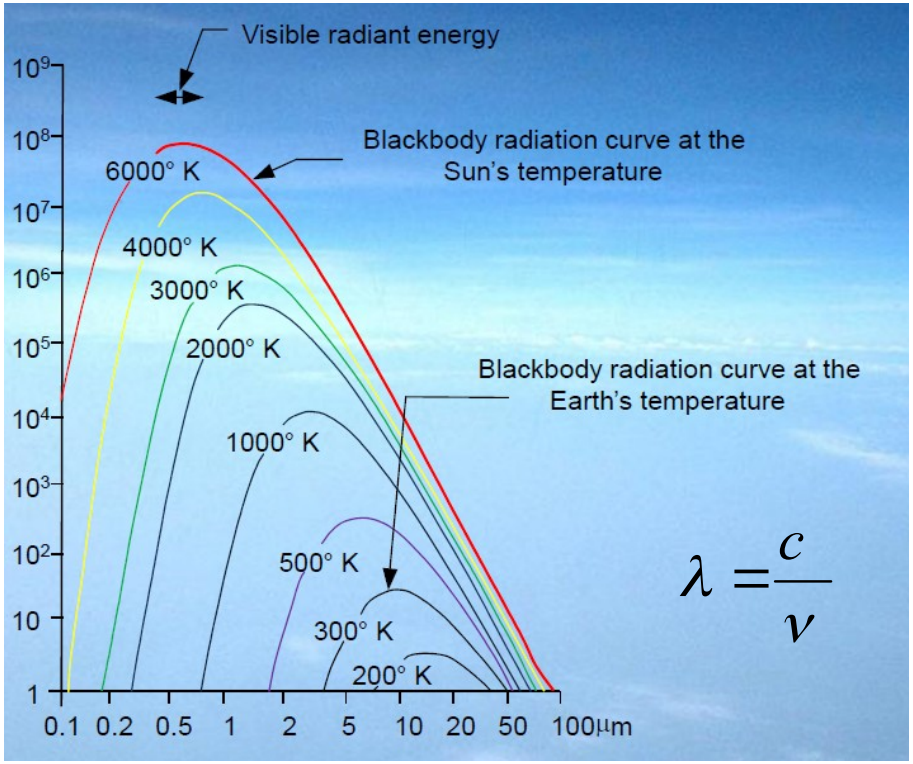
Излучение радиации в условиях термодинамического равновесия, согласно закону Кирхгофа, пропорционально коэффициенту поглощения α и функции Планка $B_\nu(T)$ – интенсивности равновесного излучения:

h – постоянная Планка
k – постоянная Больцмана
c – скорость света

$$dJ_\nu(\varphi,\theta) = \alpha B_\nu(T)$$

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2\left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1\right)}$$

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



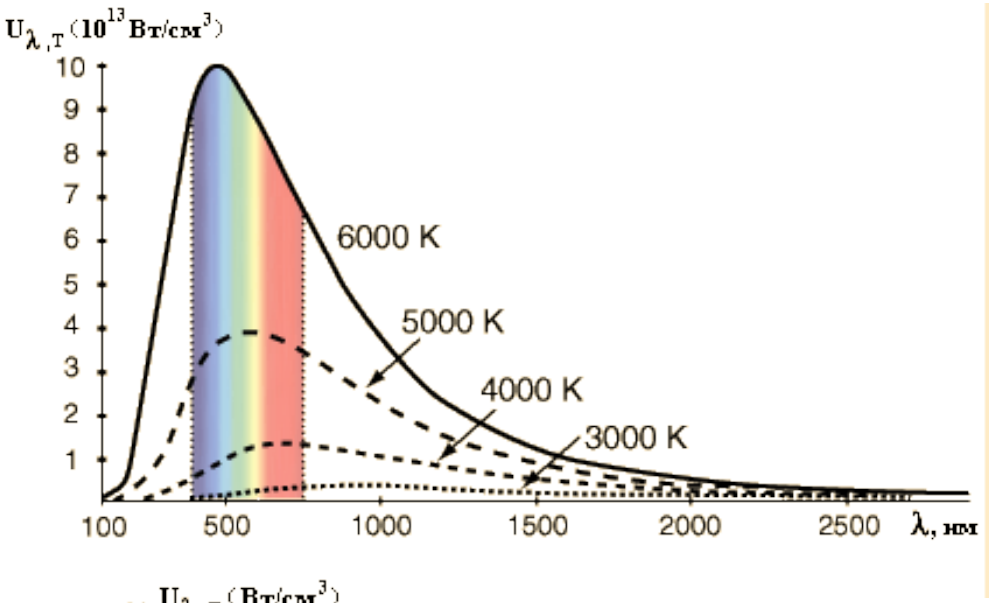
$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

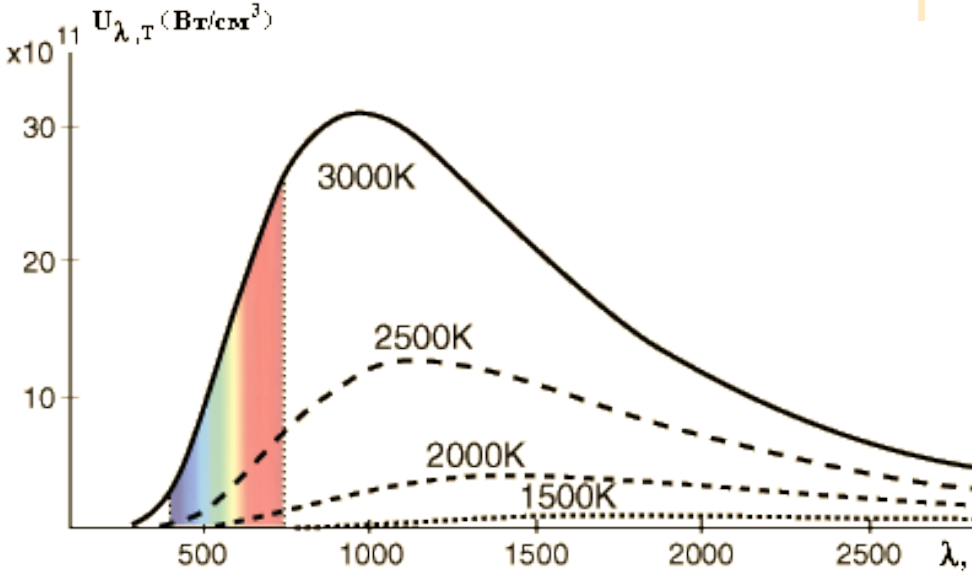
$$M(T) = \int_0^\infty \frac{2h\nu^3}{c^2\left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1\right)} d\nu = \sigma T^4$$

Закон Стефана-Больцмана

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2h^3} = 5.669\cdot 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$$

1. Спектр излучения АЧТ имеет сплошной характер, т.е. в спектре этого излучения представлен непрерывный ряд длин волн.
2. Существует отчетливо выраженный максимум излучательной способности, который с повышением температуры смещается в сторону более коротких волн.
3. Излучательная способность АЧТ уменьшается в сторону коротких волн значительно более резко, чем в сторону длинных волн.





Закон смещения Вина

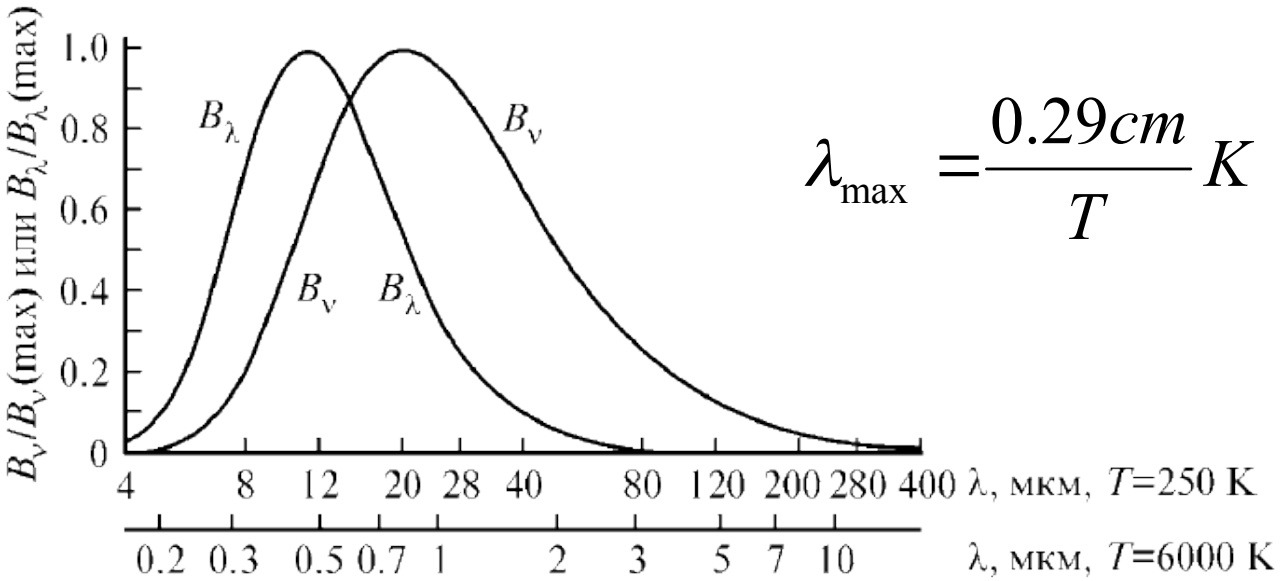
1. hν/kT >> 1

При $\lambda \to 0$ или $\nu \to \infty$

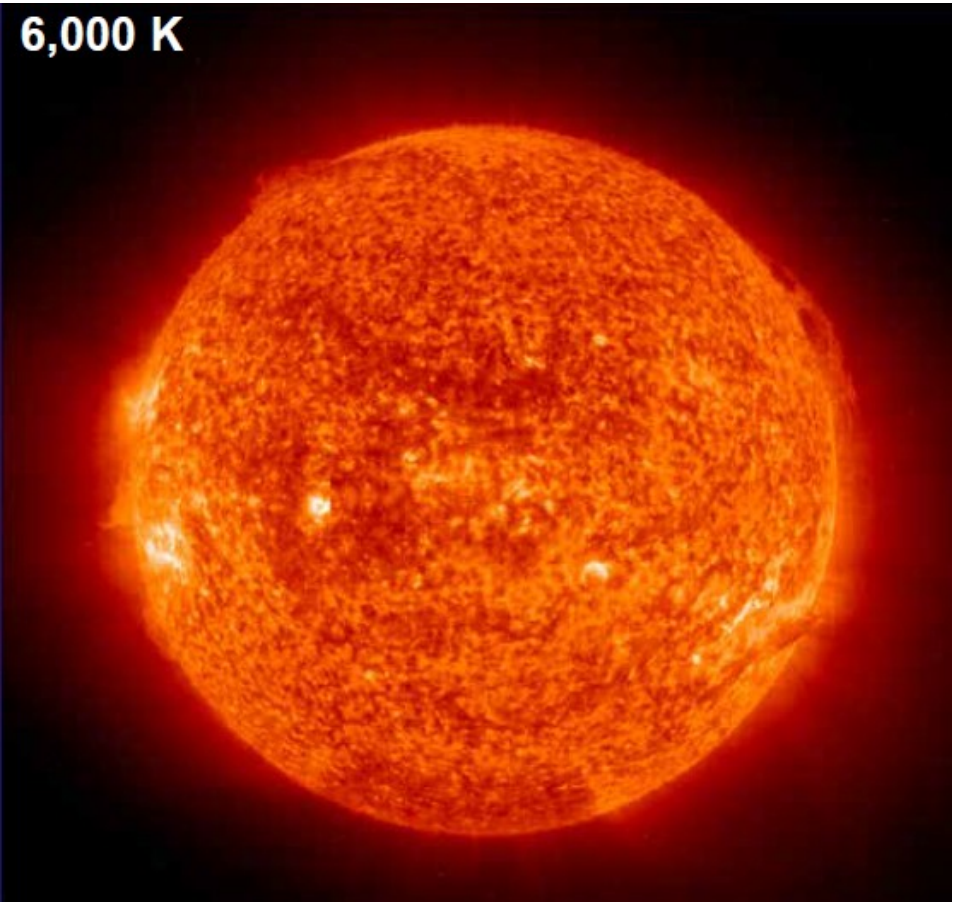
$$B_\nu(T) \longrightarrow \frac{2h\nu^3}{c^2}\exp(-\frac{h\nu}{kT})$$

$$B_\lambda(T) \longrightarrow \frac{2hc^2}{\lambda^5}\exp(-\frac{hc}{k\lambda T})$$

Определяет длину волны, на которой абсолютно черное тело излучает наибольшее количество энергии, обратно пропорционально его абсолютной температуре. Коэффициент пропорциональности (постоянная закона Вина) равен 0.290 см К.

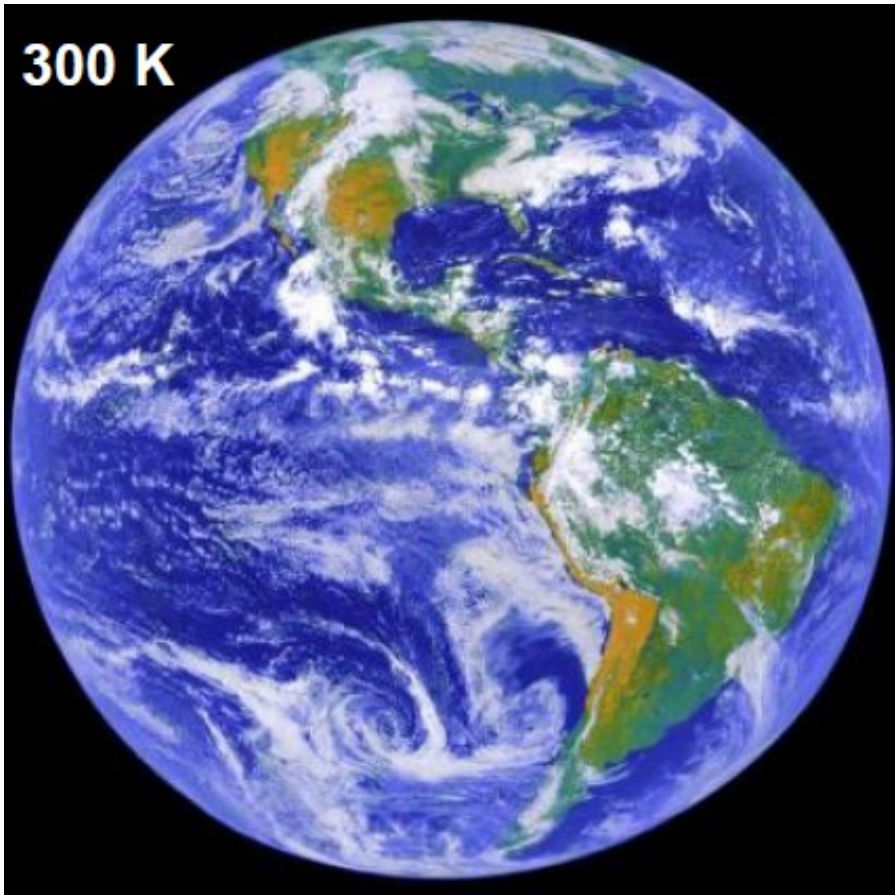


$$\lambda_{max} = \frac{0.29cm}{T}K$$

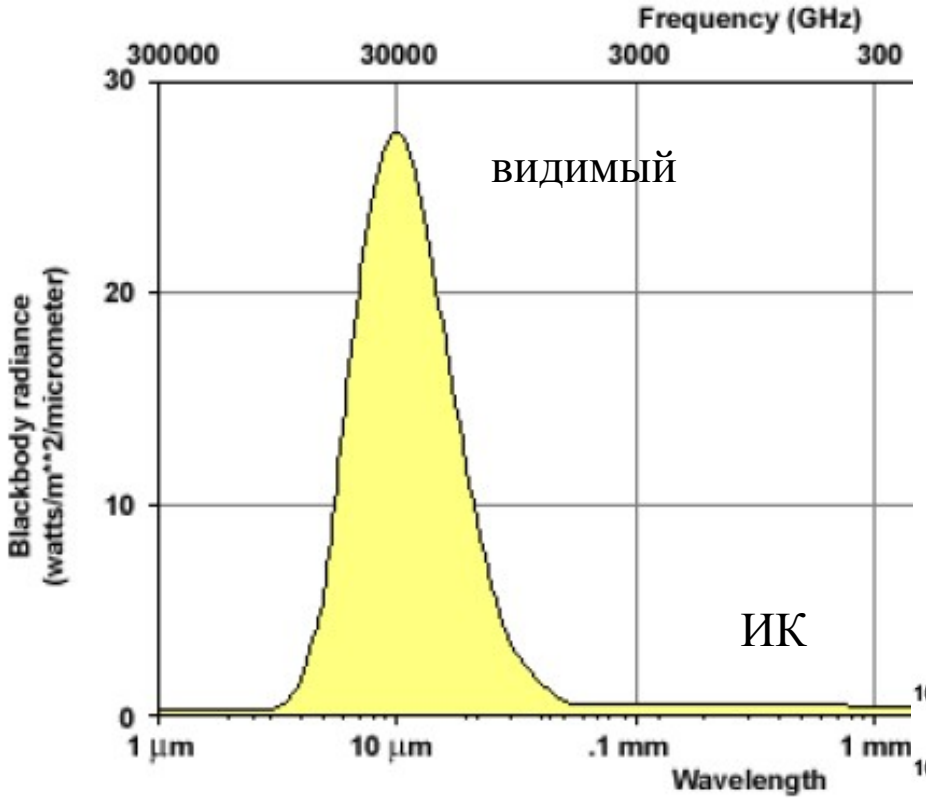


Видимый диапазон ~ 0.4 мкм

ИК диапазон ~ 10 мкм

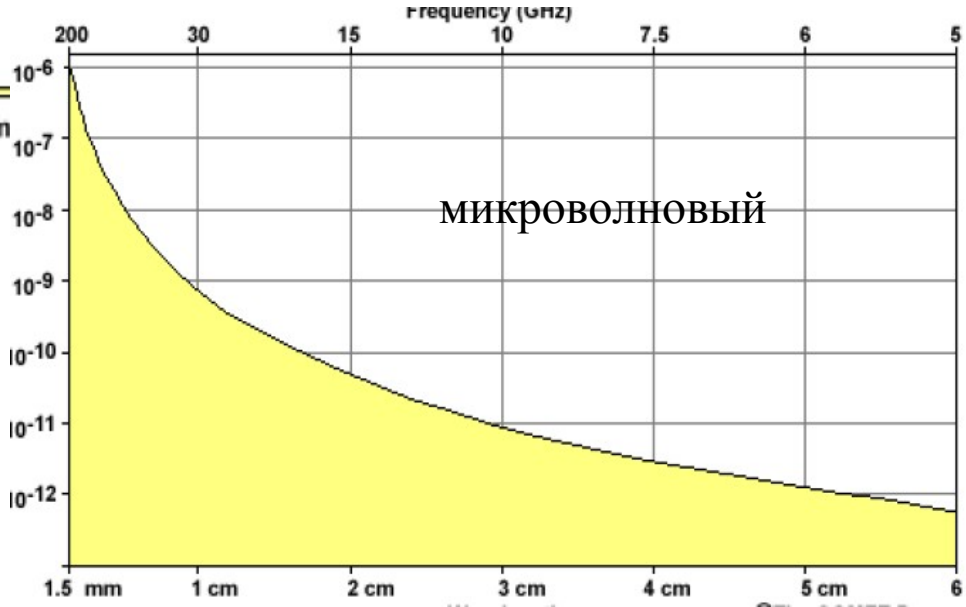


Излучение в микроволновом диапазоне электромагнитного спектра обладает малой энергией:

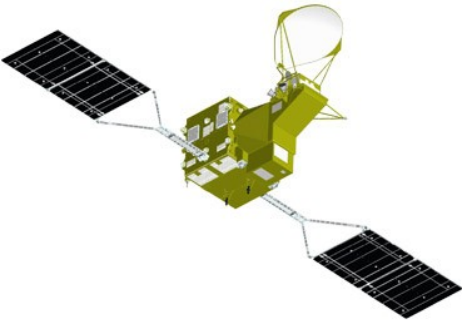


Низкие значения энергии радиации требуют больших площадей: в отличие от приборов, работающих в ИК и видимом диапазонах спектра, элемент разрешения которых порядка сотен метров или несколько км, для микроволноволнового диапазона необходимы сотни квадратных км для превышения порога чувствительности современных радиометров

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



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

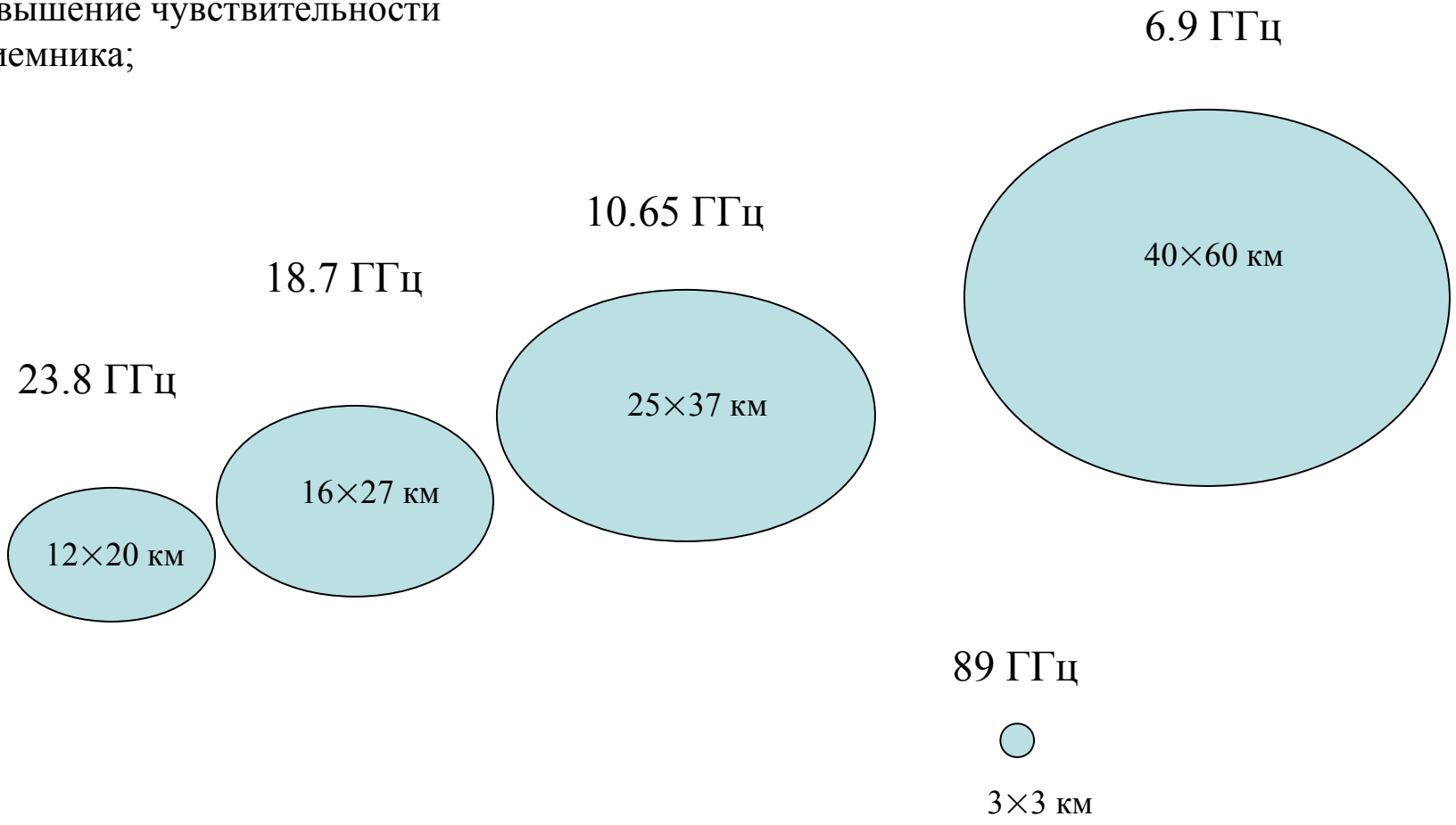
Характеристики каналов				
Центр. частота. [ГГц]	Полоса [МГц]	Поляр.	Угл. разреш. [гр.] (Простр. разреш. [км])	Частота сканир. [км]
6.925 7.3	350	B & Г	1.8 (35 ×61)	10
10.65	100		1.2 (24 ×41)	
18.7	200		0.65 (13 ×22)	
23.8	400		0.75 (15 ×26)	
36.5	1000		0.35 (7 ×12)	
89.0(A&B)	3000		0.15 (3 ×5)	5

аналогично AMSR-E

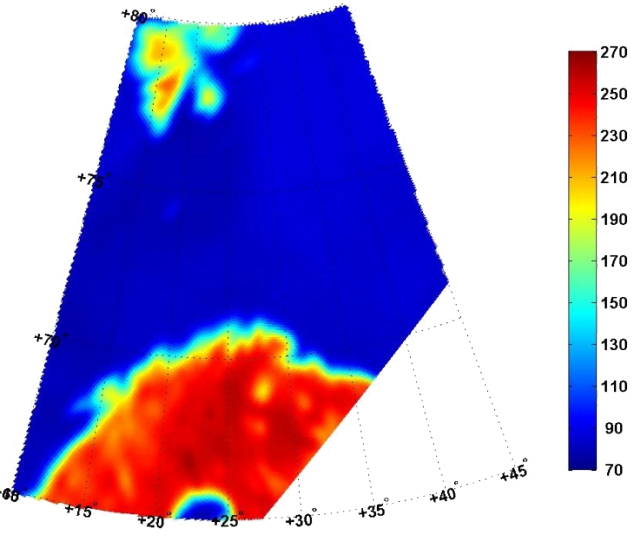
Пространственное разрешение сканирующих микроволновых радиометров

Потенциал для улучшения:

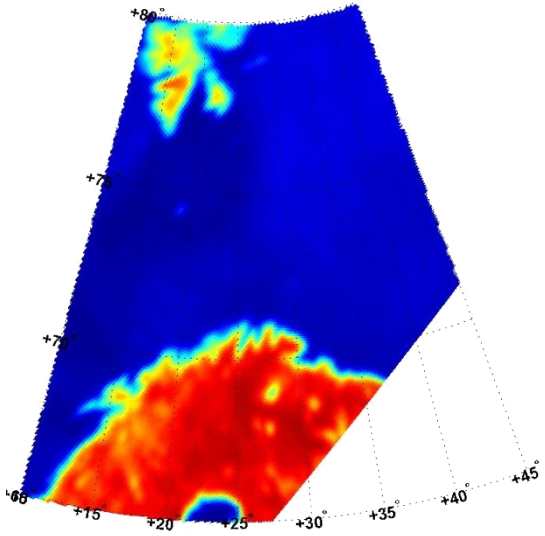
- Увеличение размеров антены;
- Повышение чувствительности приемника;



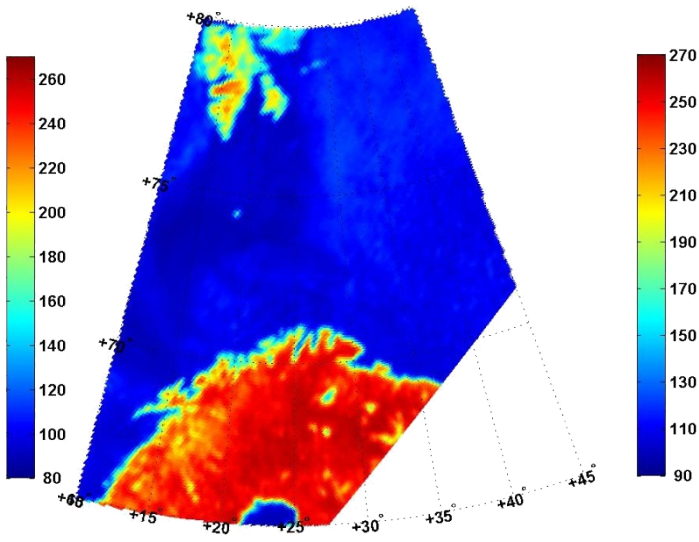
6.9 GHz



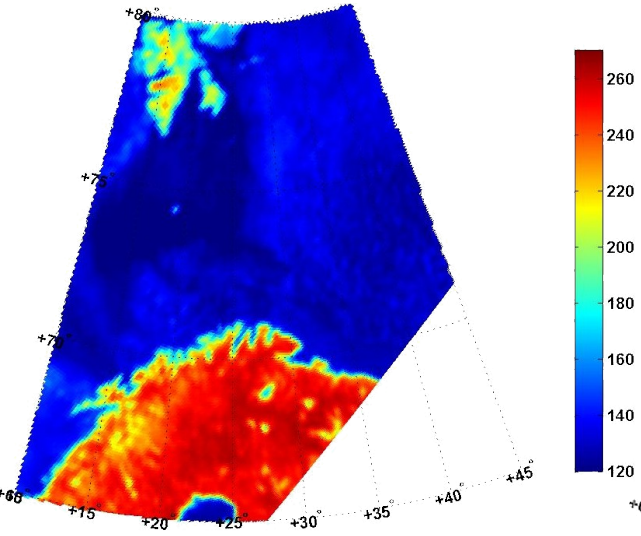
10.65GHz



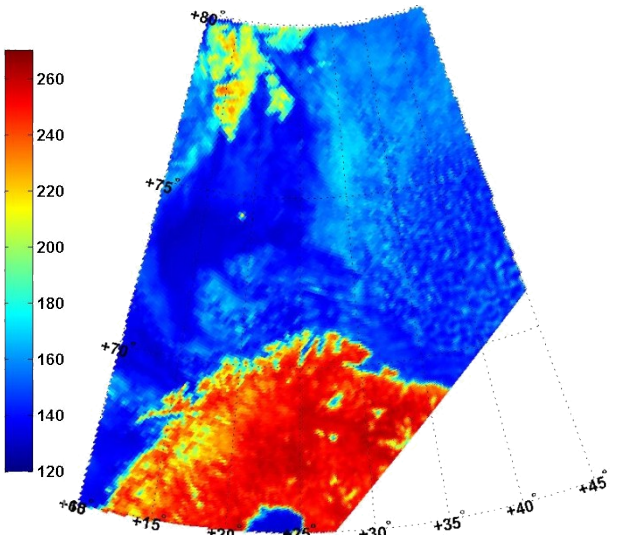
18.7GHz



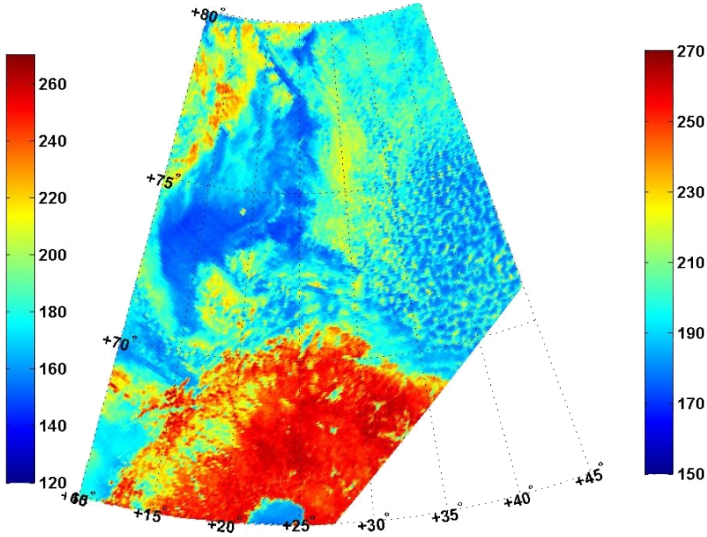
23.8 GHz



36.5 GHz



89 GHz



Перенос электромагнитного излучения

- Перенос излучения от объекта до радиометра сопровождается излучением, поглощением и рассеянием атмосферными газами, облаками, осадками;
- Определяется закономерностями взаимодействия излучения со средой;
- Это взаимодействие описывается *радиационно-метеорологической моделью*, элементы которой должны адекватно отражать реальные связи характеристик поля излучения с геофизическими параметрами

$$dJ_\nu(\varphi,\theta) = -\,dJ_{\nu 1}(\varphi,\theta) + dJ_{\nu 2}(\varphi,\theta) + dJ_{\nu 3}(\varphi,\theta)$$

ослабление среды — $dJ_{\nu 1}$

излучение среды — $dJ_{\nu 2}$

рассеяние среды — $dJ_{\nu 3}$

$$dJ_{\nu 1}(\varphi,\theta) = -\alpha_o J_\nu(\varphi,\theta)ds$$

$$\alpha_o = \alpha_n + \alpha_p$$

ослабление за счет поглощения и рассеяния в направлениях, отличных от $\Omega = (\theta, \phi)$ - <u>пропорционально величине самого излучения</u>

$$dJ_{\nu 2}(\varphi,\theta) = \alpha_n B_\nu(T)$$

излучение среды в условиях термодинамического равновесия, пропорционально коэффициенту поглощения α_n и функции Планка $B_\nu(T)$ – интенсивности равновесного излучения

$$dJ_{\nu 3}(\varphi,\theta) = \frac{\alpha_p}{4\pi}\left(\int\int P(\varphi',\theta',\varphi,\theta)J_\nu(\varphi',\theta')\sin\theta d\theta' d\varphi'\right)ds$$

рассеяние среды

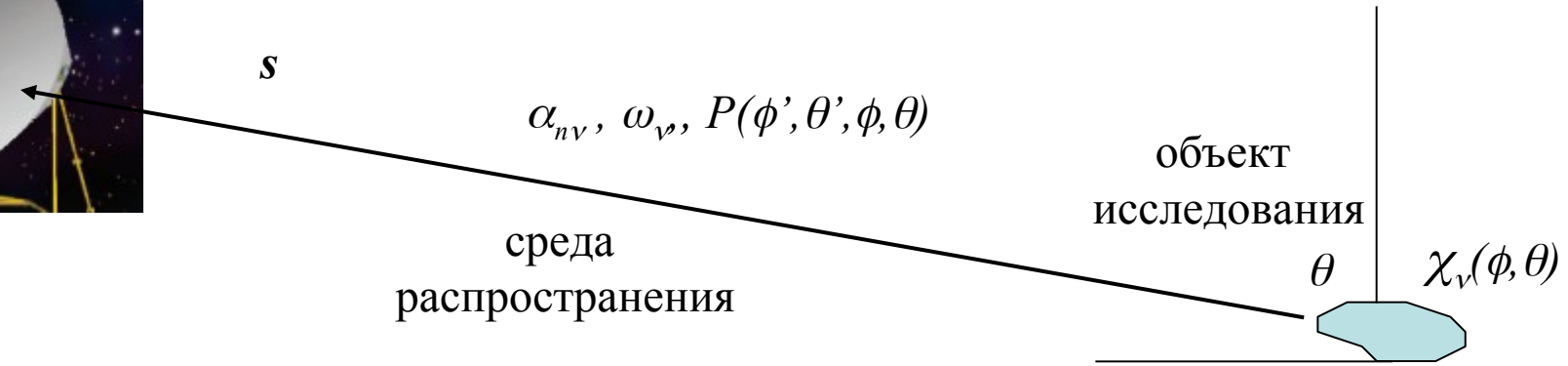
в общем случае в рассеивающей среде увеличение радиации за счет рассеяния излучения из направления Ω' в направлении Ω зависит от индикатрисы рассеяния среды $P(\phi', \theta', \phi, \theta)$

Уравнение переноса излучения

$$dJ_\nu(\varphi,\theta) = \alpha_{n\nu}\left[(1-\omega)B_\nu(T) - J_\nu(\varphi,\theta) + \frac{\omega_\nu}{4\pi}\left(\int\int P(\varphi',\theta',\varphi,\theta)J_\nu(\varphi',\theta')\sin\theta d\theta' d\varphi'\right)ds\right]$$

$\omega \equiv \alpha_p / \alpha_n$ - альбедо единичного объема

$dJ_\nu(\varphi,\theta)$ - Изменение интенсивности излучения на пути s в направлении (ϕ,θ) средой, обладающей термодинамической температурой T, альбедо единичного объема ω, коэффициентом поглощения α_p и индикатрисой рассеяния $P(\phi',\theta',\phi,\theta)$



Закон Релея-Джинса - приближение микроволнового диапазона спектра

hν/kT << 1

При $\lambda \to \infty$ или $\nu \to 0$

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2\left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1\right)} \longrightarrow B_\nu(T) = \frac{2kT\nu^2}{c^2}$$

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5\left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1\right)} \longrightarrow B_\lambda(T) = \frac{2kTc}{\lambda^4}$$

излучение среды пропорционально термодинамической температуре абсолютно черного тела эквивалентной яркости. Это приближение позволяет выразить интенсивность излучения J в виде рядияркостной температуры $T_я$

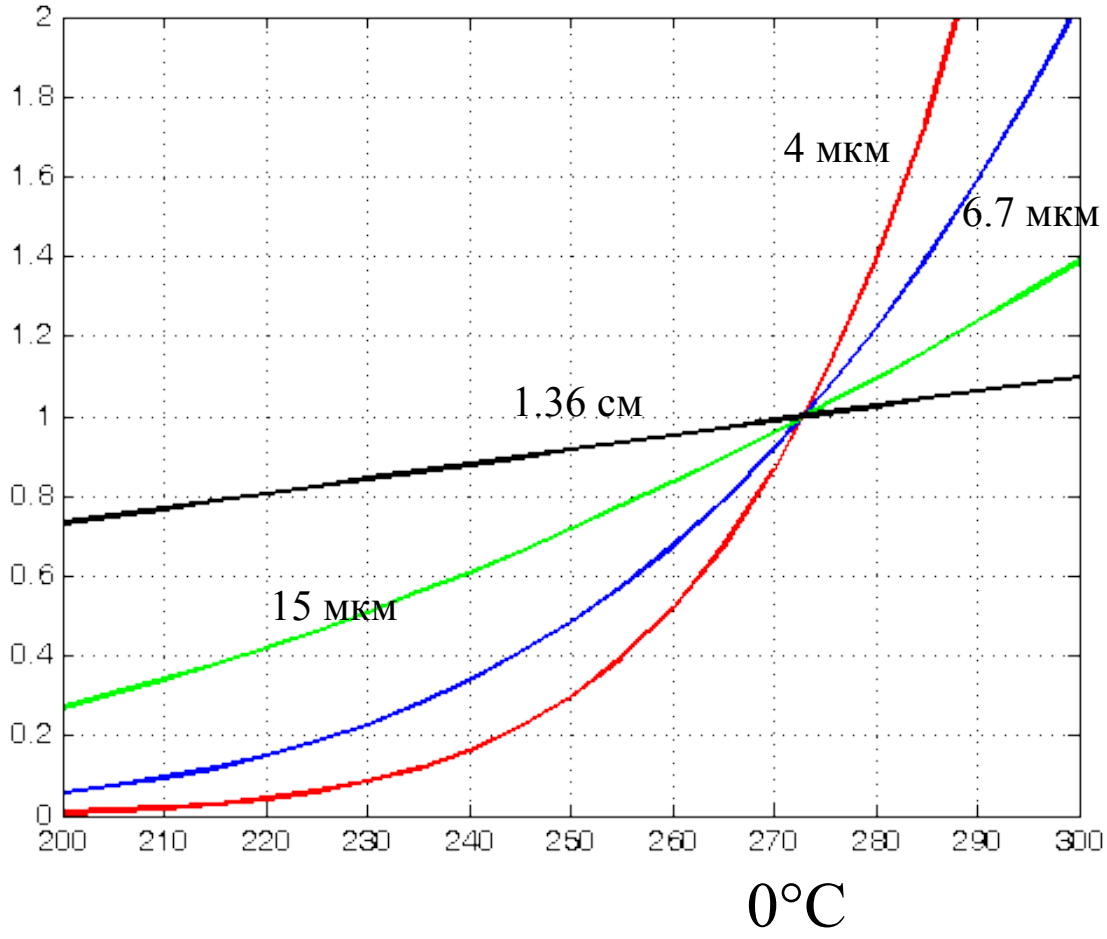
$$\Delta = 8 \cdot 10^{-3}\nu \longrightarrow$$

Ошибка, связанная с точностью аппроксимации Релея-Джинса для частот действующих радиометров и температур диапазона от 240 до 300 К, составляет 0.2 - 0.5 К

Границы применимости микроволнового приближения (Релея-Джинса) - 1

$B_\lambda(T) / B_\lambda(273)$

hc/λkT << 1



Приближения микроволнового диапазона спектра

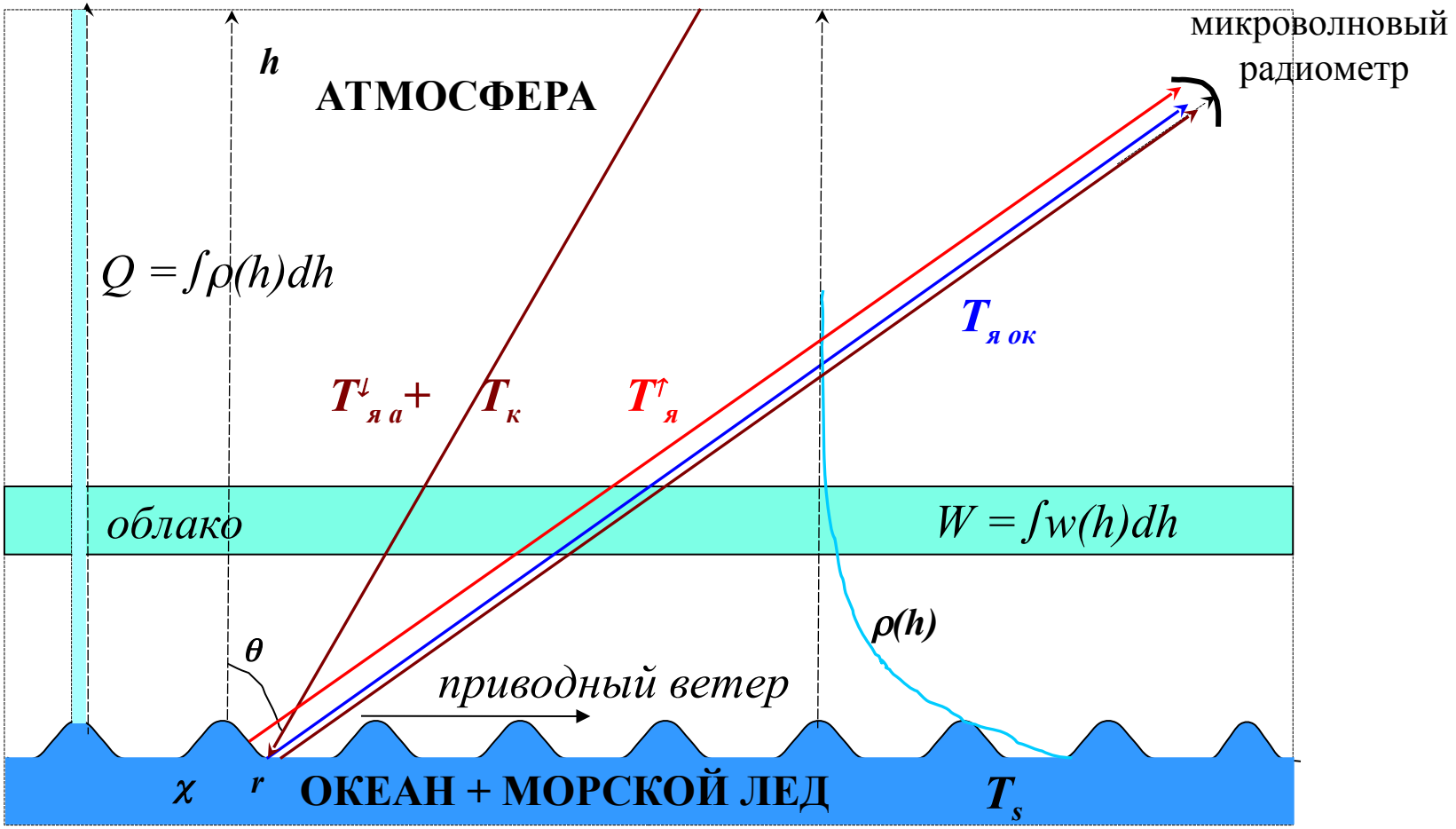
длина волны излучения $\lambda >> r$ – характерного размера частиц, взаимодействующих с излучением

- Для частот действующих радиометров такое предположение справедливо для атмосферных газов всегда, а для облаков – практически всегда при отсутствии осадков
- При таком предположении атмосфера не рассеивает, а только излучает и поглощает микроволновую радиацию. В этих условиях $\omega = 0$, и общая дифференциальная форма уравнения переноса, с учетом аппроксимации Релея-Джинса, для радиояркостной температуры излучения $T_я$ приобретет следующий вид

$$dJ_\nu(\varphi,\theta) = \alpha_{n\nu}\left[(1-\omega)B_\nu(T) - J_\nu(\varphi,\theta) + \frac{\omega_\nu}{4\pi}\left(\int\int P(\varphi',\theta',\varphi,\theta)J_\nu(\varphi',\theta')\sin\theta d\theta' d\varphi'\right)ds\right]$$

$$dT_я(\varphi,\theta) = \alpha_n\left|T - T_я(\varphi,\theta)\right|ds$$

Схема формирования микроволнового излучения



$$dT_я(\varphi,\theta) = \alpha_n \left| T - T_я(\varphi,\theta) \right| ds$$

$$dT_{я}(\varphi,\theta) = \alpha_n \left| T - T_{я}(\varphi,\theta) \right| ds$$

Уравнение переноса излучения

атмосферу рассматриваем как плоскослоистую среду, заменяя пространственную координату *s* вдоль направления излучения на вертикальную *h*: $ds = dh/\mu$, где $\mu = \cos\theta$

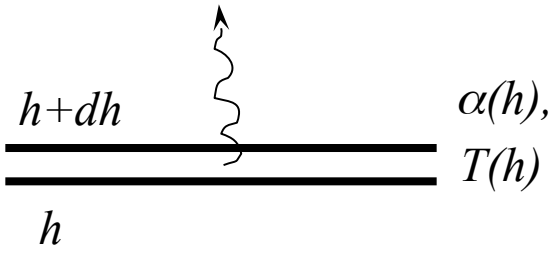
$$T^{\uparrow}_{я\,\nu} = T^{\uparrow}_{я\,а\,\nu} + T^{\downarrow}_{я\,а\,\nu\,отр} + T_{я\,к\,\nu} + T_{я\,ок\,\nu}$$

$$T^{\uparrow}_{я\,а\,\nu} = \frac{1}{\mu}\int_0^{\infty} T(h)\alpha_{\nu}(h)\exp\left(-\frac{1}{\mu}\int_h^{\infty}\alpha_{\nu}(h')dh'\right)dh$$

Восходящее излучение атмосферы

$$T^{\downarrow}_{я\,а\,\nu}(\mu) = \frac{1}{\mu}\int_0^{\infty} T(h)\alpha_{\nu}(h)\exp\left(-\frac{1}{\mu}\int_0^{h}\alpha_{\nu}(h')dh'\right)dh$$

Нисходящее излучение атмосферы



$$T_{я\ ок\ \nu}(\mu) = \chi_{p\nu}(\mu,\varphi)\cdot T_{ок}\cdot P_{\nu}(\mu,h,\infty)$$

Излучение океана

$$\chi_{p\nu}(\mu,\varphi) = 1 - \frac{1}{\pi}\cdot\int_0^{2\pi}\int_0^1 r_{p\nu}(\mu,\varphi,\mu',\varphi')\mu d\mu' d\varphi'$$

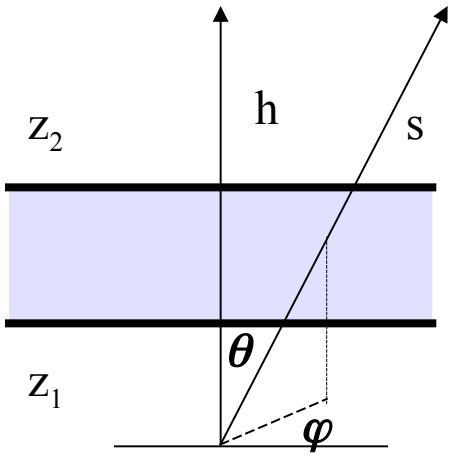
Коэффициент излучения океана

$$P_{\nu}(\mu,z_1,z_2) = \exp(-\tau_{\nu}(\mu,z_1,z_2))$$

Функция пропускания слоя атмосферы

$$\tau_{\nu}(z_1,z_2) = \frac{1}{\mu}\int_{z_1}^{z_2}\alpha_{\nu}(h')dh'$$

Оптическая толщина слоя атмосферы



$$T_{я\ к\ \nu} = 2.7\text{K}$$

Параметры, определяющие поглощение и излучение микроволновой радиации в атмосфере

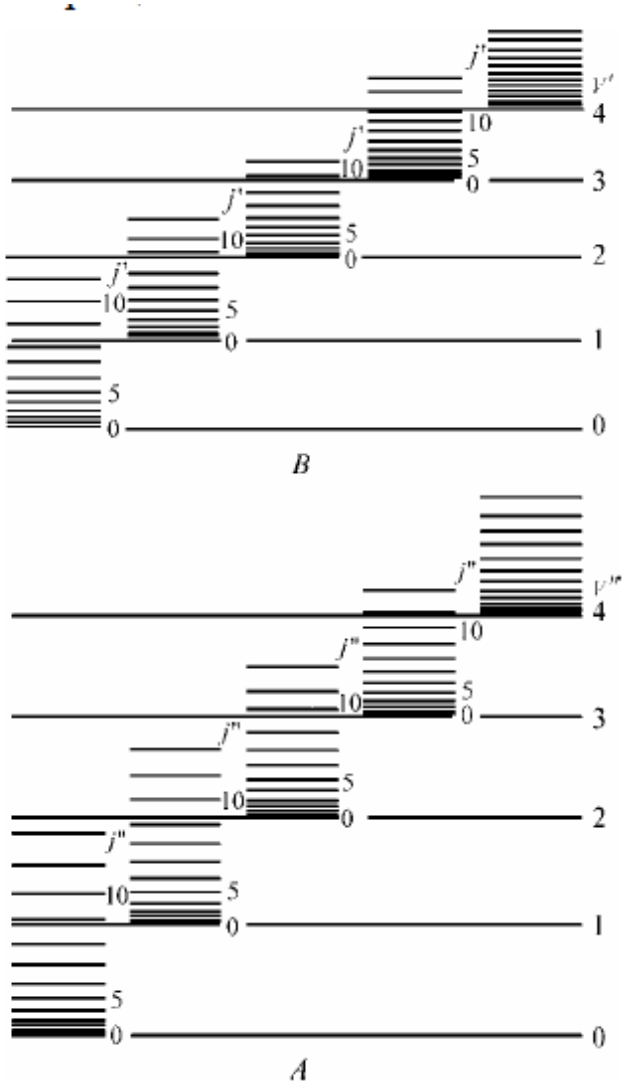
$$\alpha_\nu(h)$$

водяной пар, гидрометеоры (капли облаков и осадков)

$$T^{\uparrow}_{я\,a\,\nu} = \frac{1}{\mu}\int_0^\infty T(h)\alpha_\nu(h)\exp\left(-\frac{1}{\mu}\int_h^\infty \alpha_\nu(h')dh'\right)dh$$

$$\tau_\nu = \frac{1}{\mu}\int_0^\infty \alpha_\nu(h')dh'$$

Резонансное поглощение молекулярными газами



Спектры поглощения делятся на *электронные, колебательные и вращательные* – в зависимости от участвующих во взаимодействии излучения с молекулой состояний внутренней энергии

Поглощение излучения, обусловленное переходами между электронными, колебательными и вращательными уровнями энергии молекулы, имеет четкую спектральную структуру. Каждый такой переход, в силу дискретности уровней энергий,приводит к появлению отдельной *линии поглощения*, центр которой соответствует соотношению

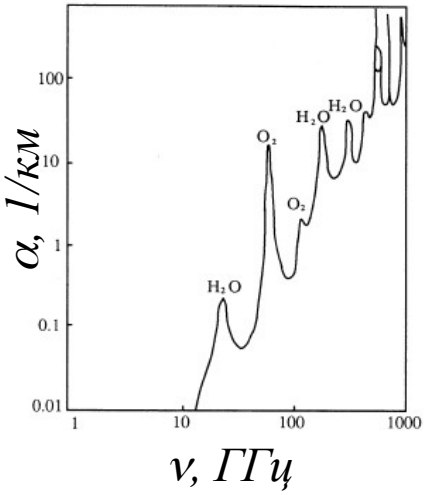
$$h\nu_{i,j} = E_i - E_j$$

Поглощение молекулярными газами излучения в микроволновом диапазоне спектра

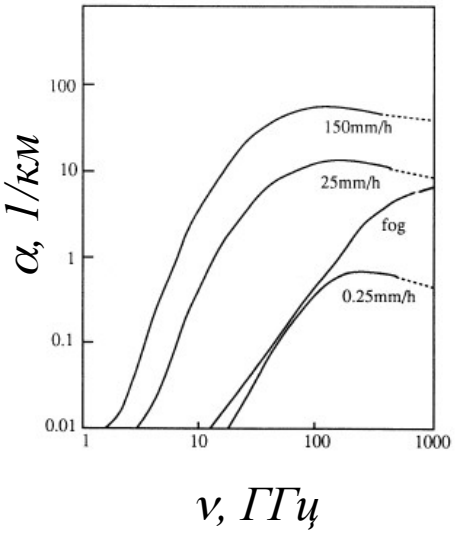
- В микроволновом диапазоне электромагнитного спектра заметно поглощают лишь газы, молекулы которых имеют дипольные моменты (переход между вращательными уровнями.
- Кроме основных газов, среди которых молекула водяного пара обладает электрическим дипольным моментом, а молекула кислорода – магнитным, дипольными моментами обладают также некоторые малые газовые примеси (CO, SO_2, NO, NO_2, O_3).
- Однако, их содержание в атмосфере и интенсивности линий поглощения настолько малы, что их вкладом в общее поглощение микроволнового излучения можно пренебречь

Поглощение и излучение атмосферой микроволновой радиации определяется:

- Кислородом (зависит от температуры и давления);
- Водяным паром (зависит от температуры, давления и влажности);
- Жидкокапельной влагой облаков и осадков (зависит от диэлектричской проницаемости воды, водности и температуры)



Не зависит от ледности облаков (содержания кристаллической влаги)



Различия между жидкой и твердой водой в отношении взаимодействия с микроволновой радиацией связаны с различиями в диэлектрической проницаемости

Поглощение молекулярными газами излучения в микроволновом диапазоне спектра

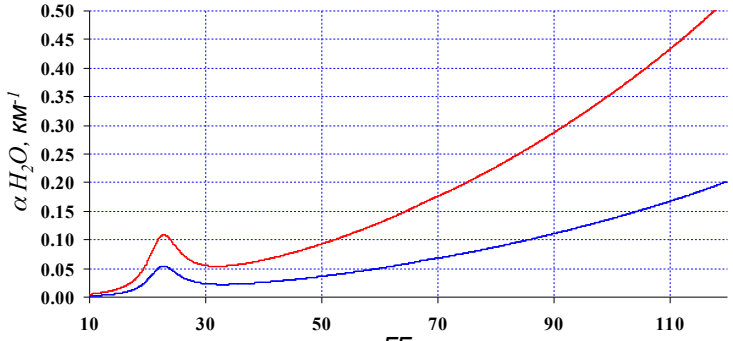
$$\alpha = \frac{0.1820 \cdot \nu \cdot N''(\nu)}{4.34}$$

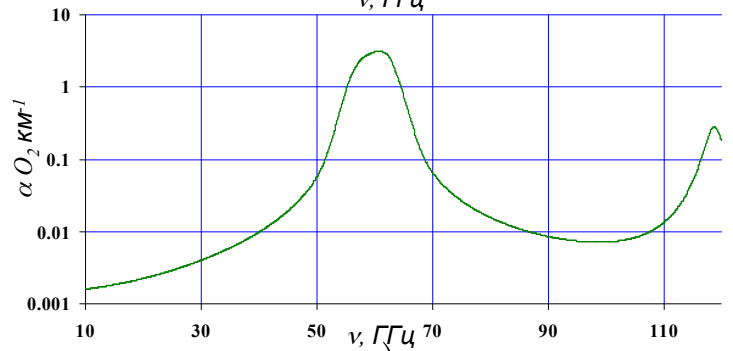
$$N''(\nu) = N_L + N_d + N_c$$

резонансный вклад влажного воздуха

нерезонансный вклад сухого воздуха

нерезонансный вклад водяного пара





$$N_L = \sum_{i=1}^{M_{O_2}} S_i \cdot F(\nu)_i + \sum_{k=1}^{M_{H_2O}} S_k \cdot F(\nu)_k$$

$$F(\nu)_{i,k} = \frac{A_{i,k}(\nu)}{X_{i,k}(\nu)} + \frac{A_{i,k}(\nu)}{Y_{i,k}(\nu)} - \delta_{i,k} \cdot \frac{\nu}{\nu_{0_{i,k}}} \left(\frac{\nu_{0_{i,k}} - \nu}{X_{i,k}(\nu)} + \frac{\nu_{0_{i,k}} + \nu}{Y_{i,k}(\nu)} \right)$$

$$X_{i,k}(\nu) = (\nu_{0_{i,k}} - \nu)^2 + \gamma_{i,k}^2$$

$$Y_{i,k}(\nu) = (\nu_{0_{i,k}} + \nu)^2 + \gamma_{i,k}^2$$

$$A_{i,k}(\nu) = \frac{\gamma_{i,k} \cdot \nu}{\nu_{0_{i,k}}}$$

$$T^{\uparrow}_{я a \nu} = \frac{1}{\mu} \int_0^{\infty} T(h) \alpha_\nu(h) \exp\left(-\frac{1}{\mu} \int_h^{\infty} \alpha_\nu(h') dh'\right) dh$$

Параметры линий, зависящие от температуры, давления и влажности:

$$S_i = a_{1_i} \cdot 10^{-6} \cdot p \cdot \theta^3 \cdot \exp(a_{2_i} \cdot (1 - \theta))$$

$$\gamma_i = a_{3_i} \cdot 10^{-3} \cdot (p \cdot \theta^{(0,8 - a_{4_i})} + 1,1 \cdot e \cdot \theta)$$

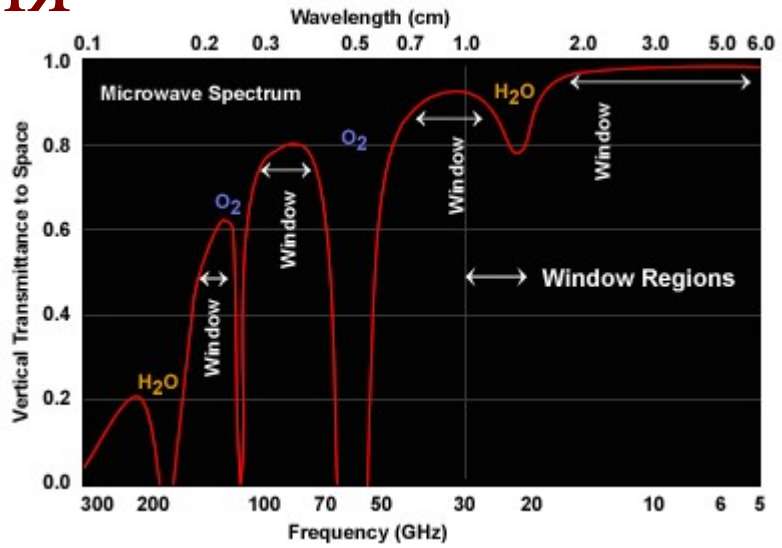
$$\delta_i = 10^{-3} \cdot p \cdot \theta^{0,8} \cdot (a_{5_i} + a_{6_i})$$

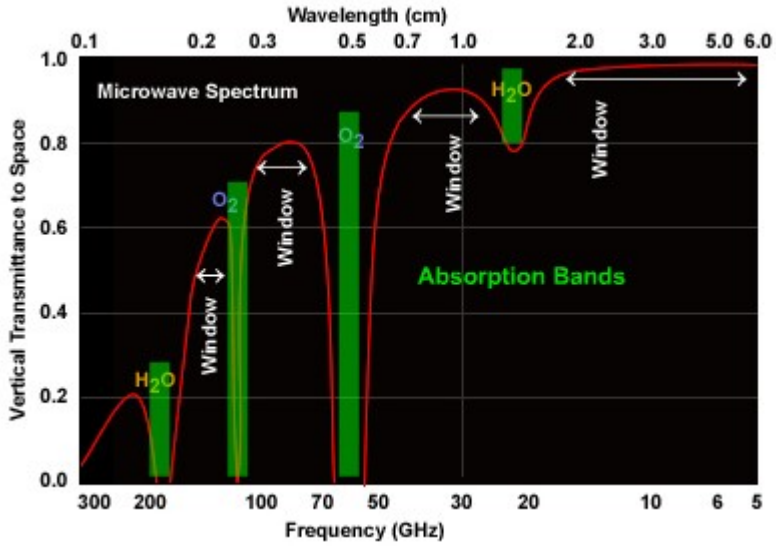
Окна прозрачности и полосы поглощения

- Каналы в окнах прозрачности (малое поглощение атмосферными газами) служат для изучения свойств Земных поверхностей;

- Каналы в полосах поглощения служат для определения свойств атмосферных газов – водяного пара и кислорода;

в диапазоне от 1 до 100 ГГц в поглощение микроволнового излучения вносят основной вклад линия водяного пара 22.235 ГГц и полоса поглощения кислорода в районе 60 ГГц

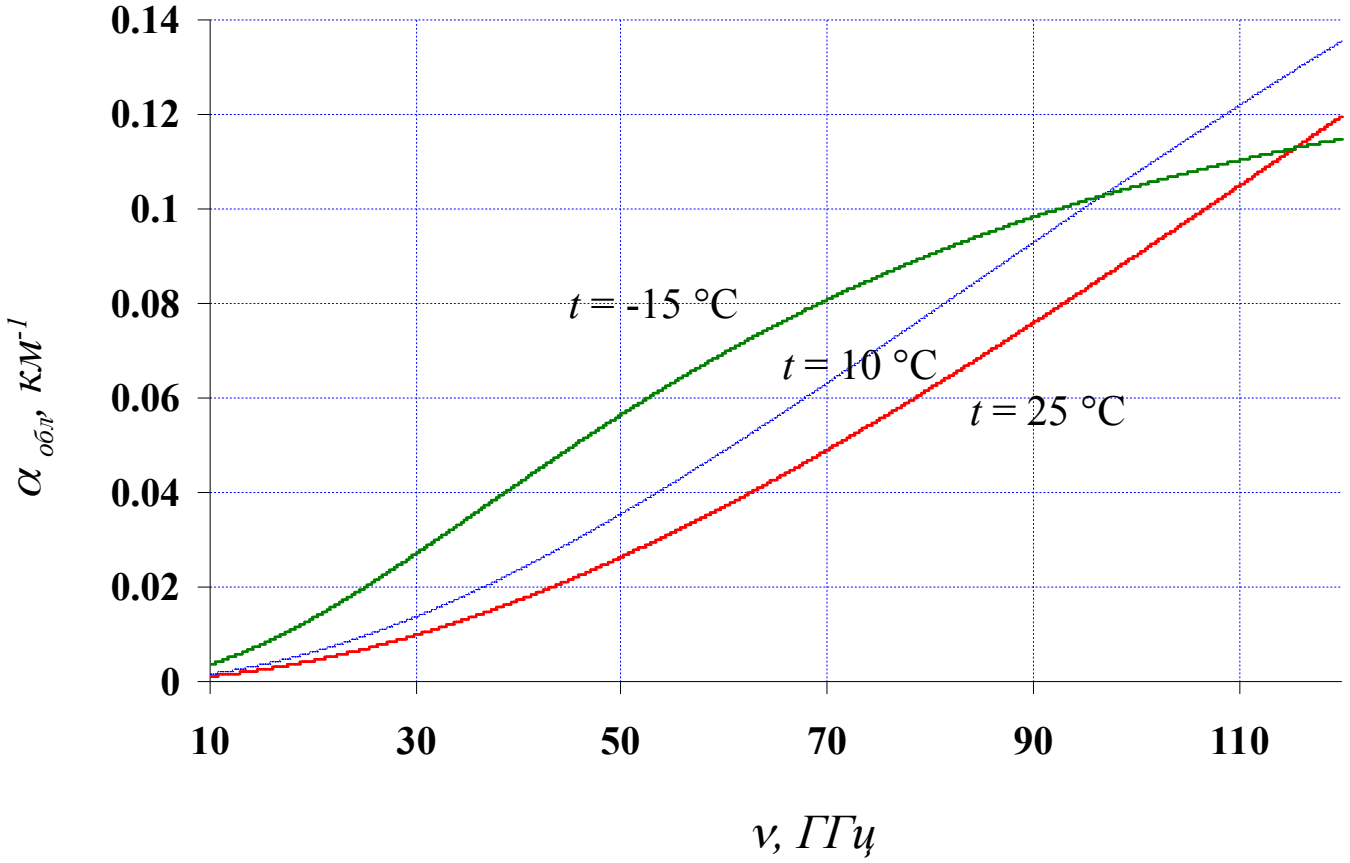




Поглощение в облаках

Определяется диэлектрической проницаемостью молекул воды: $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$

$$\alpha_{обл} = 0.1887 \cdot \nu \cdot \frac{\varepsilon''}{(\varepsilon' + 2.0)^2 + (\varepsilon'')^2} \cdot \omega$$



$$\varepsilon' = 5.5 + \frac{\varepsilon_s - 5.5}{1 + \left(\frac{\nu \cdot \lambda_s}{30.0}\right)^2}$$

$$\varepsilon'' = \frac{\varepsilon_s - 5.5}{1 + \left(\frac{\nu \cdot \lambda_s}{30.0}\right)^2} \cdot \left(\frac{\nu \cdot \lambda_s}{30.0}\right)$$

$$\varepsilon_s = 0.00081t^2 - 0.40815t + 88.2$$

$$\lambda_s = 1.4662 \cdot e^{-0,0634t} + 0.000136t^2 - 0.027296t + 1.8735116$$

Диэлектрическая проницаемость

- Определяет свойства диэлектрической среды: связана с эффектом поляризации диэлектриков под действием электрического поля и показывает, во сколько раз сила взаимодействия двух электрических зарядов в данной среде меньше, чем в вакууме;
- Является мерой способности среды передавать электромагнитную энергию: чем выше ε, тем медленнее распространяется э/м энергия;
- Является также мерой глубины распространения э/м энергией: чем выше ε, тем дальше распространится в среде излучение
- Диэлектрическая проницаемость воздуха = 1, льда – 3.2, растений – 3, *воды - 80*

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$$

Определяет скорость распространения излучения в среде

Определяет потери

Параметры, определяющие излучение микроволновой радиации океаном

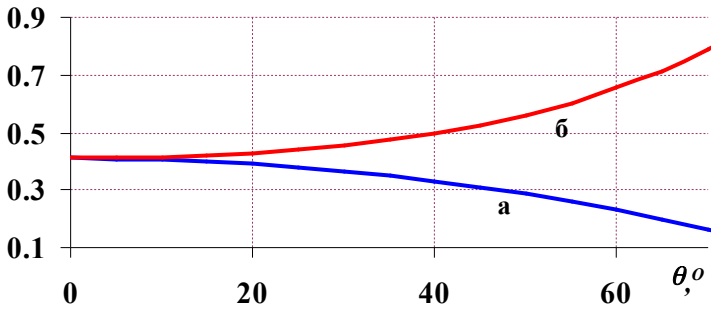
$$\chi_\nu(h)$$

соленость, температура океана,
приводный ветер

Излучение гладкой поверхности океана

Коэффициент излучения $$\chi = 1 - r_{\Gamma,B}^{\,2}$$

Формулы Френеля для коэффициентов отражения радиации от морской поверхности:



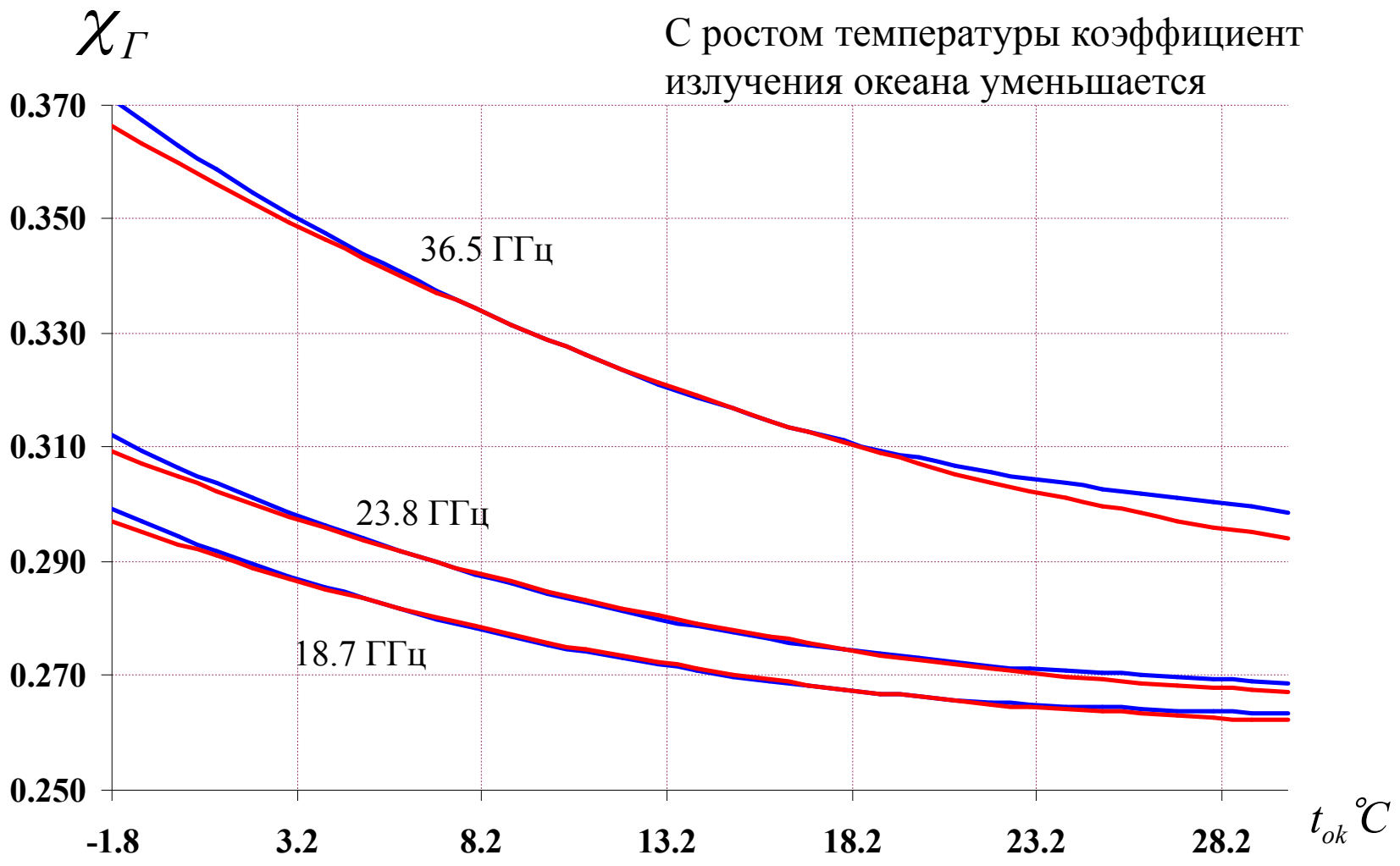
$$r_{\Gamma} = \frac{\cos\theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}}$$

$$r_{B} = \frac{\varepsilon\cos\theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}}{\varepsilon\cos\theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}}$$

Диэлектрическая проницаемость $$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{1 + 2\pi\nu\tau\, i} - i\frac{\sigma_{пр}}{2\pi\nu\varepsilon_c}$$

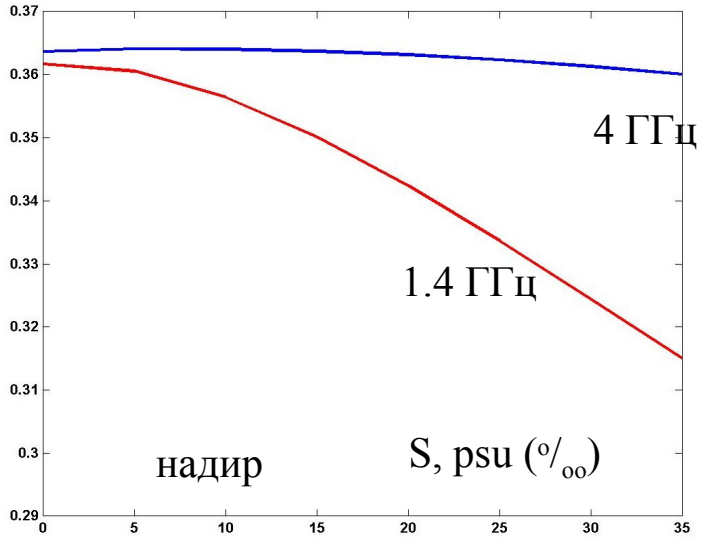
Излучение океана является существенно поляризованным

Температурная зависимость χ



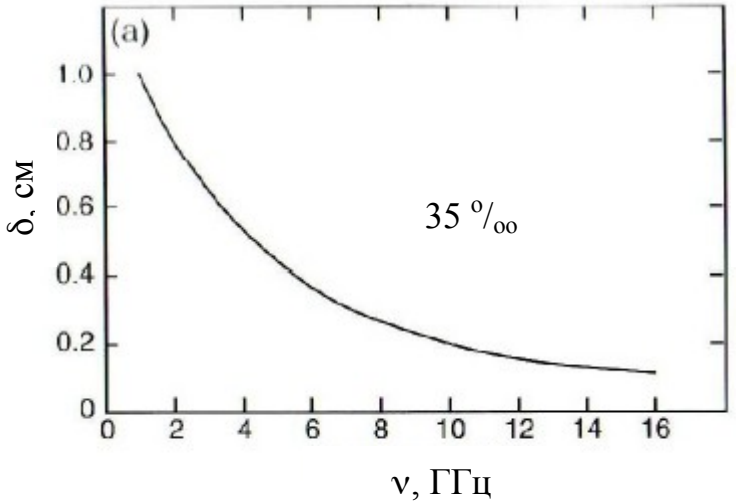
$$T_{я\,ок\,\nu}(\mu) = \chi_\nu \cdot T_{ок} \cdot \tau$$

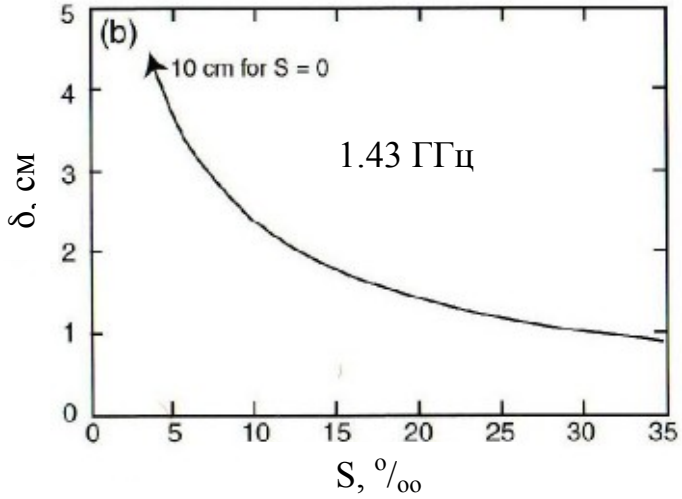
Влияние солености на коэффициент излучения χ



Соленость океана определяет глубину проникновения микроволновой радиации в верхний слой. Чем выше соленость, тем меньший слой поверхности формирует излучение.

Глубина слоя проникновения радиации растет с ростом длины волны.

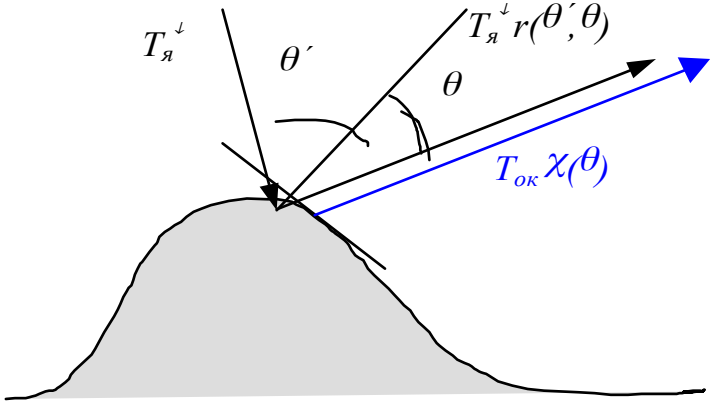




На частотах и С и Х диапазона глубина проникновения микроволновой радиации в океан (формирования излучения) составляет несколько мм.

Зависимость излучения океана от скорости ветра

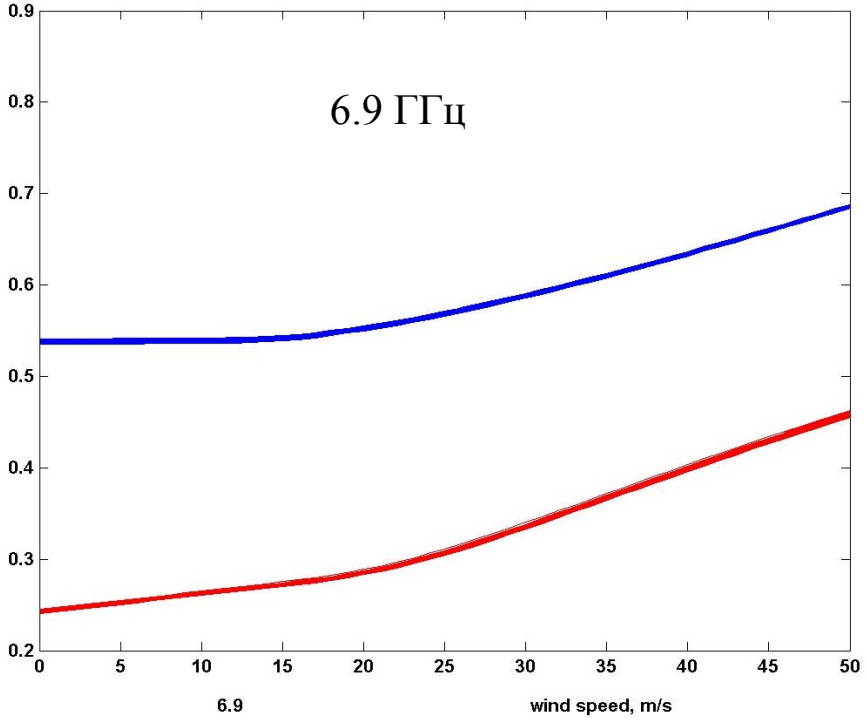
- В результате волнения, вызванного ветром, изменяются геометрические условия отражения и формирования излучения;
- Теперь отражают и излучают радиацию элементарные площадки, имеющие различные уклоны;
- Появляются пенные образования: барашки, брызги и проч. с отличным от ровной поверхности коэффициентом излучения;
- Коэффициент излучения $\chi_{\nu,p}{}^{в}(\theta, \varphi)$ определится как интеграл от $(1 - r_{\nu p}(\theta', \varphi', \theta, \varphi))$ по верхней полусфере (по всем φ' и θ'):

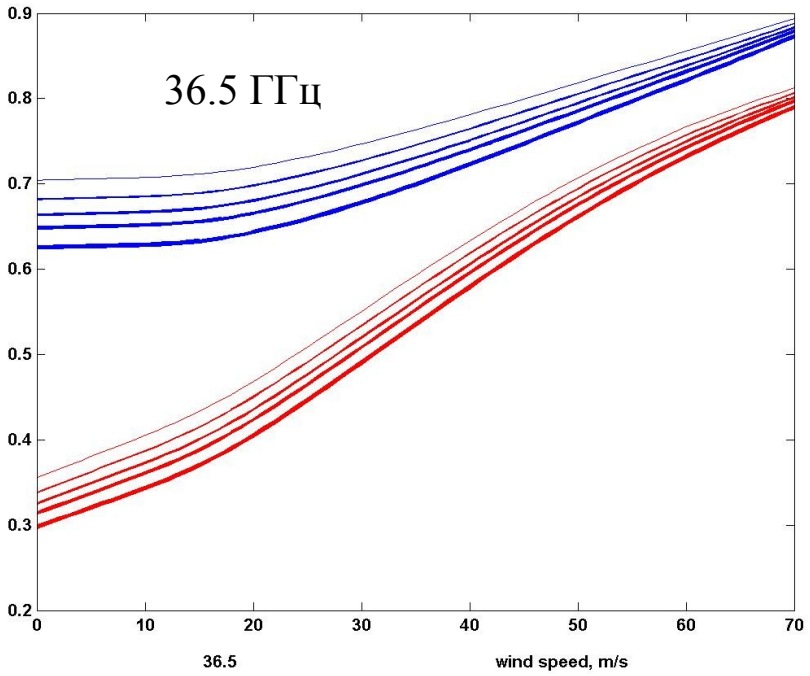


$$\chi_{p\nu}(\mu,\varphi) = 1 - \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi}\int_0^{1} r_{p\nu}(\mu,\varphi,\mu',\varphi')\mu d\mu' d\varphi'$$

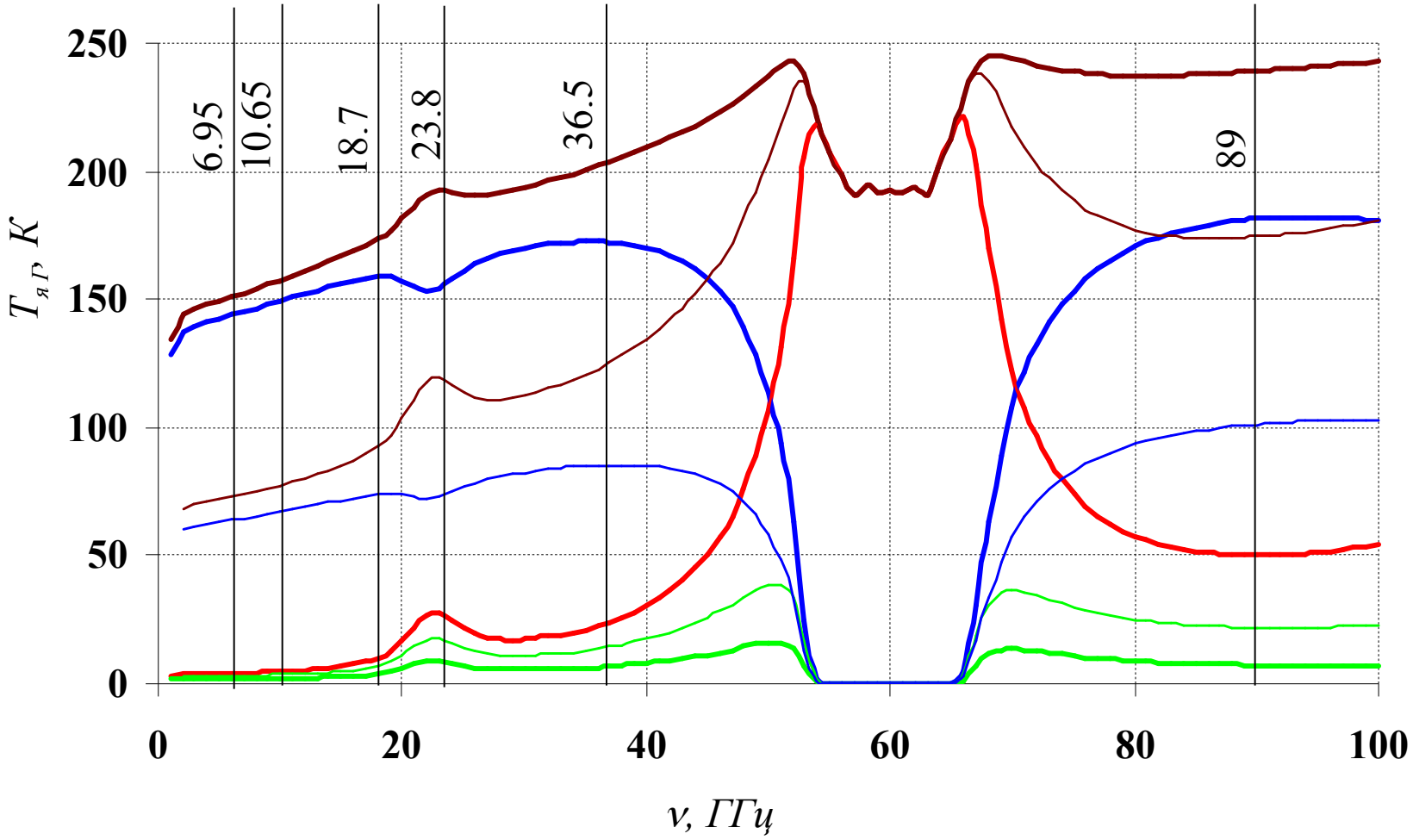
Зависимость коэффициента излучения от приводного ветра

$$\chi(\nu, SSWS, SSS, SST, Pol, \theta) = (1 - f) \cdot (1 - r) + f \cdot \chi_f$$



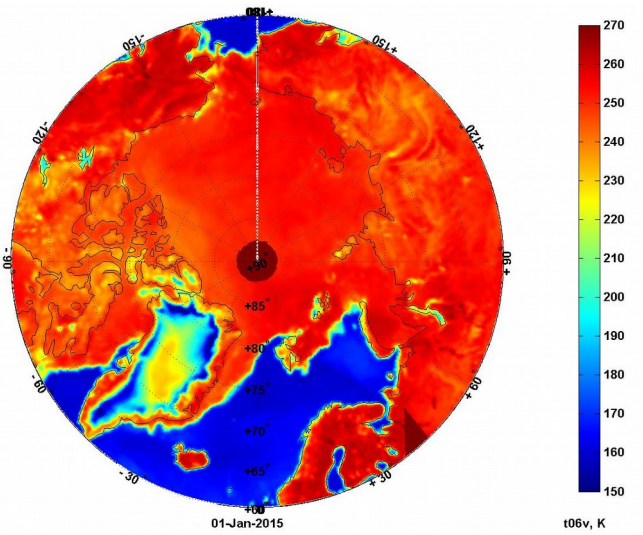


Спектры радиояркостных температур в системе океан - атмосфера

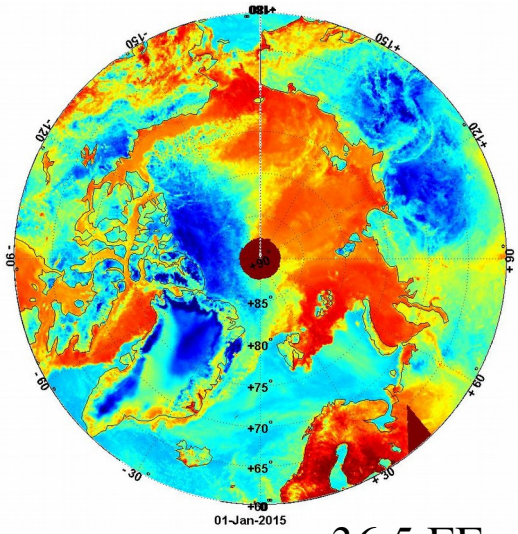


$$T_{я\,\nu}^{\uparrow} = T_{я\,а\,\nu}^{\uparrow} + T_{я\,а\,\nu\,отр}^{\downarrow} + T_{я\,к\,\nu} + T_{я\,ок\,\nu}$$

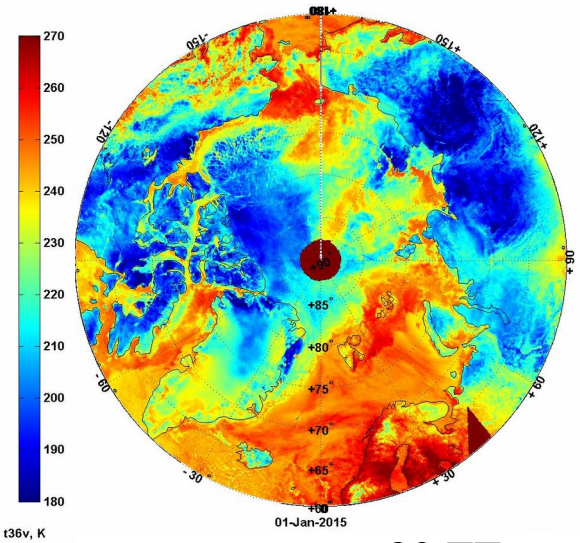
Поля Тя в Арктике



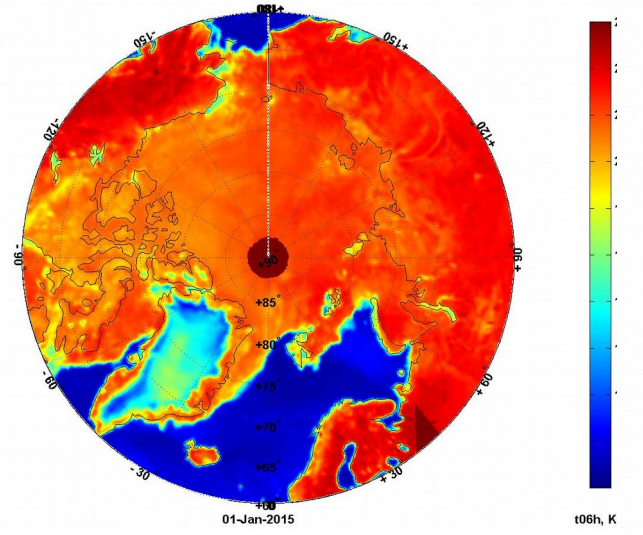
6.9 ГГц

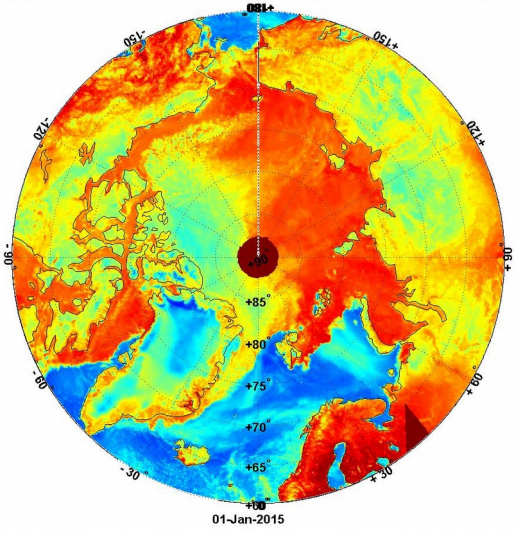


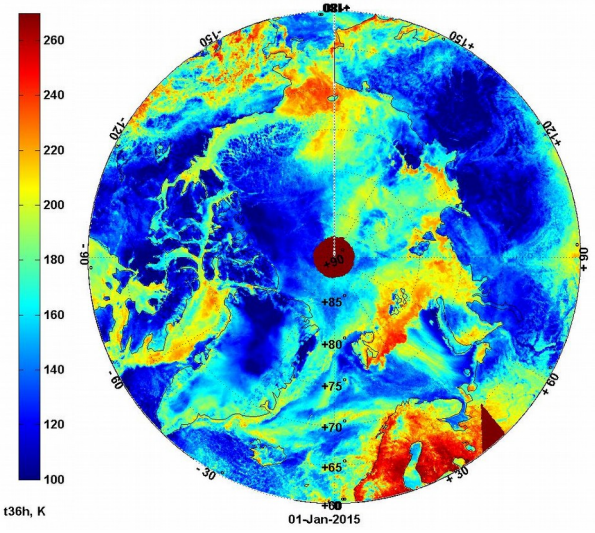
36.5 ГГц



89 ГГц



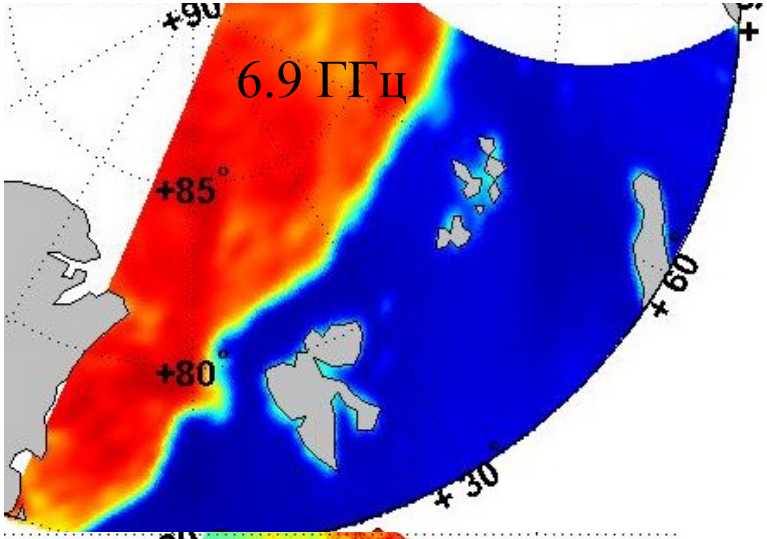


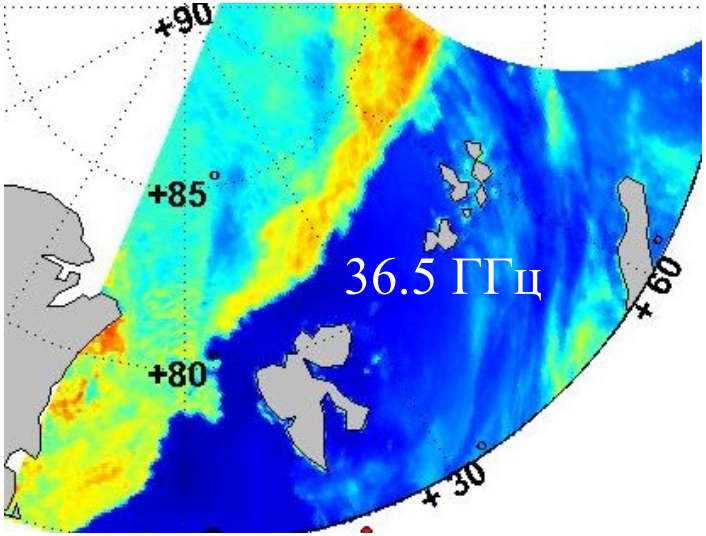


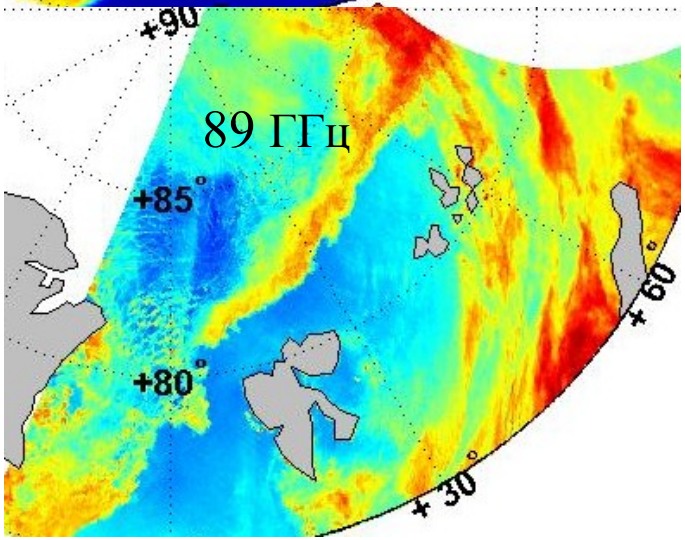
Пассивное микроволновое зондирование морского льда

- Данные спутниковых пассивных микроволновых радиометров могут быть использованы для оценки сплоченности морского льда;
- Радиояркостные контрасты между морским льдом и открытым океаном ~ 50-100K;
- 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*.

Измерение микроволновой радиации

- производится при помощи специальных радиотеплолокационных систем. Такие системы представляют собой функционально совмещенные *антенну*, микроволновый *радиометр* и *регистрирующее устройство*.

- Антенная система служит для приема и преобразования электромагнитной волны из внешнего пространства в волну, распространяющуюся по волноводному тракту до приемника. Антенна преобразует радиояркостную температуру излучения $T_я$, усредненную в пределах диаграммы направленности, в антенную температуру T_a, предающуюся на вход радиометра.

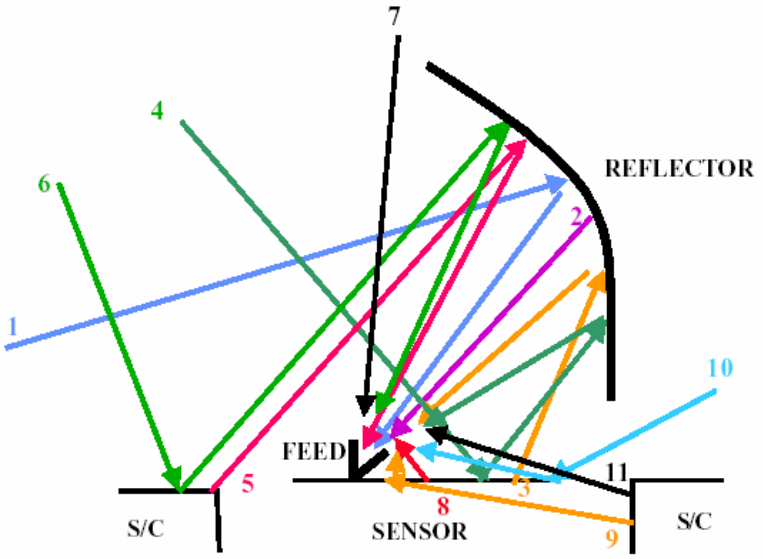
- Радиометр служит для усиления принятого антенной сигнала в определенном диапазоне частот измерения антенных температур, и его основной характеристикой является чувствительность, которая определяется как минимально обнаружимое приращение антенной температуры

- Регистратор предназначен для вывода сигнала радиометра в цифровом виде для последующей автоматизированной обработки.

$$\delta \sim \lambda / D$$

Источники микроволновой энергии, принимаемой рупорным устройством:

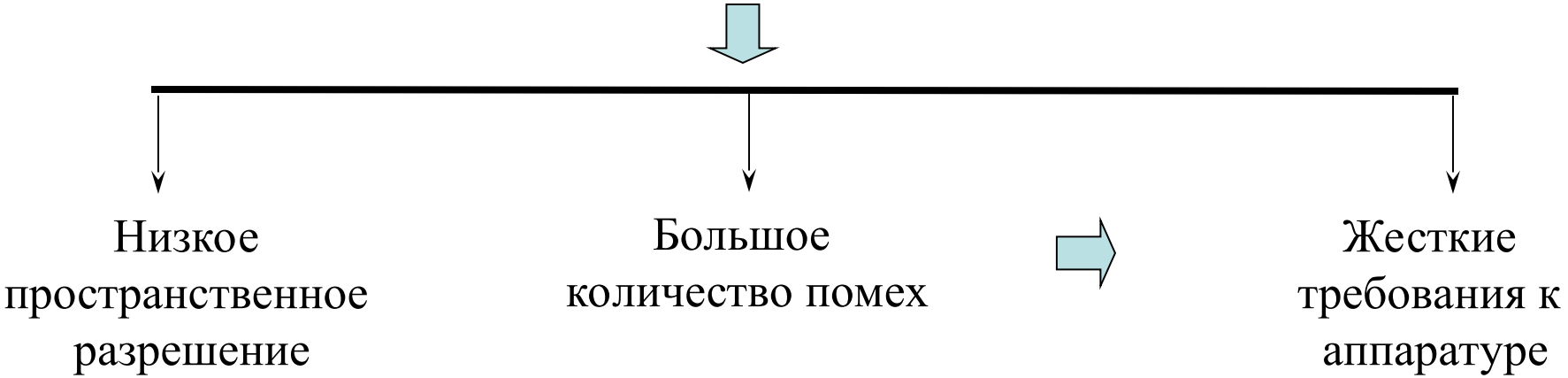
1. Полезный сигнал
2. Излучение самого параболического рефлектора
3. Излучение приемника, собранное рефлектором
4. Излучение за пределами главного лепестка антенны (внешнее), собранное рефлектором
5. Излучение спутника, собранное рефлектором
6. Внешнее излучение, отраженное спутником и собранное рефлектором
7. Внешнее излучение
8. Излучение приемника
9. Излучение спутника, отраженное приемн собранное рефлектором
10. Внешнее излучение, отраженное приемн
11. Излучение спутника



Проблемы калибровки микроволновых радиометров

- Излучение в микроволновом диапазоне электромагнитного спектра обладает малой энергией

- Размер элемента разрешения должен быть достаточно велик, чтобы собрать энергию, превышающую чувствительность прибора



- Радиометрические методы получили развитие только тогда, когда были разработаны высокочувствительные приемники микроволнового излучения

Первый спутниковый микроволновый радиометр

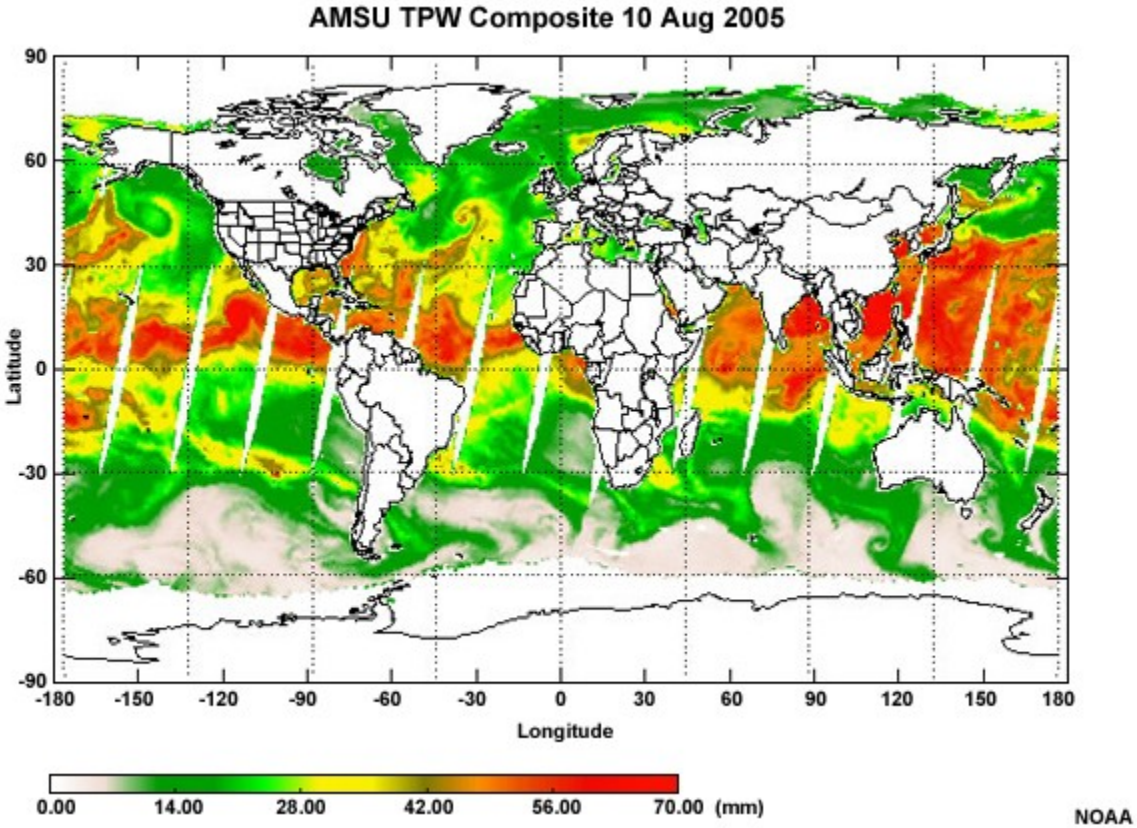
Спутниковое микроволновое зондирование
нашей планеты началось 23 сентября 1968 г., когда на орбиту был выведен спутник “Космос 243” с четырьмя трассовыми микроволновыми радиометрами, ориентированными в надир.

Микроволновые измерения продолжались до 2 октября, что позволило охватить измерениями почти весь земной шар, за исключением полярных областей.

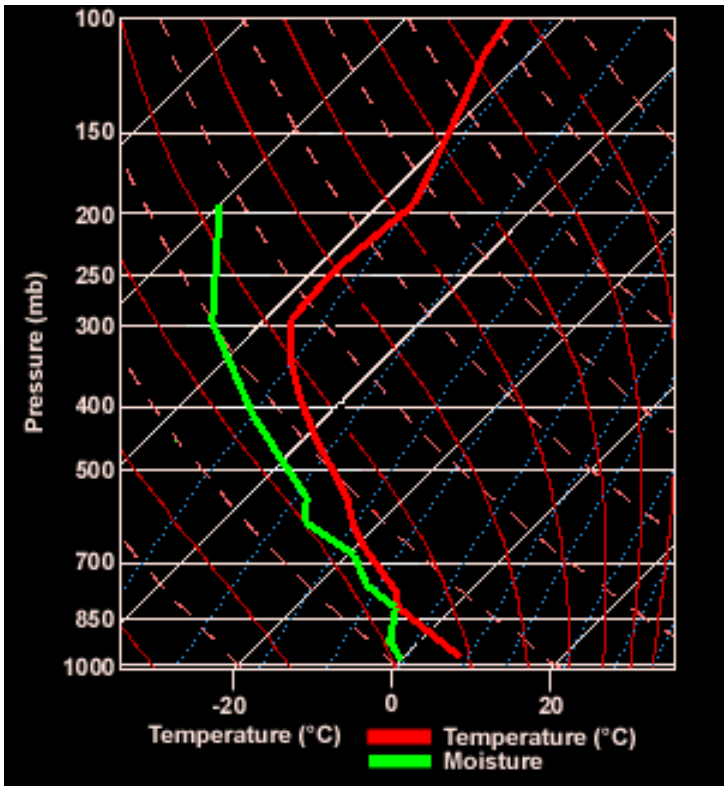
Частоты радиометров были выбраны на основе выполненных ранее теоретических и экспериментальных исследований ослабления электромагнитных волн в атмосфере и коэффициентов излучения морской поверхности и ледяного покрова

Длина волны, см	8.5	3.4	1.35	0.8
Центральная частота, ГГц	3.5	8.8	22.2	37.5
Ширина диаграммы направленности антенны, гр.	8.6	4.0	3.6	4.0
Чувствительность, К	0.7	0.5	0.9	1.3
Разрешение, км х км	50 х 50	22 х 22	20 х 20	22 х 22

Сканеры и зондировщики (imagers and sounders)



- Результат обработки данных сканеров - двумерные поля параметров

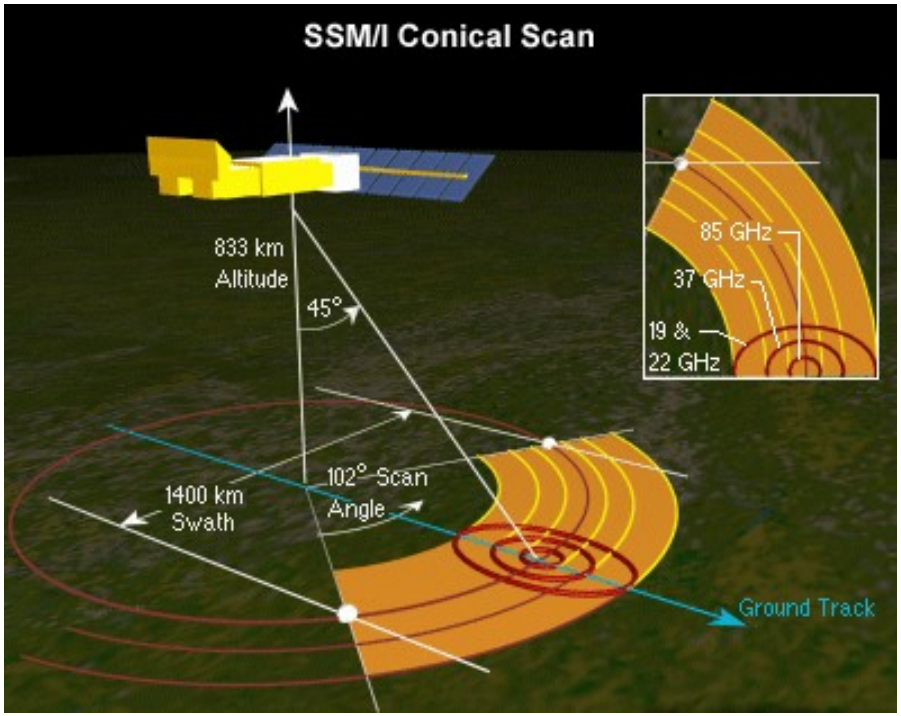


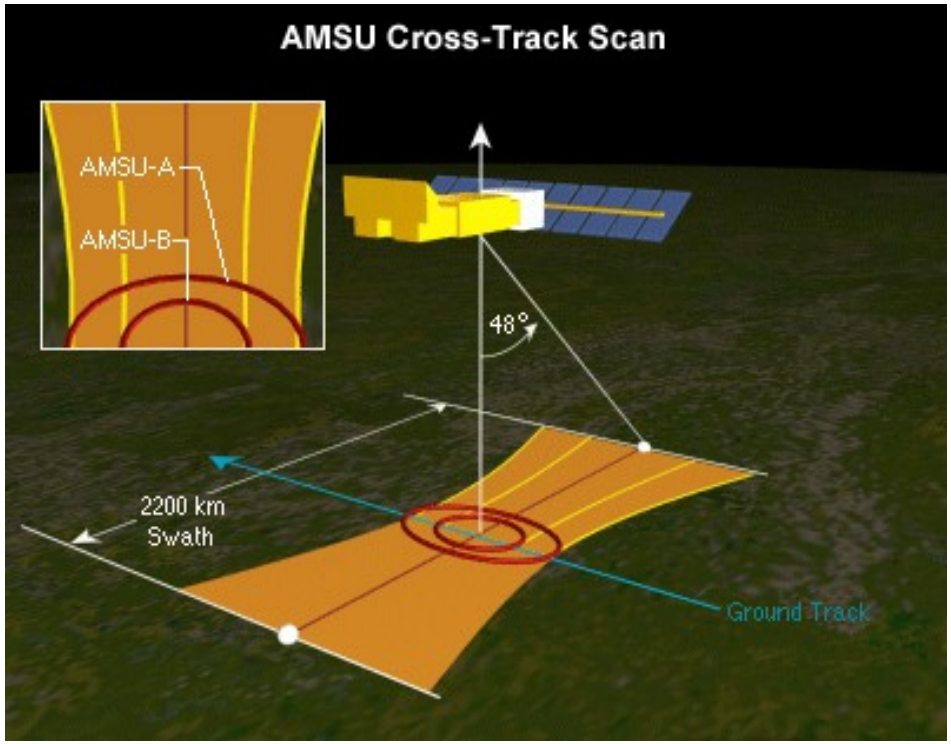
- Результат обработки данных зондировщиков - трехмерные поля температуры и влажности атмосферы

Спутниковые микроволновые радиометры

Инструмент	период	Тип прибора	№ 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)	2009-2014	сканер / зондировщик	18	10.6-183.31	5-150	1400
МТВЗА-ГЯ (Метеор-М №2)	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

Геометрия сканирования микроволновых радиометров





Методы решения обратных задач

Классификация:

по подходу:

- Физические - базируются на обращении уравнения переноса излучения в атмосфере относительно искомых геофизических параметров (среди методов решения - *линеаризация, итерационные методы, аналитические, численные методы, Нейронные Сети и др.*)
- Статистические - основаны на поиске корреляционной зависимости между искомыми геофизическими параметрами и измеряемыми радиояркостными температурами. Характеристики этой корреляционной связи обычно получают путем совместной статистической обработки большого числа прямых измерений искомых параметров

Методы решения обратных задач

Классификация:

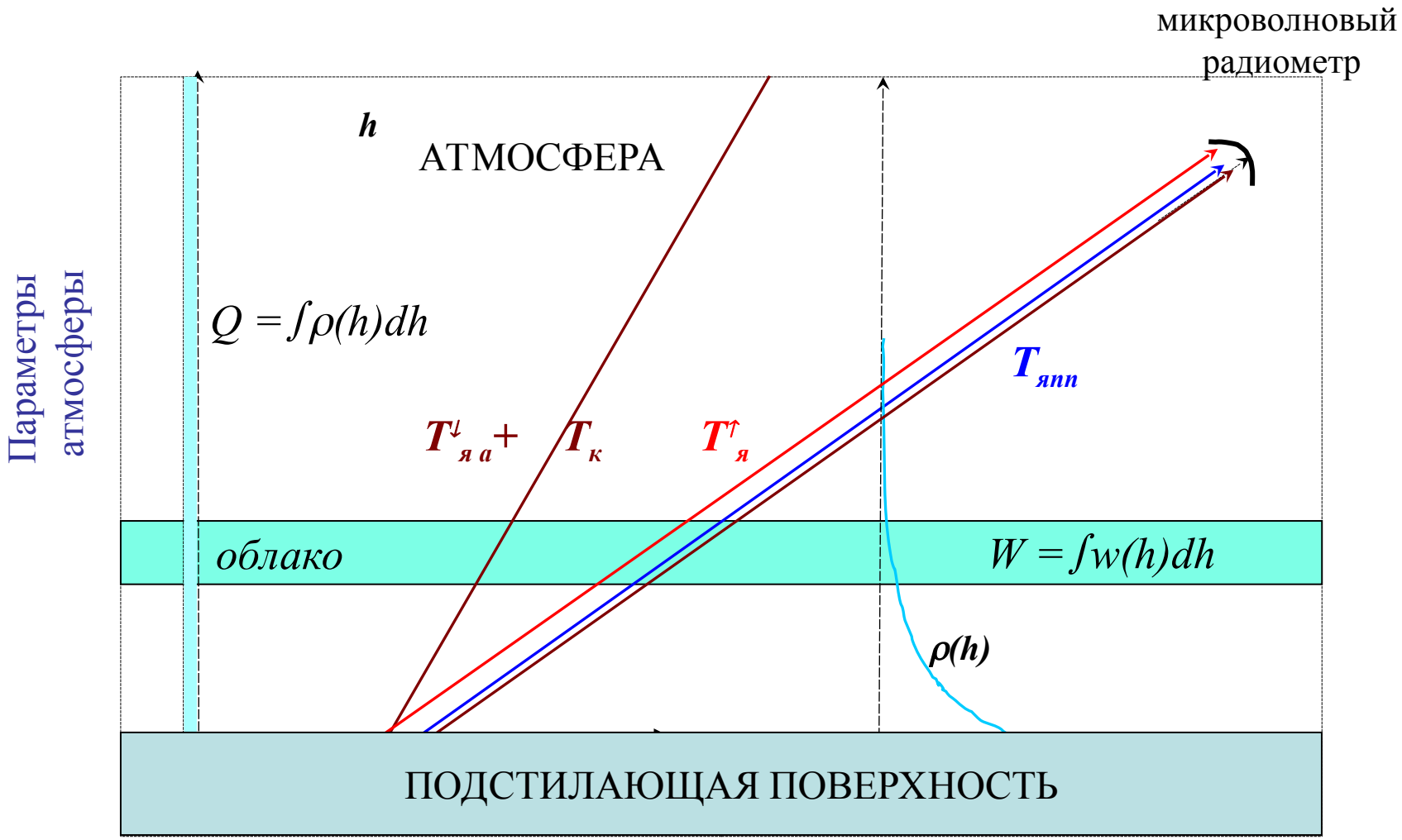
по числу восстанавливаемых параметров :

- Однопараметрические - когда восстанавливается один параметр;
- Многопараметрические алгоритмы оценок решают комплексную задачу одновременного определения нескольких геофизических параметров;

по сфере применения :

- Глобальные – разработанные и применимые для всех регионов Земного шара
- Региональные – работающие эффективно только для определенных районов (широт, морей и т.д.)

Схема формирования микроволнового излучения



Параметры подстилающей поверхности

$$T_{я\,\nu}^{\uparrow} = T_{я\,a\,\nu}^{\uparrow} + T_{я\,a\,\nu\,отр}^{\downarrow} + T_{я\,ок\,\nu} + T_{я\,к\,\nu}$$

над океаном:

$$T_я = \frac{\partial T_я}{\partial T_s} \cdot T_s + \frac{\partial T_я}{\partial V} \cdot V + \frac{\partial T_я}{\partial S} \cdot S + \frac{\partial T_я}{\partial Q} \cdot Q + \frac{\partial T_я}{\partial W} \cdot W + \frac{\partial T_я}{\partial R} \cdot R + \sum \frac{\partial T_я}{\partial P} \cdot P$$

Q – влагозапас атмосферы, W - водозапас облаков, R - интенсивность осадков;

V – скорость ветра, T_s - температура океана, S - соленость;

над сушей или снегом:

$$T_я = \frac{\partial T_я}{\partial \rho} \cdot \rho + \frac{\partial T_я}{\partial T_s} \cdot T_s + \frac{\partial T_я}{\partial Q} \cdot Q + \frac{\partial T_я}{\partial W} \cdot W + \frac{\partial T_я}{\partial R} \cdot R + \sum \frac{\partial T_я}{\partial P} \cdot P$$

ρ – влажность почвы или водный эквивалент снега;

надо льдом:

$$T_я = C_{MY} \cdot \frac{\partial T_я}{\partial C_{MY}} + \frac{\partial T_я}{\partial T_{ice}} \cdot T_{ice} + C_{FY} \cdot \frac{\partial T_я}{\partial C_{FY}} + \frac{\partial T_я}{\partial Q} \cdot Q + \frac{\partial T_я}{\partial W} \cdot W + \frac{\partial T_я}{\partial R} \cdot R + \sum \frac{\partial T_я}{\partial P} \cdot P$$

для определения того или иного параметра необходимы многоканальные радиометрические измерения

Параметры влагосодержания атмосферы

1. $$Q = \int_0^{H_{Max}} \rho(h)dh$$

интегральное содержание водяного пара в атмосфере

2. $$W = \int_{h_н}^{h_в} \omega(h)dh$$

интегральное содержание жидкокапельной влаги в облаке

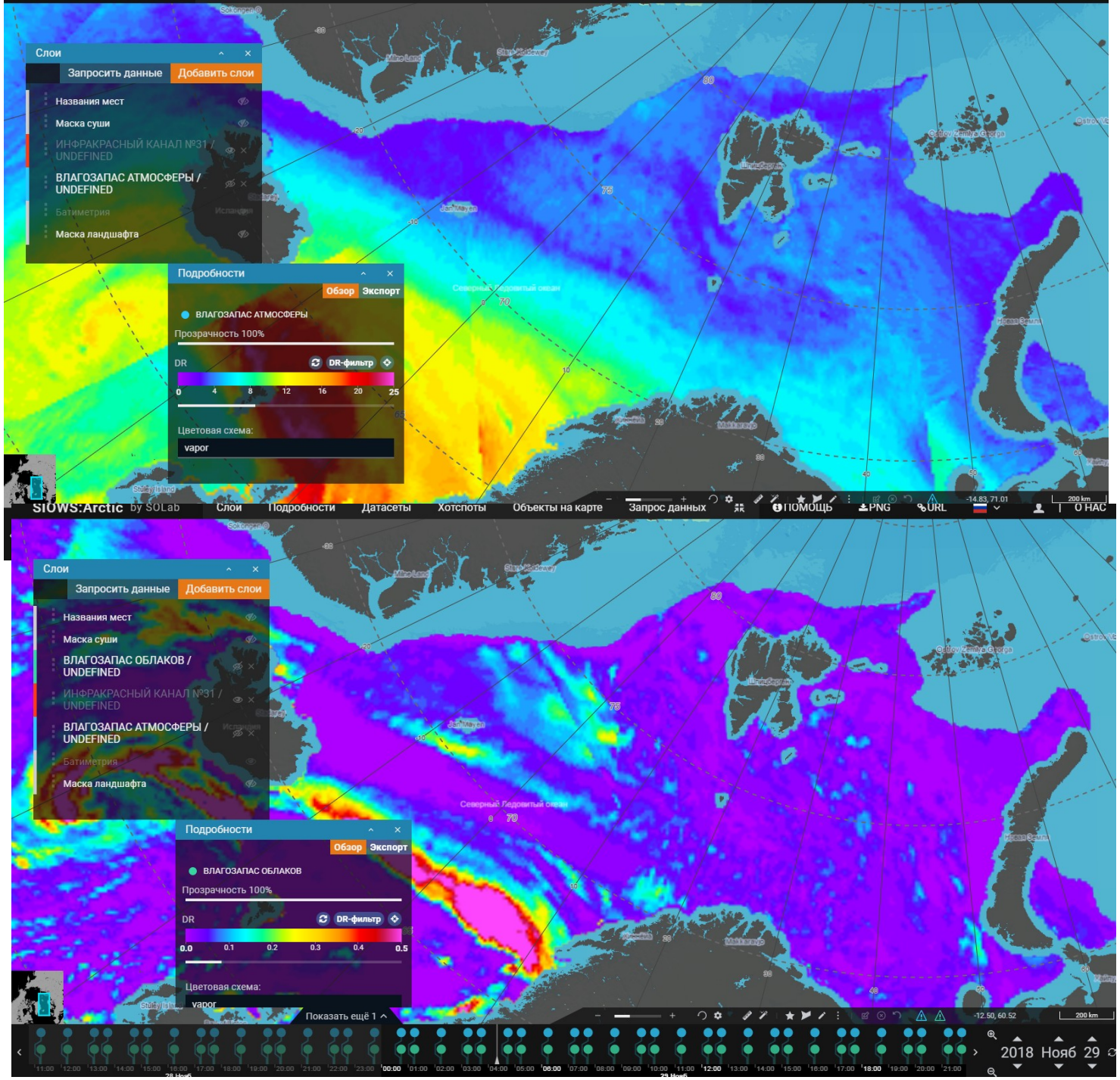
$\omega(h)$ – водность облака, $h_н$ – его нижняя, $h_в$ – верхняя границы

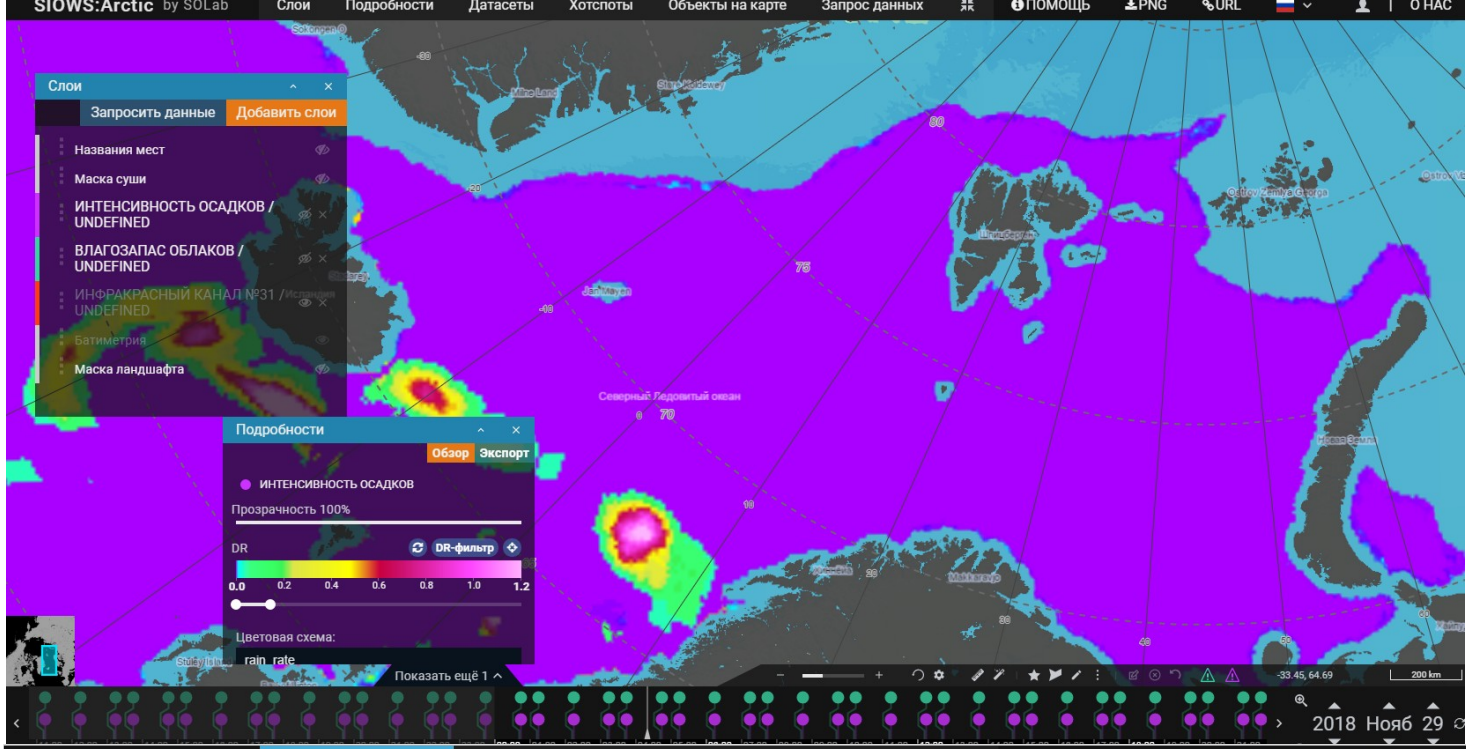
Водозапас облаков и влагозапас атмосферы, наряду с аэрозолями, контролируют планетарное альбедо Земли, и, таким образом, являются одними из важнейших компонентов, определяющих климат.

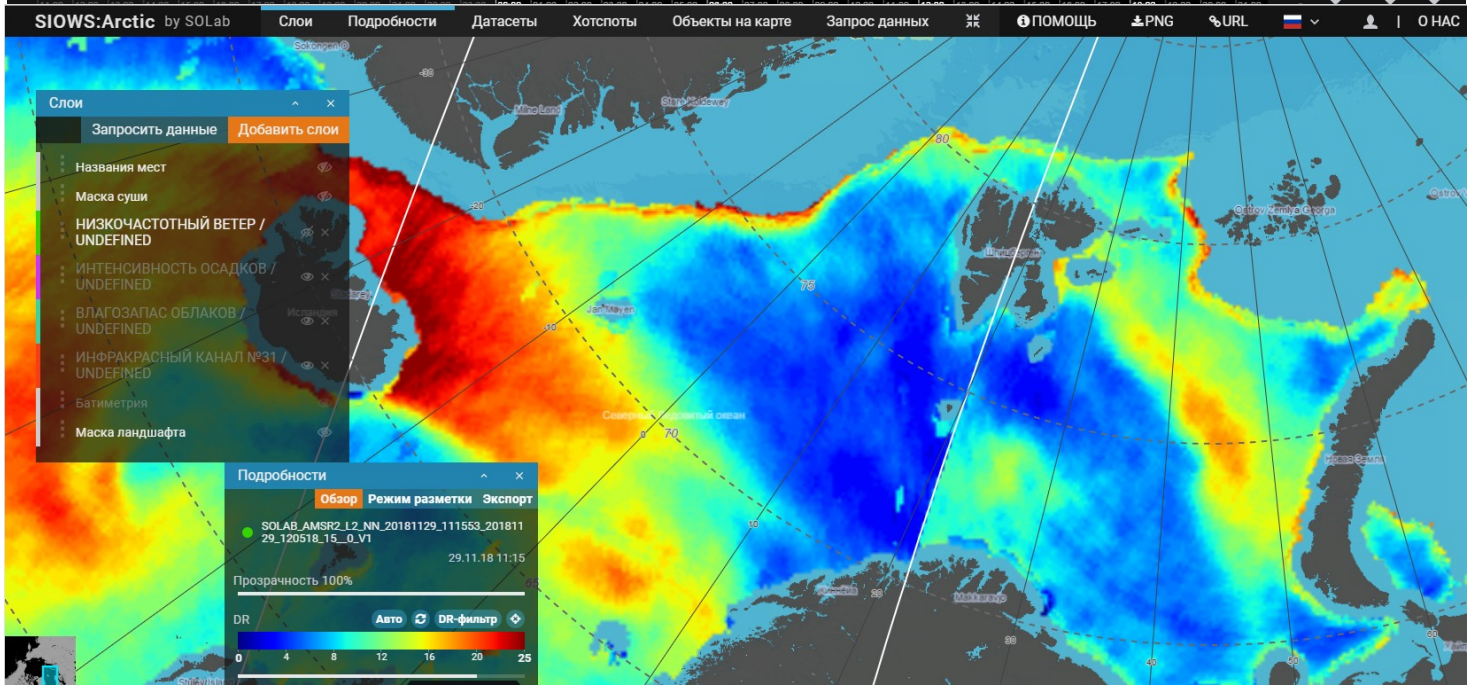
3. интенсивность дождя – слой осадков, выпадающий за единицу времени

Дождь – атмосферные осадки, выпадающие из облаков в виде капель жидкой воды диаметром от 0.5 мм до 6-7 мм

Кристаллические облака и осадки в виде снега и града не поглощают и не излучают радиацию в микроволновом диапазоне э/м спектра


Слои
Запросить данные
Добавить слои
Названия мест
Маска суши
ИНФРАКРАСНЫЙ КАНАЛ №31 / UNDEFINED
ВЛАГОЗАПАС АТМОСФЕРЫ / UNDEFINED
Батиметрия
Маска ландшафта
Подробности
Обзор
Экспорт
ВЛАГОЗАПАС АТМОСФЕРЫ
Прозрачность 100%
DR
DR-фильтр
0 4 8 12 16 20 25
Цветовая схема:
vapor
SIOWS:Arctic by SOLab
Слои
Подробности
Датасеты
Хотспоты
Объекты на карте
Запрос данных
ПОМОЩЬ
PNG
URL
О НАС
Слои
Запросить данные
Добавить слои
Названия мест
Маска суши
ВЛАГОЗАПАС ОБЛАКОВ / UNDEFINED
ИНФРАКРАСНЫЙ КАНАЛ №31 / UNDEFINED
ВЛАГОЗАПАС АТМОСФЕРЫ / UNDEFINED
Батиметрия
Маска ландшафта
Подробности
Обзор
Экспорт
ВЛАГОЗАПАС ОБЛАКОВ
Прозрачность 100%
DR
DR-фильтр
0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5
Цветовая схема:
vapor
Показать ещё 1
2018 Нояб 29

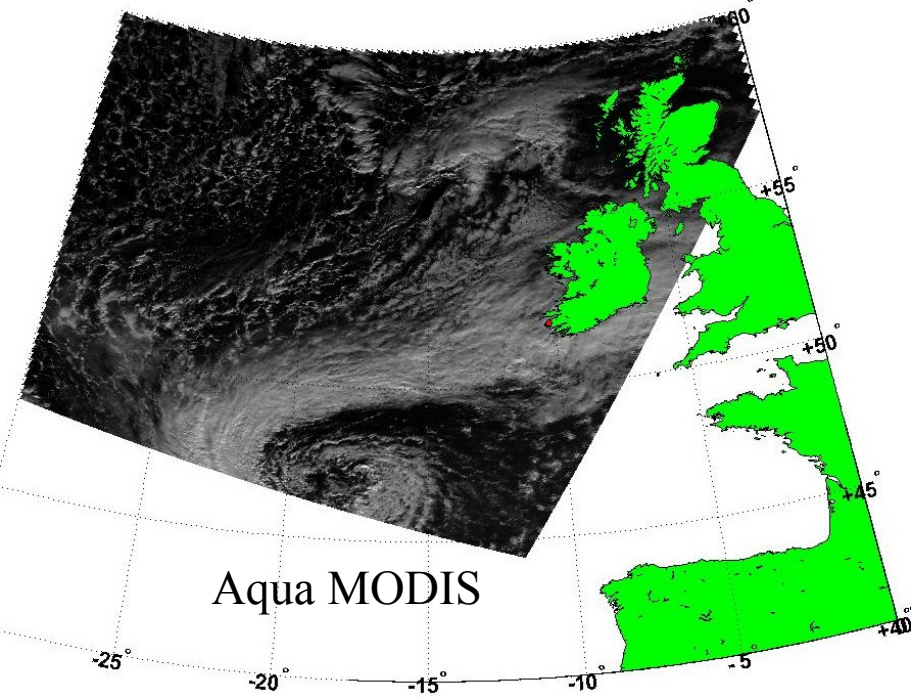

SIOWS:Arctic by SOLab
Слои
Подробности
Датасеты
Хотспоты
Объекты на карте
Запрос данных
ПОМОЩЬ
PNG
URL
О НАС
Слои
Запросить данные
Добавить слои
Названия мест
Маска суши
ИНТЕНСИВНОСТЬ ОСАДКОВ / UNDEFINED
ВЛАГОЗАПАС ОБЛАКОВ / UNDEFINED
ИНФРАКРАСНЫЙ КАНАЛ №31 / UNDEFINED
Батиметрия
Маска ландшафта
Подробности
Обзор
Экспорт
ИНТЕНСИВНОСТЬ ОСАДКОВ
Прозрачность 100%
DR
DR-фильтр
0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2
Цветовая схема:
rain_rate
Показать ещё 1
2018 Нояб 29


SIOWS:Arctic by SOLab
Слои
Подробности
Датасеты
Хотспоты
Объекты на карте
Запрос данных
ПОМОЩЬ
PNG
URL
О НАС
Слои
Запросить данные
Добавить слои
Названия мест
Маска суши
НИЗКОЧАСТОТНЫЙ ВЕТЕР / UNDEFINED
ИНТЕНСИВНОСТЬ ОСАДКОВ / UNDEFINED
ВЛАГОЗАПАС ОБЛАКОВ / UNDEFINED
ИНФРАКРАСНЫЙ КАНАЛ №31 / UNDEFINED
Батиметрия
Маска ландшафта
Подробности
Обзор
Режим разметки
Экспорт
SOLAB_AMSR2_L2_NN_20181129_111553_20181129_120518_15__0_V1
29.11.18 11:15
Прозрачность 100%
DR
Авто
DR-фильтр
0 4 8 12 16 20 25

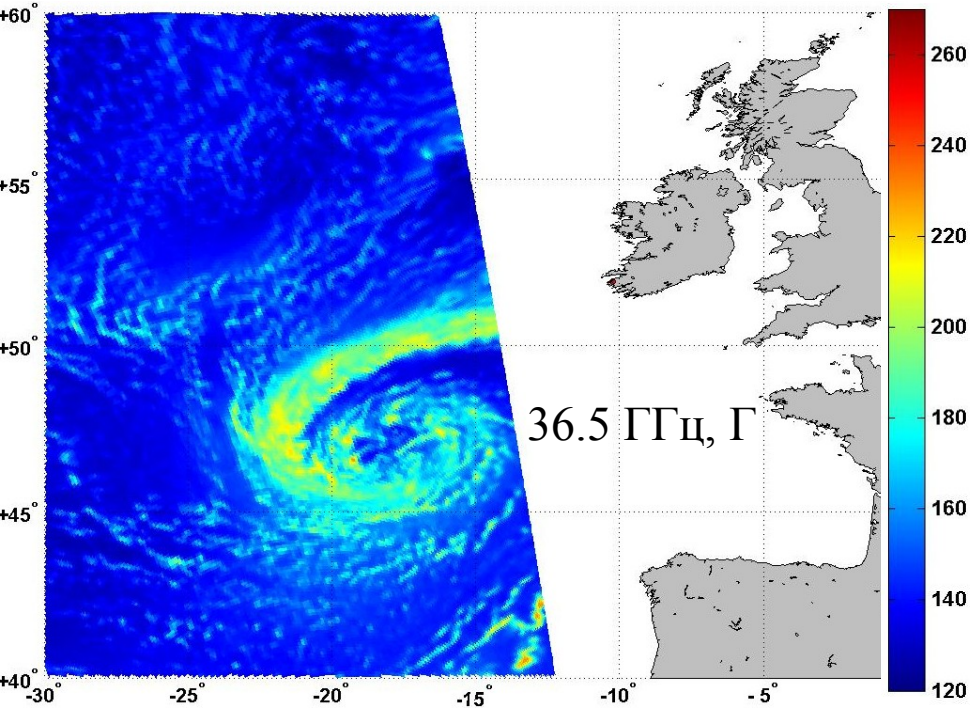
23 Февраля 2010

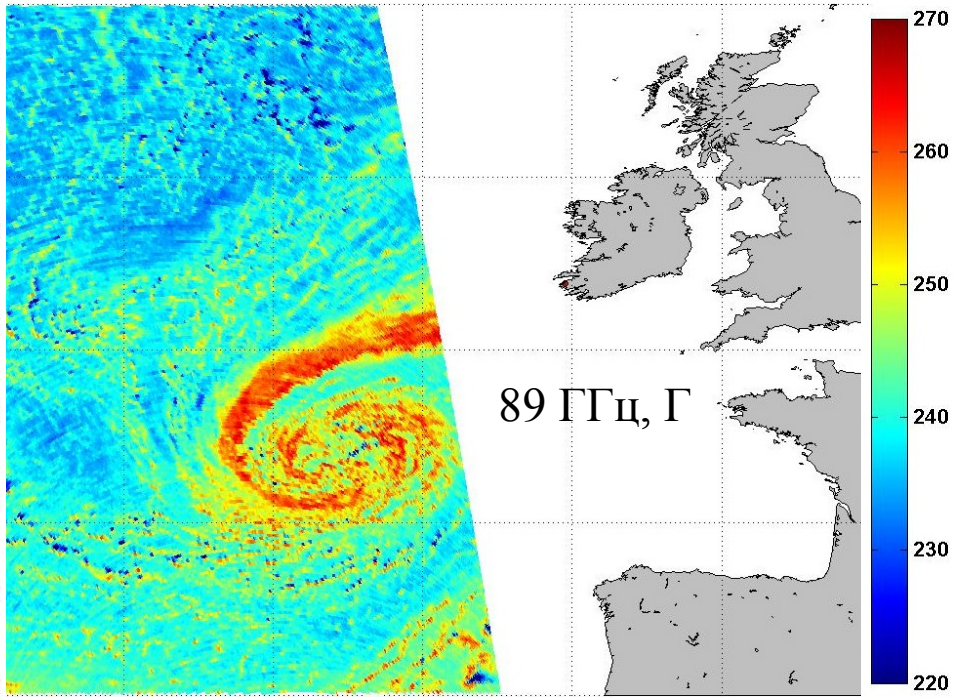
Циклон в Атлантике

Уменьшение $T_я$ на высокочастотных каналах сопровождаемое повышением $T_я$ на низкочастотных свидетельствует о наличии рассеяния в кристаллических облаках



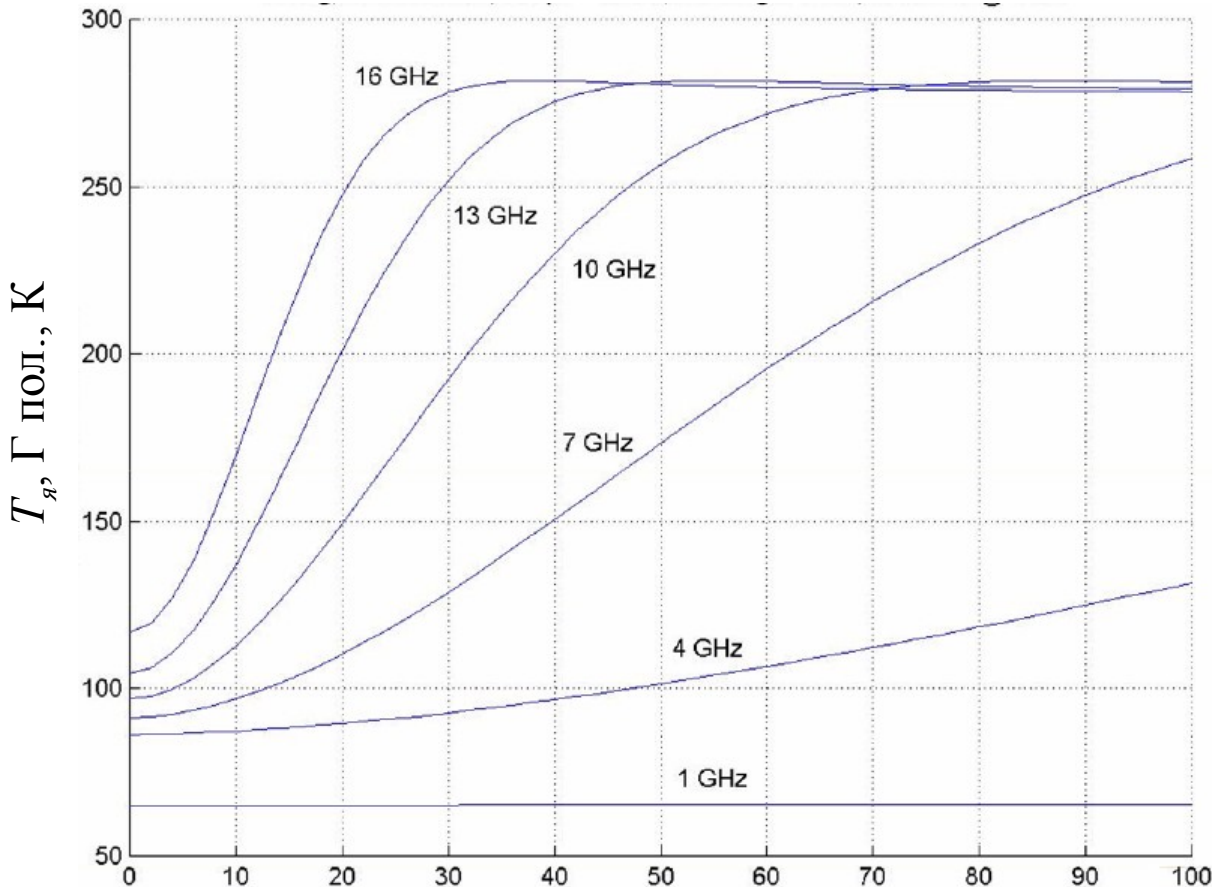
Aqua AMSR-E $T_я$

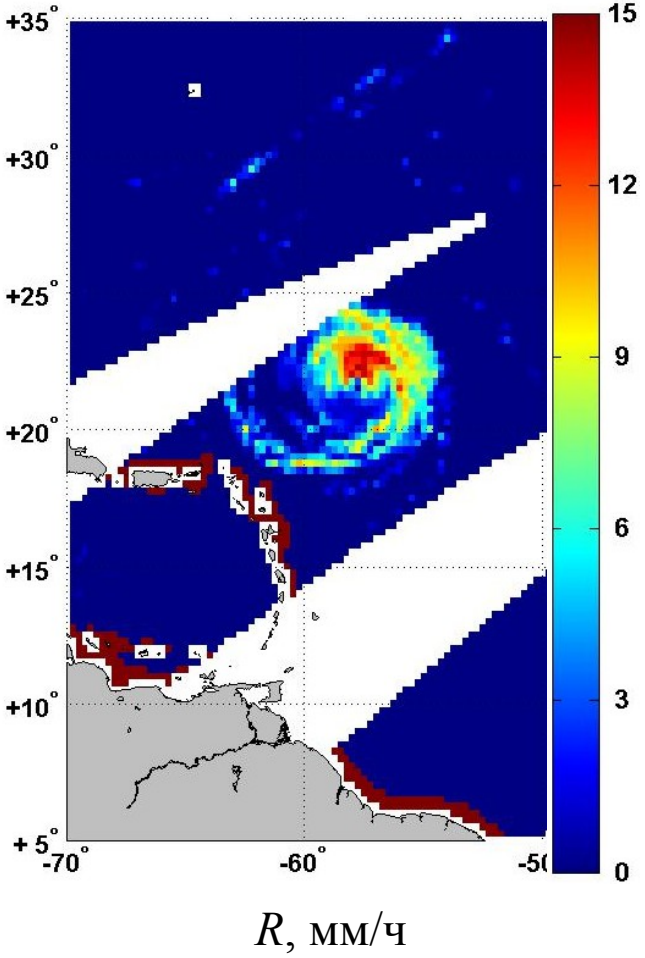




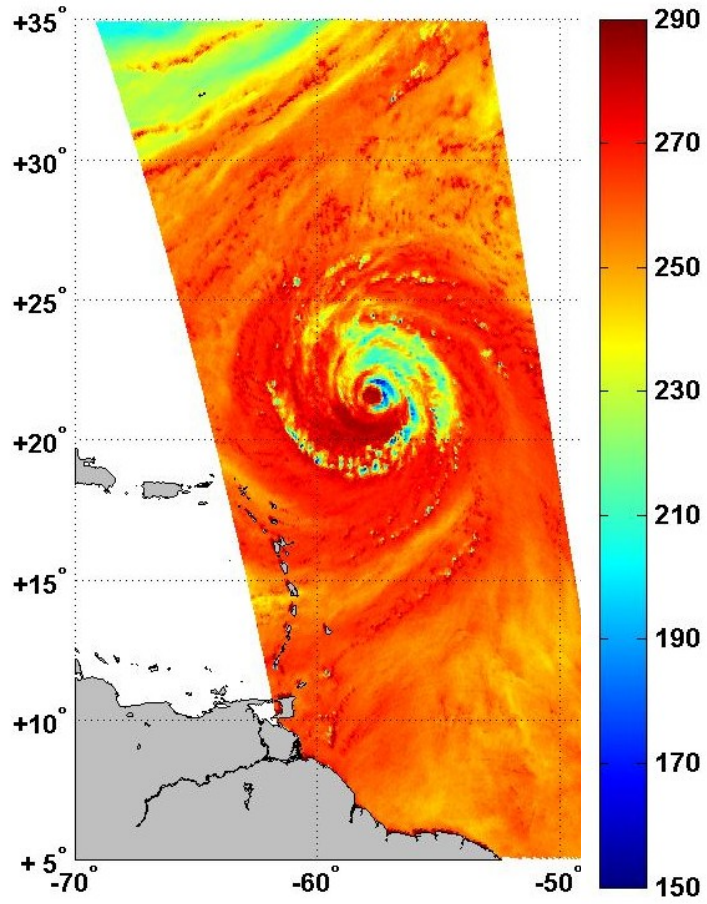
Дождь над океаном

- Приводит к повышению радиояркостных температур, и их насыщению, пока не начинаются эффекты рассеяния;
- Эти эффекты зависят от интенсивности дождя и длины волны излучения

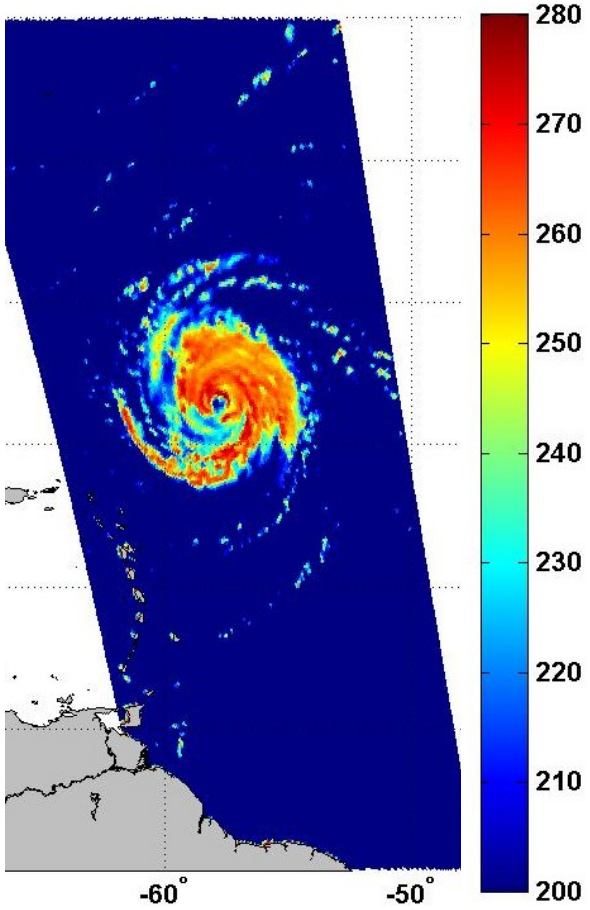




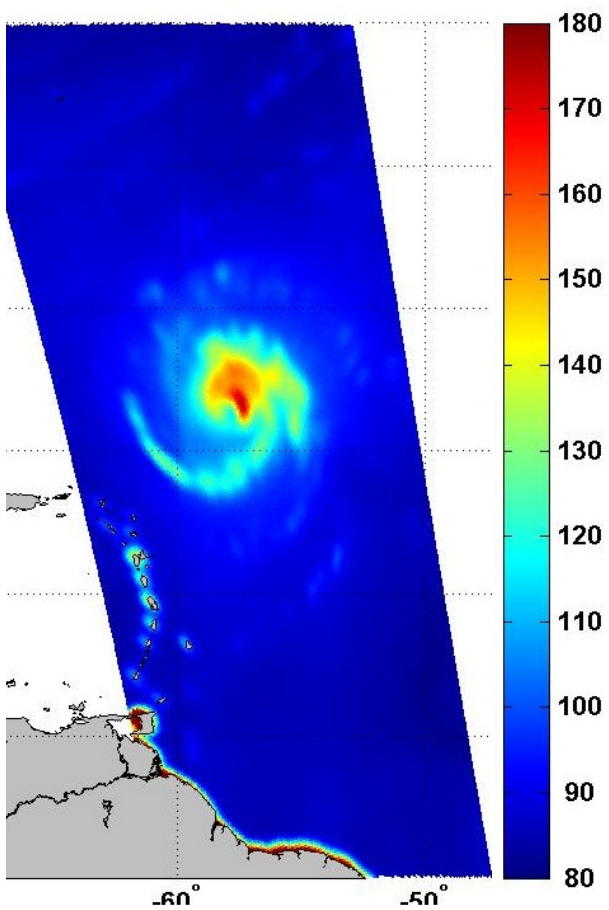
Ураган Игорь



Тя на 89 ГГц, Г



Тя на 36.5 ГГц, Г



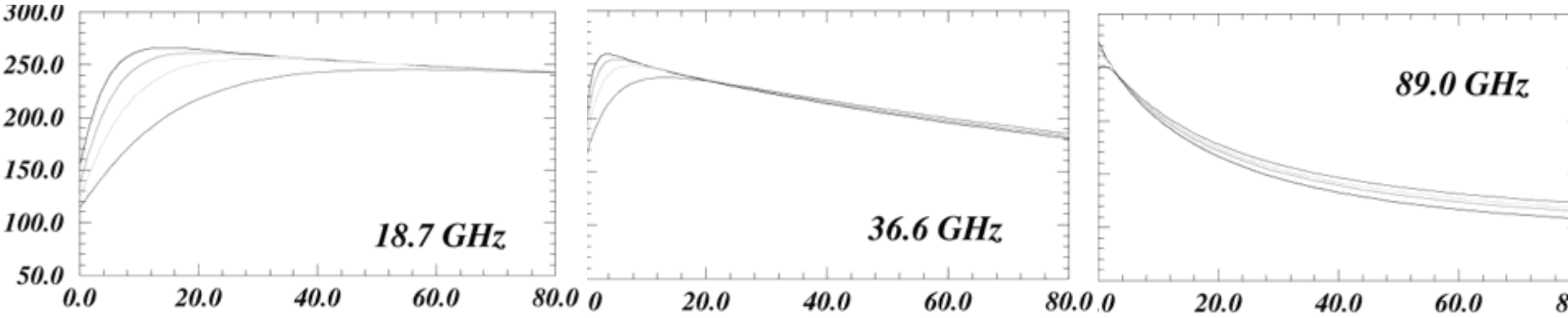
Тя на 6.9 ГГц, Г

Aqua AMSR-E 16 сентября 2010, 17:10 Гр.

Методы оценки интенсивности дождя

1. Над океаном основаны на использовании излучения и рассеяния дождевых капель;

Наиболее информативные каналы - на частотах, превышающих К-диапазон



2. $T_я$ над областями с осадками обладает существенной чувствительностью к профилю гидрометеоров и уровню нулевой изотермы;

3. Метод оценки основан *на байесовской инверсии*: рассчитываются модельные значения векторов $T_я$ для каждой реализации профиля гидрометеоров (используется статистически достоверная база данных профилей), а обращения векторов производятся с учетом вероятности реализации профилей

4. Над сушей основан на использовании только рассеяния дождевых капель;

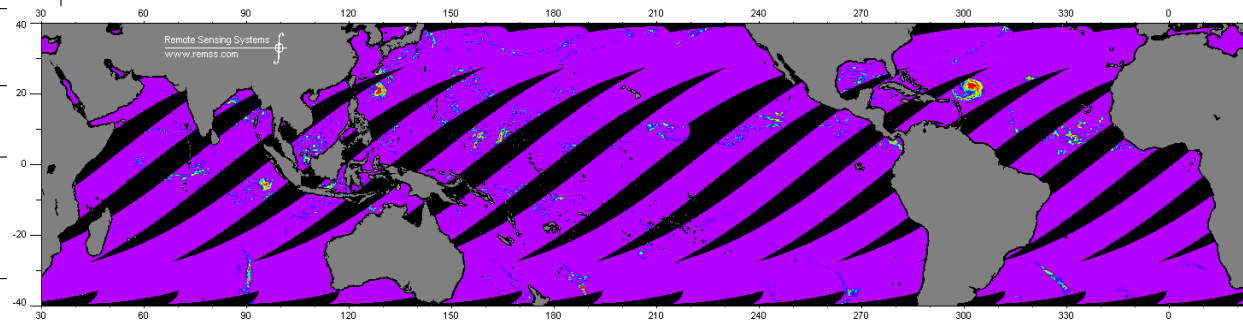
Наиболее информативные каналы - на частотах W-диапазона (85, 89 ГГц)

5. Алгоритмы оценки R над сушей, в основном, являются статистическими

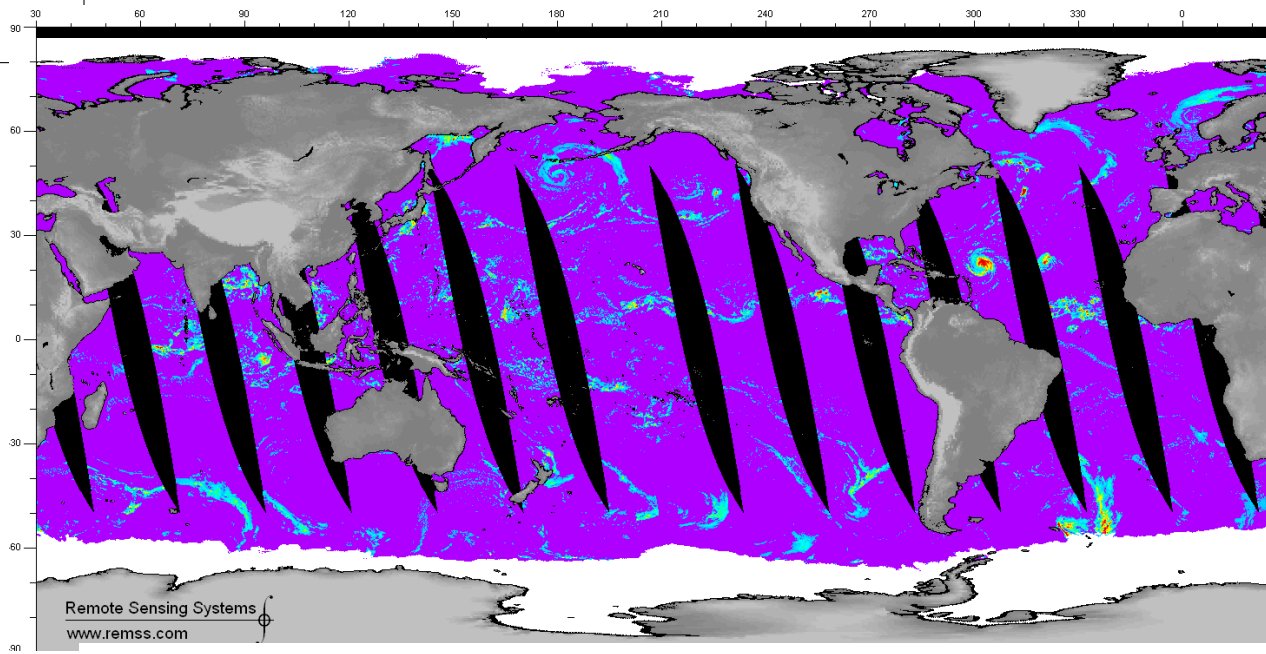
Радиометры, позволяющие оценивать интенсивность осадков:

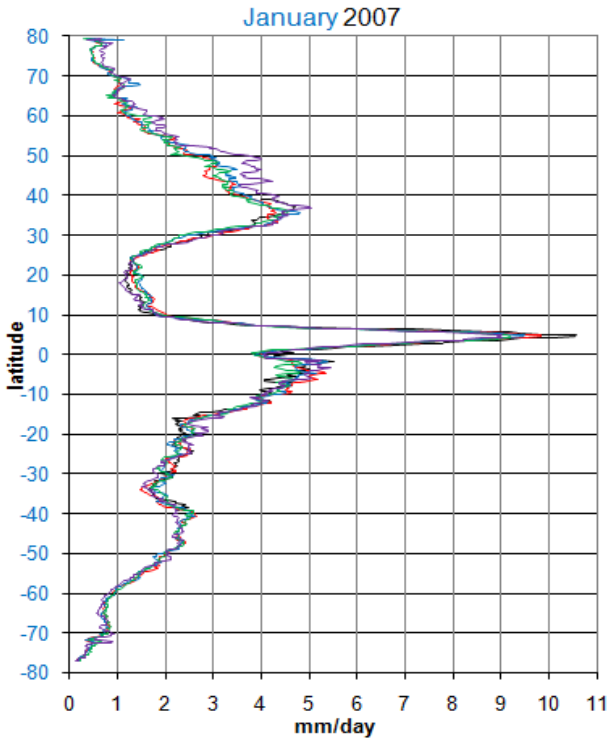
	частоты, ГГц	полоса обзора, км
TMI	10.65-85.5	780
GMI	10.65 - 183	885
SSM/I - SSMIS	19-183	1700
WindSat	6.8-37	1025
AMSR-E- AMSR2	6.9-89	1450

TMI

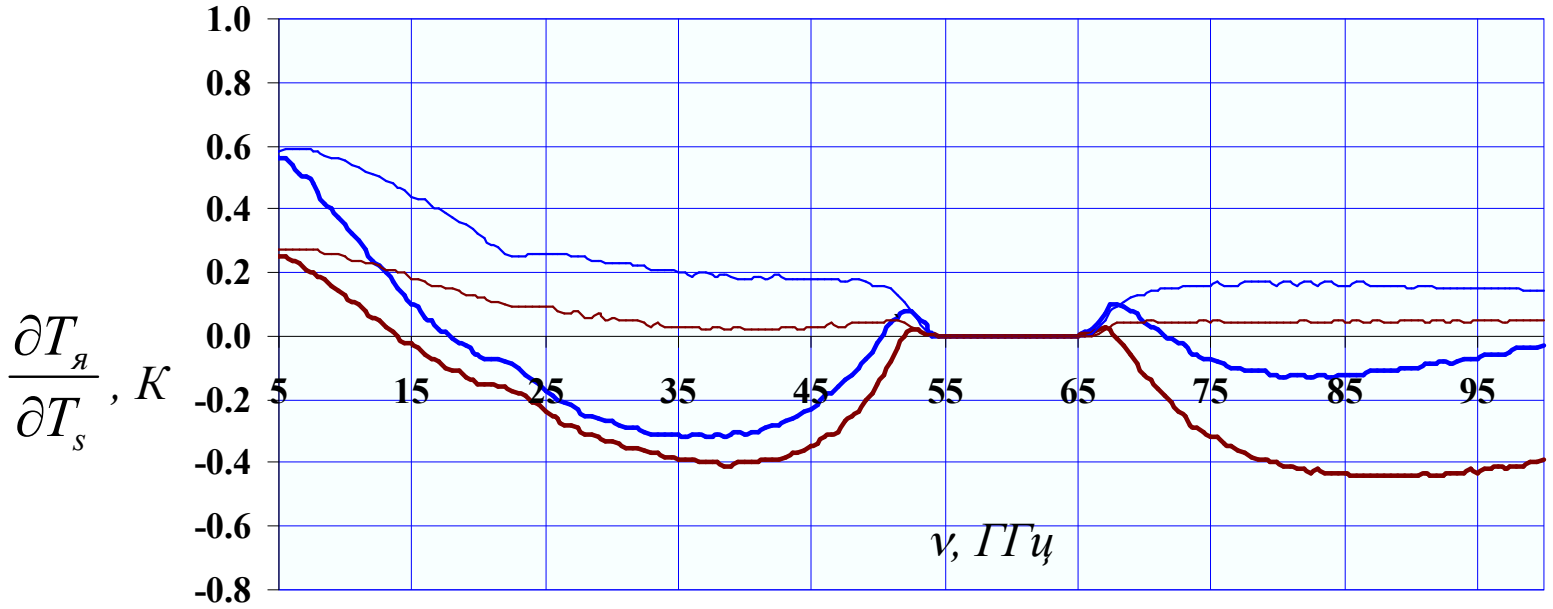


AMSR-E





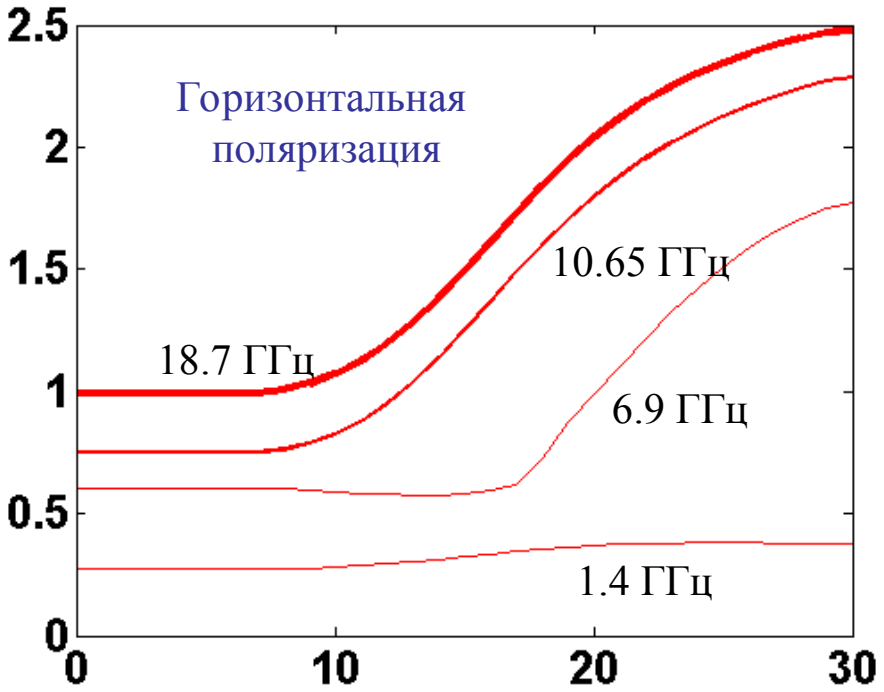
Чувствительность $T_я$ к температуре океана T_s



- На частотах выше С-диапазона $T_я$ практически не зависит от температуры океана;
- Для всех остальных каналов радиометров влиянием температуры океана на излучение можно пренебречь;
- Радиометры, не имеющие каналов в С-диапазоне, для оценки T_s не пригодны

Чувствительность $T_я$ океана к скорости приводного ветра V

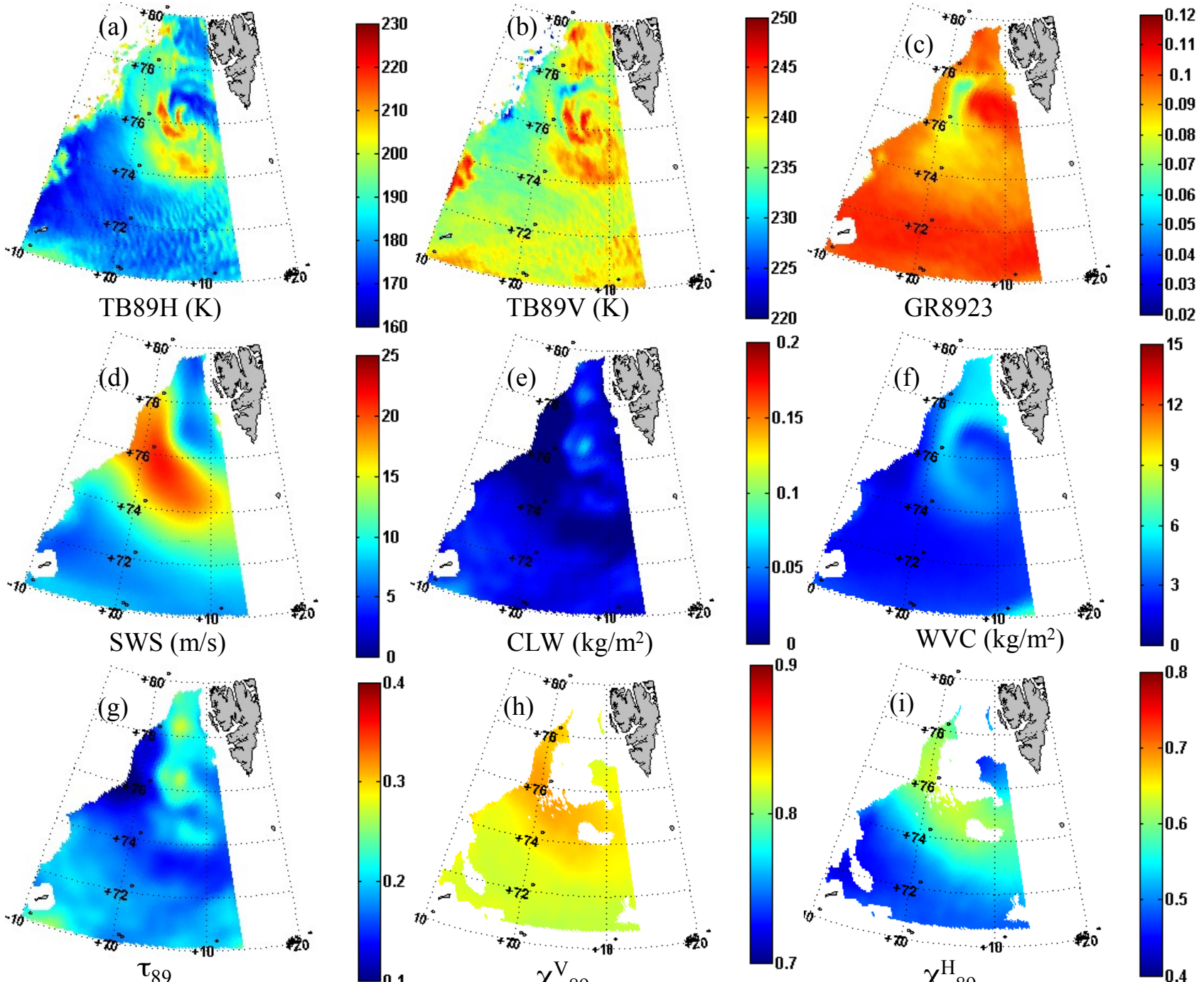
$\frac{\partial T_{яок}}{\partial V}$, *K*



V, м/с

- На частотах L –диапазона чувствительность радиометров к скорости приводного ветра составляет порядка 0.25 К;
- С ростом частоты чувствительность яркостной температуры океана к V растет;
- Но! С ростом частоты растет и ослабление сигнала от поверхности:

$$\frac{\partial T_я}{\partial V} = \frac{\partial T_{яок}}{\partial V} \cdot e^{-\tau}$$


(a)
TB89H (K)
(b)
TB89V (K)
(c)
GR8923
(d)
SWS (m/s)
(e)
CLW (kg/m²)
(f)
WVC (kg/m²)
(g)
τ89
(h)
(i)

Разделение задач

- Над океаном методы оценки параметров атмосферы и океана по спутниковым пассивным микроволновым измерениям предполагают отсутствие осадков;
- Площади океана, занятые осадками, составляют ~ 2%
- Высокочастотные каналы радиометров (W – диапазон: 85.5, 89 ГГц) в алгоритмах оценки параметров атмосферы и океана чаще всего не используются из-за большой плотности атмосферы
- Низкая чувствительность низкочастотного диапазона (L, C) к параметрам атмосферы, а высокочастотного диапазона к параметрам океана позволяет упростить решение обратных задач путем использования соответствующих каналов радиометров;

Разделение задач

$$T_я = \frac{\partial T_я}{\partial T_s} \cdot T_s + \frac{\partial T_я}{\partial V} \cdot V + \frac{\partial T_я}{\partial S} \cdot S + \frac{\partial T_я}{\partial Q} \cdot Q + \frac{\partial T_я}{\partial W} \cdot W + \frac{\partial T_я}{\partial R} \cdot R + \sum \frac{\partial T_я}{\partial P} \cdot P$$

Для оценки солености – L – диапазон:

$$T_я \approx \frac{\partial T_я}{\partial T_s} \cdot T_s + \frac{\partial T_я}{\partial S} \cdot S + \frac{\partial T_я}{\partial V} \cdot V$$

Для оценки температуры океана – C – диапазон:

$$T_я \approx \frac{\partial T_я}{\partial T_s} \cdot T_s + \frac{\partial T_я}{\partial V} \cdot V$$

Для оценки скорости приводного ветра – C, X – диапазон для плотных атмосфер

$$T_я \approx \frac{\partial T_я}{\partial T_s} \cdot T_s + \frac{\partial T_я}{\partial V} \cdot V$$

K, Ka - диапазон для прозрачных атмосфер

$$T_я \approx \frac{\partial T_я}{\partial V} \cdot V + \frac{\partial T_я}{\partial Q} \cdot Q + \frac{\partial T_я}{\partial W} \cdot W$$

Для оценки влаго-и водозапаса – X, K, Ka – диапазон:

$$T_я \approx \frac{\partial T_я}{\partial V} \cdot V + \frac{\partial T_я}{\partial Q} \cdot Q + \frac{\partial T_я}{\partial W} \cdot W$$

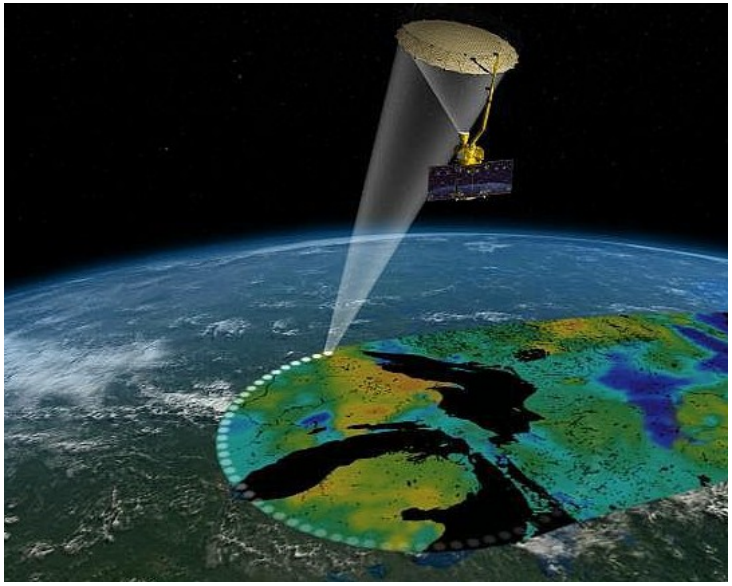
Определение солености океана по данным радиометров L-диапазона

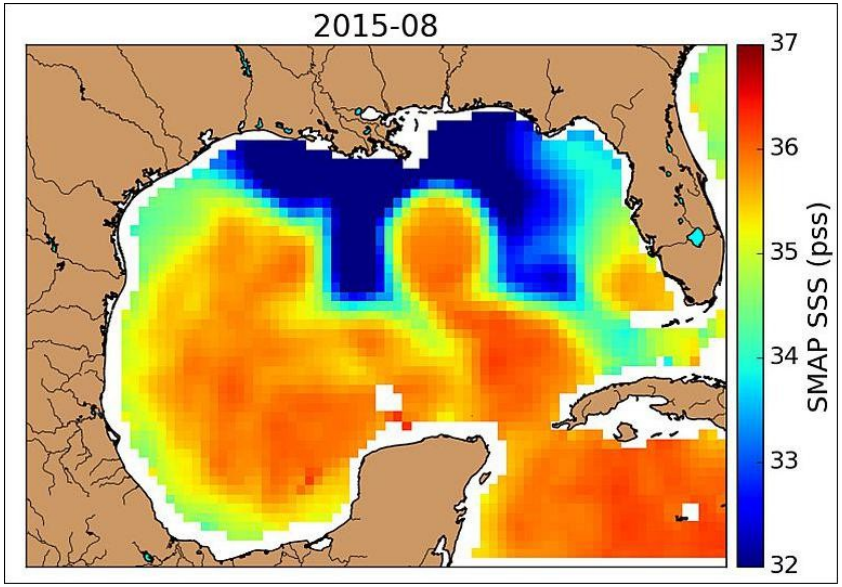
Частота ν = 1.4 ГГц, вертикальная и горизонтальная поляризации

•Осуществляется в настоящее время с использованием данных радиометров - на спутниках SMOS (уникальный радиометрический интерферометр MIRAS, разрешение 35×150 км) с 2009 года, Aquarius с 2011 года (150 ×150 км) и SMAP (~40 × 40 км) с 2015 г.;

•Использует коррекцию на атмосферу, влияние ветра и температуры океана на $T_я$ путем использования данных ECMWF;

•Алгоритм состоит из итерационной схемы поиска наилучшего соответствия между измеренными значениями $T_я$ и модельными $T_я$;





распреснение в Мексиканском заливе после наводнения в Техасе в мае 2015 по данным SMAP

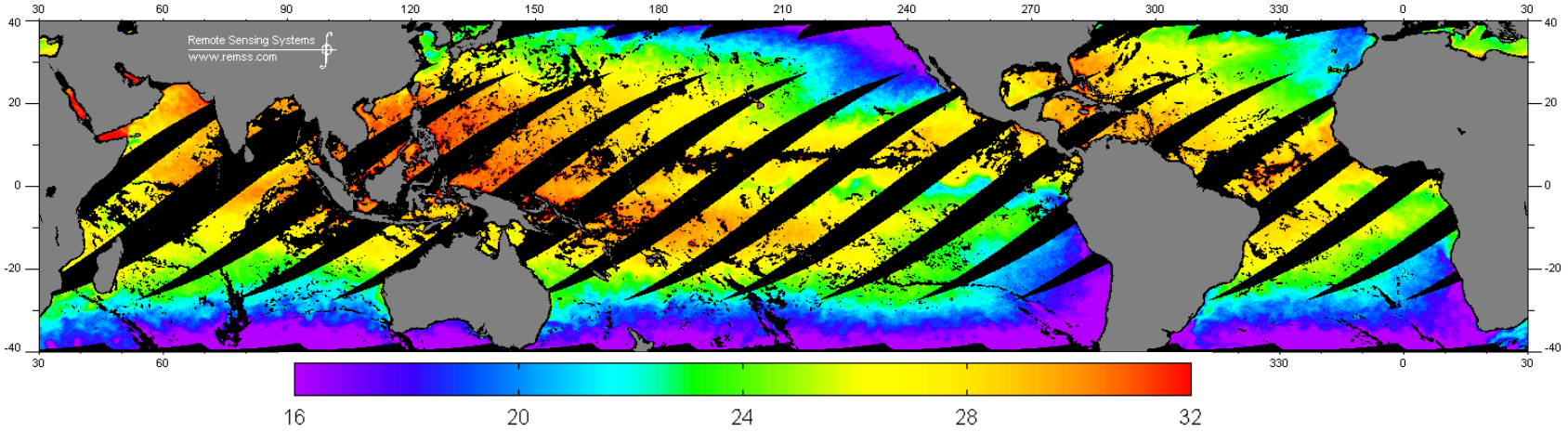
Определение температуры океана

- Обязательно используется С-диапазон микроволновых радиометров (RSS для TMI использует X);
- Большинство алгоритмов основаны на использовании регрессионного анализа, основанного либо на массивах модельных значений $T_я$, либо на совмещенных радиометрических и буйковых измерений;
- Текущий оперативный алгоритм (Remote Sensing Systems) использует все каналы кроме высокочастотных (89 ГГц)

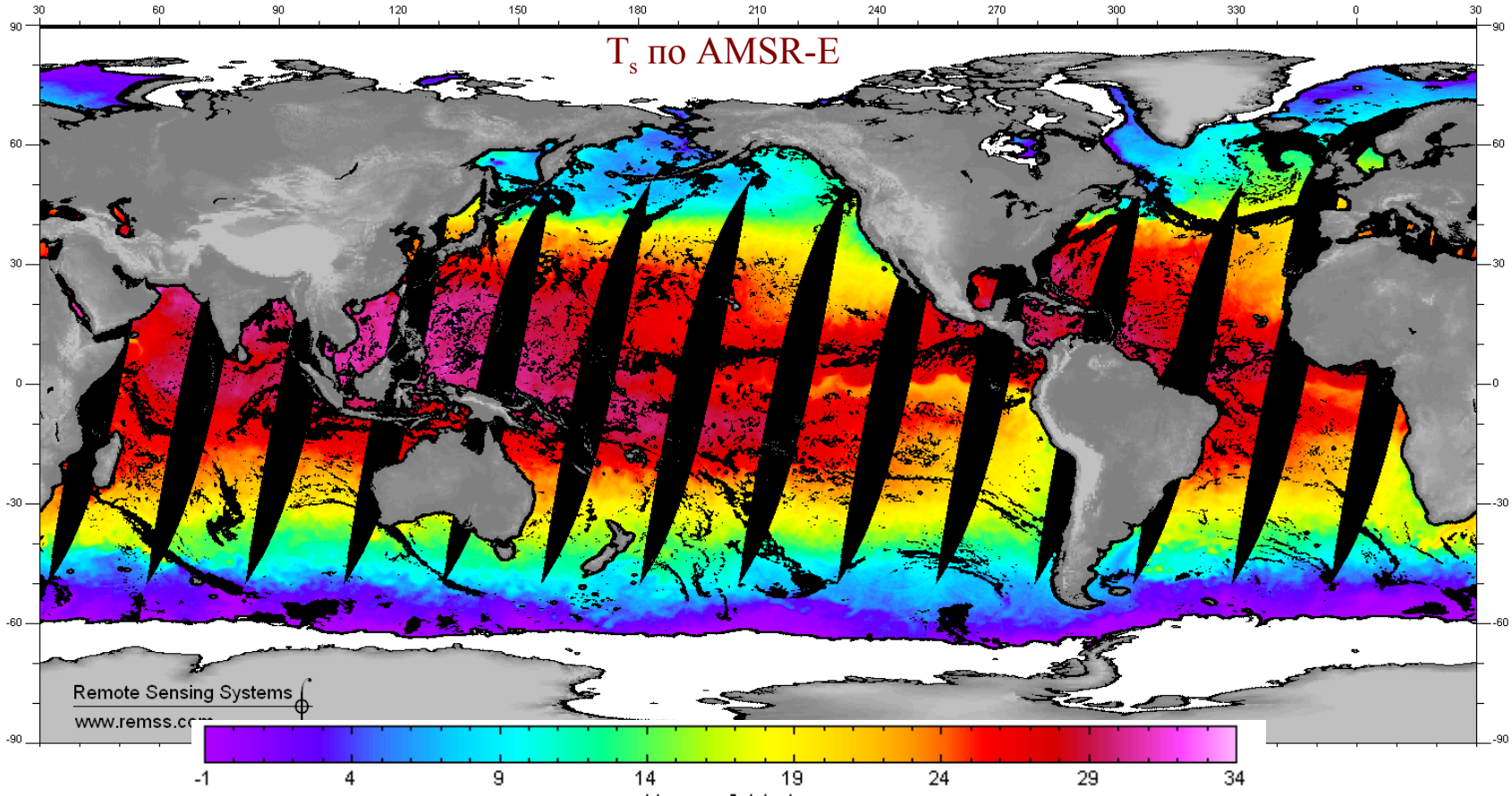
Радиометры, позволяющие оценивать температуру океана:

	частоты	полоса обзора
TMI	10.65-85.5	780
WindSat	6.8-37	1025
AMSR-E-AMSR2	6.9-89	1450

T_s по TMI



T_s по AMSR-E



Определение температуры океана:

	ИК	пассивные микроволны
Энергия излучения	велика (+)	мала (-)
Чувствительность $T_я$ к T_s	велика (+)	мала (-)
Коэффициент излучения	~1 (+)	~0.5 (-)
Влияние состояния морской поверхности	не влияет (+)	влияет (-)
Пространственное разрешение	высокое (+)	низкое (-)
Влияние угла зондирования	не влияет (+)	влияет (-)
Абсолютная калибровка	устойчивая (+)	неустойчивая (-)
Чувствительность приемников	0.1 К (+)	1.5 К влияет (-)
Погрешность оценки T_s	0.6 К (+)	2 К(-)
Влияние атмосферы	существенно (-) не определяется при наличии облаков	не существенно (+) оценка возможна при наличии облаков

Современные глобальные спутниковые продукты T_s высокого пространственного разрешения создаются на базе совместного использования данных ИК и микроволнов радиометрии

Определение скорости ветра по данным пассивных спутниковых микроволновых радиометров

- Алгоритмы различных исследовательских групп различны как в использовании радиометрических каналов, так и в методологическом подходе
- В связи с отсутствием систематизированных знаний об эффекте влияния ветра на коэффициент излучения океана большинство подходов является статистическими;
- Для оценки в условиях прозрачных атмосфер используются K, Ka каналы, в плотных атмосферах - C, X, в условиях ливневых осадков – L-диапазон

На сегодняшний день данные спутниковых пассивных микроволновых радиометров являются единственным источником регулярной глобальной всепогодной информации о скоростях ветра

Радиометры, позволяющие оценивать ветер

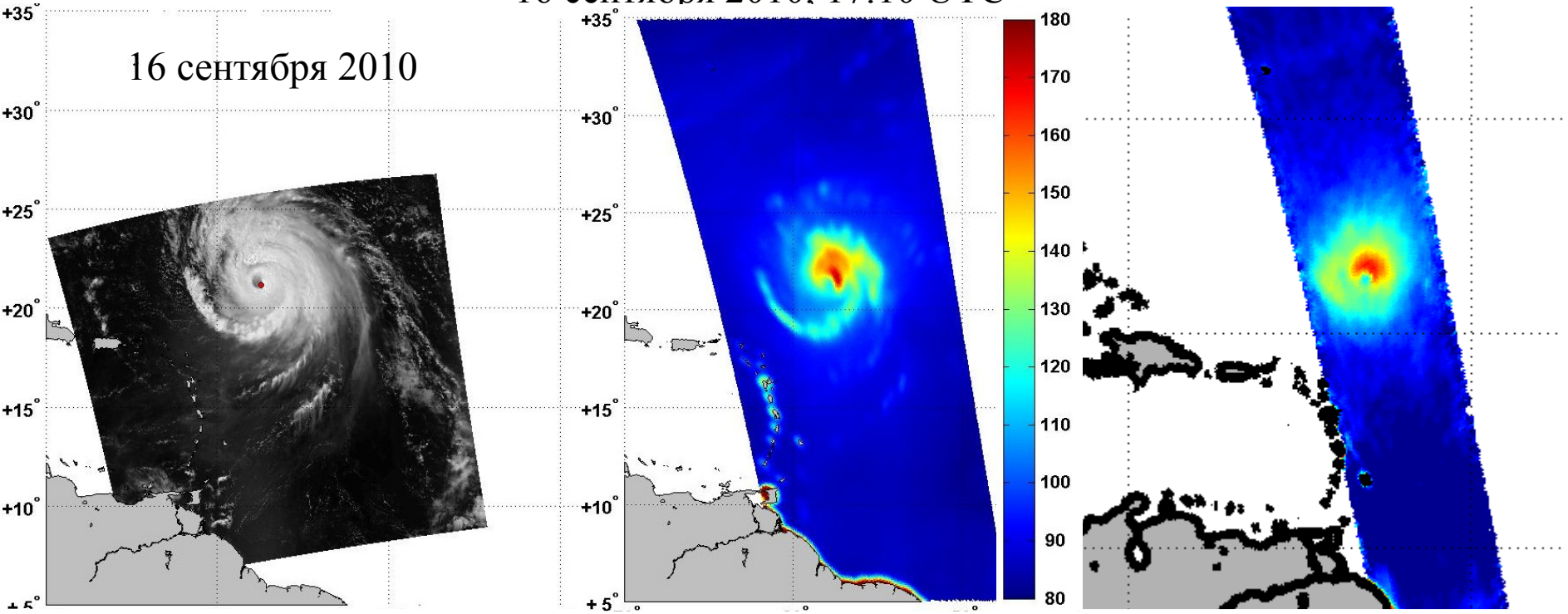
SSM/I, SSMIS	В условиях оптически прозрачных атмосфер
TMI, GMI	
WindSat	В условиях оптически плотных атмосфер, определяет также направление ветра
AMSR-E, AMSR2	
SMOS, SMAP	В условиях осадков

Данные спутниковых пассивных микроволновых радиометров позволяют оценивать скорость ветра в условиях тропических ураганов, в отличие от активных микроволновых инструментов, сигнал которых насыщается при V > 15 м/с

Проблема разделения излучения поверхности и излучения атмосферы в условиях осадков

Ураган 4-й категории Игорь Атлантическом Океане 8-19 сентября 2010

16 сентября 2010, 17:10 UTC



Aqua MODIS

17:10 UTC

Aqua AMSR-E, 6.9 ГГц, Г

17:10 UTC

SMOS, (Tx+Ty)/2

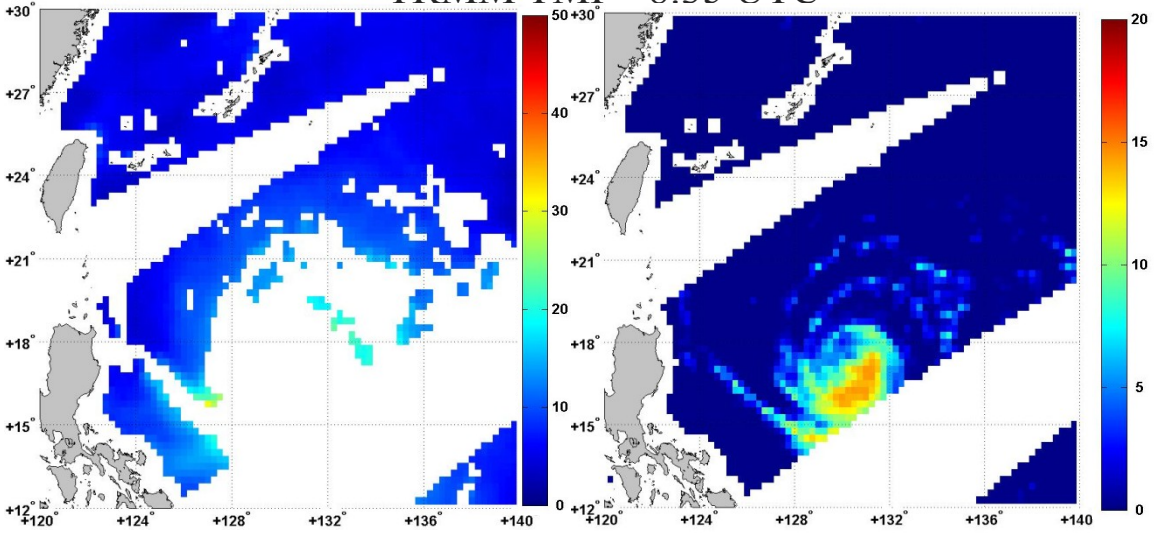
17 сентября 2010

Reul Nicolas, Tenerelli Joseph, Chapron Bertrand, Vandemark Doug, Quilfen Yves, Kerr Yann (2012). **SMOS satellite L-band radiometer: A new capability for ocean surface remote sensing in hurricanes**. *Journal Of Geophysical Research-oceans*, 117, -.http://dx.doi.org/10.1029/2011JC007474

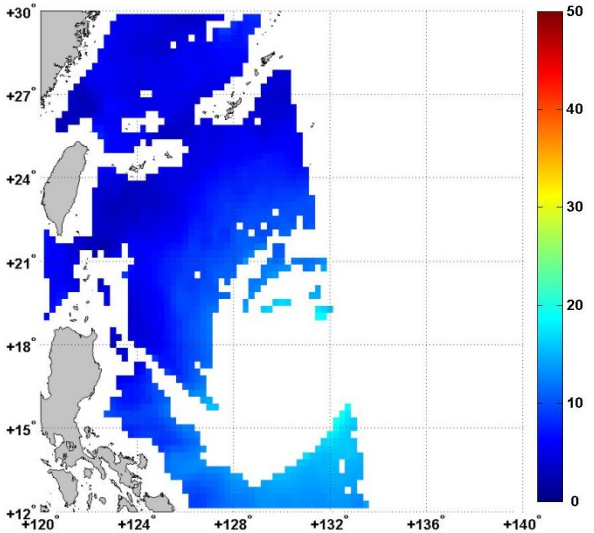
Поле скорости ветра в урагане Халонг ночью-утром 4 августа 2014 по данным спутниковых измерений

по данным JTWC V_{max} = 45 м/с

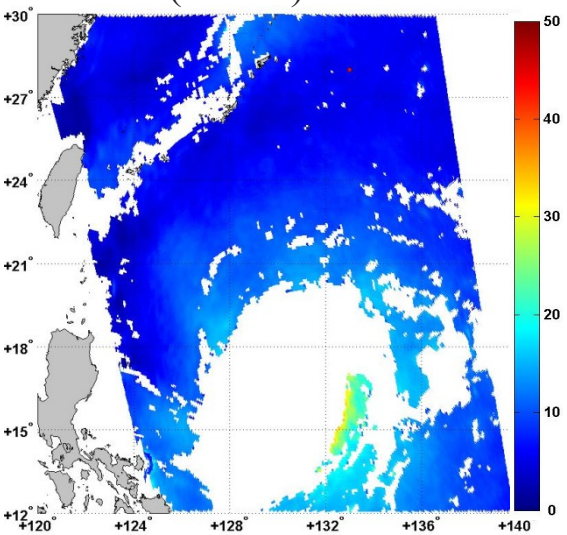
TRMM TMI ~ 8:35 UTC



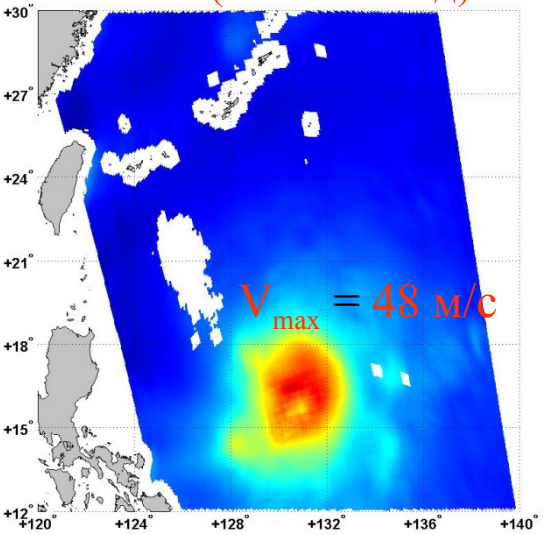
WindSat ~ 9:25 UTC



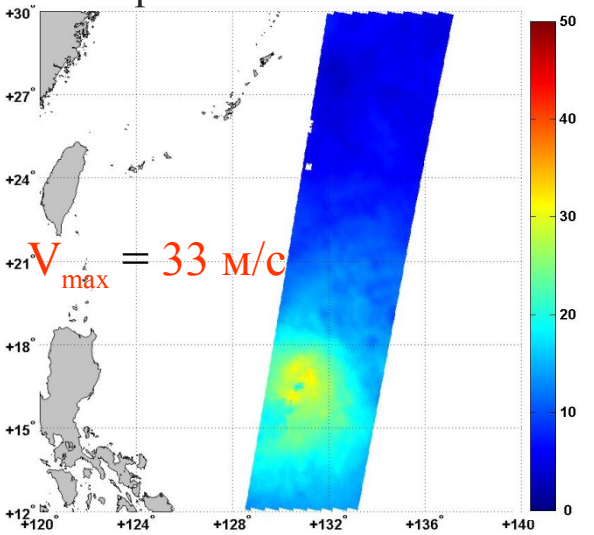
AMSR2 (JAXA) ~ 4:40 UTC



AMSR2 (новый метод)



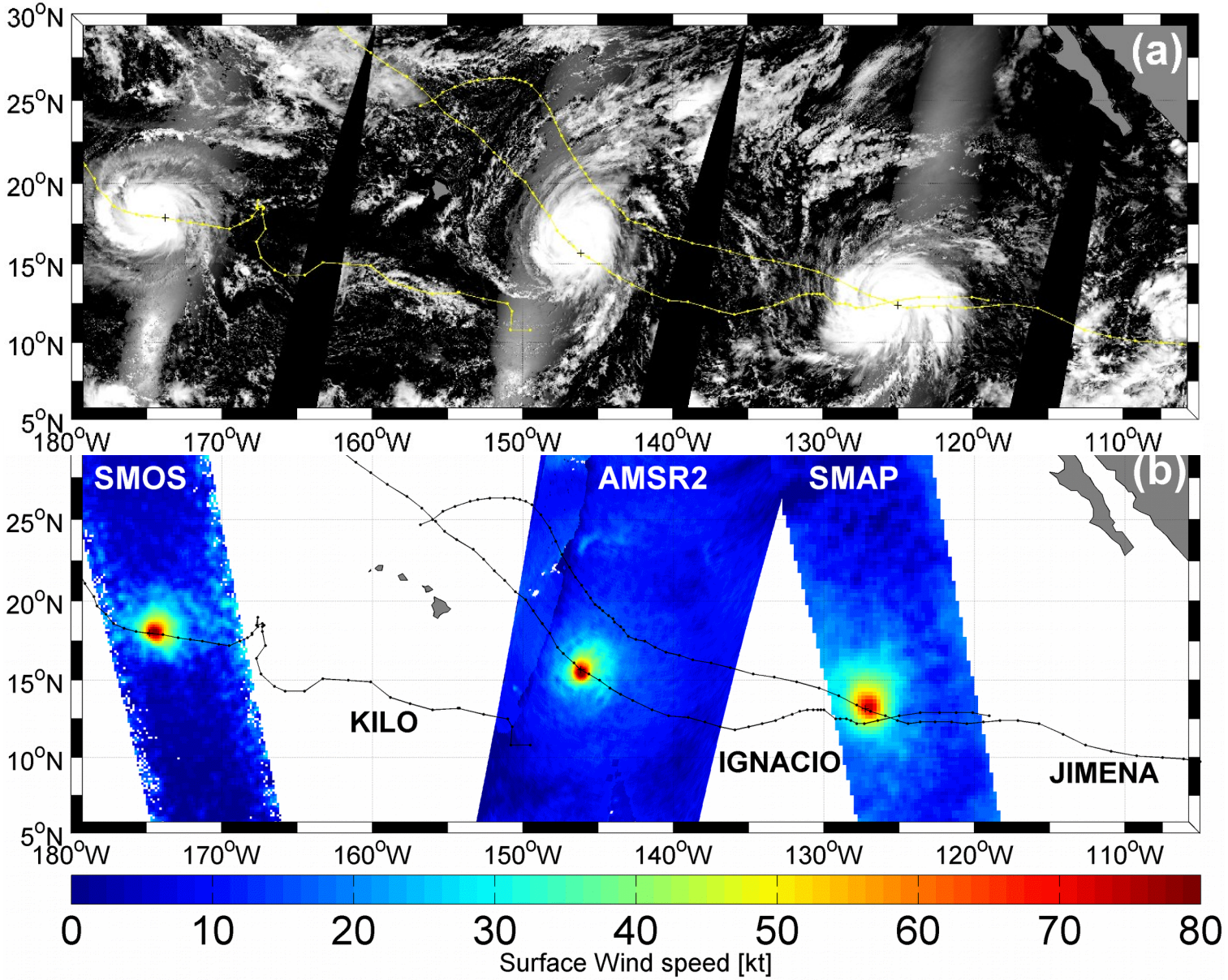
Metop-A ASCAT ~ 0:00 UTC



Совместный продукт по скорости ветра на основании данных AMSR2, SMOS и SMAP

NASA's Terra

29 August 2015



Типы спутниковых данных для зондирования морского льда

- Радиолокационные измерения;

  пространственное разрешение от низкого – десятки км - до высокого – десятки м;

  скаттерометры, альтиметры, радиолокаторы, РСА

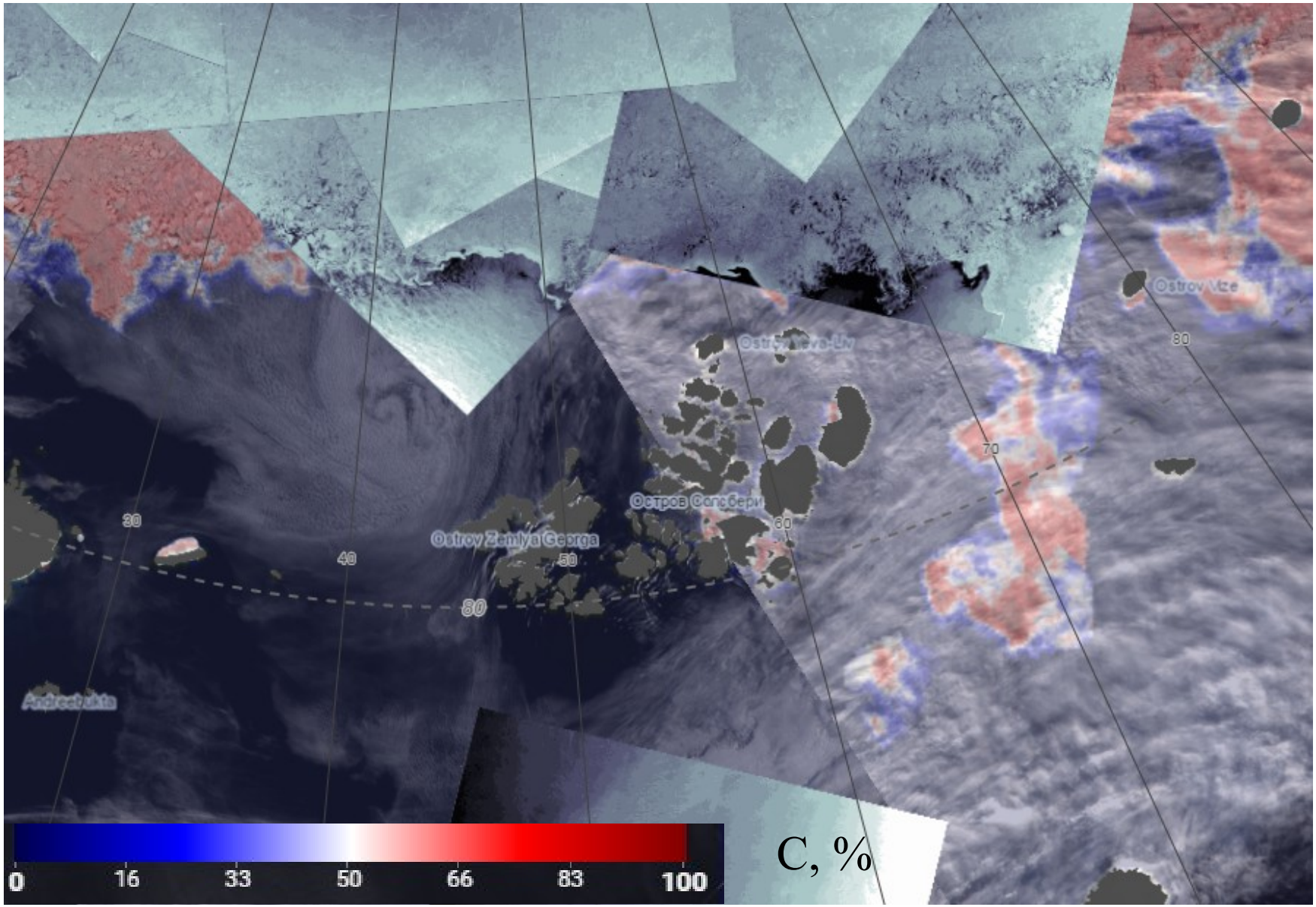
- Измерения спектральных радиометров в видимом и ИК диапазоне;

  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*

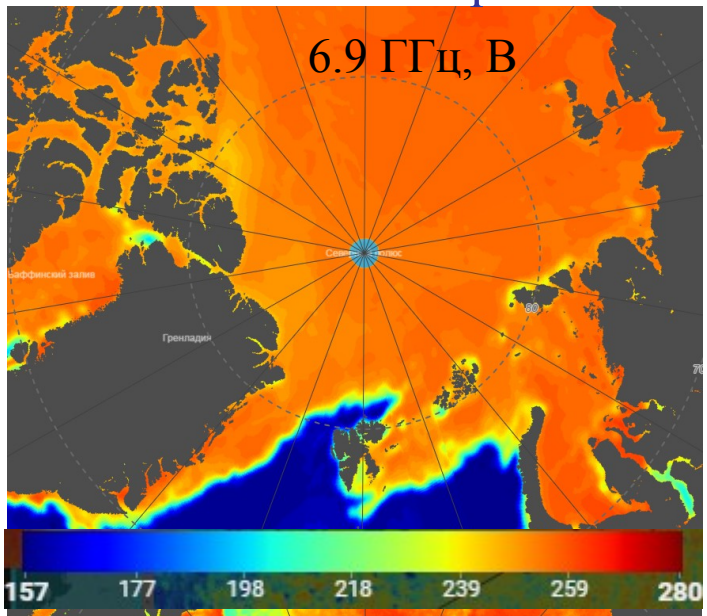

Ostrov Vize
Остров Солсбери
Ostrov Zemlya Georga
Andreebukta
30
40
50
60
70
80
0
16
33
50
66
83
100
C, %

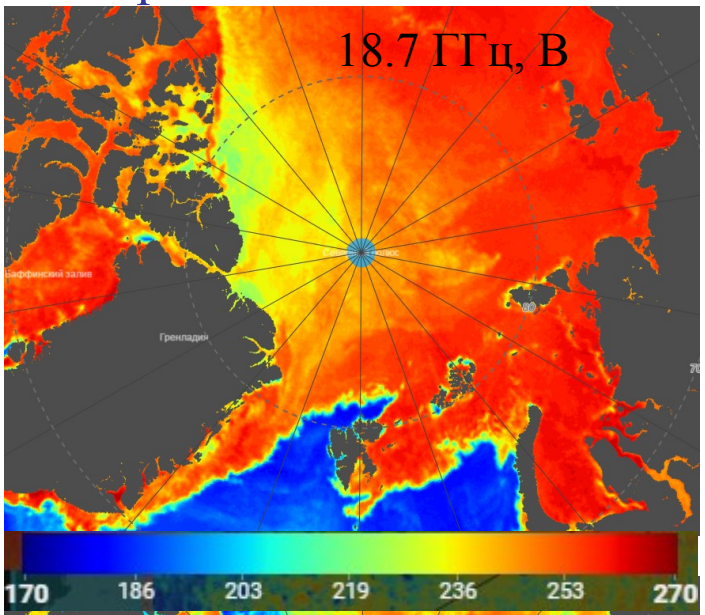
15 июля 2018

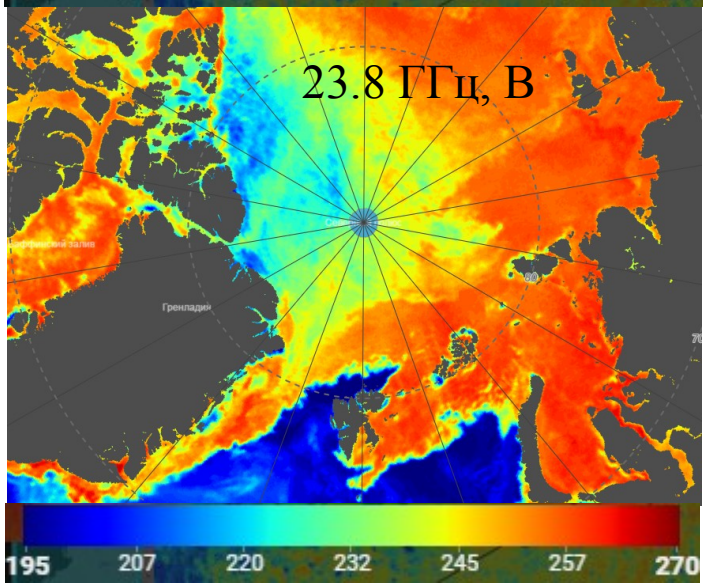
Типы алгоритмов

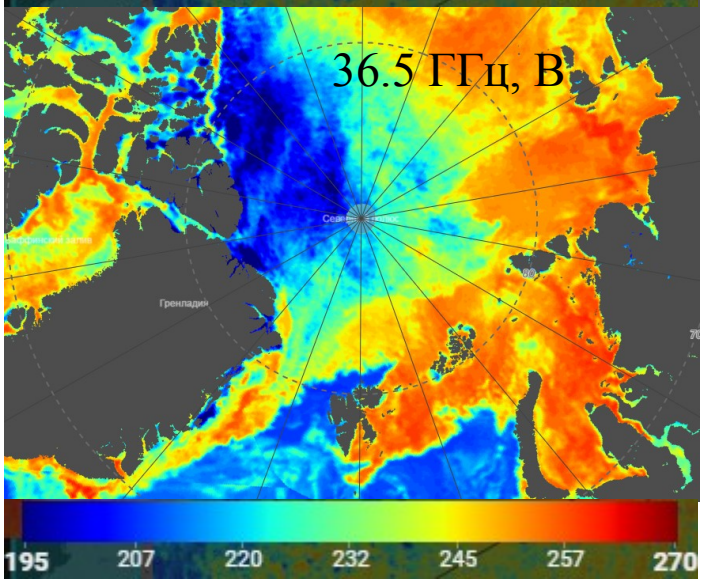
– 1) на основе измерений в Ka, K и Ku диапазонах (18-37 ГГц);

измерения AMSR2 11 апреля 2018





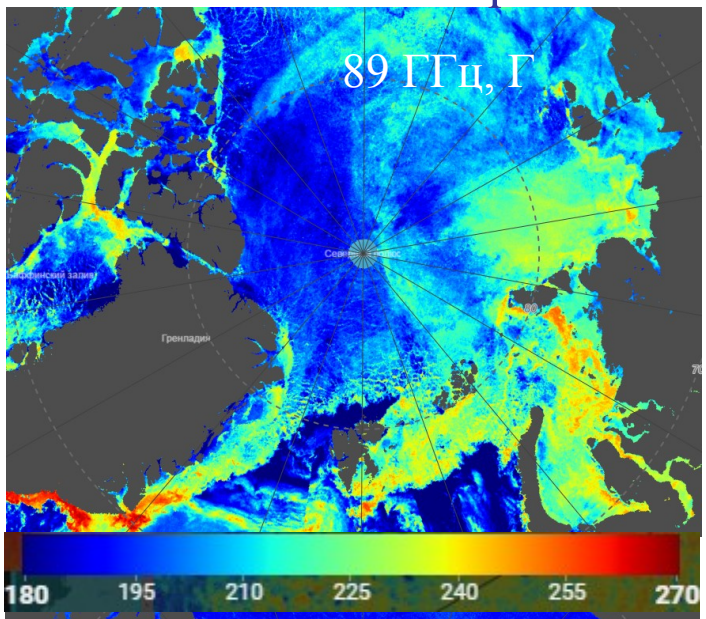


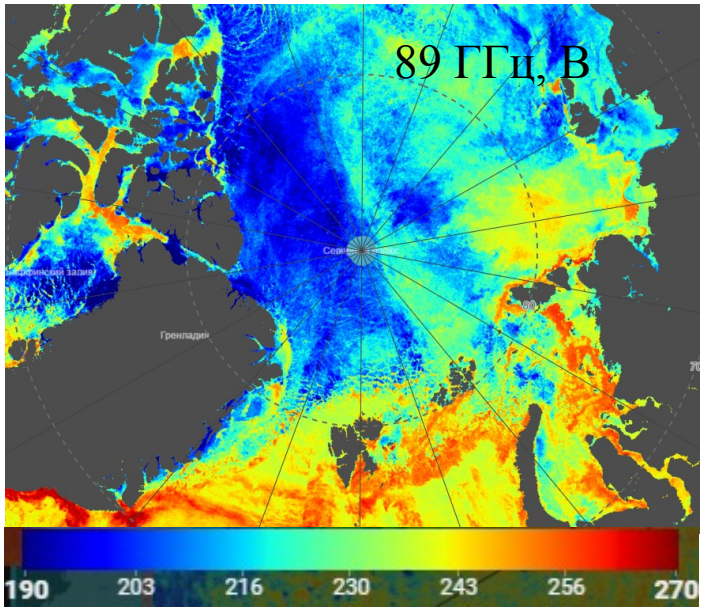


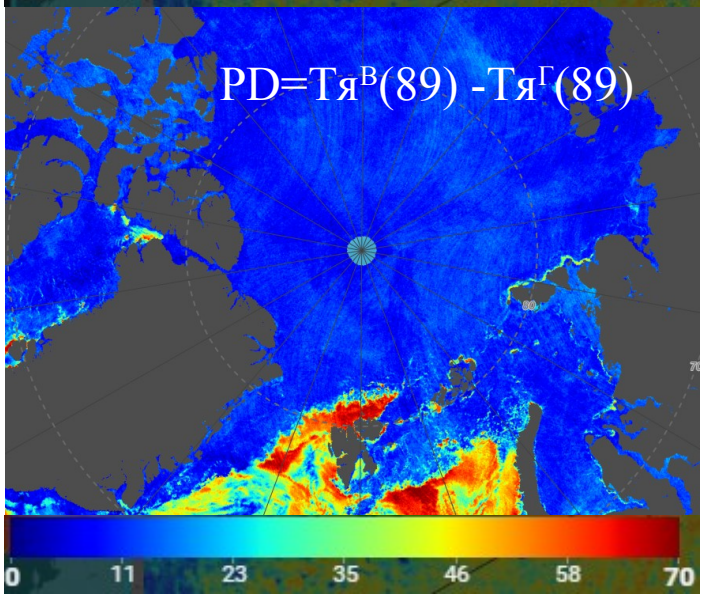
Типы алгоритмов

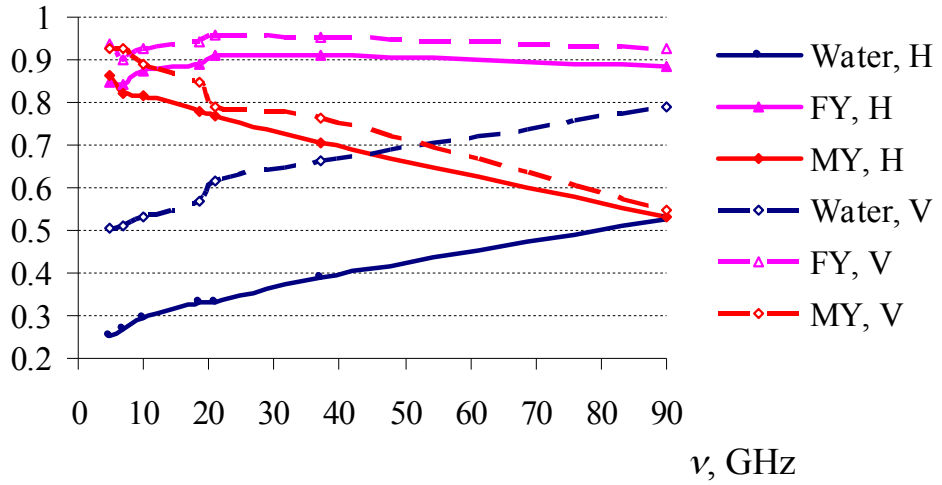
– 2) на основе измерений в W диапазоне (~ 90 ГГц)

измерения AMSR2 11 апреля 2018

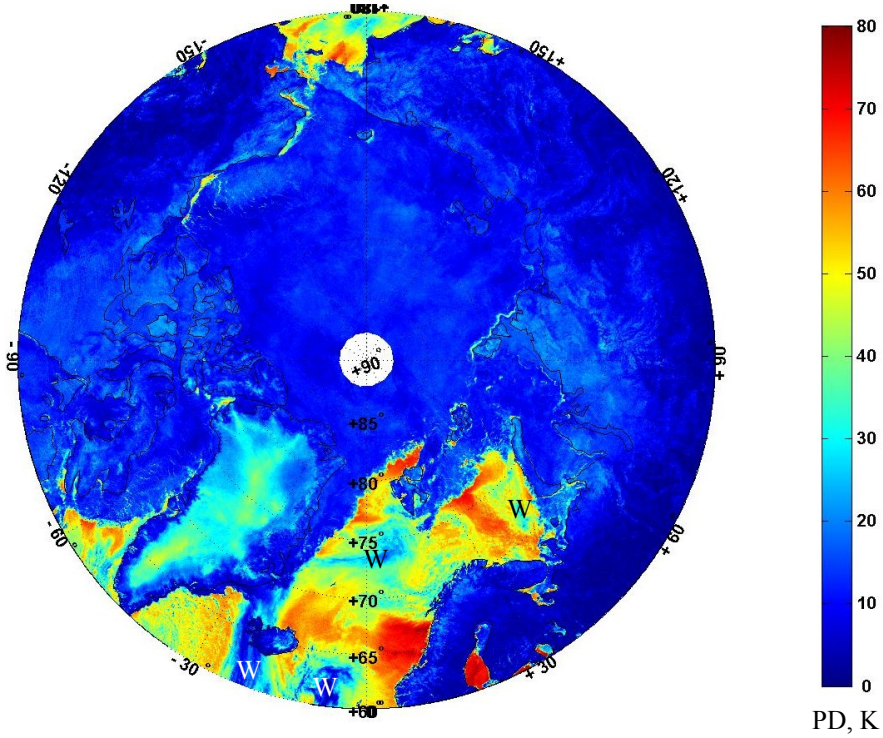








Алгоритмы восстановления сплоченности льда, основанные на использовании PD

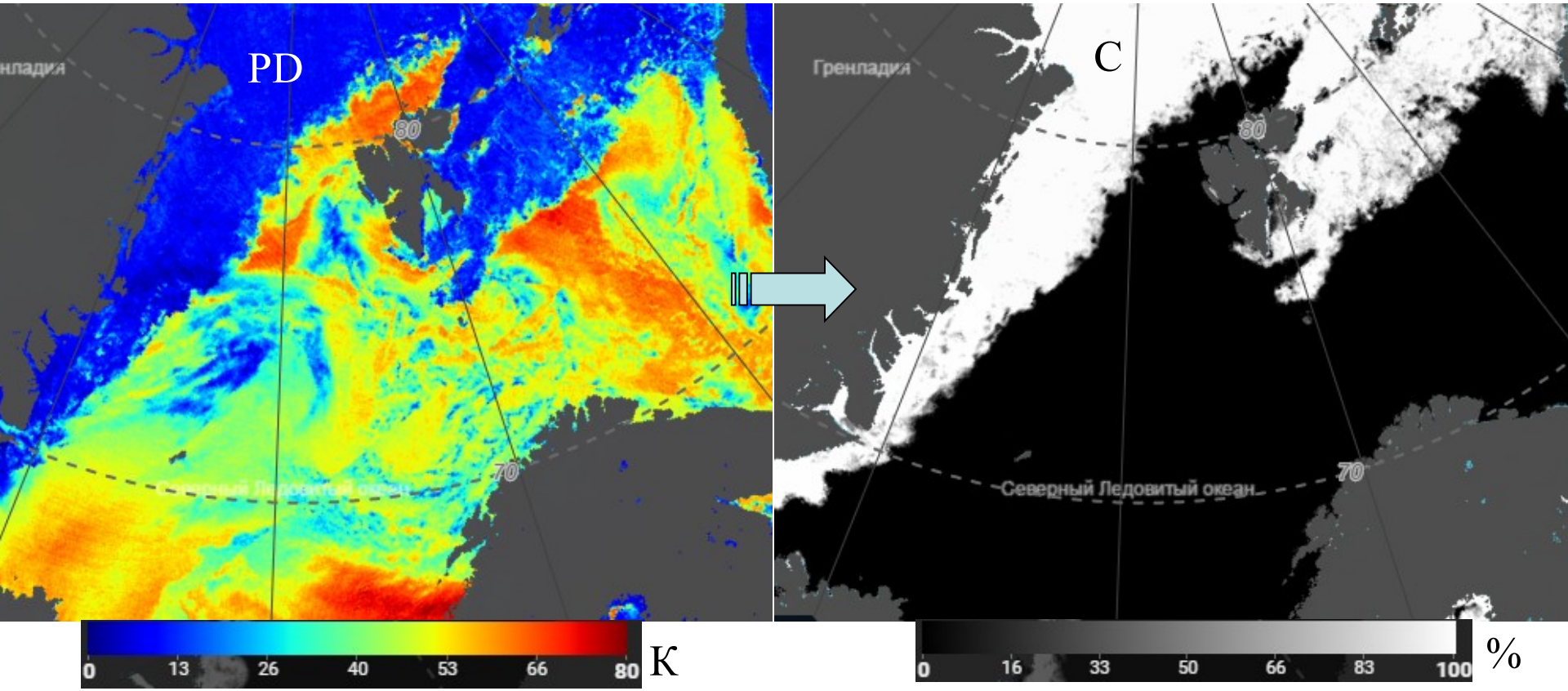


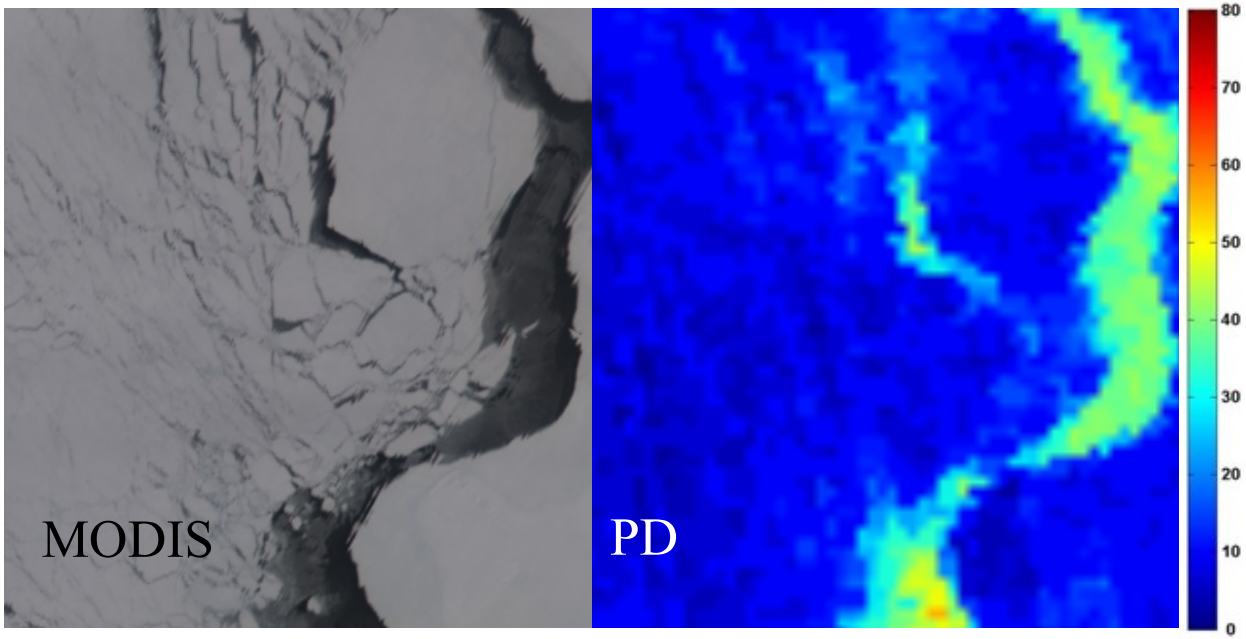
Карта среднедневных значений PD по данным измерений AMSR2 на частоте 89 ГГц для всей Арктики 11 апреля 2018 г.

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 С, 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.

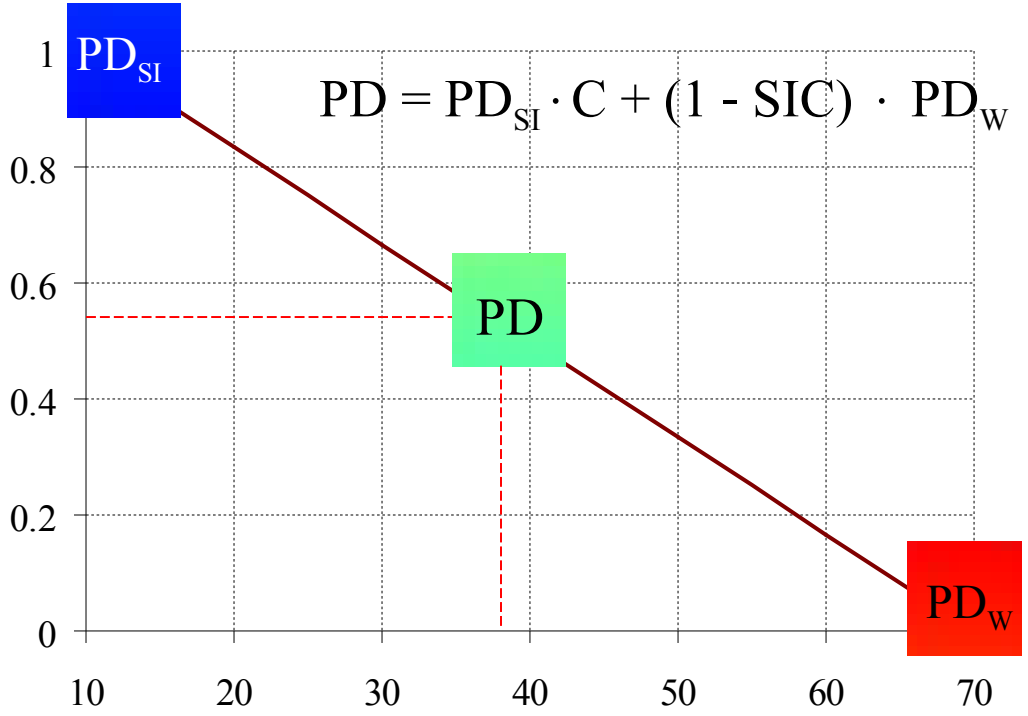




C – концентрация льда (сплоченность)

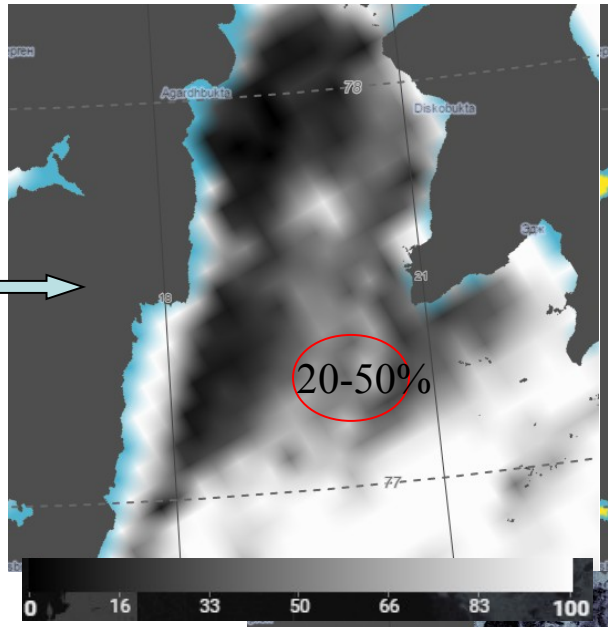
(1-C) – концентрация воды

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

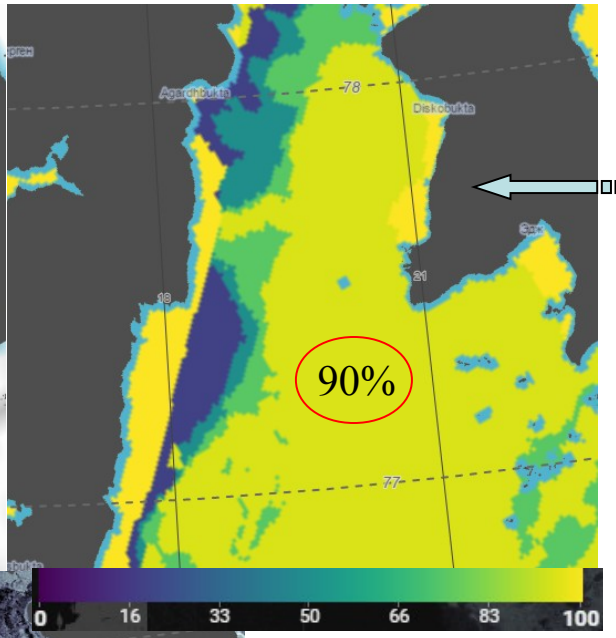


Ошибки оценки сплоченности

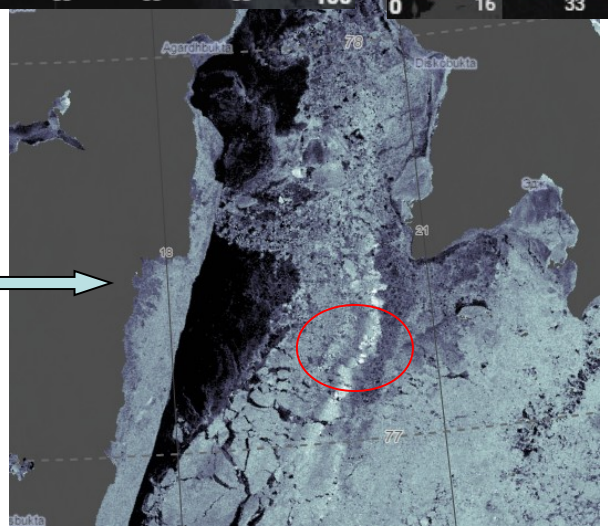
Сплоченность по данным AMSR2 (продукт университета Бремена)



Сплоченность по картам НМИ

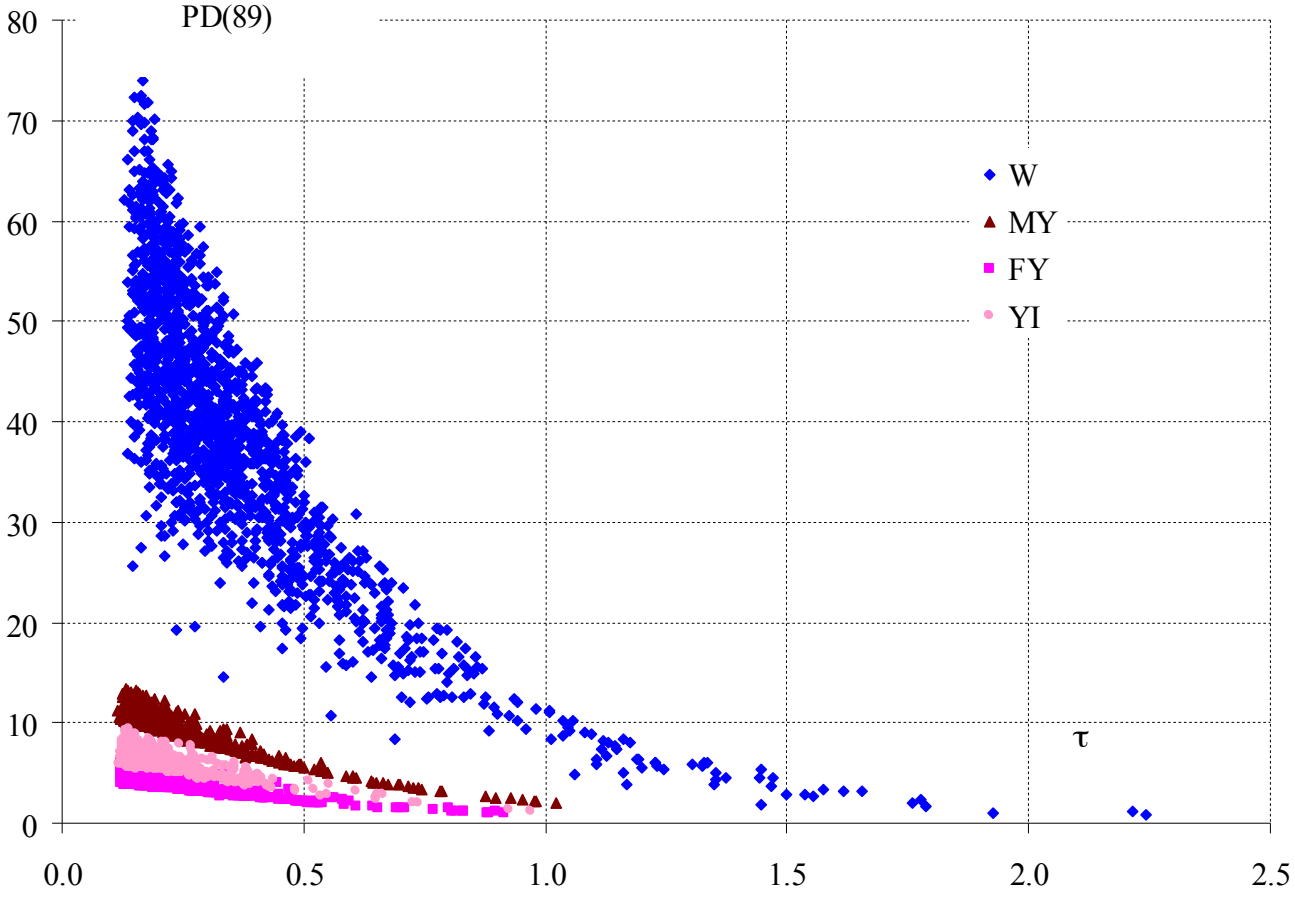


Sentinel 1-B



11 апреля 2018

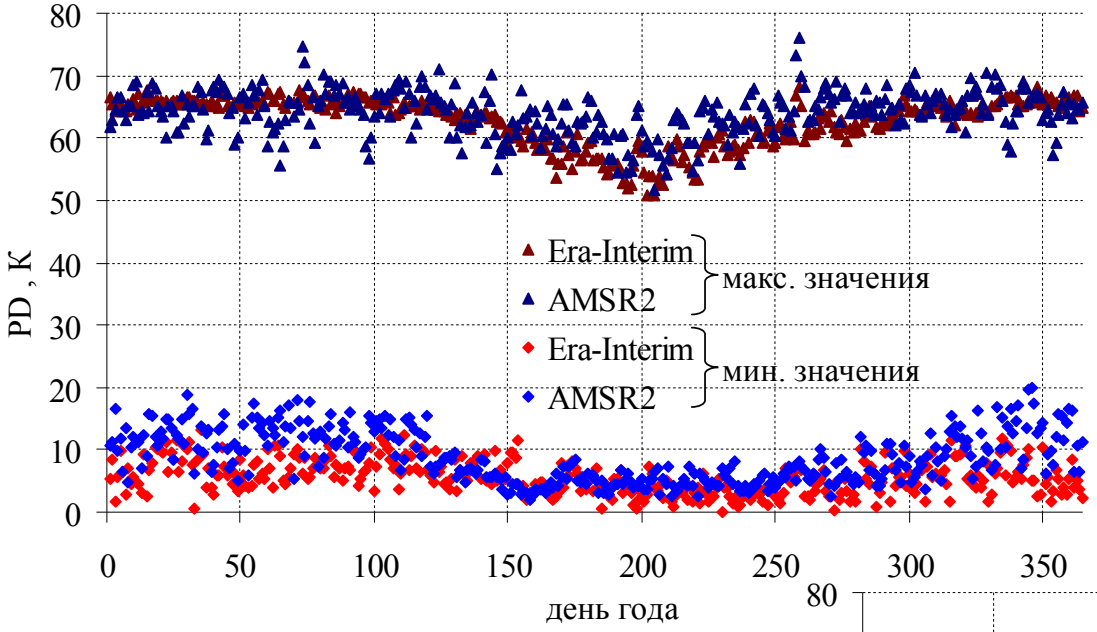
Выбор точек привязки PD_W и PD_{SI}



$$PD_W = \Delta\varepsilon_W \cdot (Ts_W - T_a) \cdot e^{(-\tau)}$$

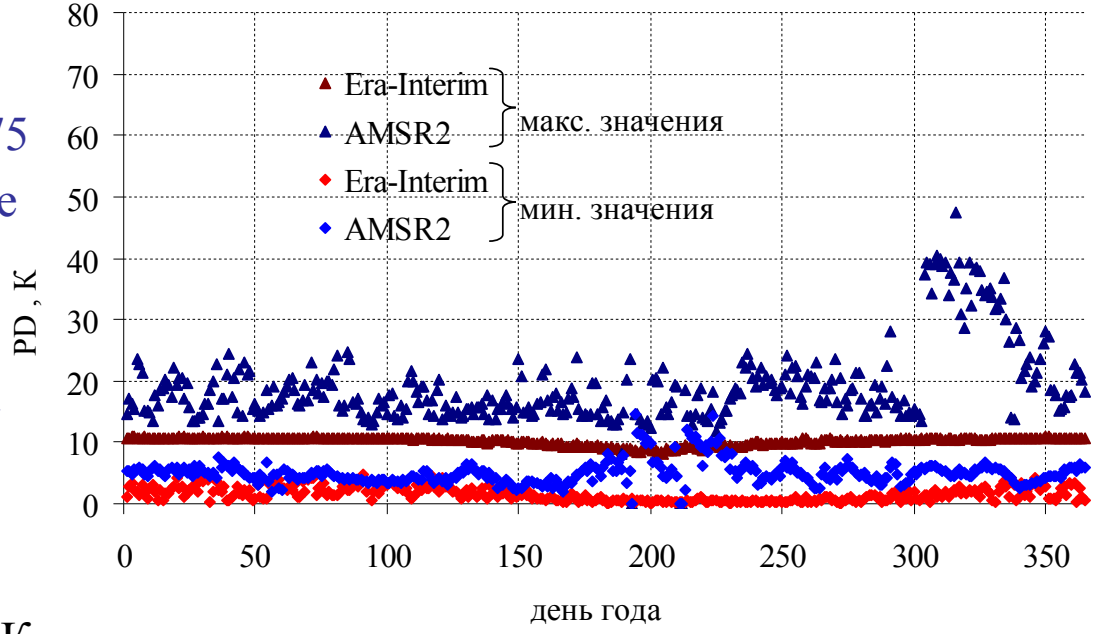
$$PD_{SI} = \Delta\varepsilon_{SI} \cdot (Ts_{SI} - T_a) \cdot e^{(-\tau)}$$

Распределение мин. и макс. PD в Арктике



над морской водой

над морским льдом



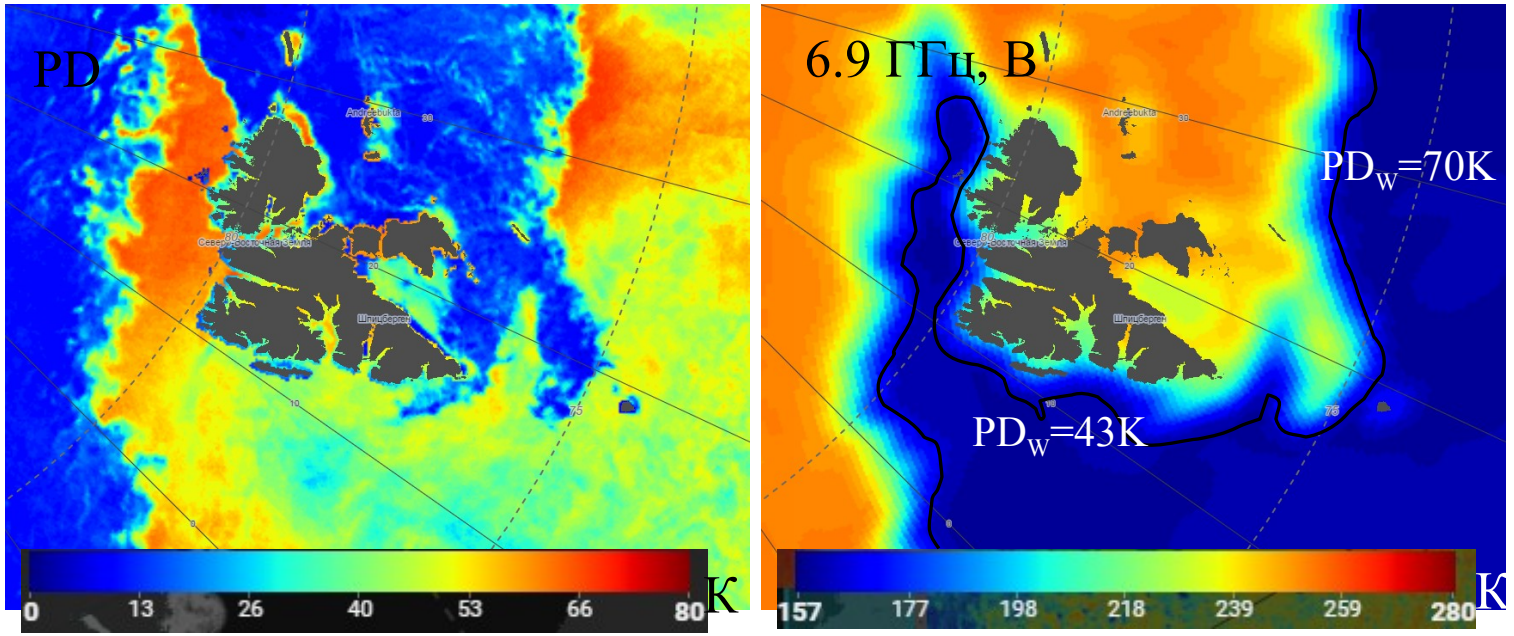
1. Большой разброс PD_W (от 5 до 75 К) Среднегодовое максимальное значение $PD_W \sim 65$ К;
2. Разница между модельными и измеренными PD_W – 15-20К (=> $\sigma_C \sim 20\text{-}60\%$);
3. изменчивость $\Delta PD_{SI} \sim 5 – 25$ К, средние AMSR2 значения ~ 9.7 К

Новый алгоритм

Основан на анализе модельных и измеренных значений PD

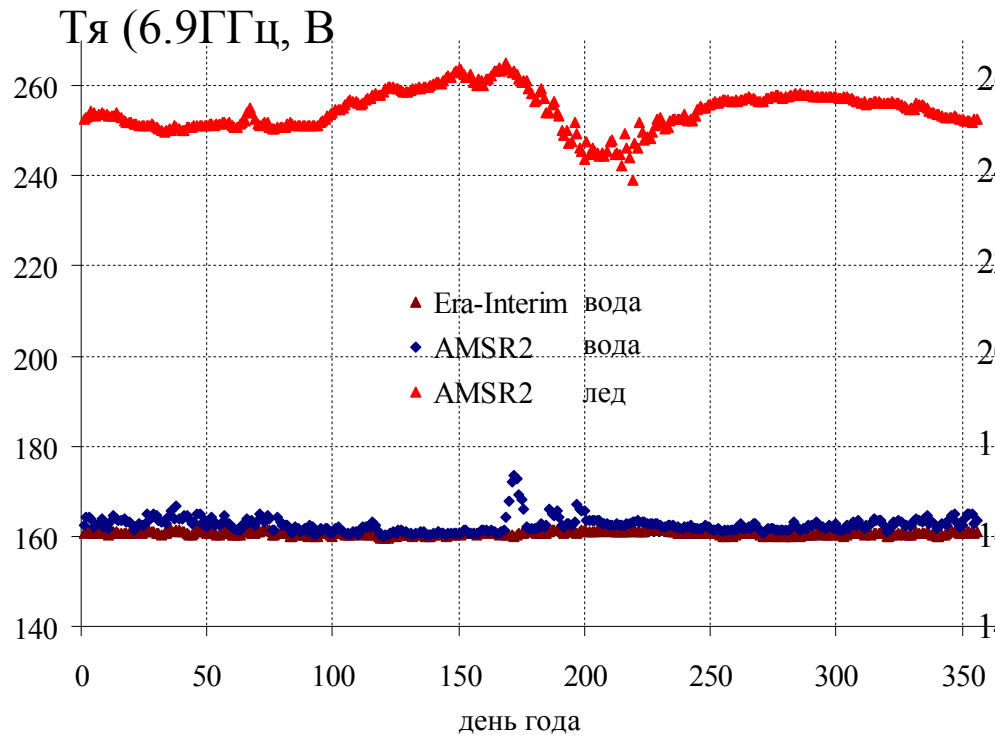
PD_{SI} = 9.7 К; для PD_W используется переменное значение. На расстоянии < 100км от кромки льда используется PD_W, измеренное над элементом морской поверхности, ближайшим к кромке. Вдали от кромки льда, используется PD_W = 65 К.

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

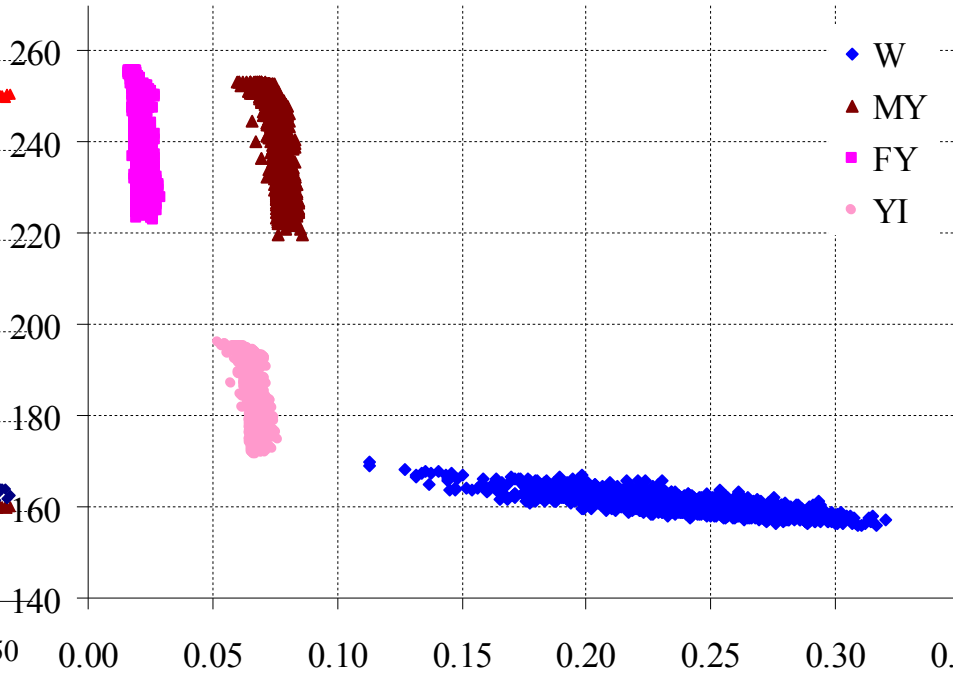


Кромка льда определяется по пороговым значениям Тя на канале 6.9 ГГц вертикальной поляризации 170 К

Определение кромки льда



средние Тя излучения систем *морской лед – атмосфера* и *океан - атмосфера* на 6.9 ГГц (В) в Арктике в 2015 году



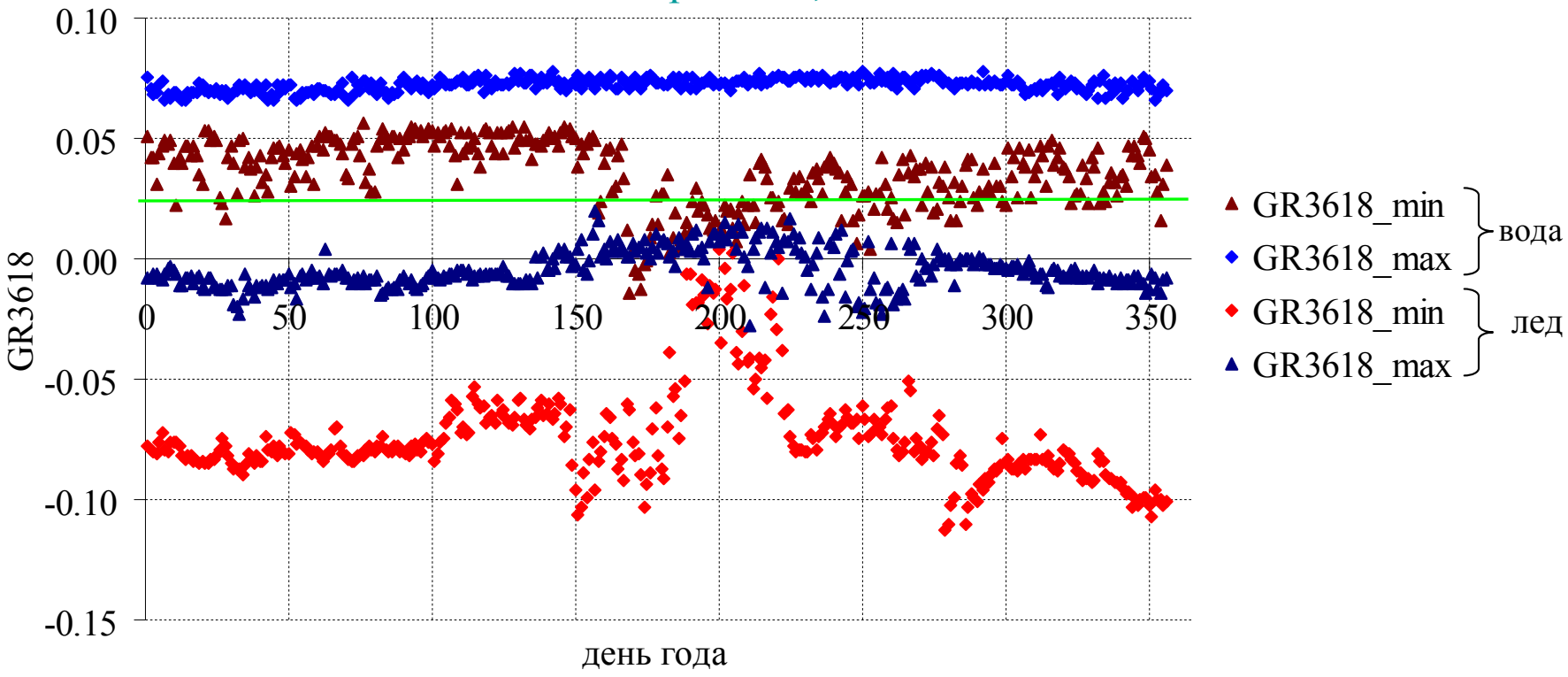
расчетные Тя на 6.9 ГГц (В)

Погодные фильтры

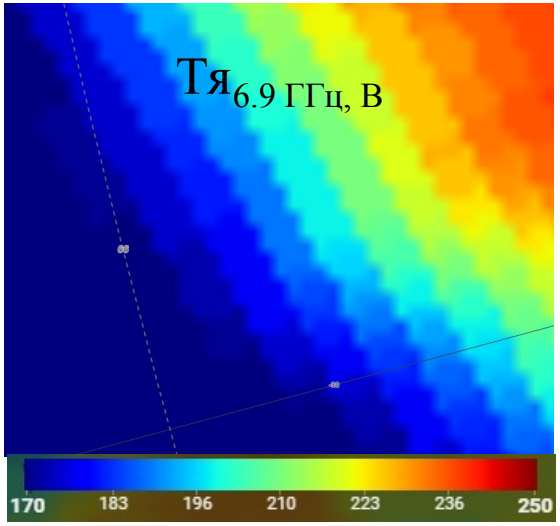
Для фильтрации атмосферы с высокими значениями водозапаса облаков

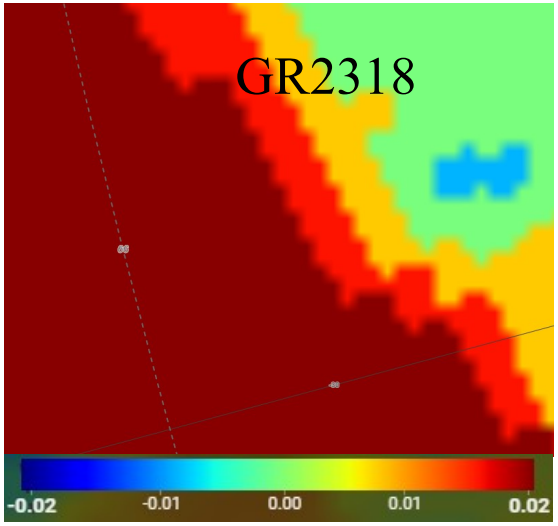
$$GR3618 = (T_я(36.5ГГц, B) - T_я(18.7ГГц, B)) / (T_я(36.5ГГц, B) + T_я(18.7ГГц, B))$$

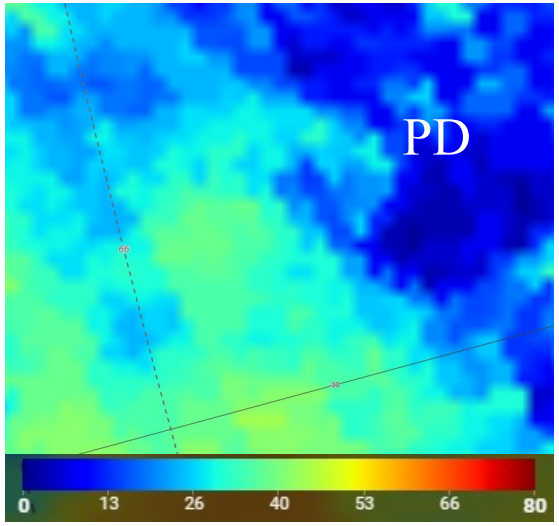
GR3618 ≥0.024 – водная поверхность, свободная ото льда

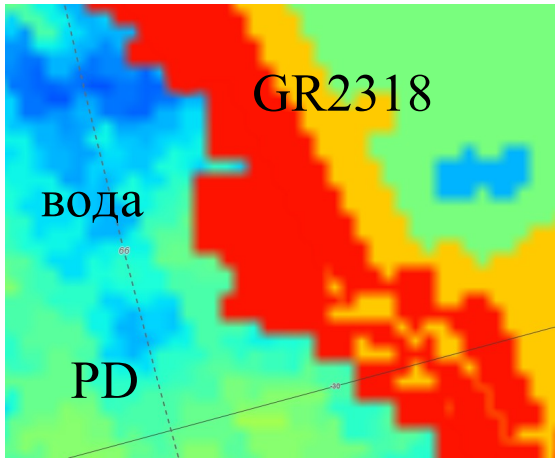


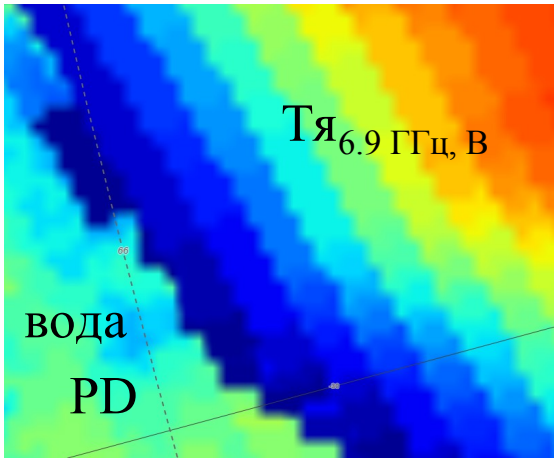
Годовой ход минимальных и максимальных значений GR3618 над водой и над морским льдом по данным измерений AMSR2

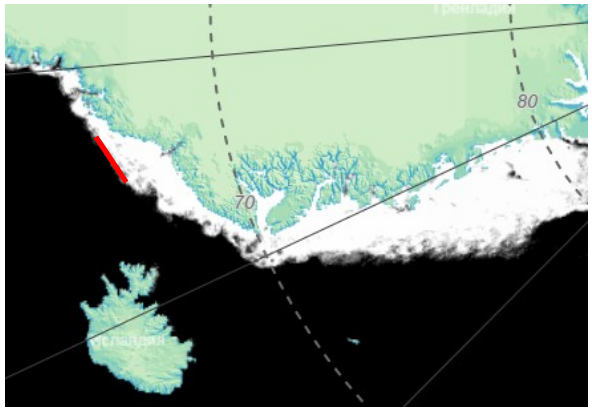








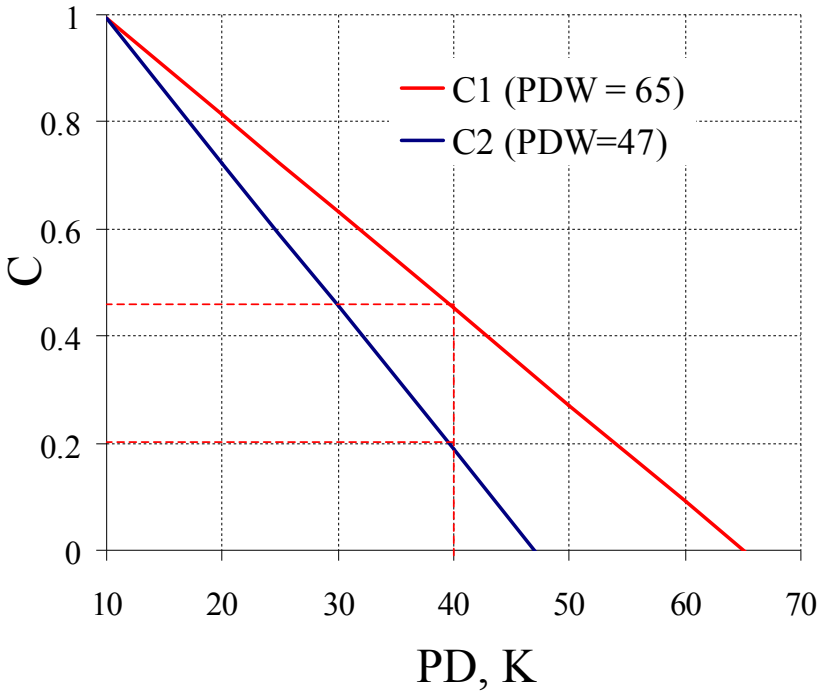


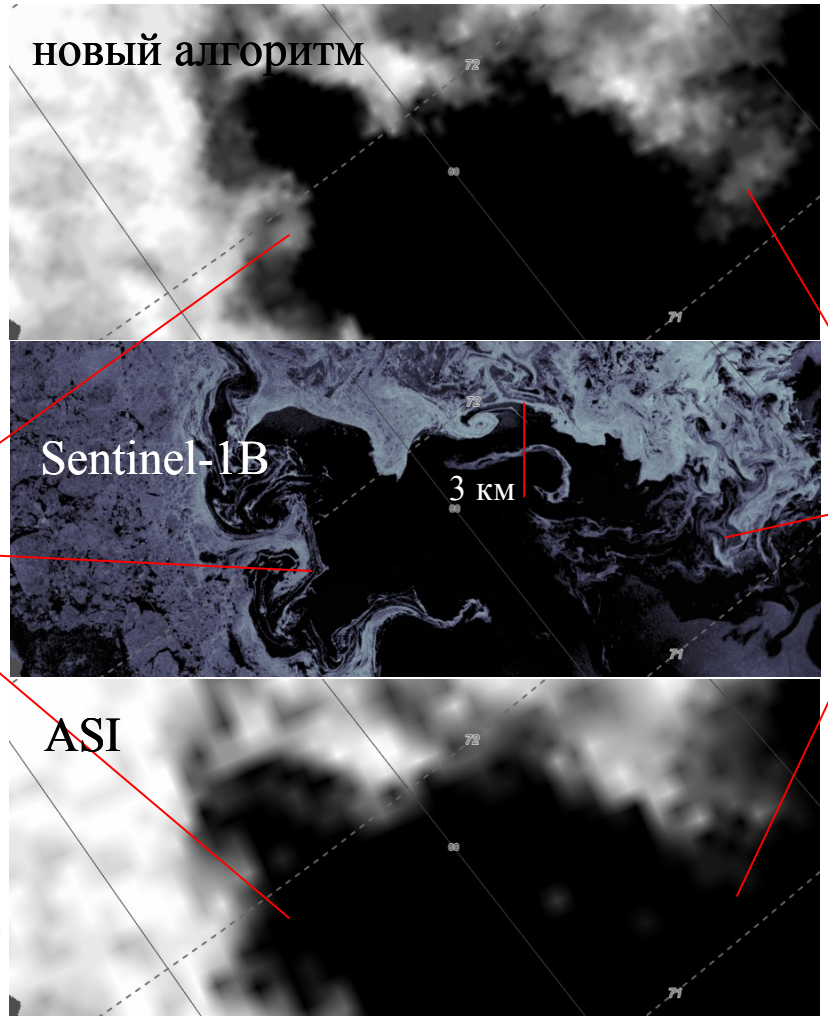


5 января 2018 кромка льда у Гренландии

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

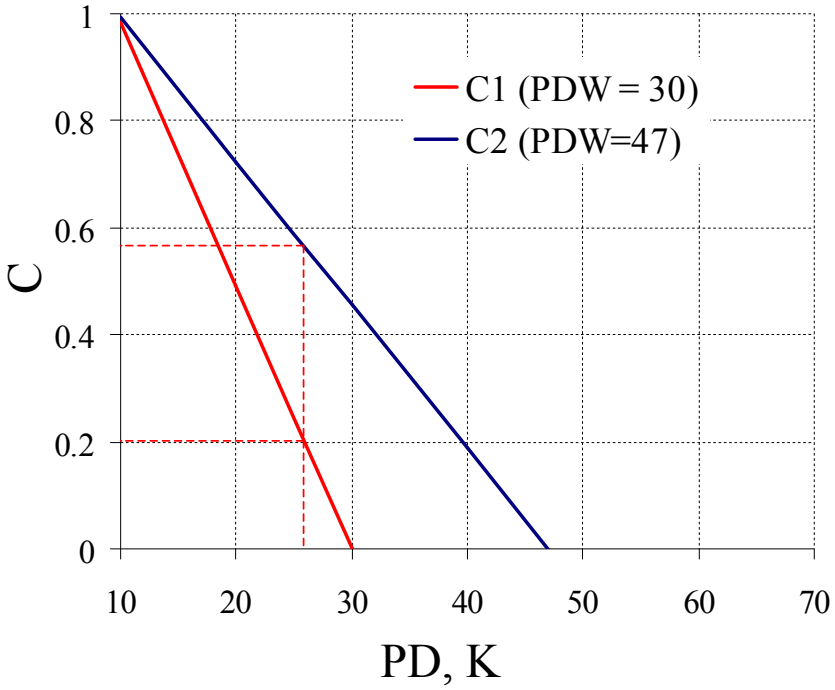


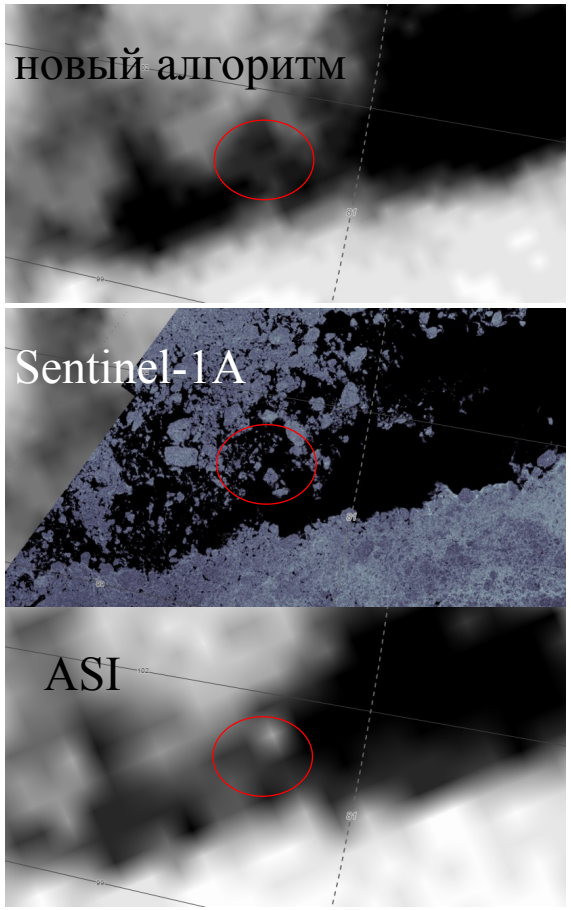


лед в Карском море 5 января 2018

Что дает новый алгоритм?

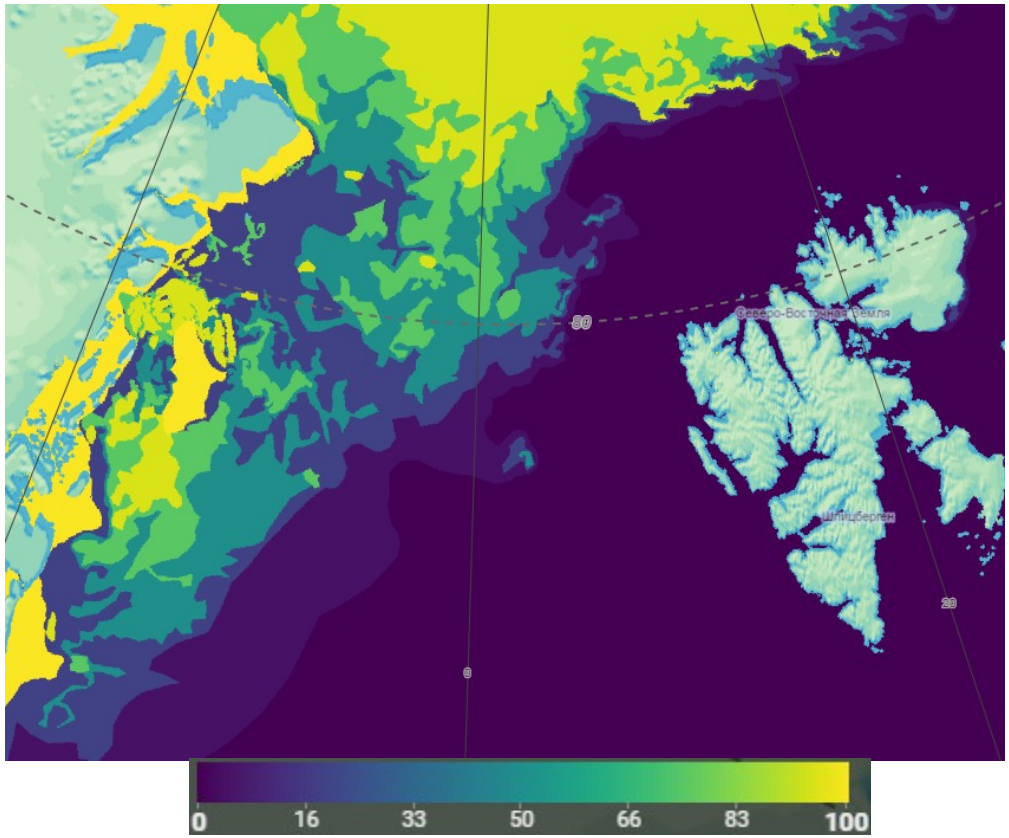
1. Уменьшение оцениваемой сплоченности в области влажных/облачных атмосфер (летние условия), разреженная кромка льда. Отсутствие льда там, где другие алгоритмы демонстрируют его наличие





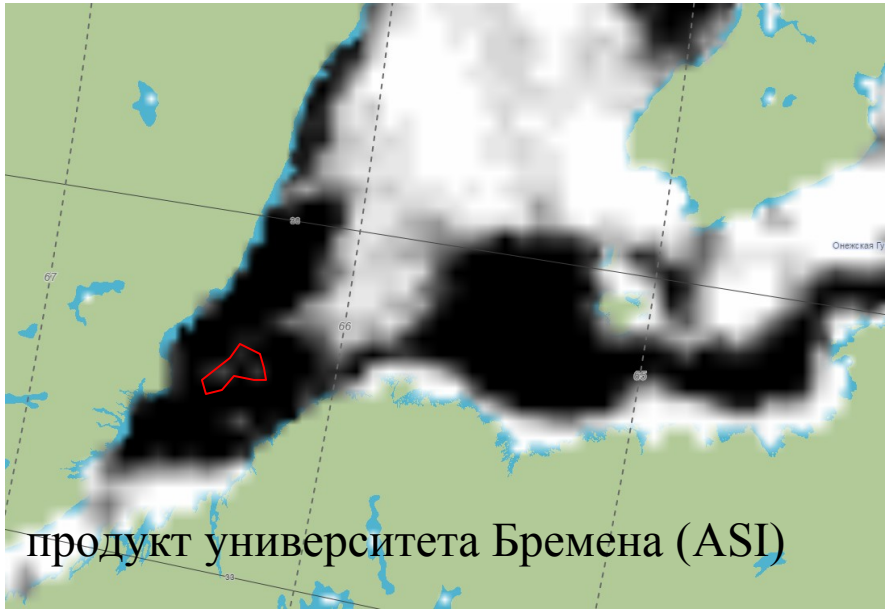
Тестирование метода

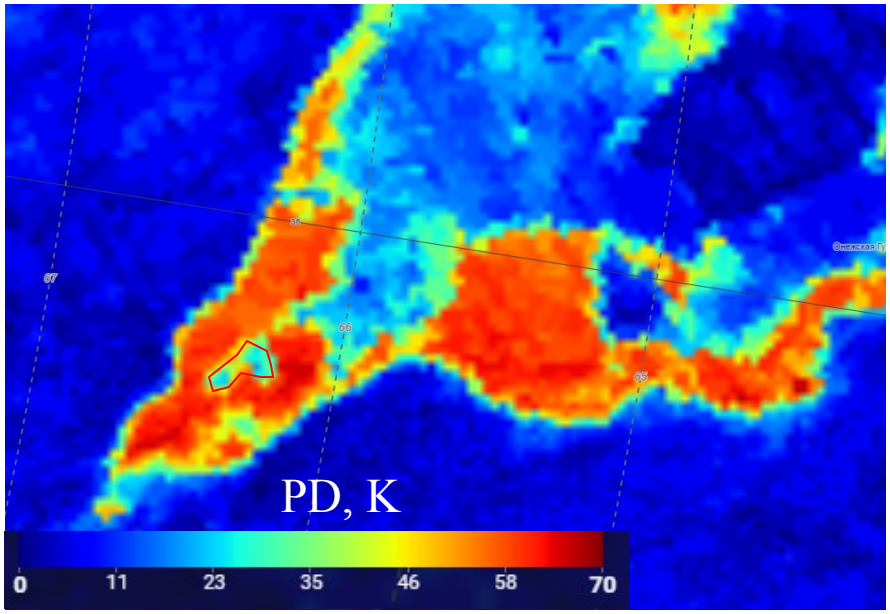
1. С использованием карт НМИ;
2. На основе сопоставления полей сплоченности а) с оптическими снимками MODIS, б) со снимками РСА Sentinel-1 A/B;

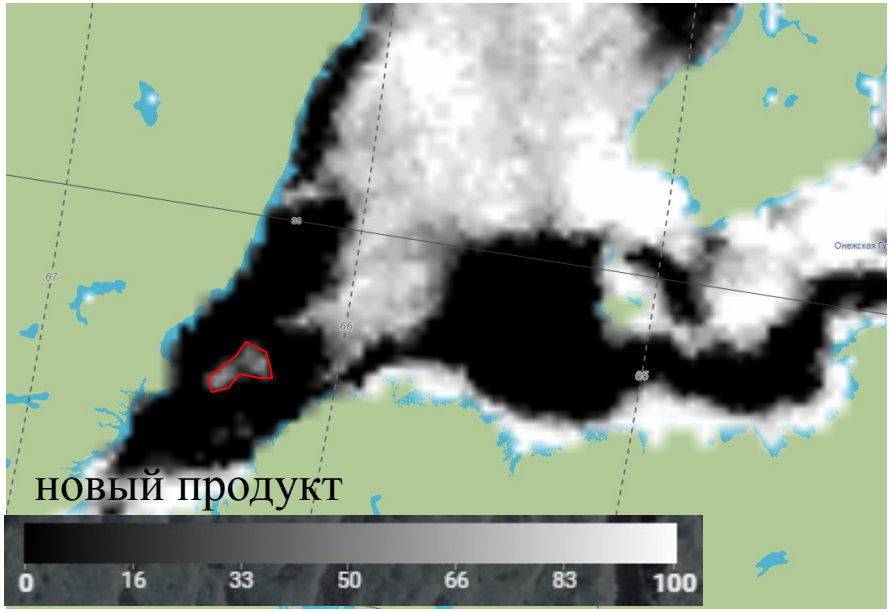


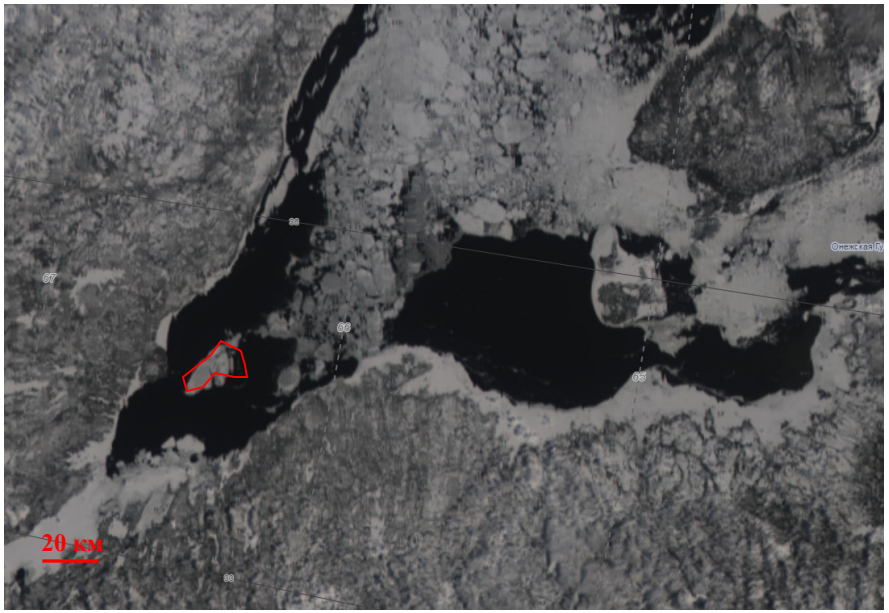
Карта сплоченности льда НМИ за 30 июля 2018

лед в Кандалакшском заливе 11 апреля 2018





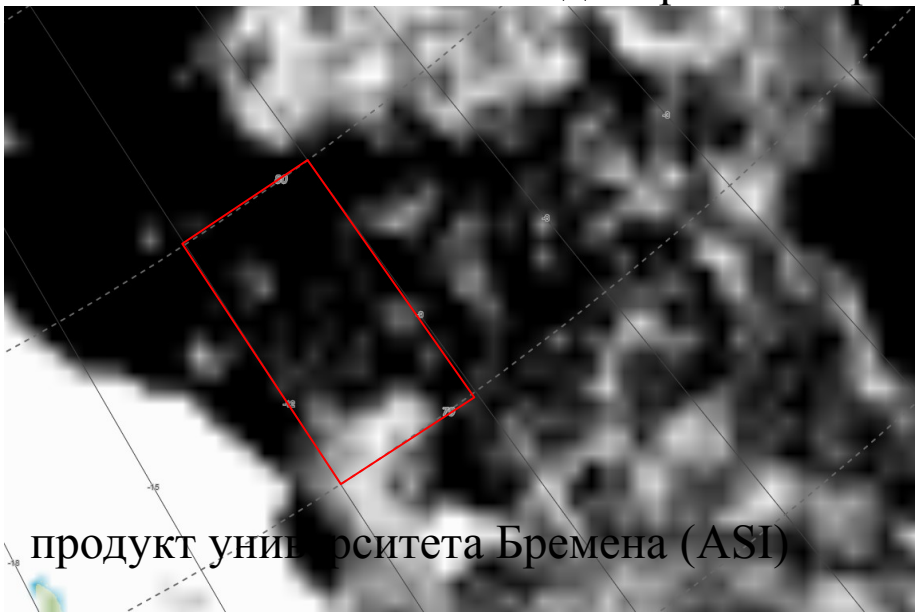


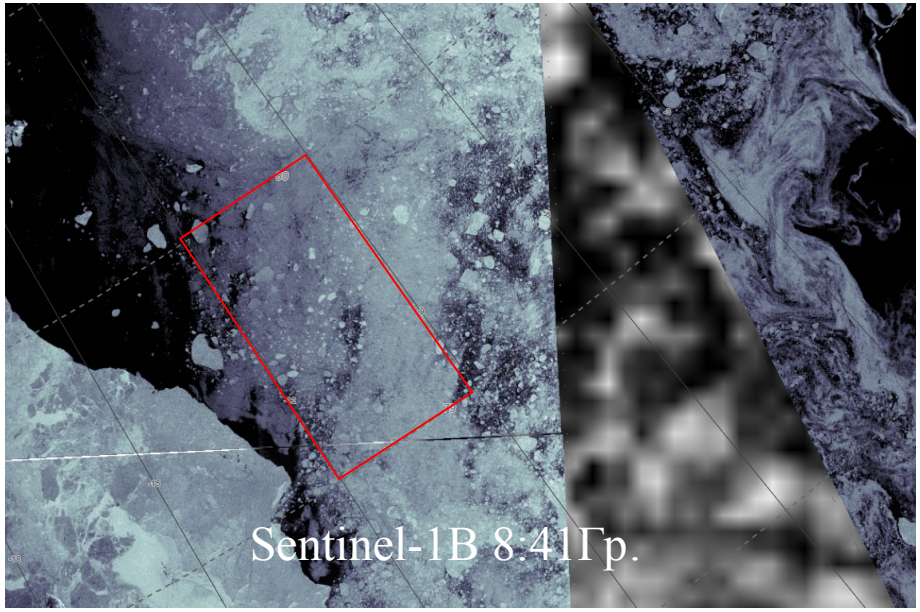


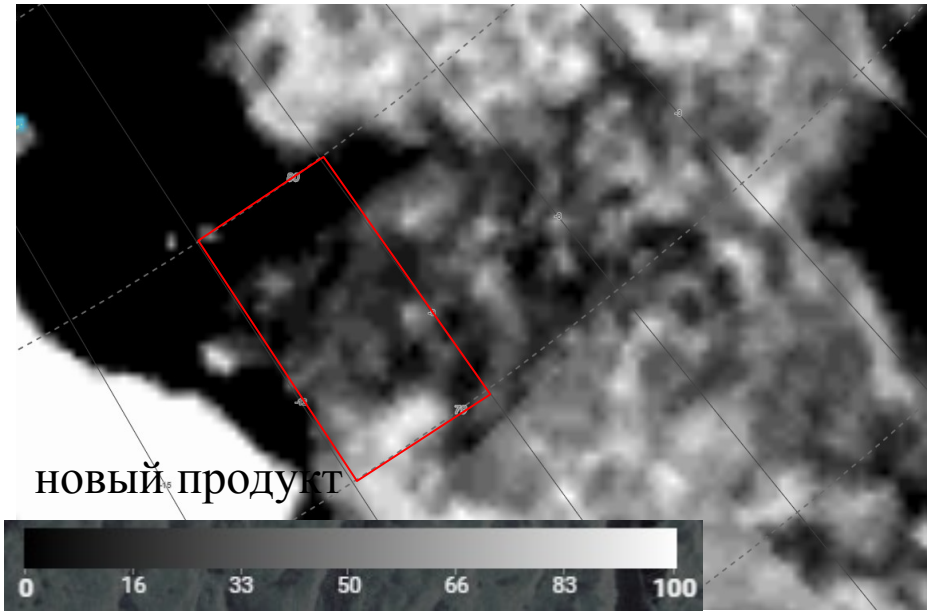
Сплоченность льда по данным AMSR2, %

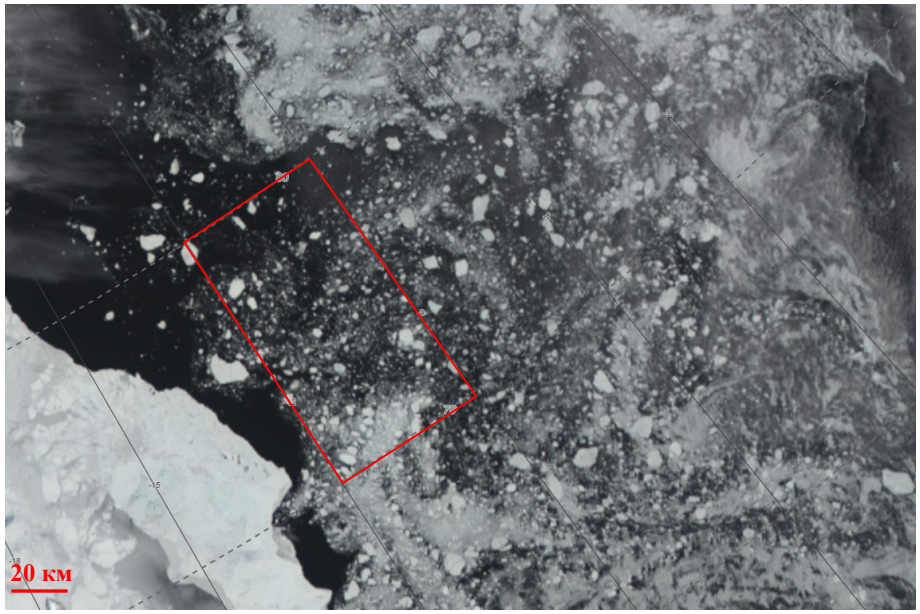
Aqua MODIS 10:30 Гр.

лед в проливе Фрама 15 июля 2018





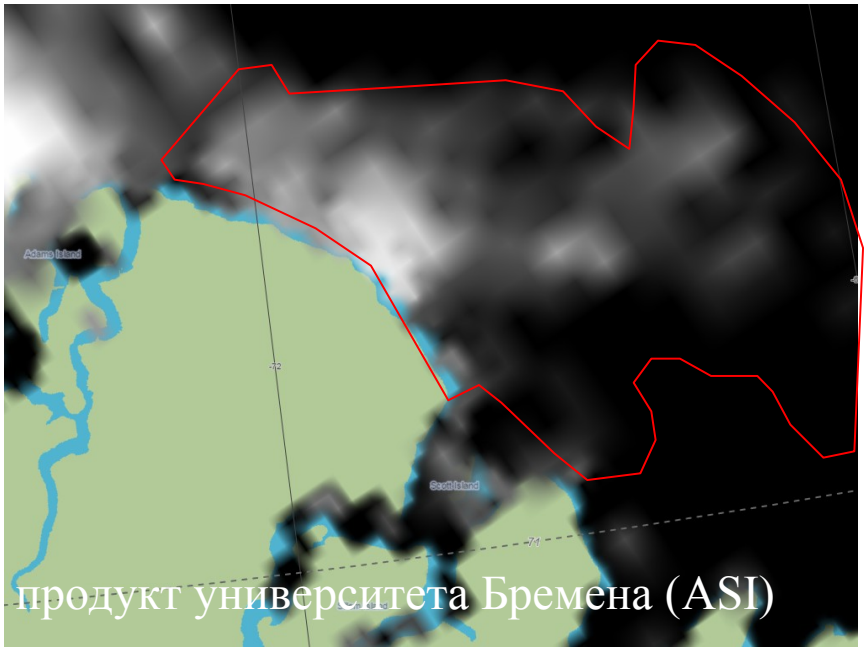


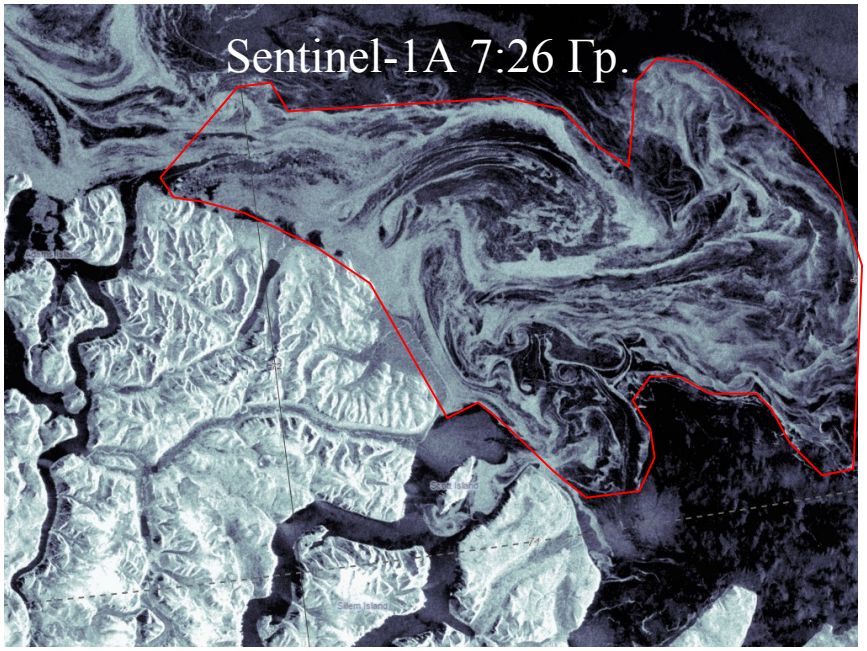


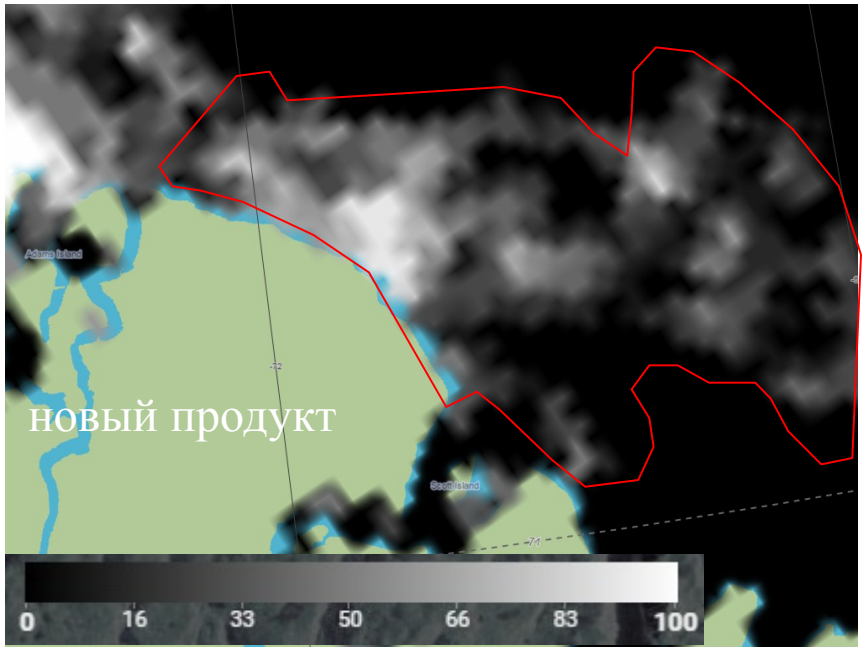
Сплоченность льда по данным AMSR2, %

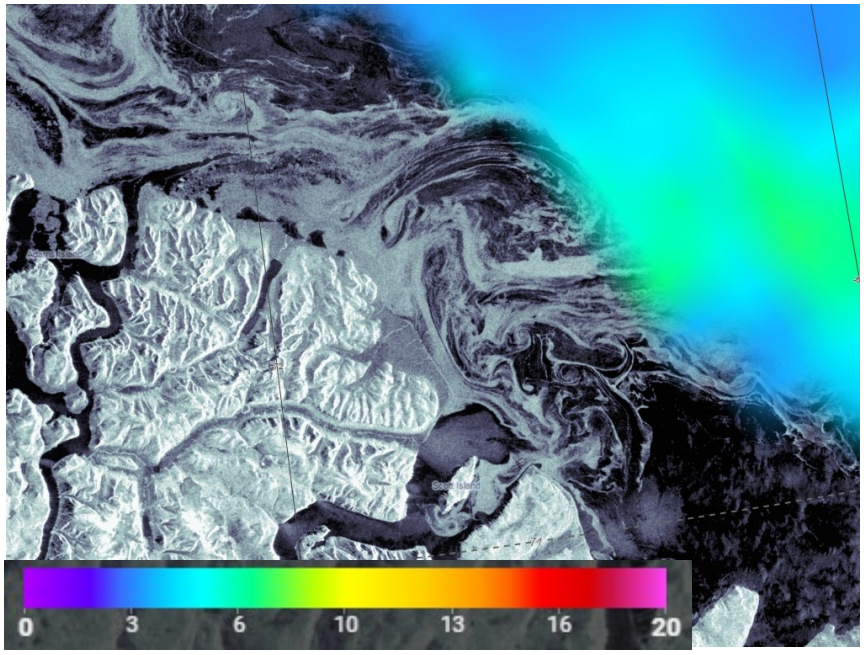
Aqua MODIS 09:45 Гр.

лед в море Баффина 17 октября 2018









Сплоченность льда по данным AMSR2, %

Влагозапас атмосферы по данным AMSR2, кг/м^2