

Спутниковое пассивное
микроволновое зондирование:
физические основы

Спутниковая радиометрия в системе дистанционного зондирования Земли из космоса

- Суть методов дистанционного зондирования (ДЗ) — определение параметров и характеристик объектов бесконтактным способом;
- Физическая основа большинства методов ДЗ — регистрация изменений характеристик электромагнитного излучения, вызванных взаимодействием излучения с исследуемым объектом;

Классификация методов ДЗ:

- По диапазону спектра: видимый, инфракрасный (ИК) и микроволновый (СВЧ, радио-диапазон);
- По наличию внешнего источника: активные, пассивные;

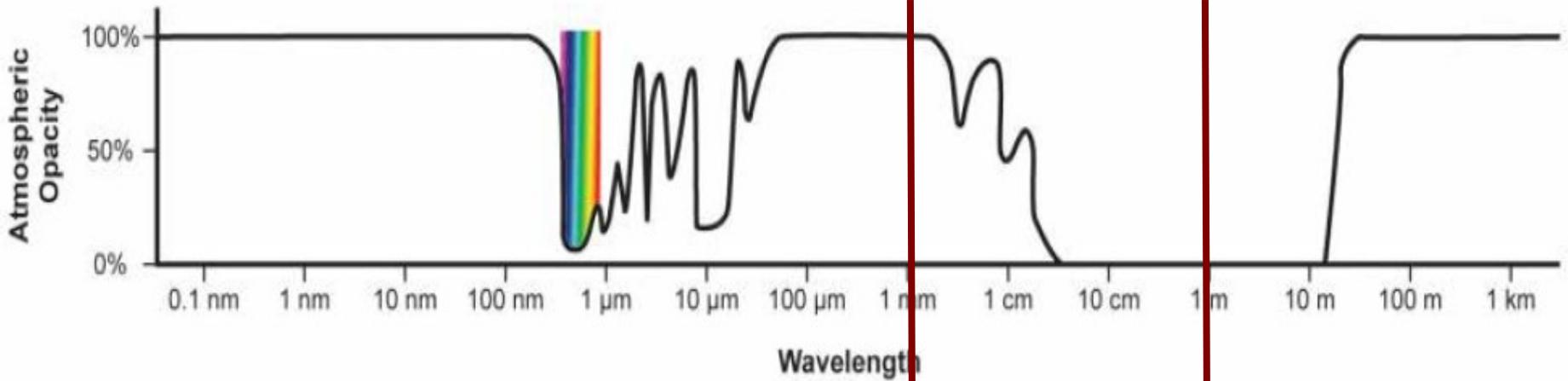
- Суть методов пассивного микроволнового зондирования - измерение радиометрами собственного излучения объектов в микроволновом диапазоне электромагнитного спектра и интерпретация этих измерений;

Классификация методов спутниковой микроволновой радиометрии:

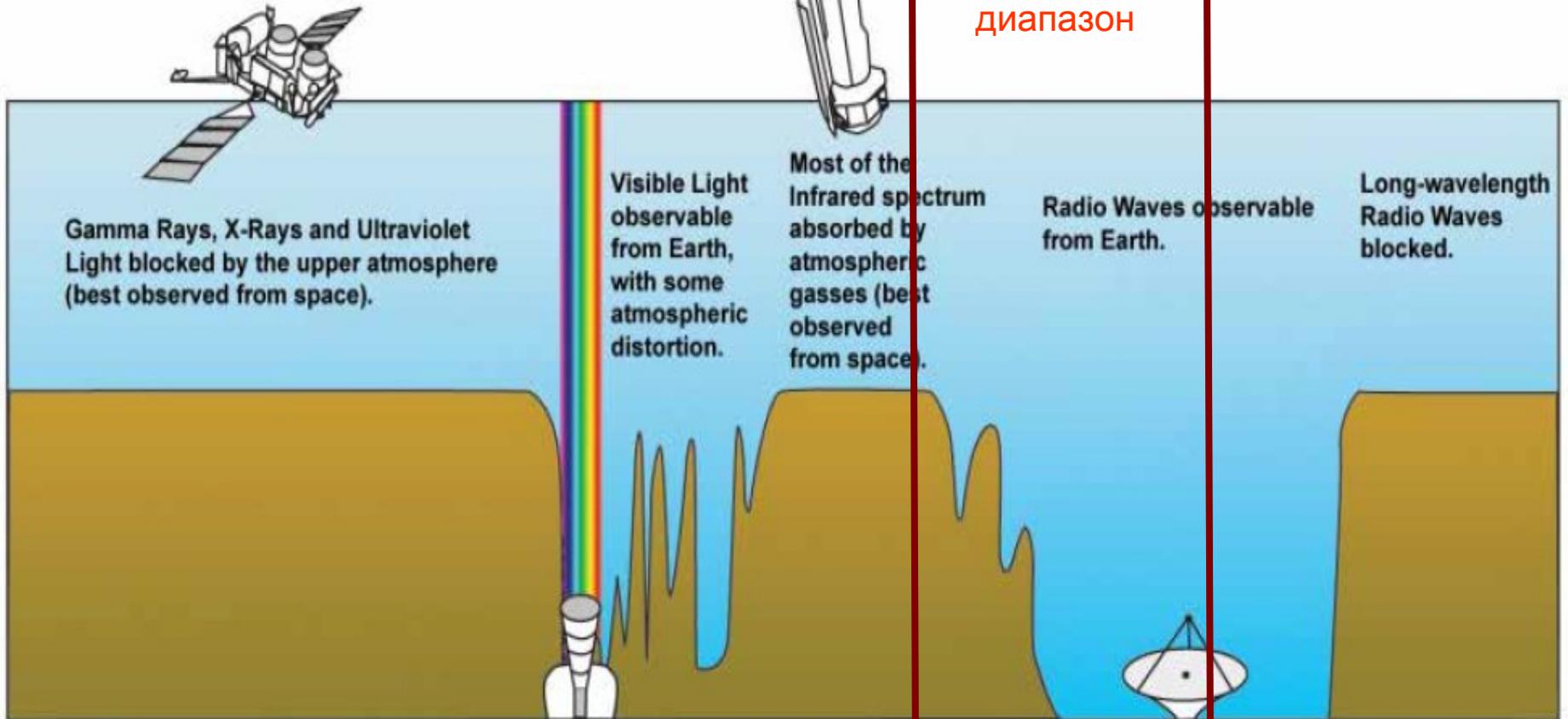
По частотному диапазону

- 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, атмосферы



Микроволновый
диапазон

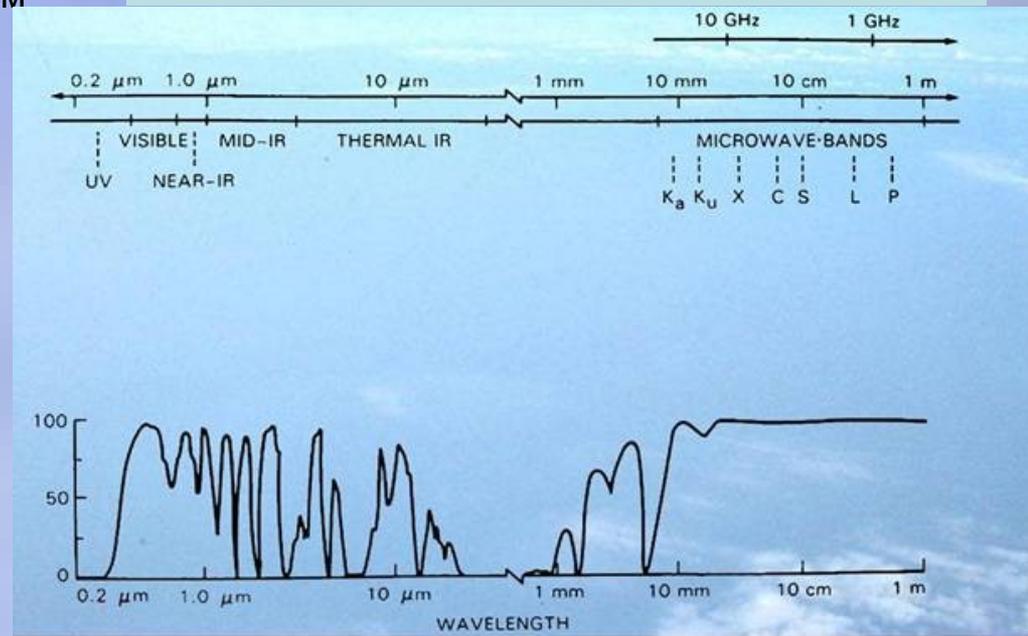


Микроволновый диапазон электромагнитных волн: *1 мм – 1 м*

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

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

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



Достоинства спутниковой микроволновой радиометрии

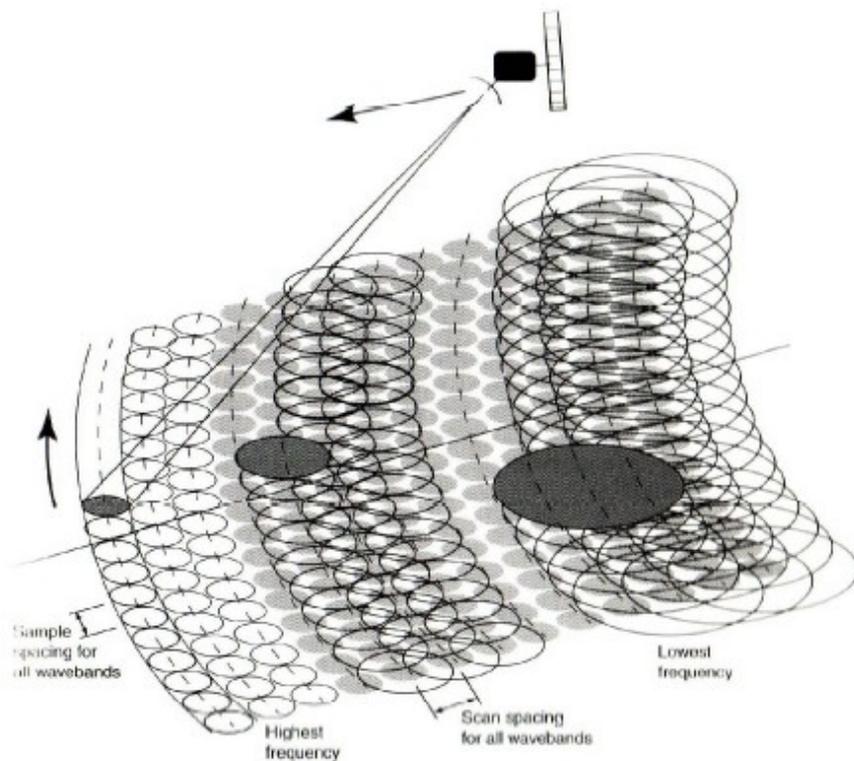
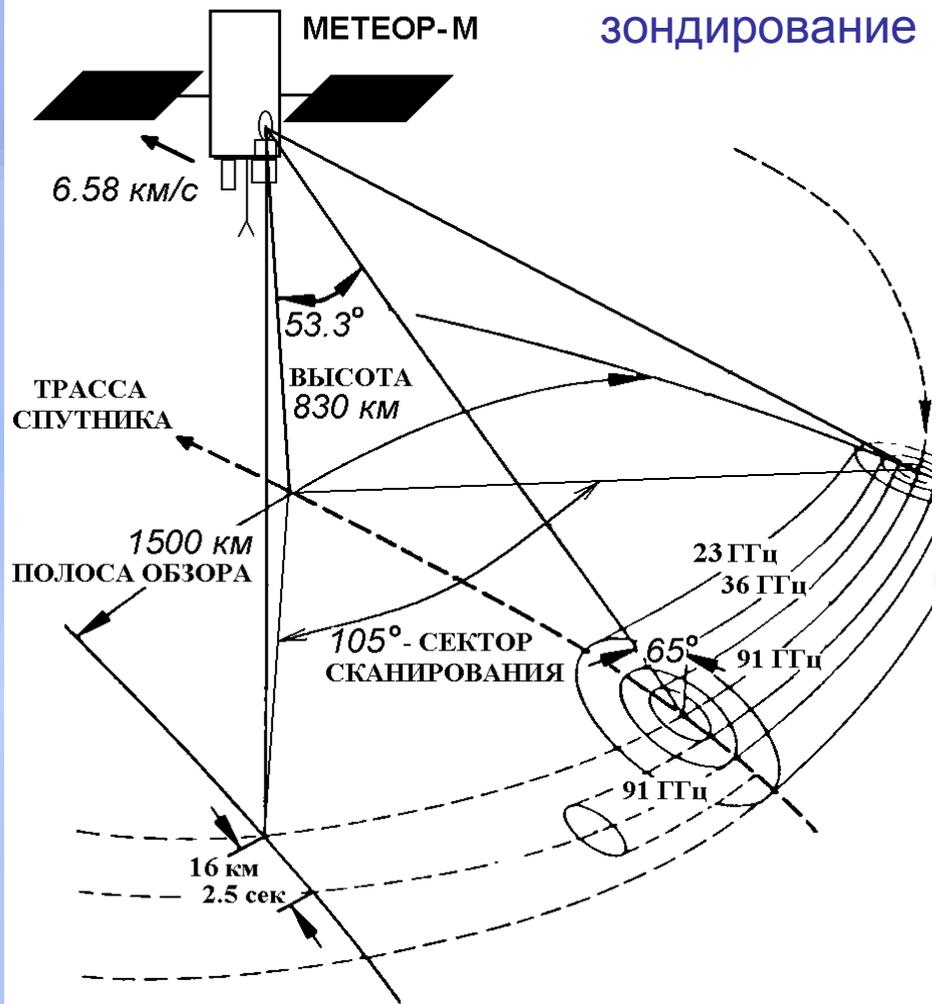
- Глобальность;
- Регулярность;
- Независимость от времени суток;
- Независимость от погодных условий;
- Сравнительно небольшие габариты, масса и энергопотребление радиометров

Ограничения

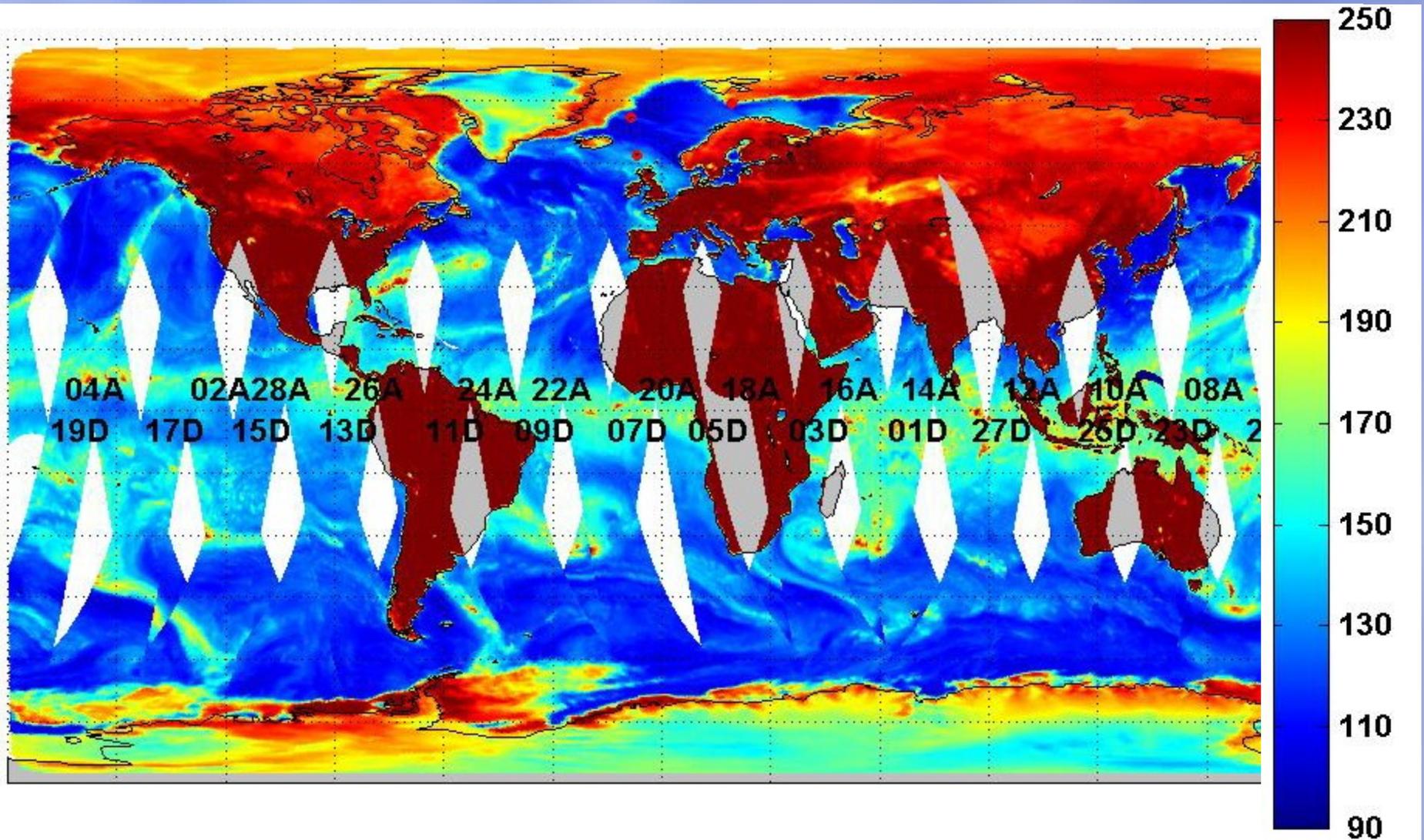
- Низкое пространственное разрешение;
- Неустойчивая калибровка;
- Необходимость высокой чувствительности радиометрических приемников,

Геометрия сканирования микроволновых радиометров

Коническое зондирование



Глобальные поля радиояркостных температур



Радиояркостная температура SSM/I на 19ГГц
горизонтальной поляризации

Основные параметры, определяемые по данным спутниковых микроволновых радиометров

Параметры океана:

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

Параметры земной поверхности:

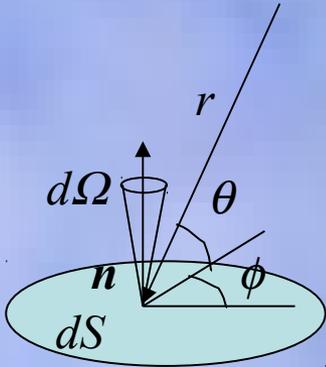
- Водозапас снежного покрова;
- Влажность почвы;

Параметры атмосферы:

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

Характеристики электромагнитного излучения

$$dE = I_{\lambda} dS d\lambda d\Omega dt$$



Монохроматической интенсивностью излучения I называется количество электромагнитной энергии dE с длиной волны λ , проходящее на единичную площадку (или проходящее через нее) перпендикулярно к ней из единичного телесного угла за единицу времени

$$I = I(x, y, z, \mathbf{n}, t)$$

Поток излучения – интеграл интенсивности по телесному углу

Плотность излучения – количество энергии излучения в единичном объеме

- **Изотропность** – независимость от пространственного угла;
- **Стационарность** – независимость от времени;
- **Однородность** – независимость от пространственных координат;

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

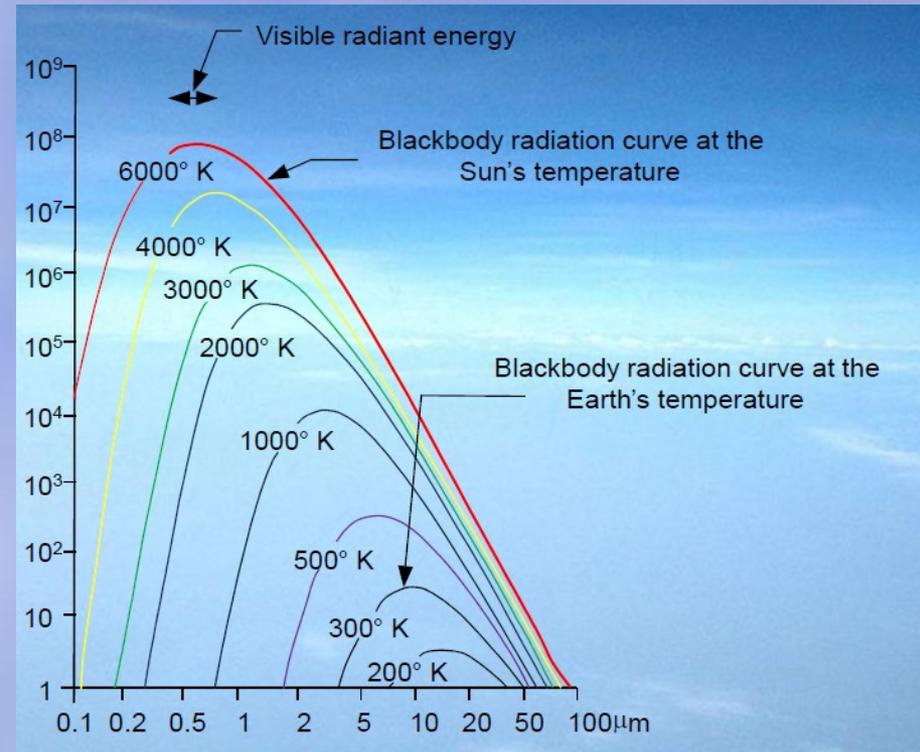
Закон Кирхгофа

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

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

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

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

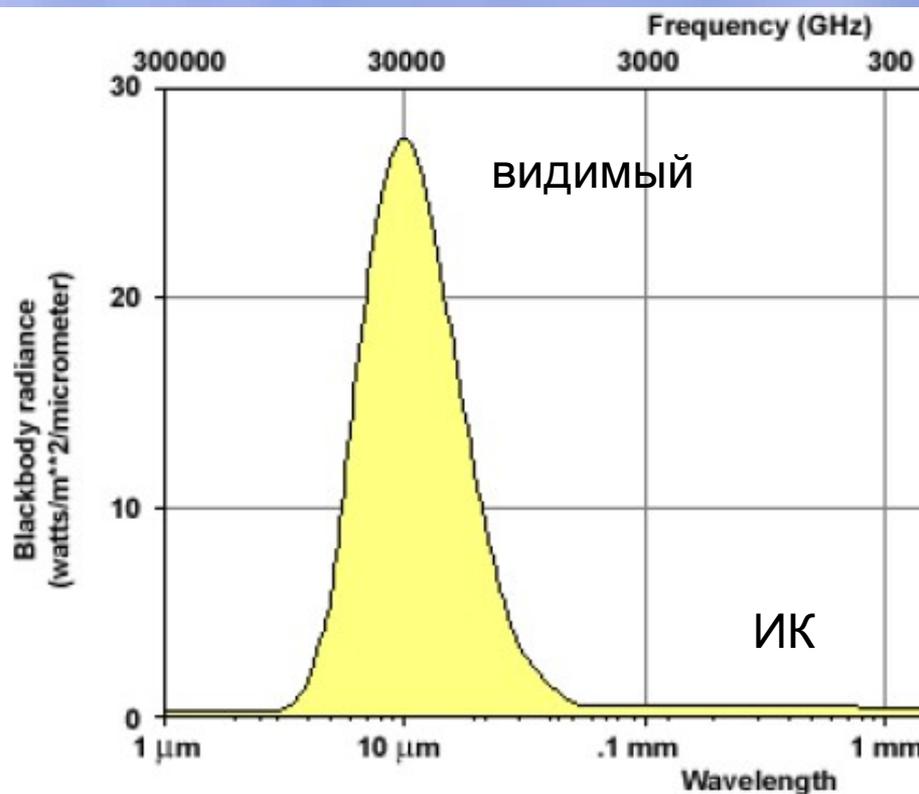


$$M(T) = \int_0^\infty \frac{2h\nu^3}{c^2(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1)} d\nu = \sigma T^4$$

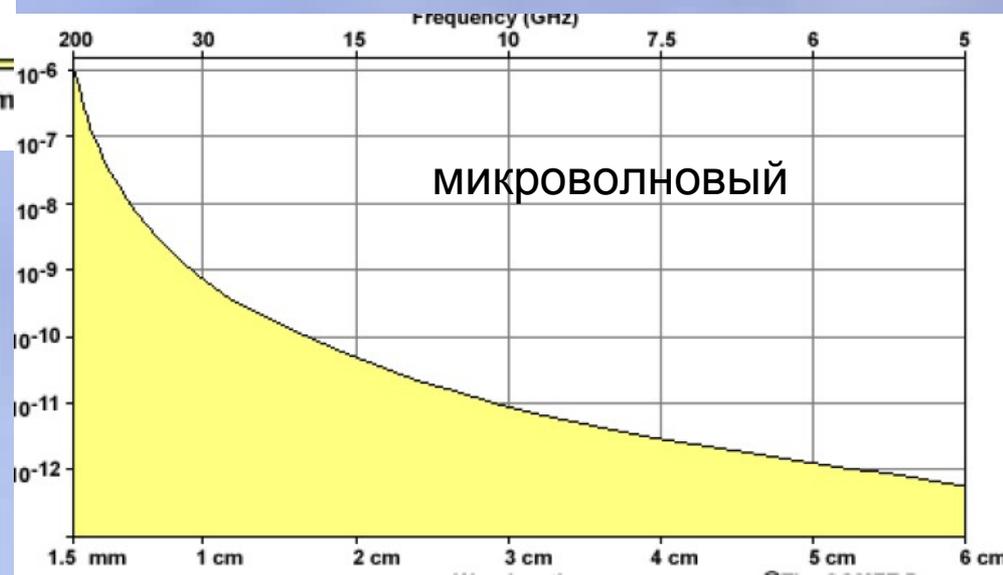
Закон Стефана-Больцмана

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

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 микроволнового диапазона необходимы **сотни квадратных км** для превышения порога чувствительности современных радиометров



Пространственное разрешение сканирующих радиометров

Потенциал для улучшения:

- Увеличение размеров антенны;
- Повышение чувствительности приемника;



WindSat

Закон смещения Вина

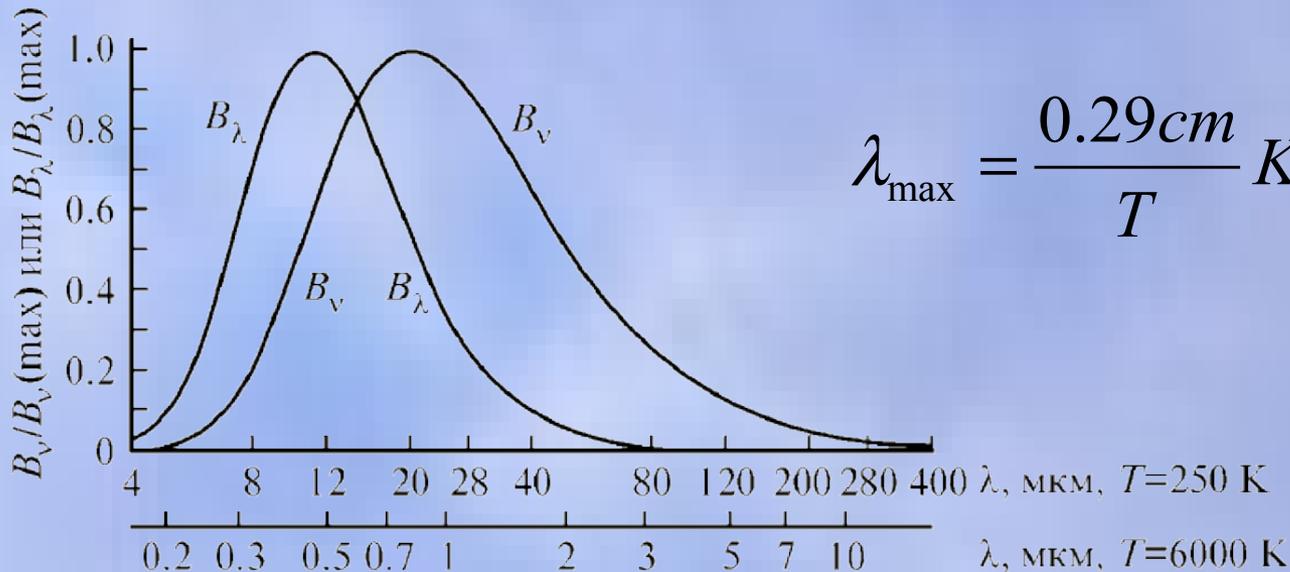
1. $h\nu/kT \gg 1$

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

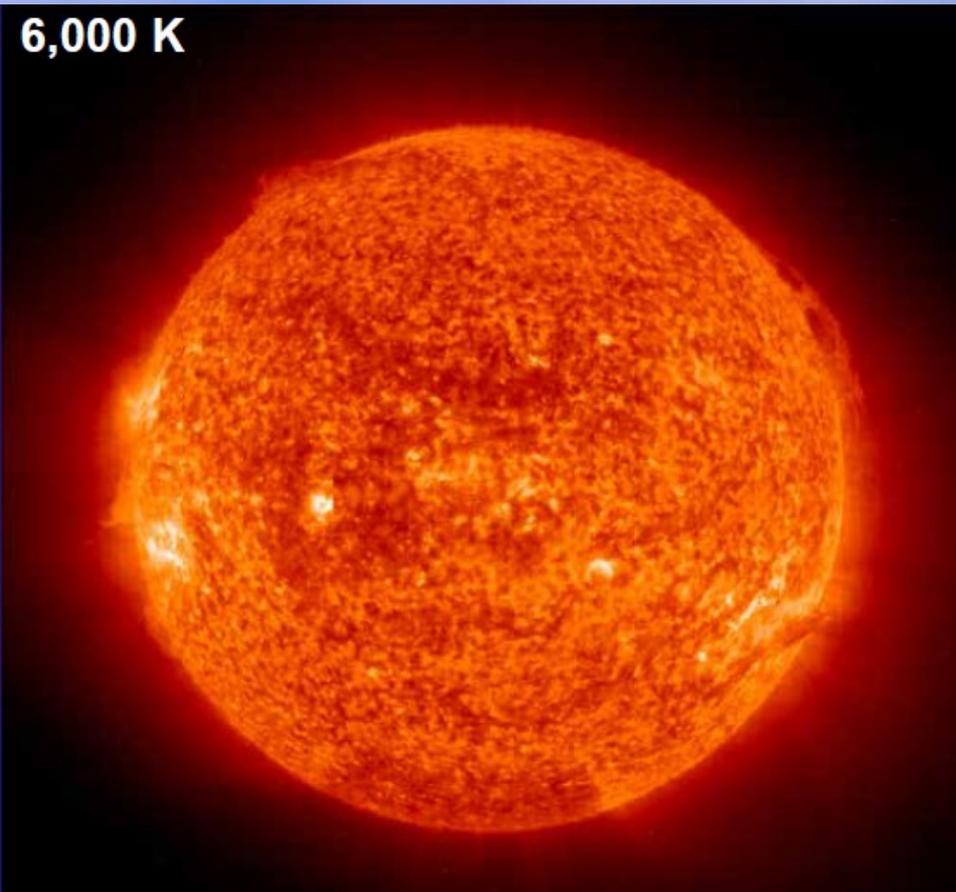
$$B_\nu(T) \rightarrow \frac{2h\nu^3}{c^2} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)$$

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

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.



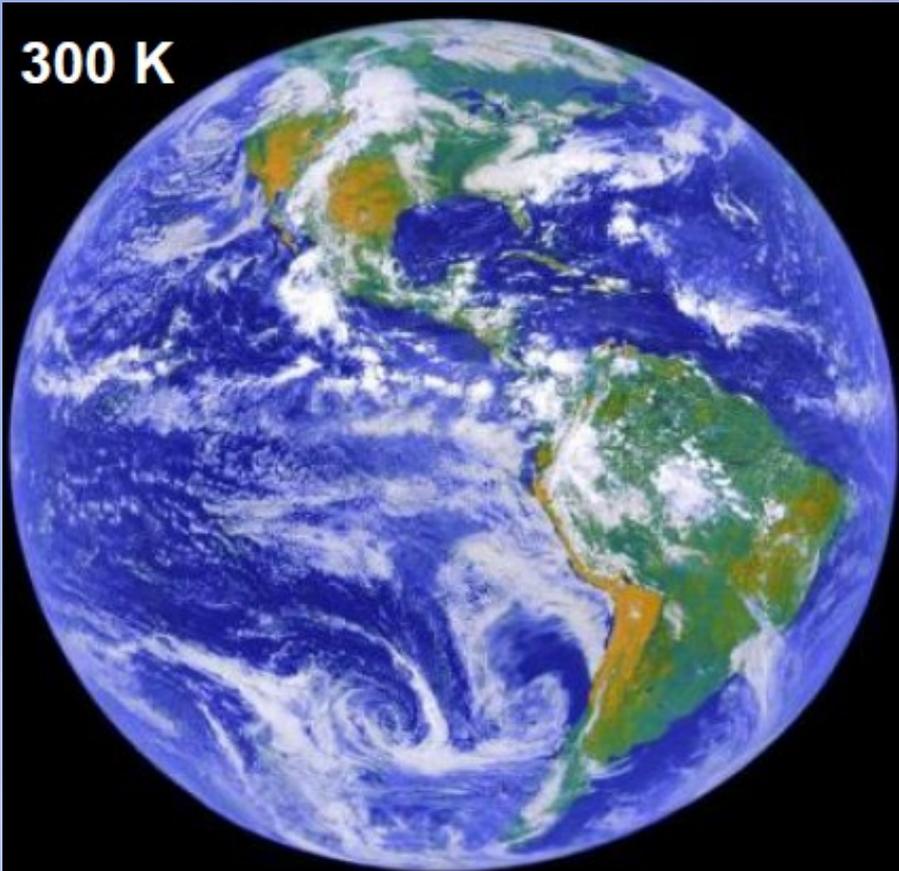
6,000 K



Видимый диапазон ~ 0.4 мкм

ИК диапазон ~ 10 мкм

300 K



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

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

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

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

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

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

**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

$$dJ_v(\varphi, \theta) = \alpha_{nv} \left[(1 - \omega) B_v(T) - J_v(\varphi, \theta) + \frac{\omega_v}{4\pi} \left(\iint P(\varphi', \theta', \varphi, \theta) J_v(\varphi', \theta') \sin \theta' d\theta' d\varphi' \right) ds \right]$$

$\omega \equiv \alpha_p / \alpha_o$ - альbedo единичного объема

$dJ_v(\varphi, \theta)$

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



s

$\alpha_{nv}, \omega_v, P(\varphi', \theta', \varphi, \theta)$

среда
распространения

объект
исследования

θ

$\chi_v(\varphi, \theta)$



Закон Релея-Джинса - приближение микроволнового диапазона спектра

$$h\nu/kT \ll 1$$

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

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

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

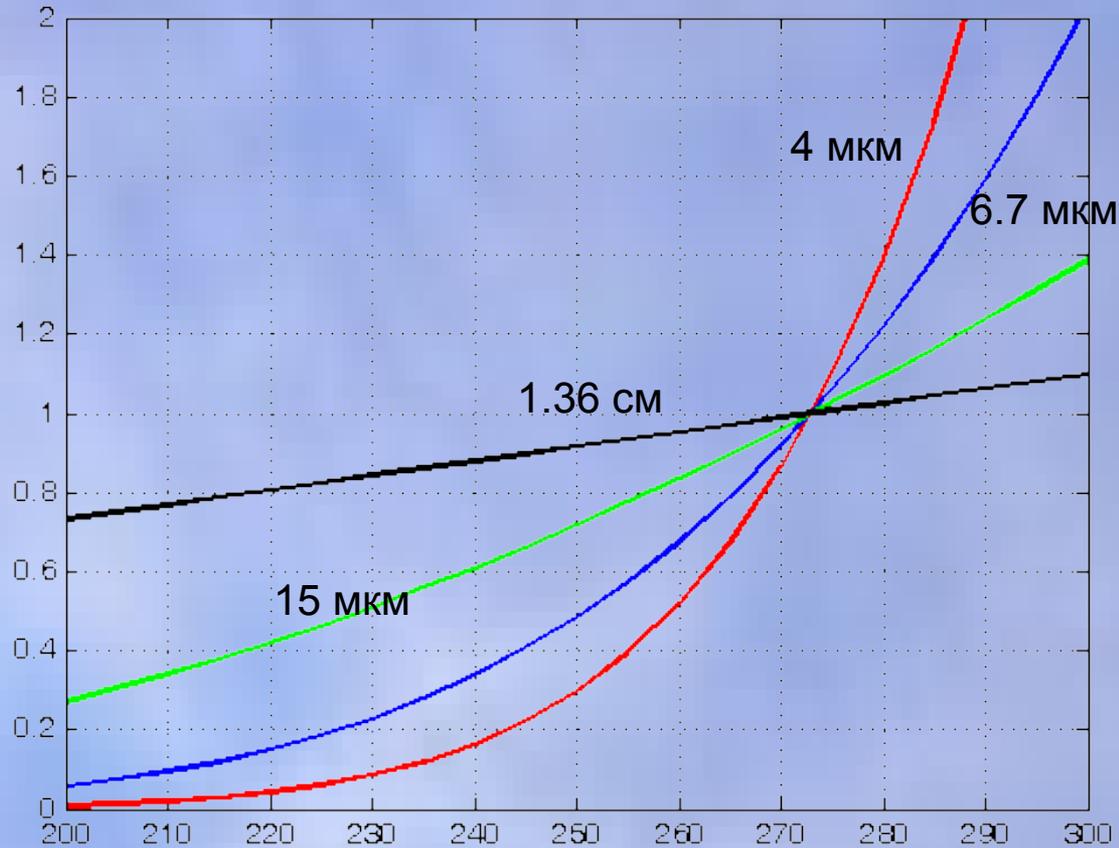
излучение среды пропорционально термодинамической температуре абсолютно черного тела эквивалентной яркости. Это приближение позволяет выразить интенсивность излучения J в виде радиояркостной температуры $T_{\text{я}}$

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

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

$$hc/\lambda kT \ll 1$$



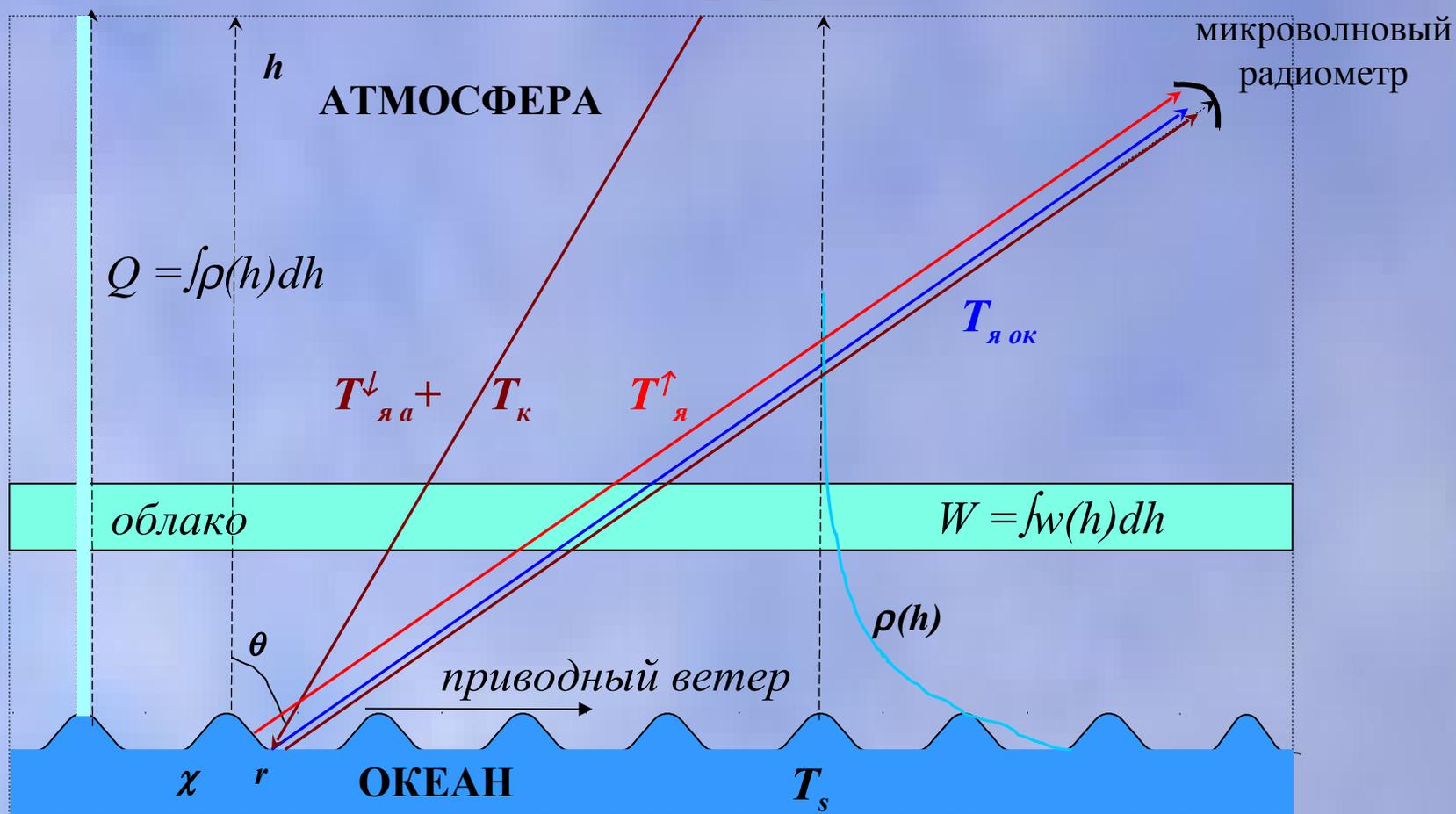
Приближения микроволнового диапазона спектра

длина волны излучения $\lambda \gg r$ – 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

$$dT_{я}(\varphi, \theta) = \alpha_n [T - T_{я}(\varphi, \theta)] ds$$

Схема формирования микроволнового излучения в системе Атмосфера-Океан



$$dT_{\text{я}}(\varphi, \theta) = \alpha_n [T - T_{\text{я}}(\varphi, \theta)] ds \quad \text{Уравнение переноса излучения}$$

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

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

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

Восходящее
излучение
атмосферы

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

Нисходящее
излучение
атмосферы

$$T_{яокv}(\mu) = \chi_{pv}(\mu, \varphi) \cdot T_{ок} \cdot P_v(\mu, h, \infty)$$

Излучение
океана

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

Коэффициент
излучения
океана

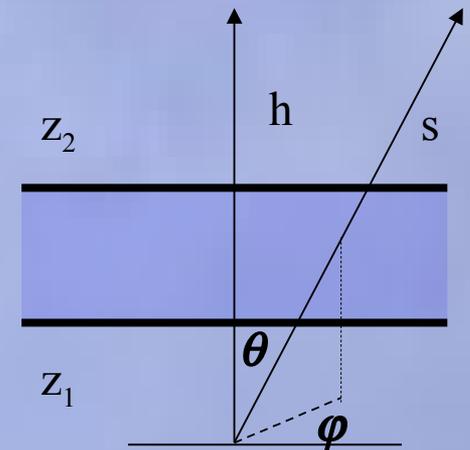
$$P_v(\mu, z_1, z_2) = \exp(-\tau_v(\mu, z_1, z_2))$$

Функция
пропускания
слоя атмосферы

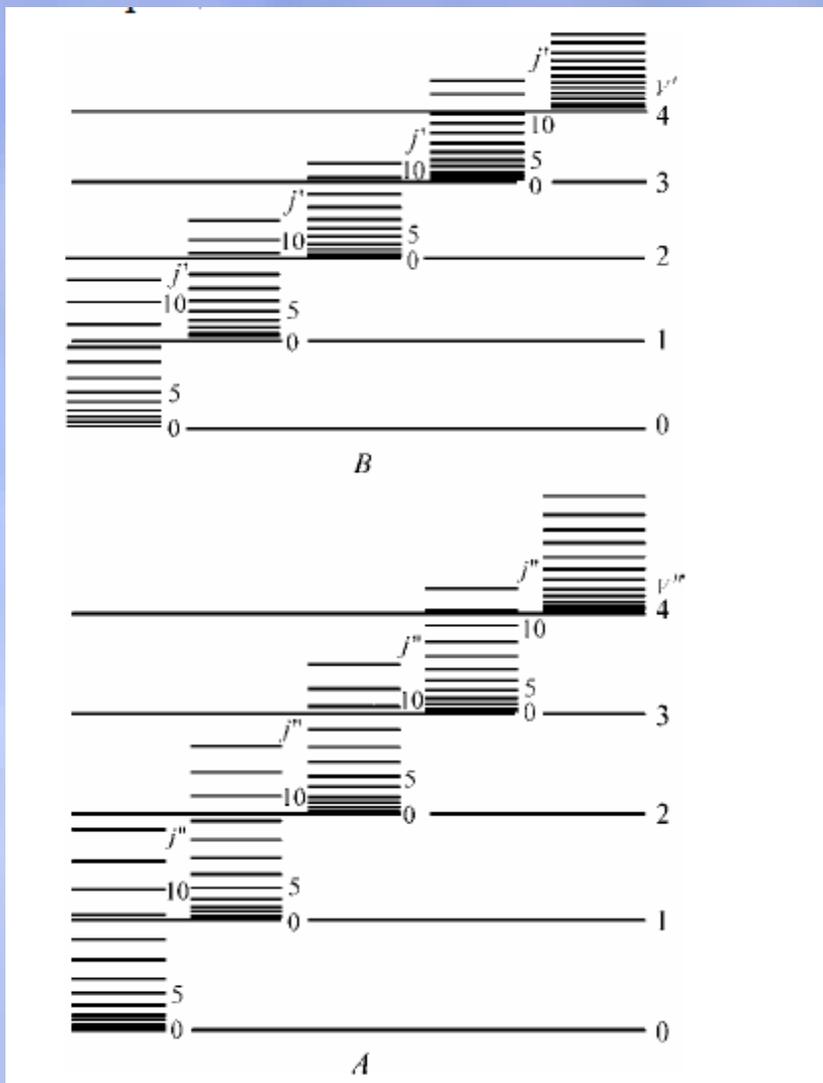
$$\tau_v(z_1, z_2) = \frac{1}{\mu} \int_{z_1}^{z_2} \alpha_v(h') dh'$$

Оптическая
толщина слоя
атмосферы

$$T_{якv} = 2,7\text{K}$$



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 энергии, 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, SO₂, NO, NO₂, O₃).
- Однако, их содержание в атмосфере и интенсивности линий поглощения настолько малы, что их вкладом в общее поглощение микроволнового излучения можно пренебречь

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

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

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

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

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

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

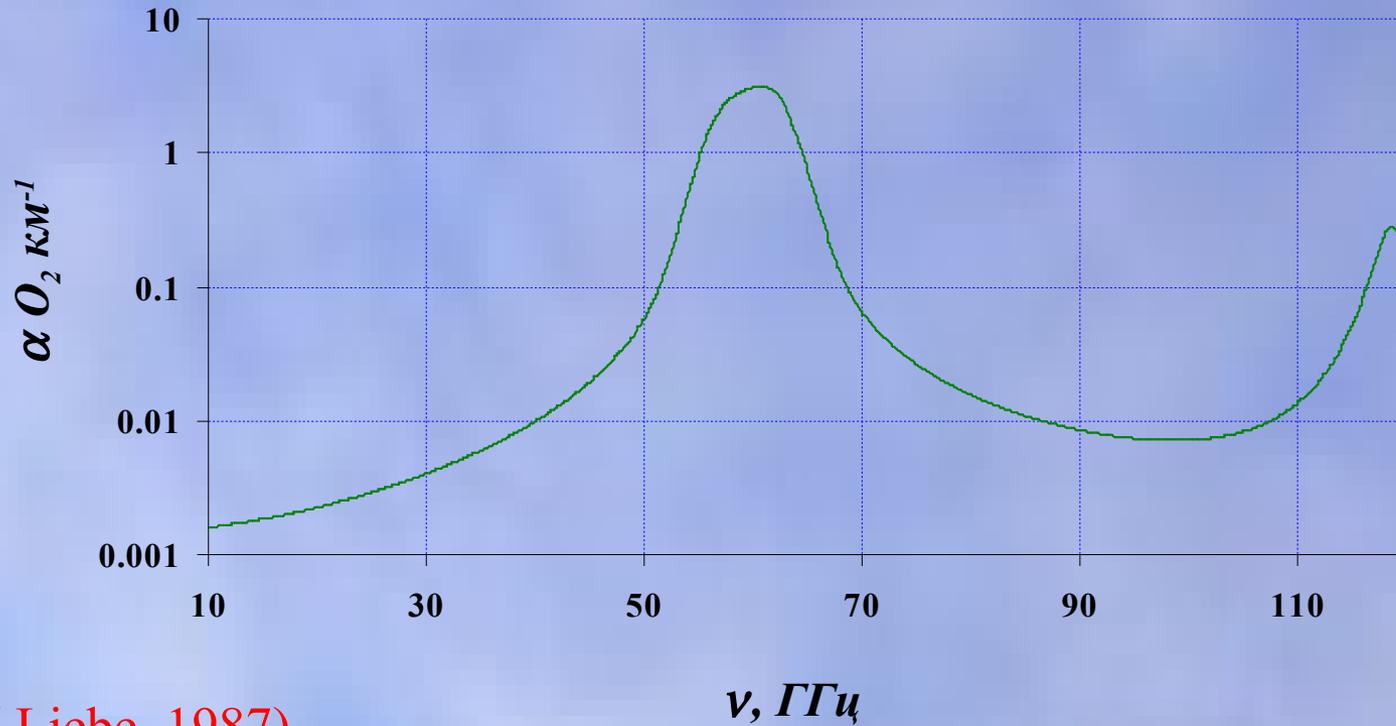
Параметры линий, зависящие от температуры, давления и влажности:

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

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

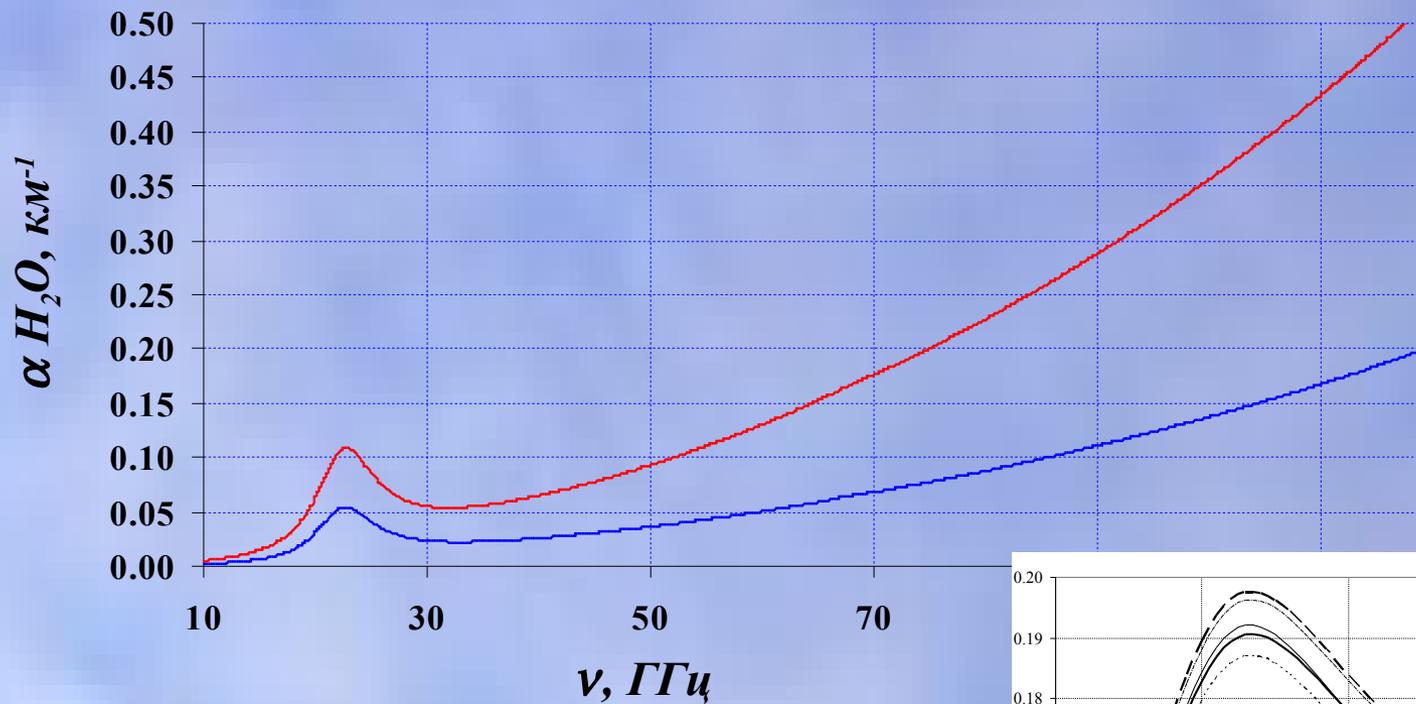
$$\delta_i = 10^{-3} \cdot p \cdot \theta^{0,8} \cdot (a_{5i} + a_{6i})$$

Поглощение в кислороде

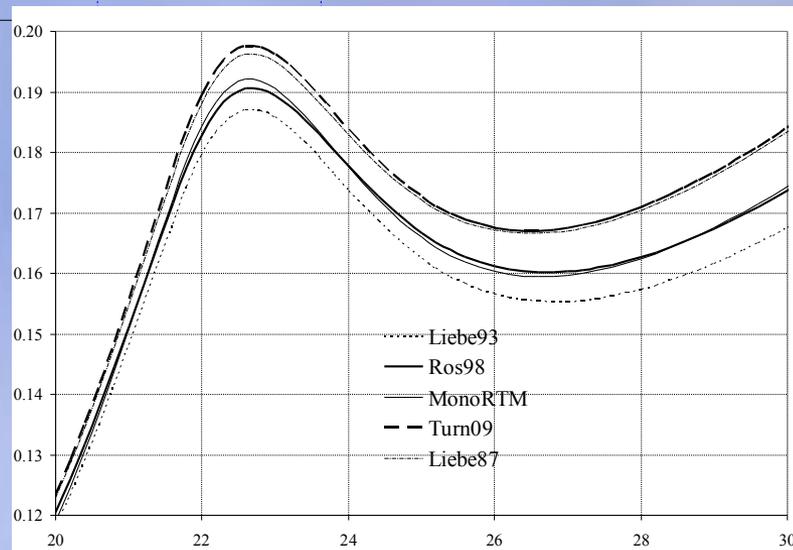


(Liebe, 1987)

Поглощение в водяном паре



(Turner, 2009)

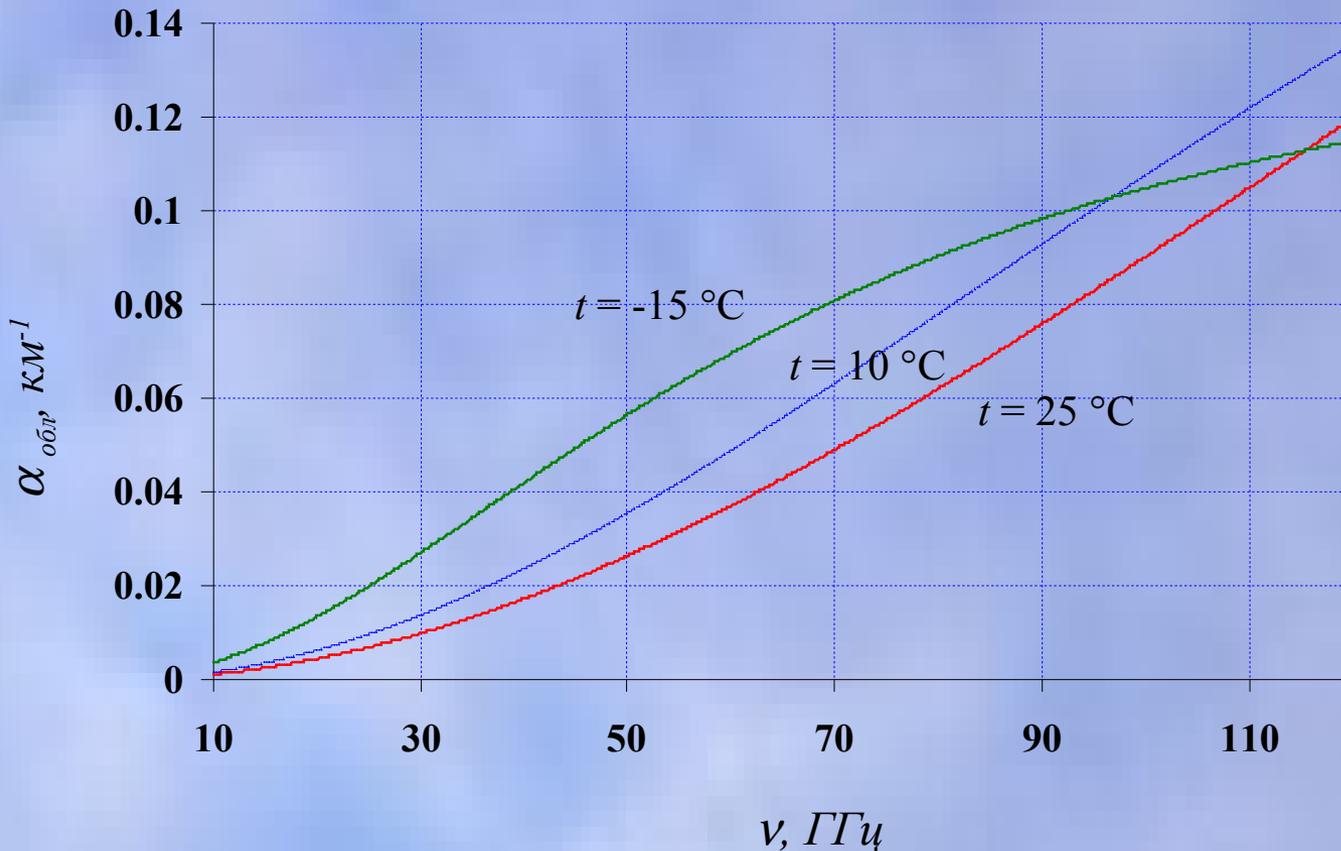


Поглощение в облаках

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**

$$\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$$

↑
Определяет скорость
распространения
излучения в среде

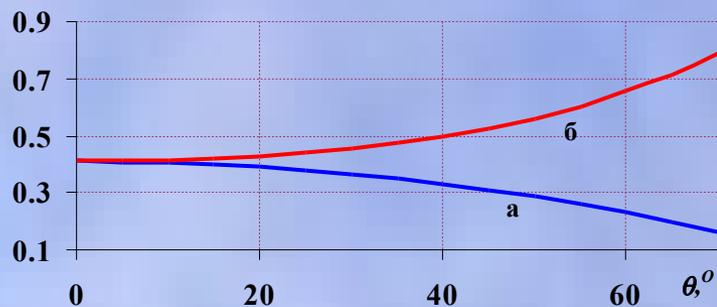
↑
Определяет потери

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

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{1 + 2\pi\nu\tau} - i \frac{\sigma_{np}}{2\pi\nu\varepsilon_c}$$

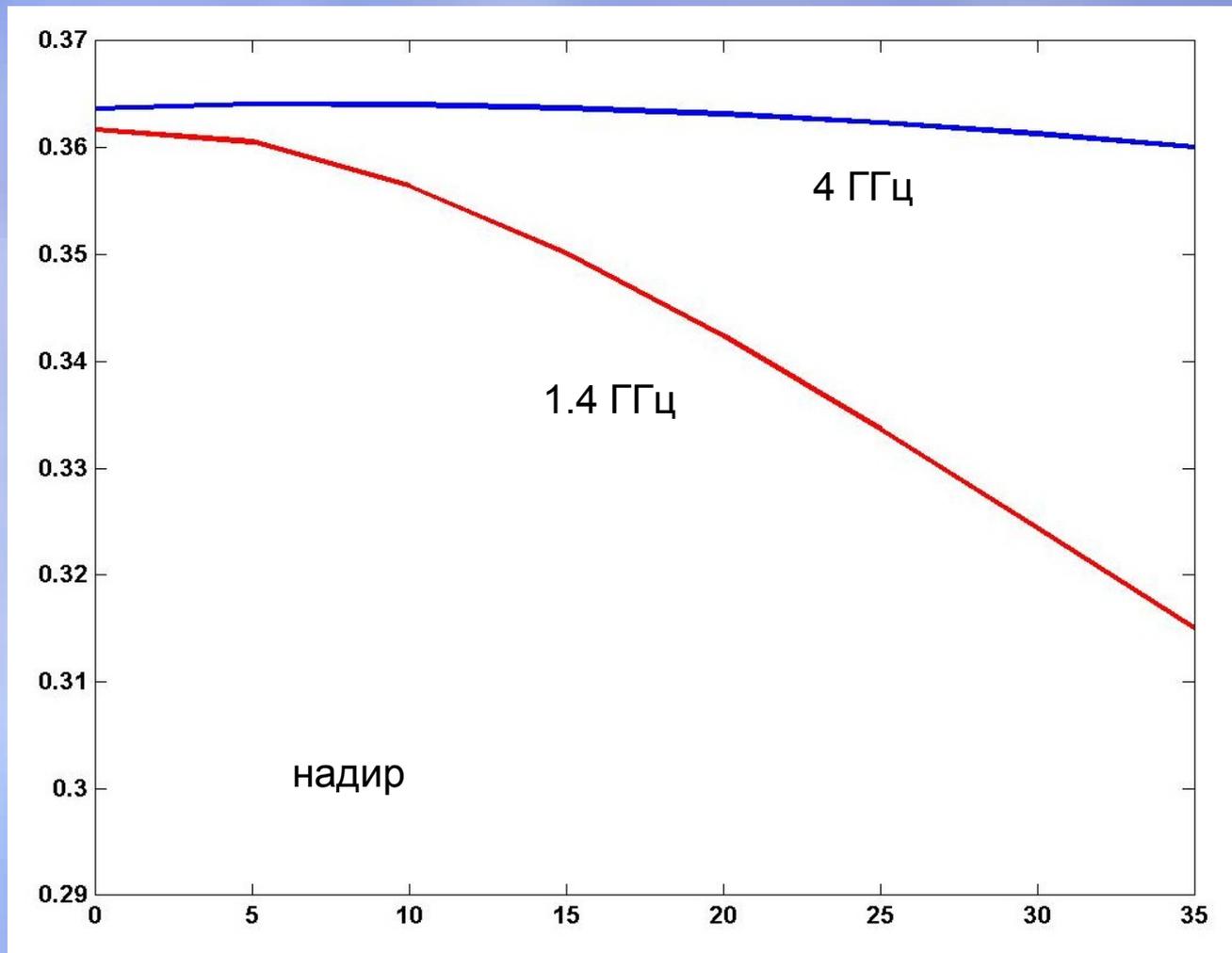
Излучение океана является существенно поляризованным

Температурная зависимость χ

С ростом температуры коэффициент излучения океана уменьшается

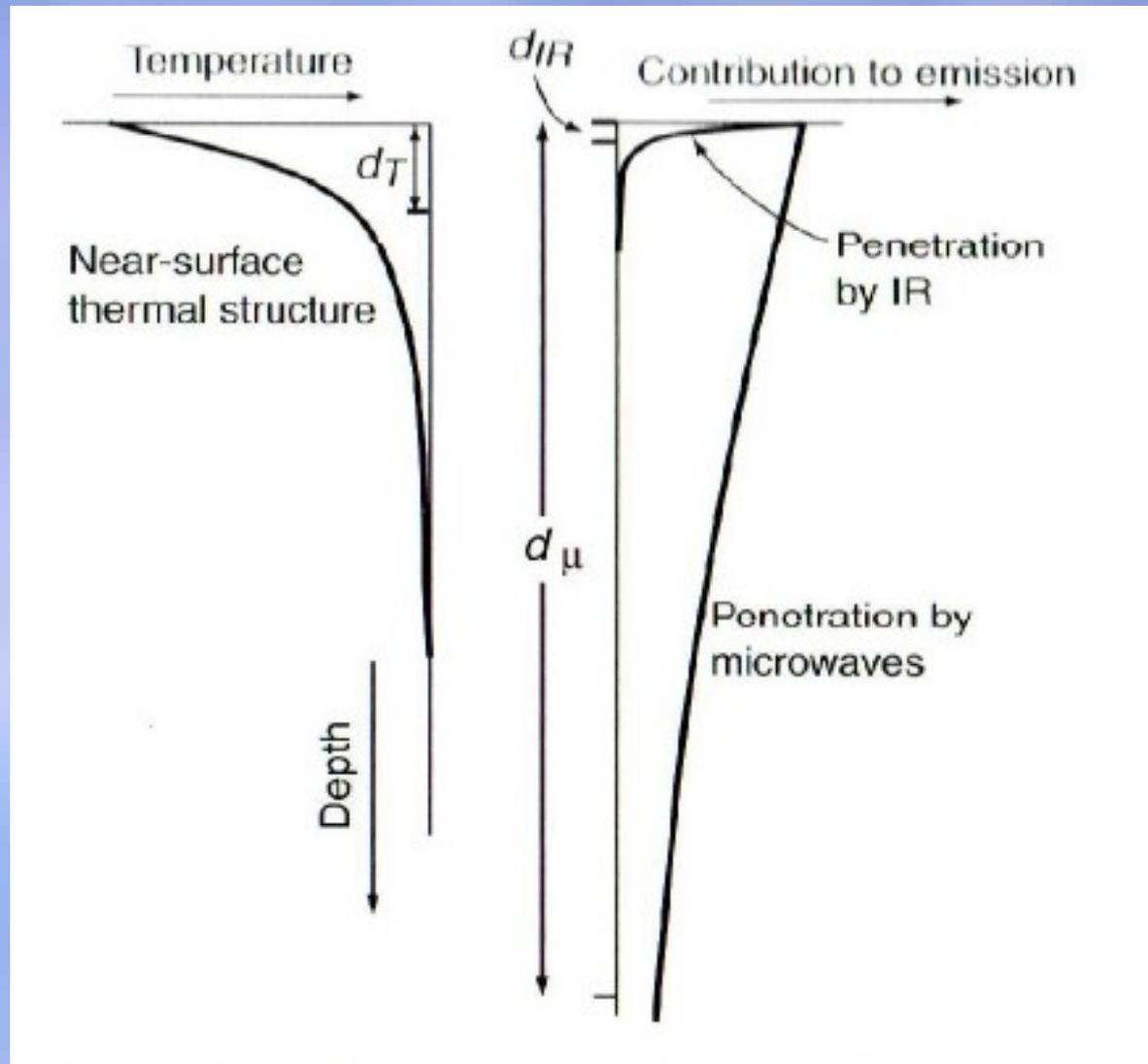


Влияние солёности на коэффициент излучения χ



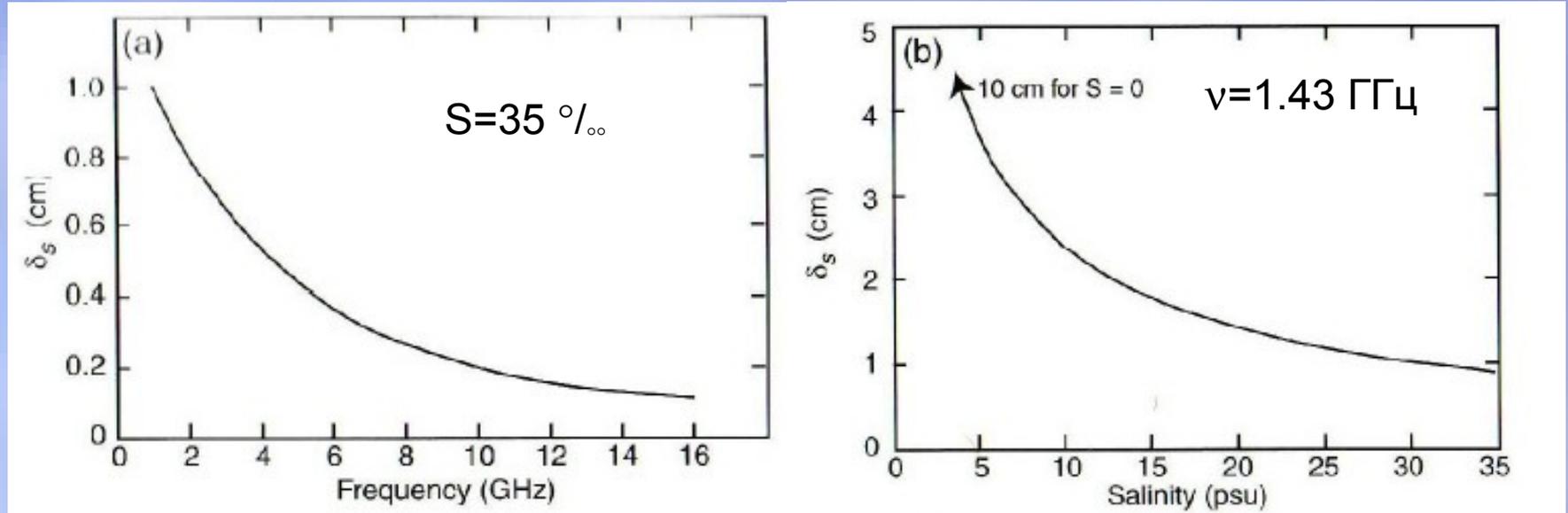
S, psu (‰)

Глубина проникновения микроволновой радиации в океан



Глубина проникновения микроволновой радиации в океан

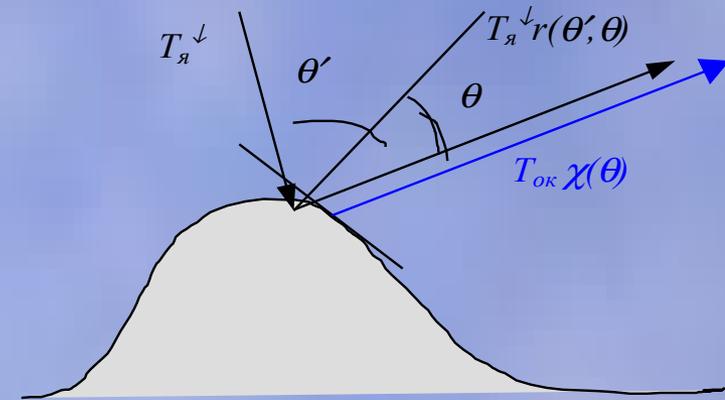
океан



- Повышается с уменьшением частоты;
- Повышается с уменьшением солёности;
- На частотах С и Х диапазона составляет 2-3 мм

Зависимость излучения океана от скорости ветра

- В результате волнения, вызванного ветром, изменяются геометрические условия отражения и формирования излучения;
- Отражают теперь и дают вклад в излучение элементарные площадки, имеющие различные уклоны;
- Формально, все эффекты, связанные с отражением и излучением поверхности океана, заложены в коэффициент отражения $r_{vp}(\theta', \varphi', \theta, \varphi)$ излучения, пришедшего на поверхность под углами (θ', φ') и отразившегося в направлении (θ, φ) ;



- Коэффициент излучения $\chi_{v,p}^e(\theta, \varphi)$

определится как интеграл от

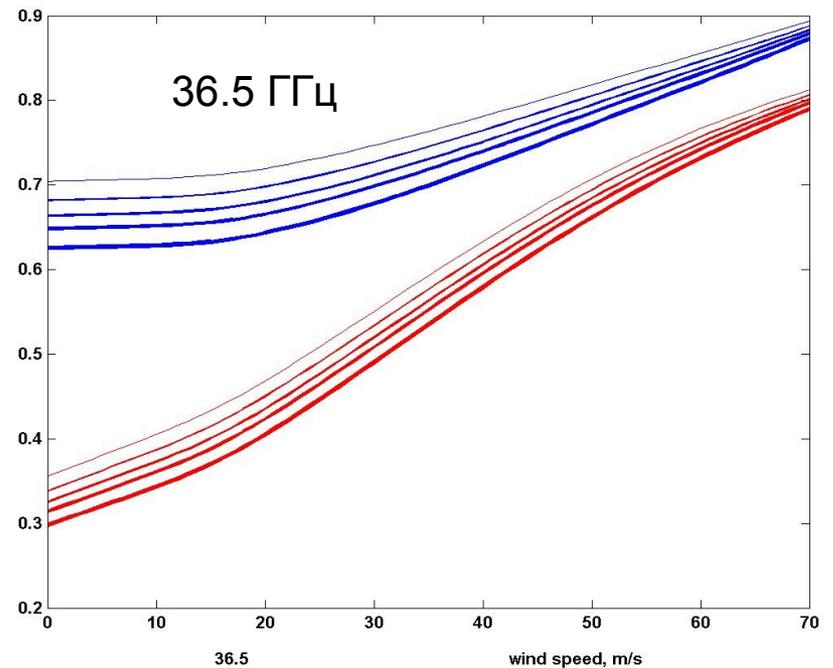
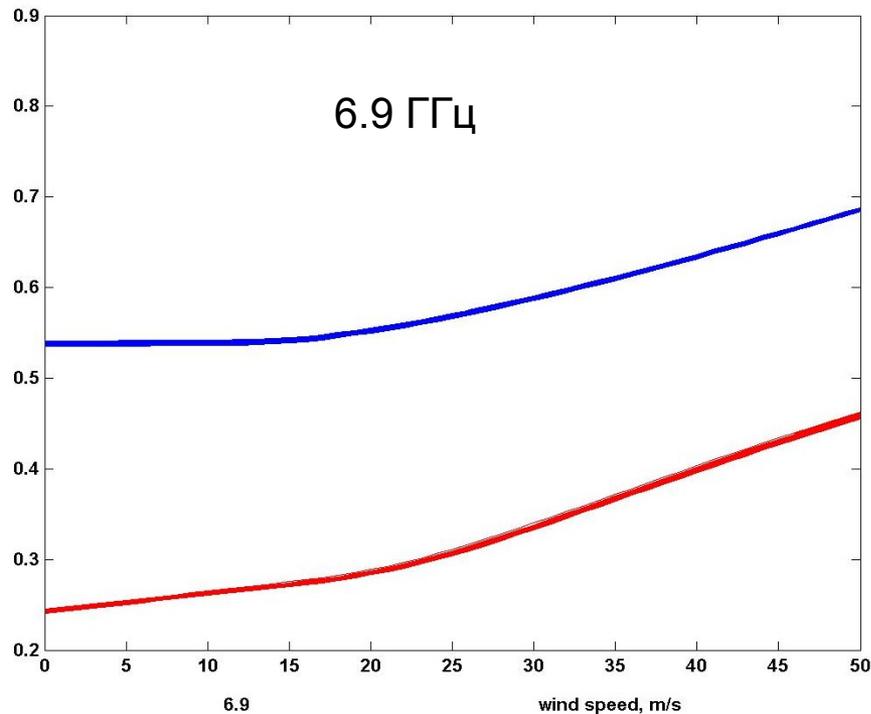
$$(1 - r_{vp}(\theta', \varphi', \theta, \varphi)) \text{ по верхней полусфере}$$

(по всем φ' и θ'):

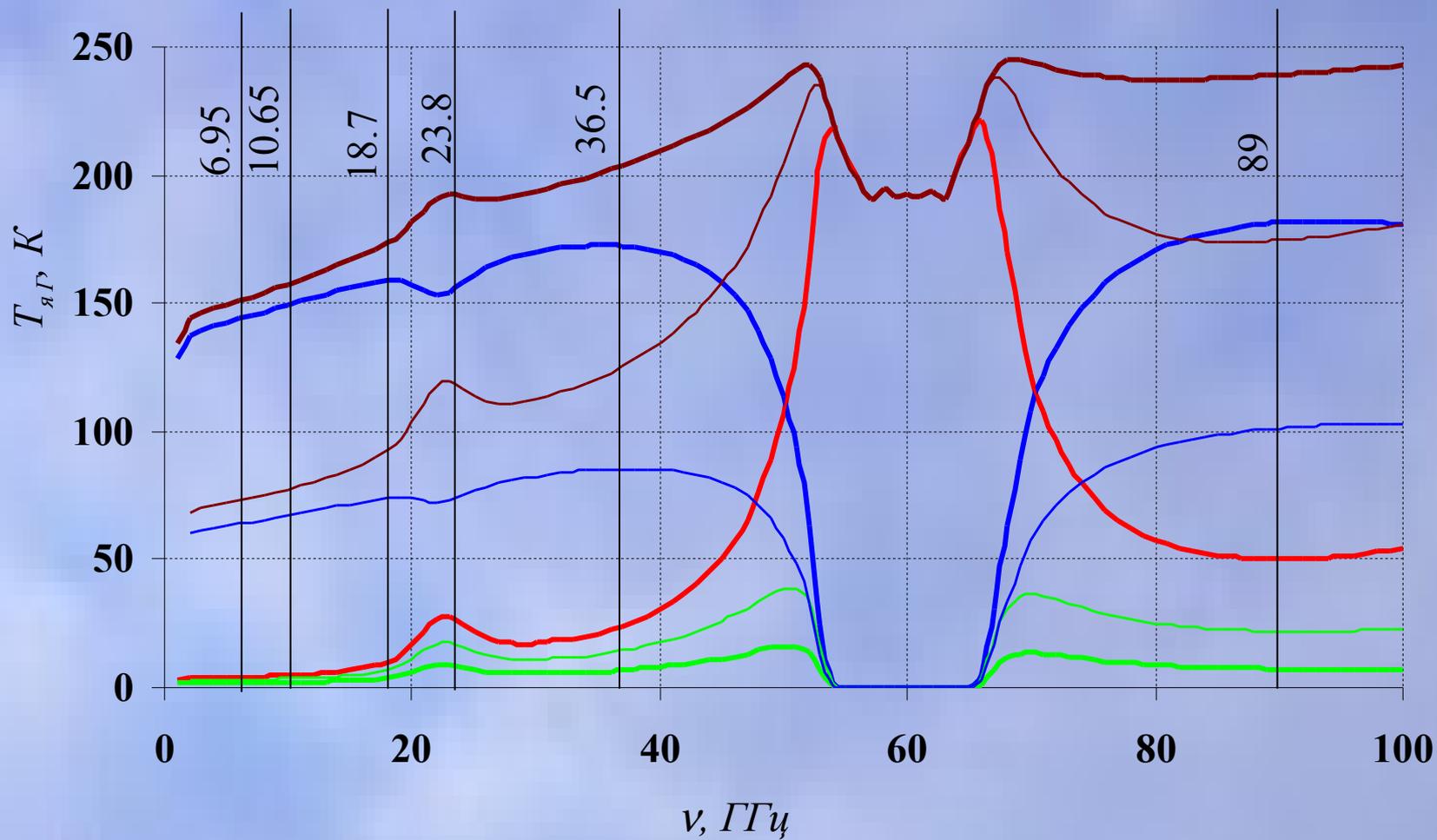
$$\chi_{pv}(\mu, \varphi) = 1 - \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^1 r_{pv}(\mu, \varphi, \mu', \varphi') \mu d\mu' d\varphi'$$

Модель коэффициента излучения (Bertrand Chapron и др.)

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

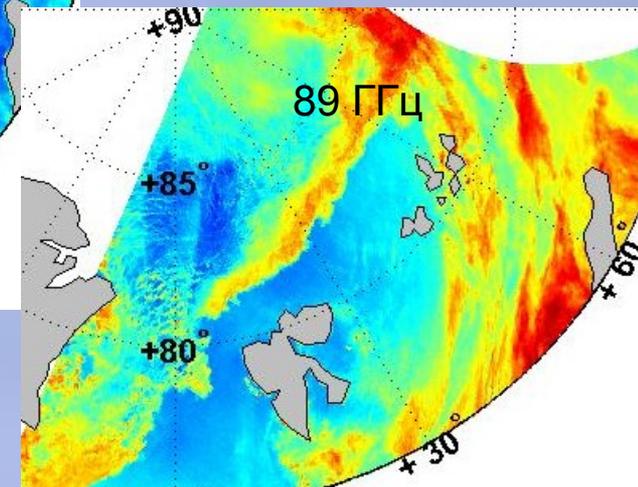
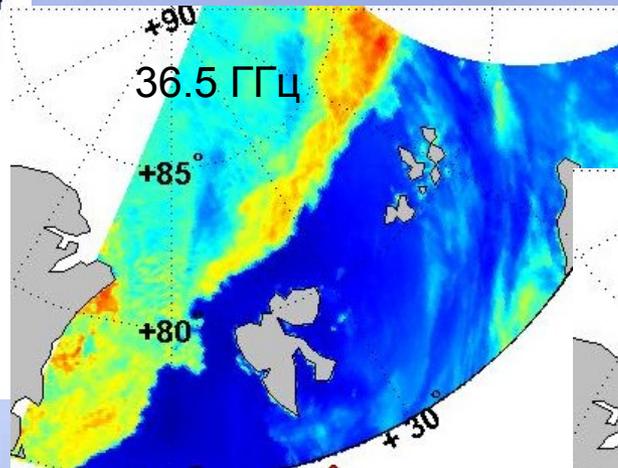
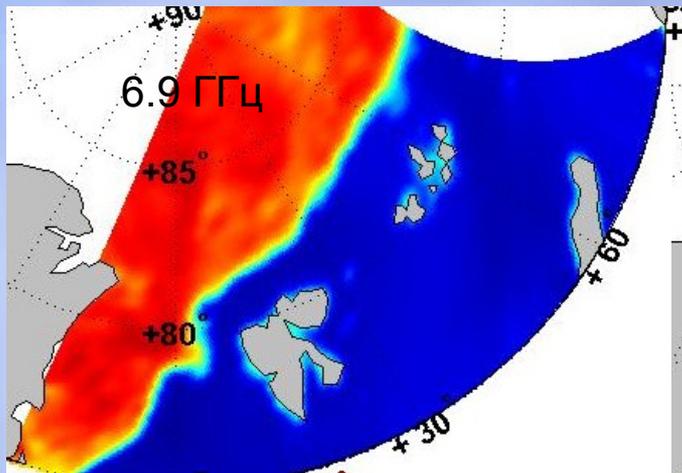


Спектры радиоярких температур в системе Атомсфера-Океан



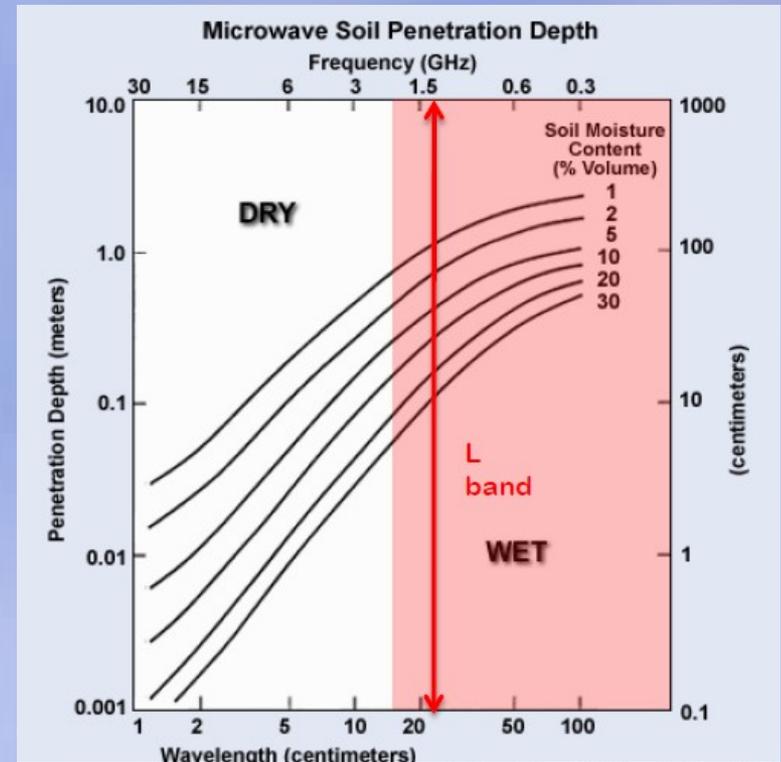
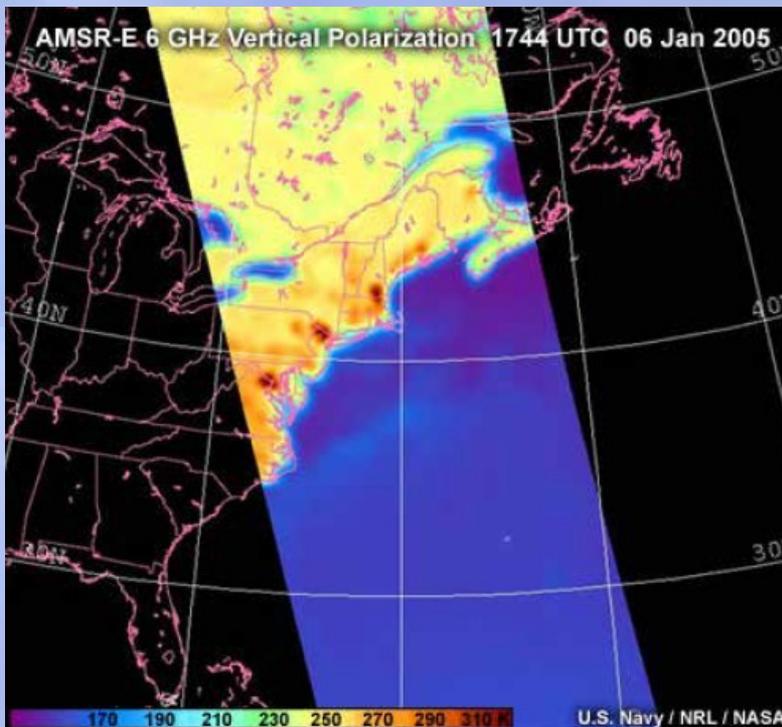
Излучение морского льда

- Излучение морского льда неполяризовано и зависит от типа льда;
- Коэффициент излучения однолетнего льда (соленого) близок к 1;
- Коэффициент излучения многолетнего льда (пережившего цикл таяния) меньше – порядка 0.7 - 0.8;
- Радиояркостный контраст между открытой водой и льдом $> 50 - 100$ К;



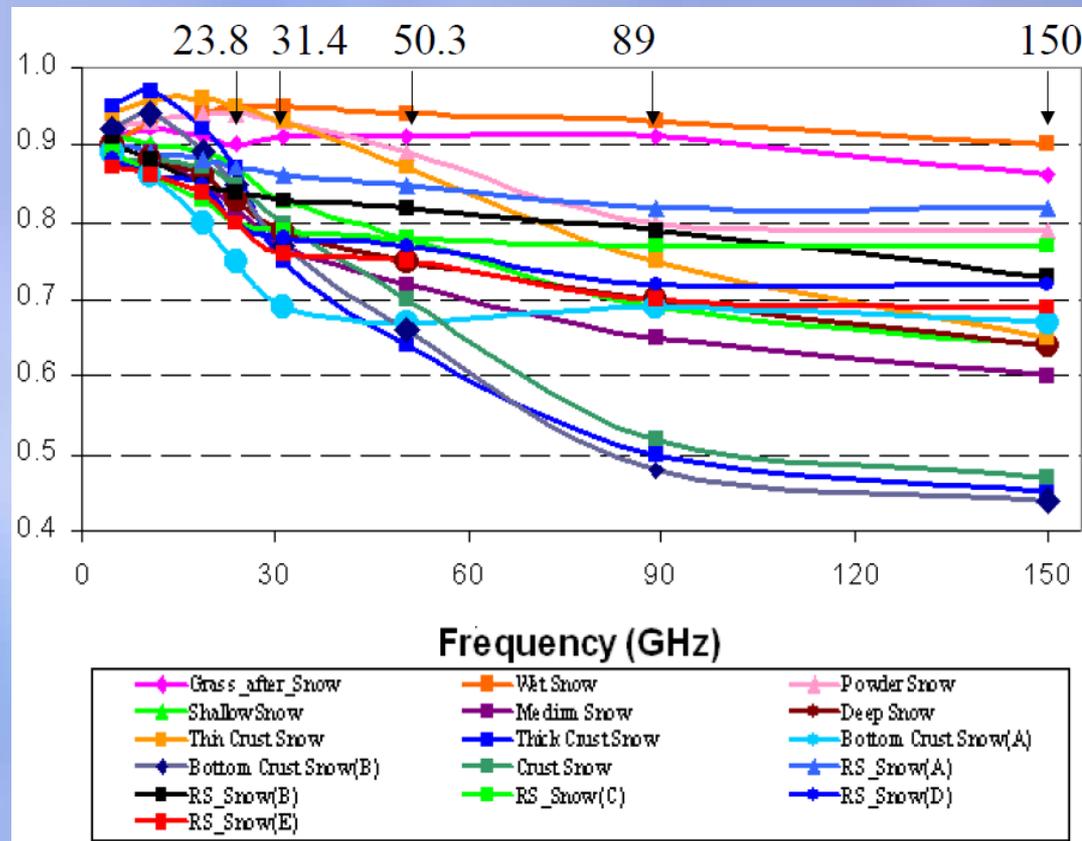
Излучение почвы

- Коэффициент излучения сухих почв близок к 1;
- Увеличение влажности почвы ведет к росту диэлектрической проницаемости ($\epsilon \sim 80$), и, следовательно, уменьшению коэффициента излучения;
- Увеличение влажности ведет также к уменьшению глубины проникновения радиации в почву



Излучение снега

- Определяется типом и состоянием снежного покрова, его влажностью;
- Имеет сильную частотную зависимость;
- Зависит от глубины снежного покрова и размера частиц;



Излучение снега на частотах сканирующих микроволновых радиометров

- Поверхностный сухой снег (shallow snow) глубиной менее 10 см прозрачен для микроволновой радиации, излучаемой подстилающей поверхностью;
- Свежий сухой снег глубиной более 10 см, главным образом, рассеивает радиацию от поверхности под ним, уменьшая $T_{я}$; По уменьшению $T_{я}$ определяют SWE;
- Увеличение влажности снега уменьшает его рассеивающие свойства, приводя к недооценке SWE;
- Осадки действуют на восходящую радиацию так же, как слой снега – уменьшают за счет рассеивания;
- Низкое разрешение радиометров приводит к ошибкам в оценке SWE за счет попадания в элемент разрешения лесов;

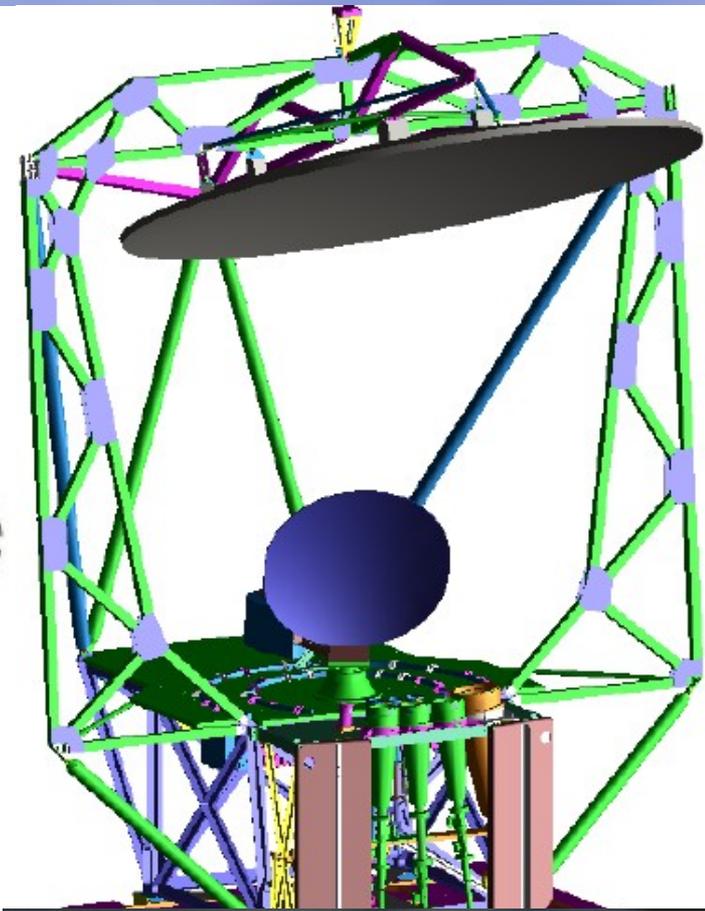
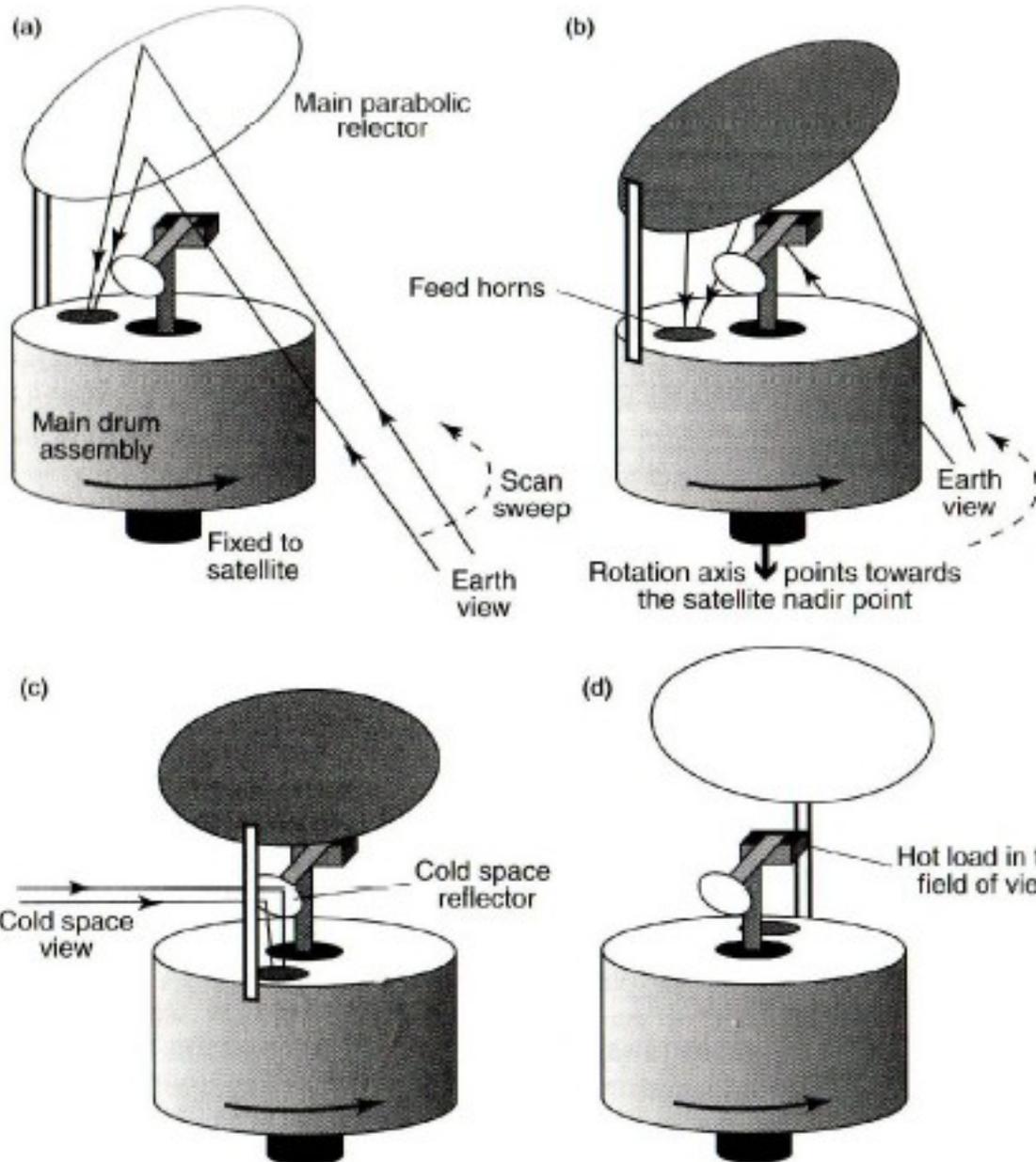
Измерение микроволновой радиации

- 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 излучающего объекта $T_{я}$, 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, при котором среднее значение изменения выходного сигнала равно действующему значению его флуктуаций
- Регистратор предназначен для вывода сигнала радиометра в цифровом виде для последующей автоматизированной обработки.

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

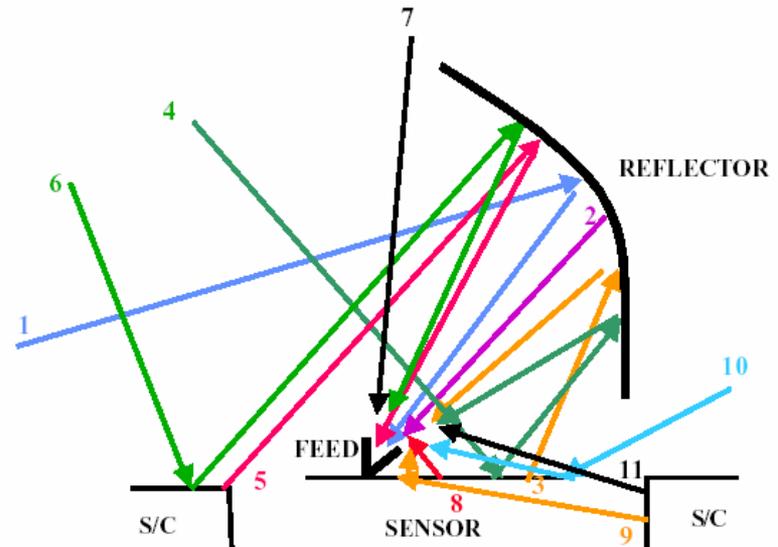


Измерение микроволновой радиации



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 приемником и собранное рефлектором
10. Внешнее излучение, отраженное приемником
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