

Распространение радиоволн в тропосфере

Показатель преломления любого газа

$$n = 1 + \rho \left(A + \frac{B}{T} \right)$$

ρ -плотность газа;

T -температура (град. K^0);

A, B – константы связанные со свойствами вещества

Индекс преломления:

$$N = 10^6 (n - 1)$$

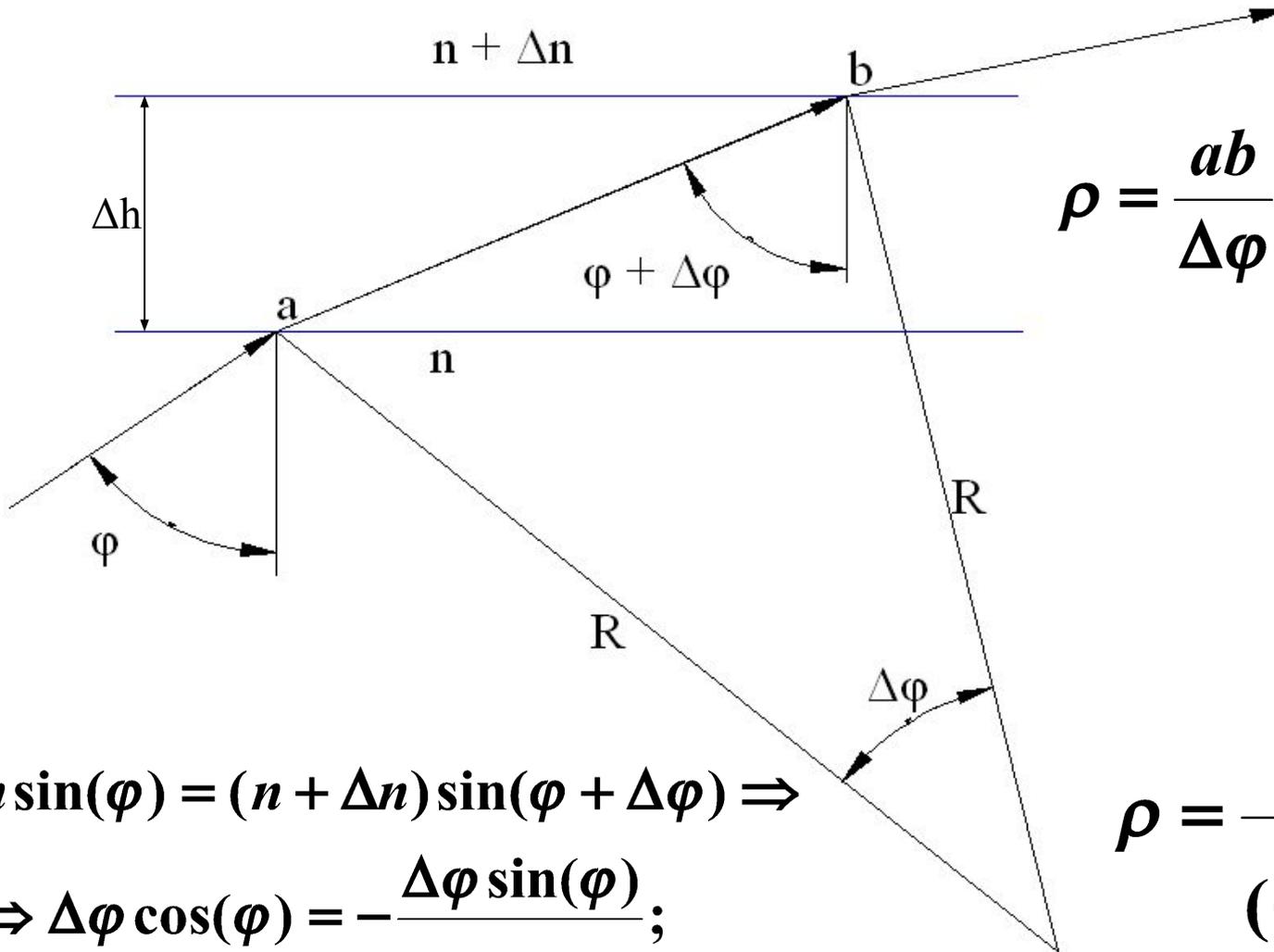
$$N = \frac{77,6}{T} \left(p + \frac{4810w}{T} \right)$$

p -давление газа; w -абсолютная влажность воздуха. Все в миллибарах.

Диэлектрическая проницаемость стандартной тропосферы

$$\varepsilon(h) = 1 + \Delta\varepsilon \exp(g_T h / \Delta\varepsilon) = 1 + 5,78 \cdot 10^{-4} \exp(-1,36 \cdot 10^{-4} h)$$

Траектория в тропосфере.



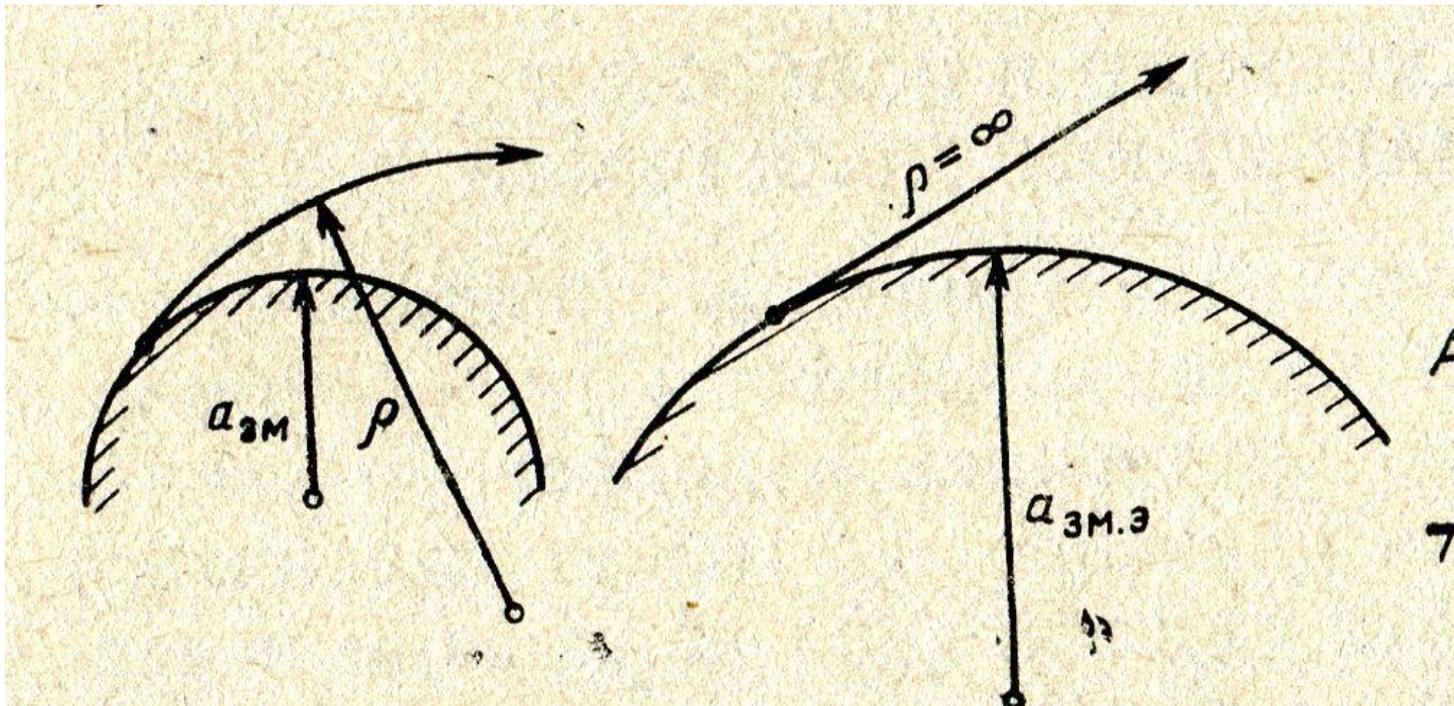
$$\rho = \frac{ab}{\Delta\varphi} = \frac{\Delta h}{(\cos\varphi)(\Delta\varphi)};$$

$$n \sin(\varphi) = (n + \Delta n) \sin(\varphi + \Delta\varphi) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta\varphi \cos(\varphi) = -\frac{\Delta\varphi \sin(\varphi)}{n};$$

$$\rho = \frac{n}{\left(-\frac{dn}{dh}\right) \sin(\varphi)}$$

Эквивалентный радиус Земли.

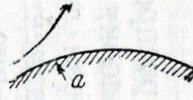
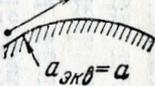
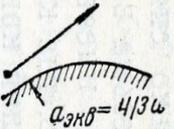
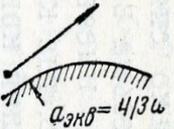
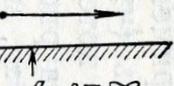
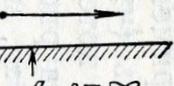
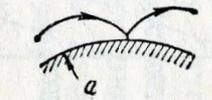


$$\frac{1}{a_3} - \frac{1}{\rho} = \frac{1}{a_{3ef}} - \frac{1}{\infty}$$

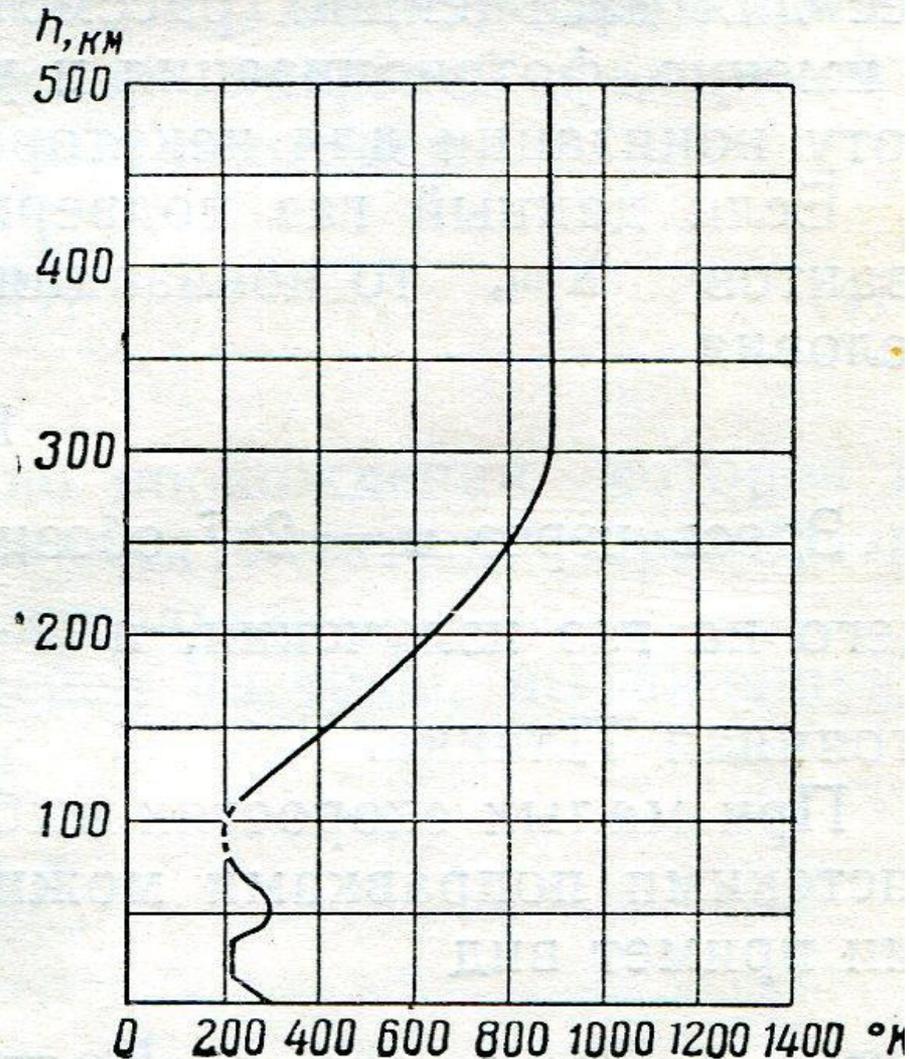
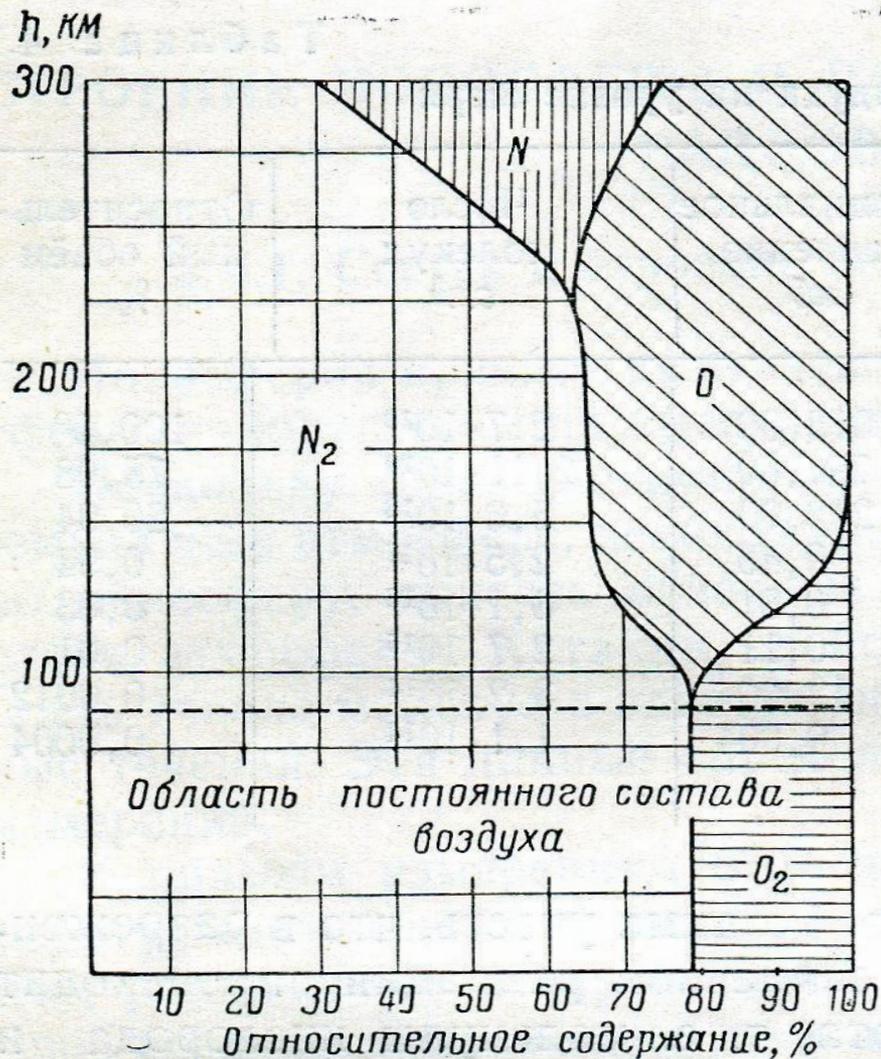
$$a_{3ef} = \frac{a_3}{\left(1 - \frac{a_3}{\rho}\right)}$$

$$a_{3ef} = 8500 \text{ km}$$

Классификация различных видов атмосферной рефракции

№ пп.	Название атмосферной рефракции	$\frac{dN}{dh}, \frac{1}{м}$	$R, м$	$a_{экр}, м$	κ	Действительная траектория	Эквивалентная траектория
А	Отрицательная	> 0	< 0	$< 6,37 \cdot 10^6$	< 1		
Б	Отсутствие рефракции	0	∞	$6,37 \cdot 10^6$	1		
В	Положительная						
В1	Пониженная	$0 \div -0,04$	$\infty \div 2,5 \cdot 10^7$	$6,37 \cdot 10^6 \div 8,5 \cdot 10^6$	$1 \div 4/3$		
В2	Нормальная	$-0,04$	$2,5 \cdot 10^7$	$8,5 \cdot 10^6$	$4/3$		
В3	Повышенная	$-0,04 \div -0,157$	$2,5 \cdot 10^7 \div 6,37 \cdot 10^8$	$8,5 \cdot 10^6 \div \infty$	$4/3 \div \infty$		
В4	Критическая	$-0,157$	$6,37 \cdot 10^8$	∞	∞		
В5	Сверхрефракция	$< -0,157$	$< 6,37 \cdot 10^8$	< 0	< 0		

Свойства ионосферы.

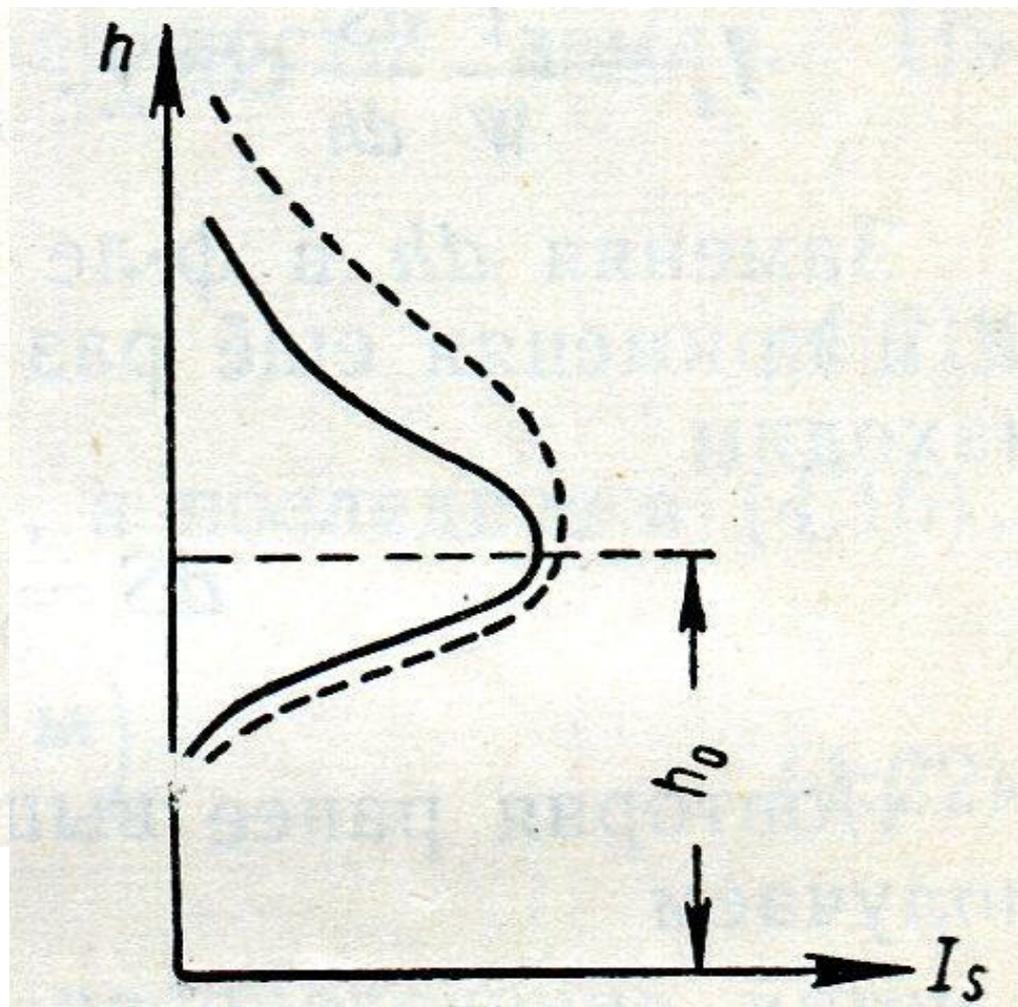
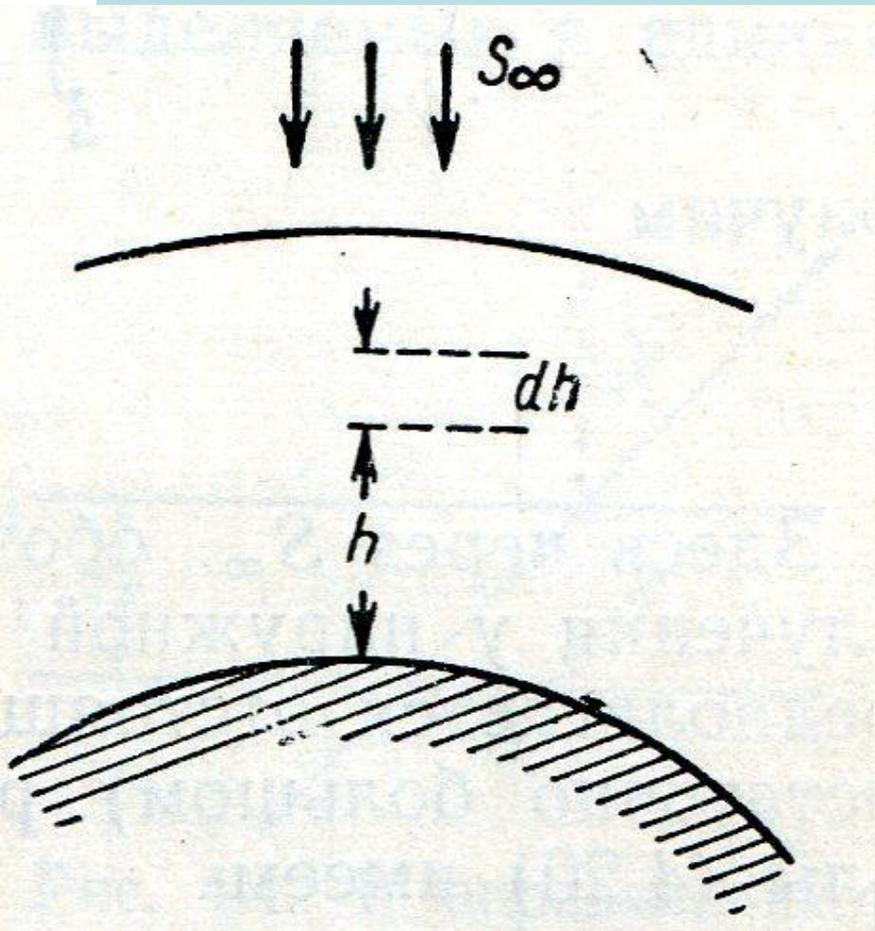


Механизмы ионизации.

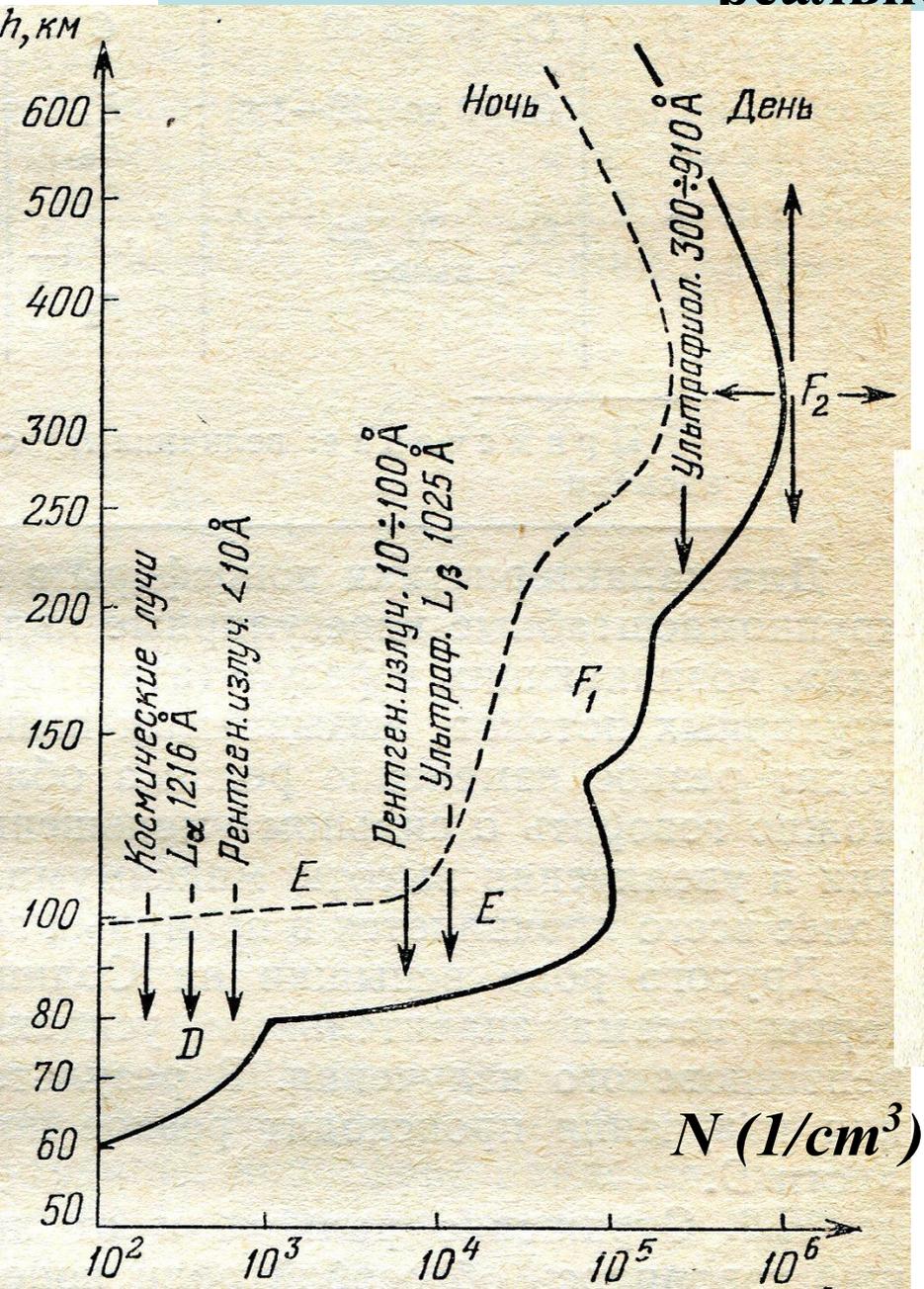
Работа ионизации для газов, входящих в состав земной атмосферы

Газ	Реакция	Ионизирующая длина волны \AA	Работа ионизации электрон-вольт
O_2	$\text{O}_2 + h\nu \rightarrow \text{O}_2^+ + e$	1010	12,1
O	$\text{O} + h\nu \rightarrow \text{O}^+ + e$	910	13,6
O^+	$\text{O}^+ + h\nu \rightarrow \text{O}^{++} + e$	310	34,9
N_2	$\text{N}_2 + h\nu \rightarrow \text{N}_2^+ + e$	800	15,5
N	$\text{N} + h\nu \rightarrow \text{N}^+ + e$	850	14,5
He	$\text{He} + h\nu \rightarrow \text{He}^+ + e$	500	24,8
H_2	$\text{H}_2 + h\nu \rightarrow \text{H}_2^+ + e$	800	15,5
H	$\text{H} + h\nu \rightarrow \text{H}^+ + e$	910	13,6
NO	$\text{NO} + h\nu \rightarrow (\text{NO})^+ + e$	1340	9,25

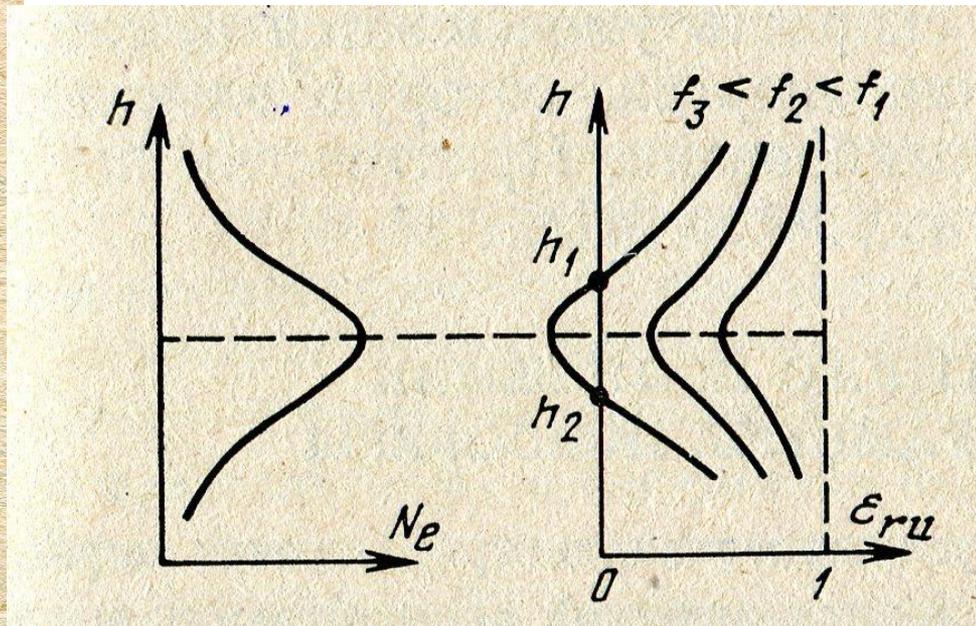
Образование слоя в однородной ионосфере.



Слои, соответствующие максимумам ионизации в реальной ионосфере.

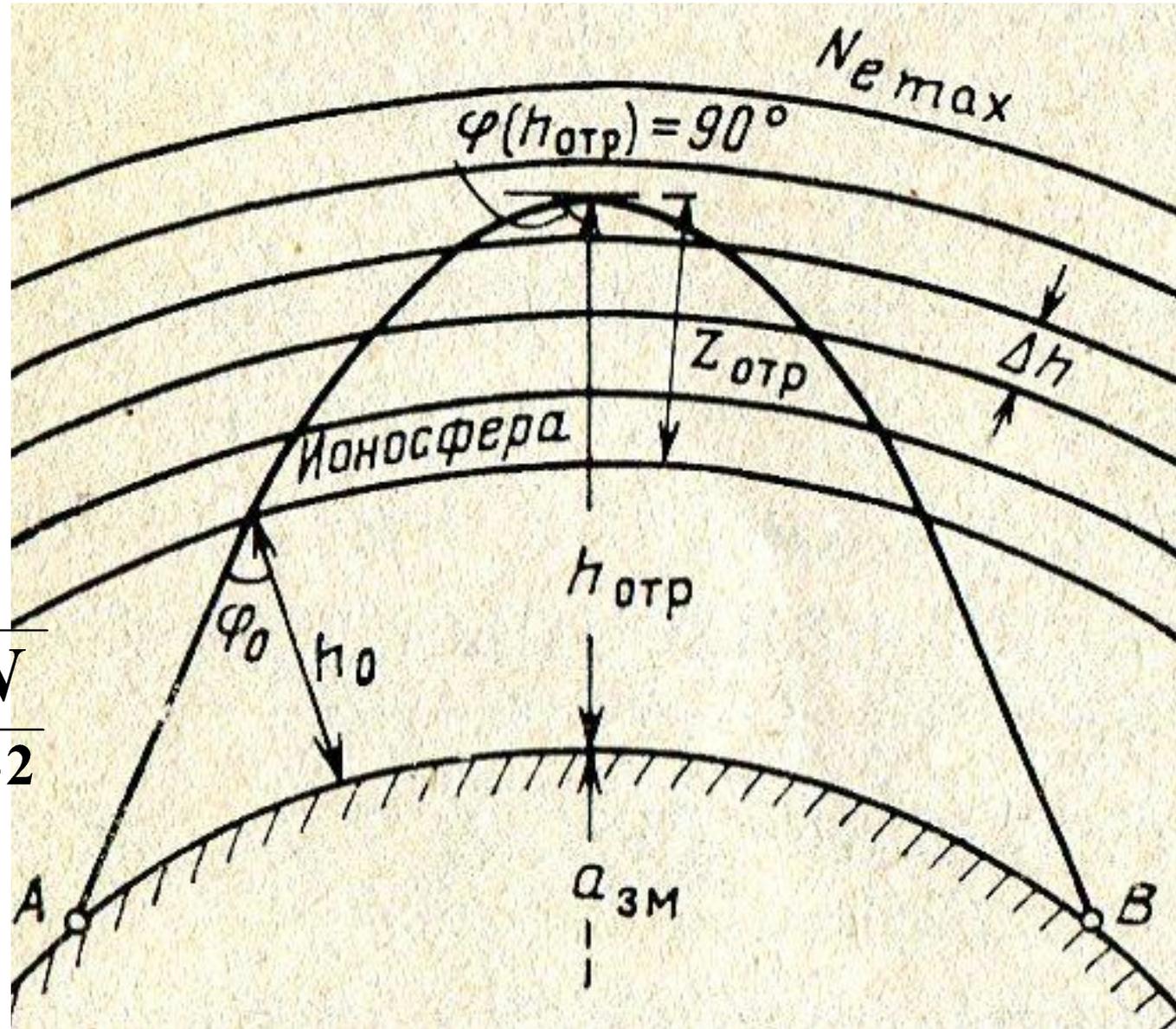


$$n = \sqrt{1 - 80,6 \frac{N}{f^2}}$$



Траектория луча в ионосфере.

$$n = \sqrt{1 - 80,6 \frac{N}{f^2}}$$



Отражение радиоволн от ионосферы

$$n(h) \sin(\varphi) = n_0 \sin(\varphi_0)$$

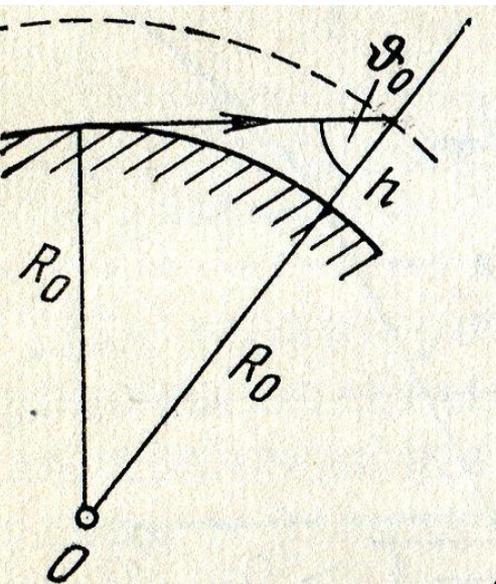
На некоторой высоте $\varphi = 90^\circ \Rightarrow \sin(\varphi) = 1$

$$n(h) = \sin(\varphi_0) \Rightarrow \cos(\varphi_0) \approx 9 \frac{\sqrt{N}}{f}$$

$$f_{\max}(\varphi_0) \approx 9 \frac{\sqrt{N_{\max}}}{\cos(\varphi_0)}$$

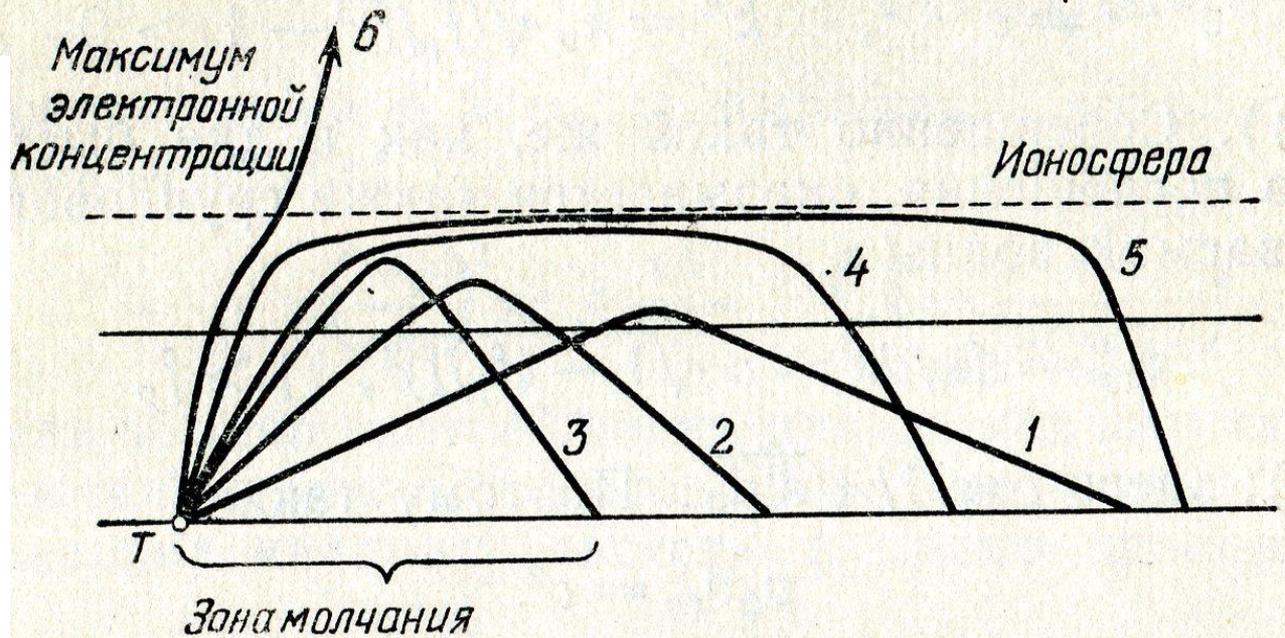
$$f_{kp}(\varphi_0 = 0^\circ) \approx 9 \sqrt{N_{\max}}$$

Максимальная частота и варианты траекторий.

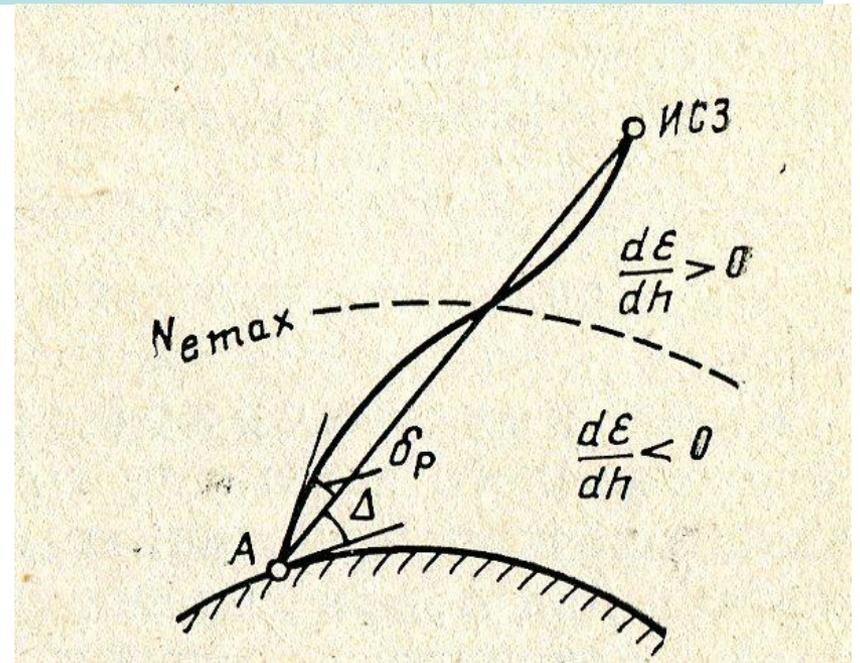
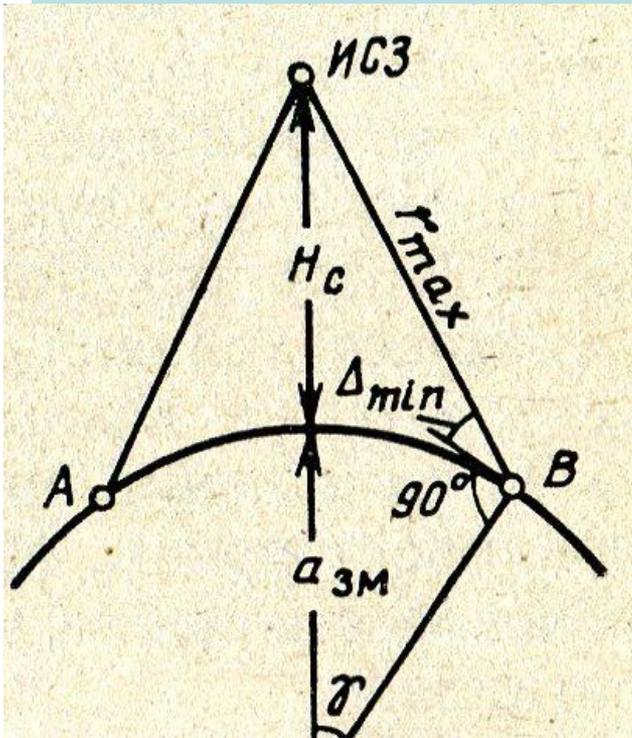


$$\nu_0 = \arcsin\left(\frac{R_0}{R_0 + h}\right) \Rightarrow$$

$$f_{\max \text{np}} \approx 9\sqrt{N} \frac{R_0 + h}{\sqrt{(2R_0 + h)h}}$$



Космические линии связи.



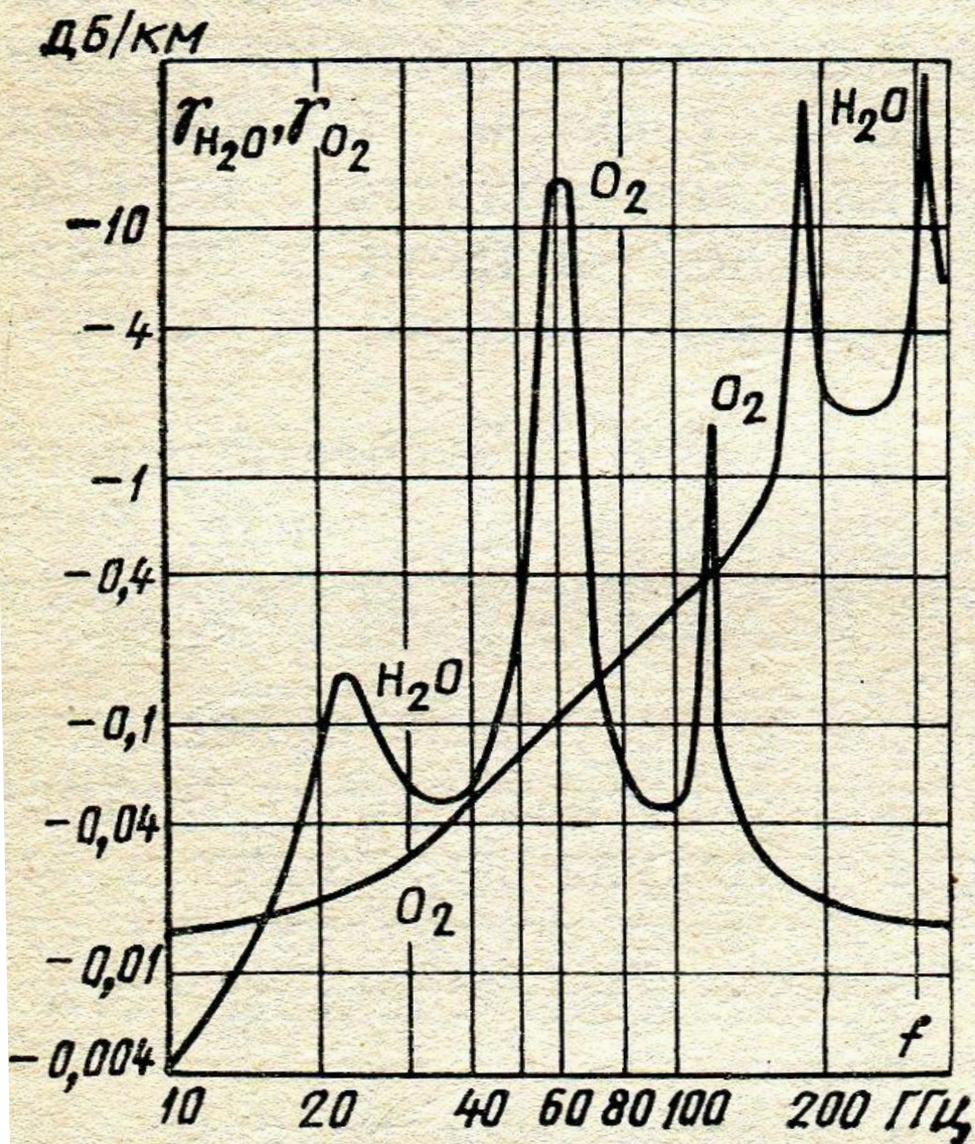
$$H_c = (10000 - 36000) \text{ km} \quad r_{max} = (17000 - 40000) \text{ km}$$

Основные потери:

$$F = 3 \text{ ГГц} - (185 - 193) \text{ dB}$$

$$F = 30 \text{ ГГц} - (205 - 214) \text{ dB}$$

Затухание в тропосфере и дисперсия в ионосфере.



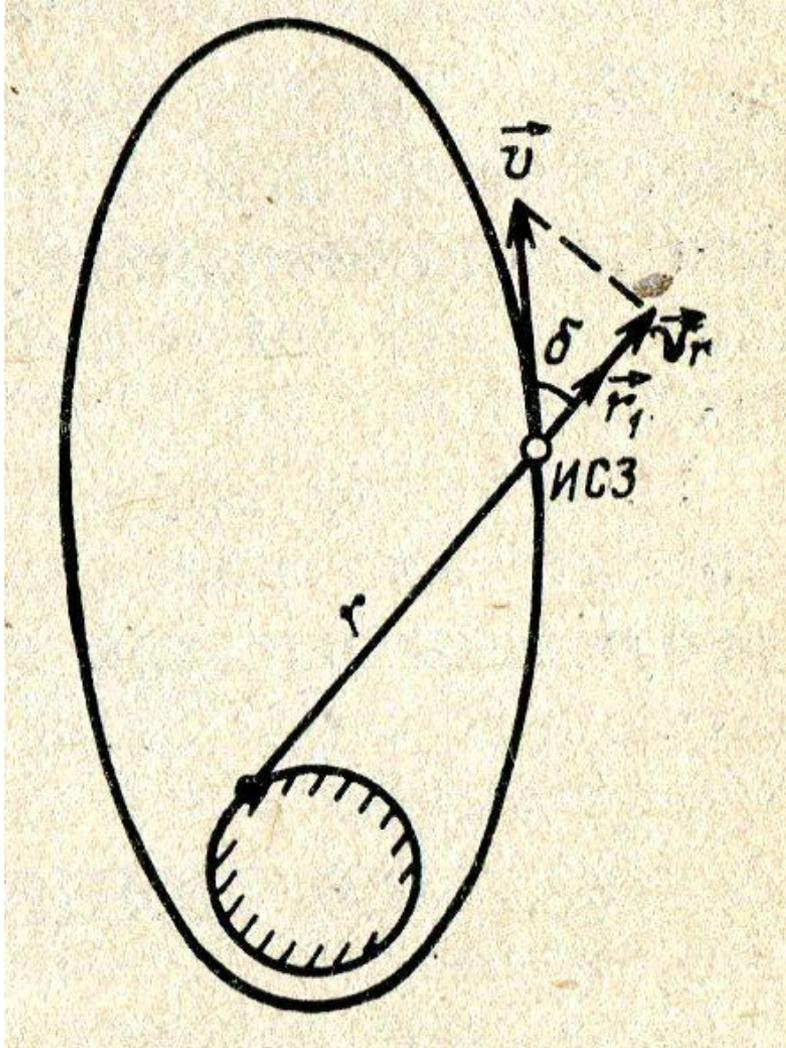
$$n = \sqrt{1 - 80,6 \frac{N}{f^2}}$$

$$\Delta f_{\max} \leq 1,1 \cdot 10^{-6} \sqrt{f^3 \sin(\Delta)}$$

$$f = 10^9 \text{ Hz} \Rightarrow \Delta f_{\max} = 12 \text{ MHz}$$

$$f = 10^{10} \text{ Hz} \Rightarrow \Delta f_{\max} = 410 \text{ MHz}$$

Доплеровский сдвиг частоты



$$f_d = f \left(1 - \frac{v}{c} \cos \delta\right) \Rightarrow$$

$$\Delta f_d = f_d - f = (0,2 - 0,02) \text{ MHz}$$

$$(\Delta f_{\max})_d = \Delta f_{\max} \left(1 - \frac{v}{c} \cos \delta\right)$$