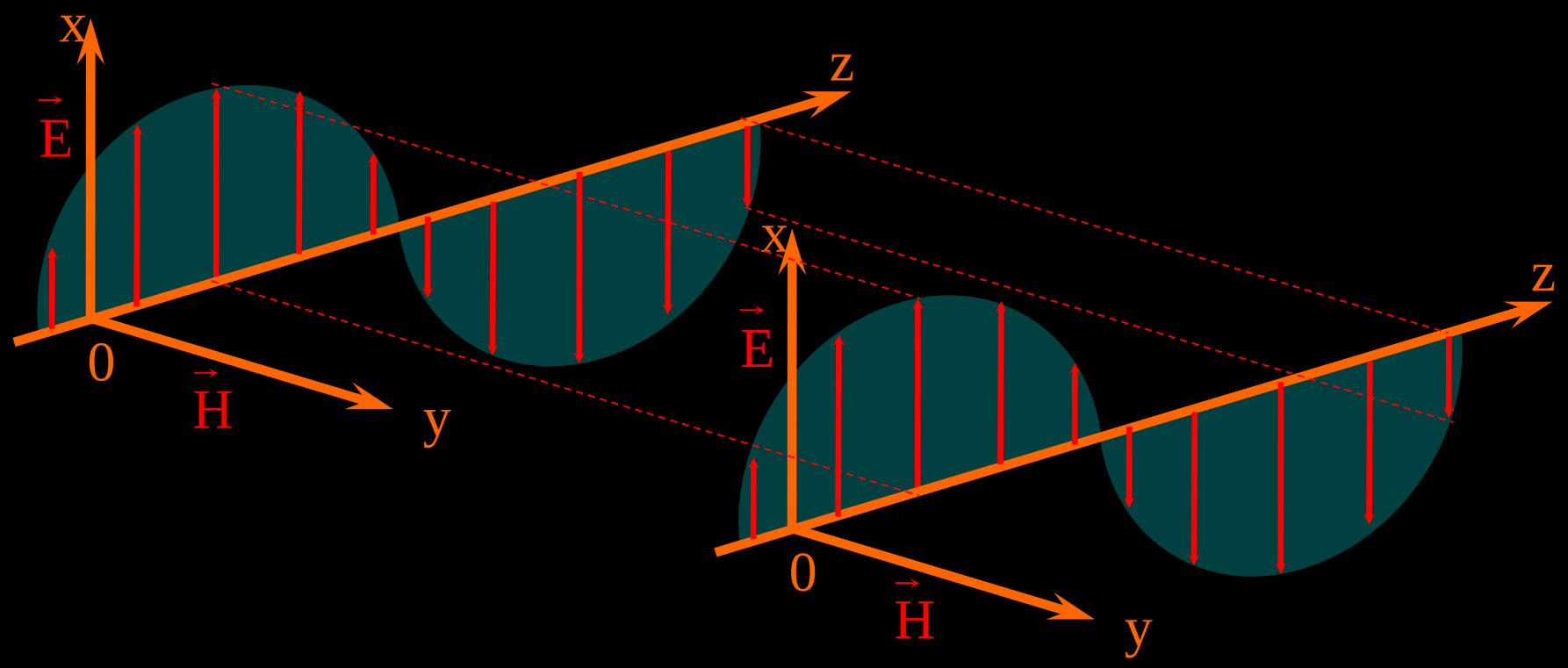
Рассеяние электромагнитной волны на частицах: теории Рэлея и Ми

Д. А. Северов

Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН

Институт географии РАН

Плоская, линейно поляризованная электромагнитная волна.

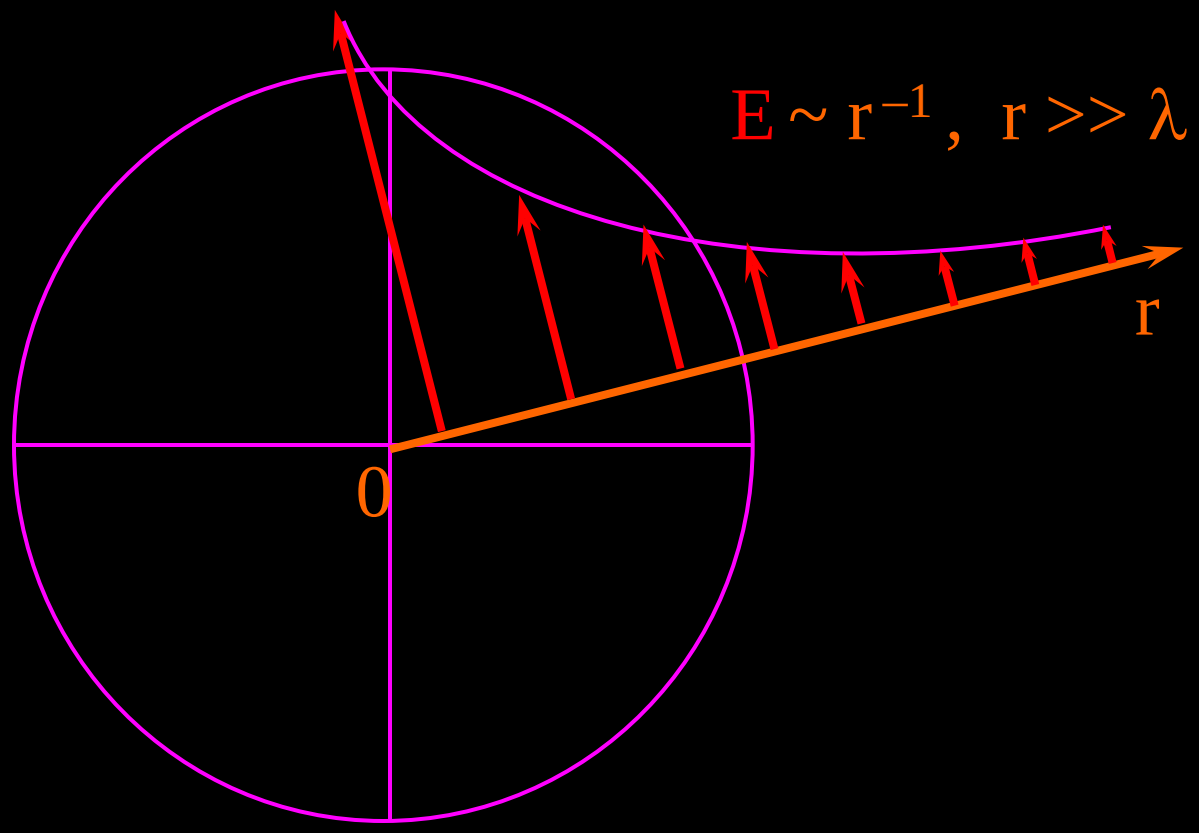


$\vec{E}$ - вектор напряженности электрического поля

$\vec{H}$ - вектор напряженности магнитного поля

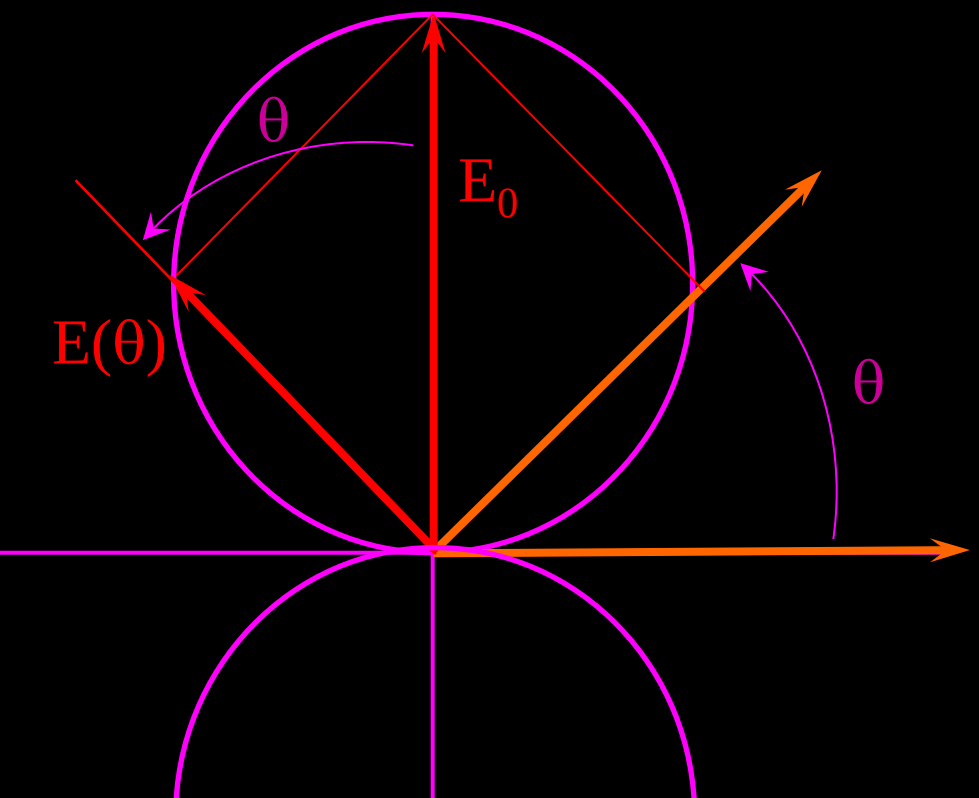
(X0Z – плоскость “E” , Y0Z – плоскость “H”)

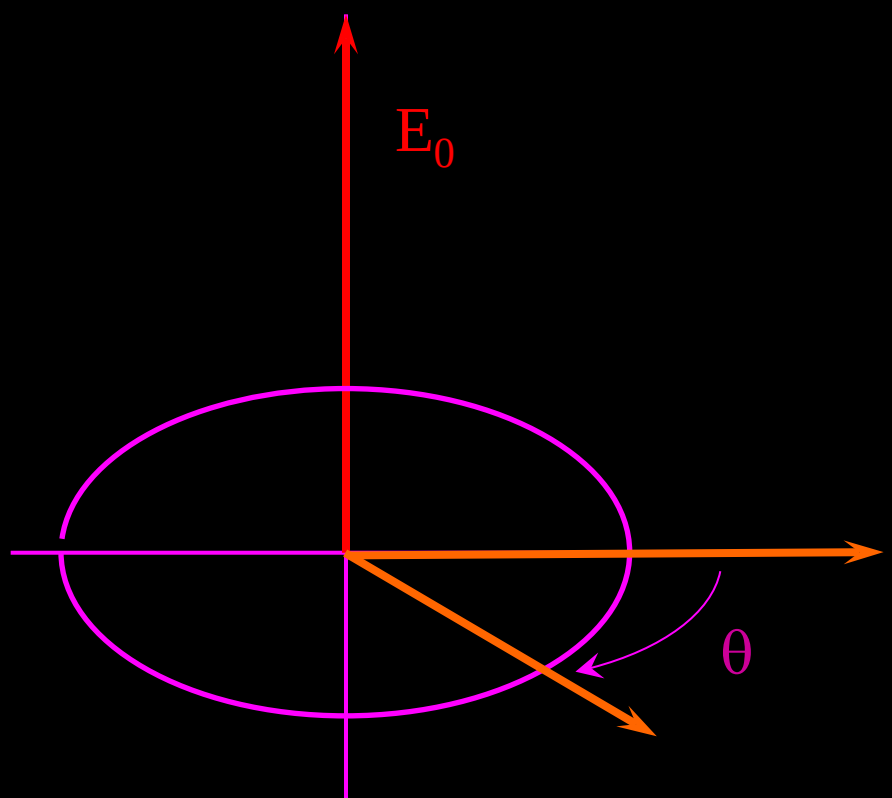
E – напряженность электрического поля на фронте сферической волны.



$E(\theta) = E_0 \cos(\theta)$ – амплитуда колебаний напряженности электрического поля волны, распространяющейся в плоскости ”E” под углом θ к набегающей волне.

E_0– амплитуда колебаний напряженности электрического поля волны, распространяющейся в плоскости ”H”, не зависит от угла θ .





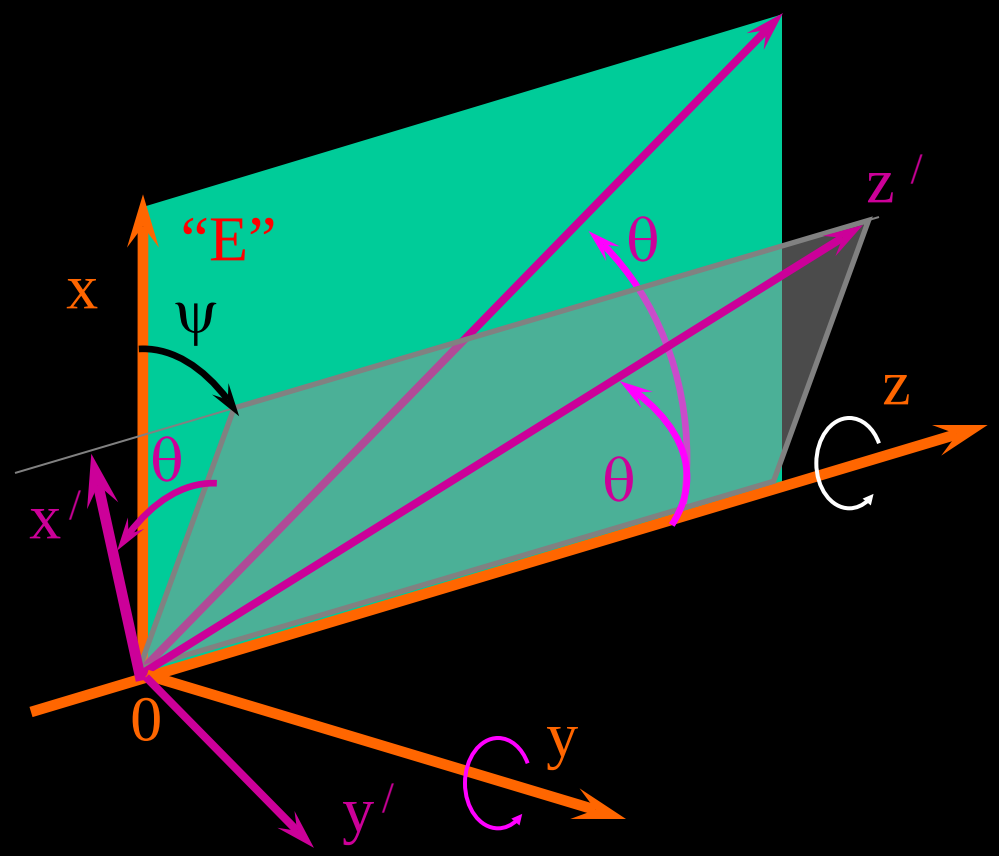
Преобразование декартовых координат вектора $E=\{ \vec{E}_x , 0 , 0 \}$

при повороте осей на угол θ и ψ (углы Эйлера)

$\vec{E}(\theta, \psi)= E_x \cdot \{\cos \psi , - \cos \theta \cdot \sin \psi , \sin \theta \cdot \sin \psi \}$

Интенсивность рассеянной волны в направлении θ , ψ

$I(\theta, \psi) \sim E_x^2 \cdot (\cos^2 \psi + \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \psi)$



Осреднение по ψ

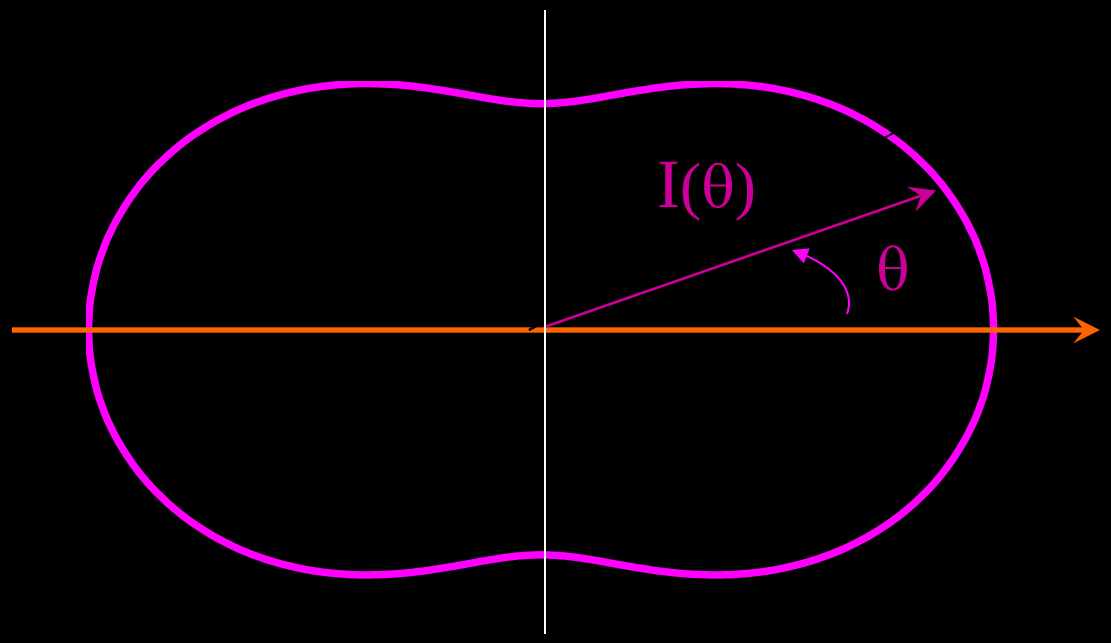
$$I(\theta) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} I(\theta,\psi)d\psi =$$

$$= \frac{1}{2}(1+\cos^2\theta)$$

Индикатриса рассеяния

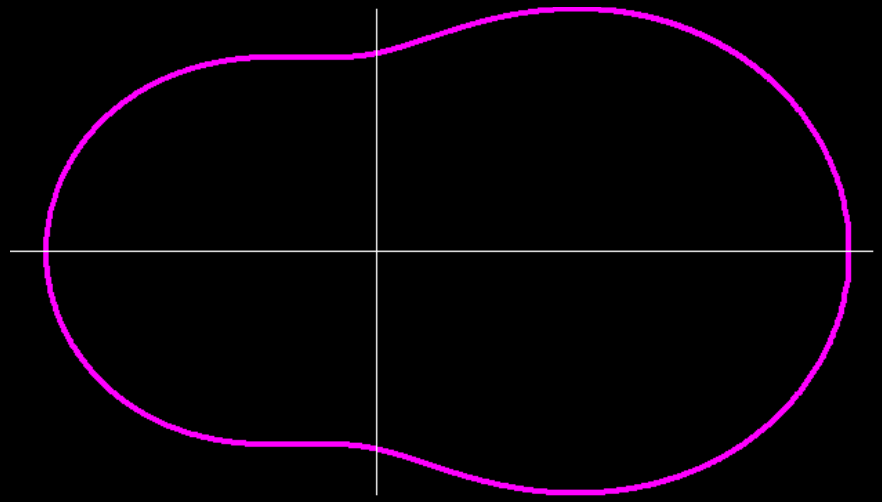
$$\frac{I(\theta)}{I(\pi/2)} = 1+\cos^2\theta$$

Индикатриса релеевского рассеяния света



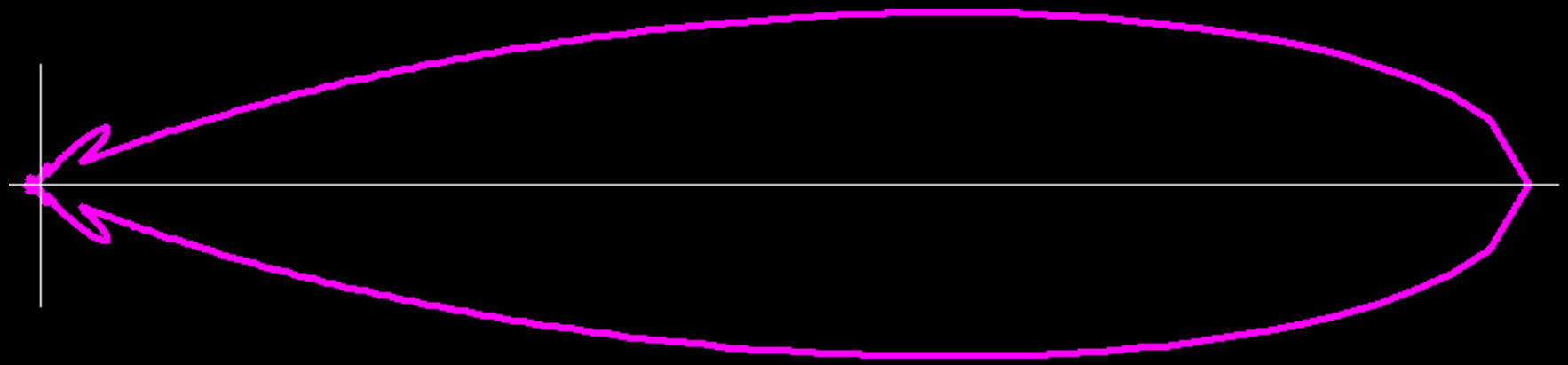
Интенсивность света, рассеянного единицей объема оптически неоднородного идеального газа $I \sim \frac{(n-1)^2}{\lambda^4 \cdot N_0}$, где n –показатель преломления газа, N_0 – число молекул газа в единице объема.

Индикатриса рассеяния света с длиной волны λ сферической частицей (75% H_2SO_4) радиуса r .



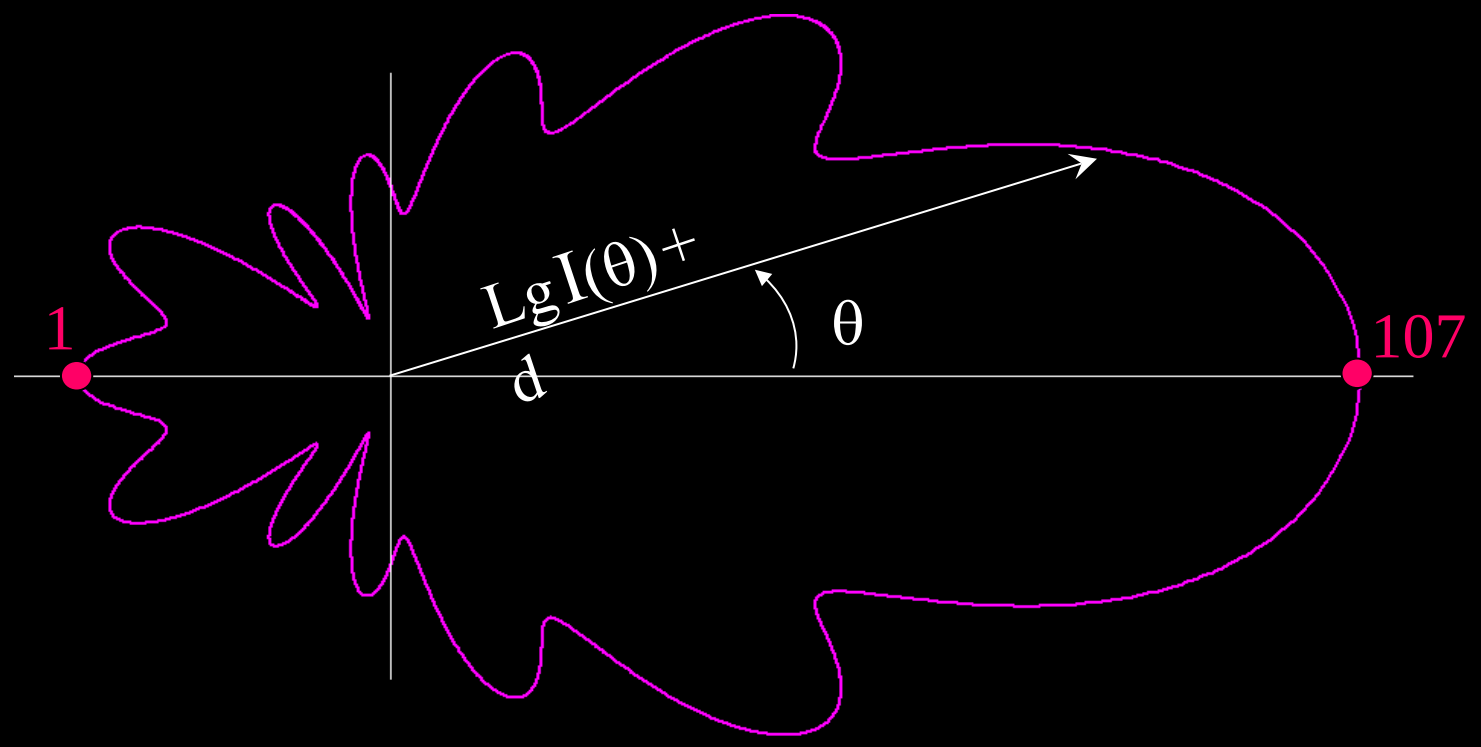
r =0.05 , λ=0.5 мкм

r =0.5 , λ=0.5 мкм



Индикатриса рассеяния света с длиной волны λ сферической частицей (75% H_2SO_4) радиуса r в логарифмическом масштабе.

r =0.5 , λ=0.5 мкм



Формулы Г. Ми .

$$A_1 = \frac{1}{k}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2n+1}{n(n+1)}\left[a_n\pi_n(\cos\theta)+b_n\tau_n(\cos\theta)\right] , \qquad A_2 = \frac{1}{k}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2n+1}{n(n+1)}\left[b_n\pi_n(\cos\theta)+a_n\tau_n(\cos\theta)\right] ,$$

$$a_n = \frac{\psi_n'(y)\,\psi_n(x) - m\psi_n'(x)\,\psi_n(y)}{\psi_n'(y)\,\zeta_n(x) - m\,\zeta_n'(x)\,\psi_n(y)} , \qquad b_n = \frac{m\,\psi_n'(y)\,\psi_n(x) - \psi_n'(x)\,\psi_n(y)}{m\,\psi_n'(y)\,\zeta_n(x) - \zeta_n'(x)\,\psi_n(y)} ,$$

$$\psi_n(z) = \sqrt{\frac{\pi z}{2}}\,J_{n+\frac{1}{2}}(z) , \qquad \zeta_n(z) = \sqrt{\frac{\pi z}{2}}\left(J_{n+\frac{1}{2}}(z) - i\cdot N_{n+\frac{1}{2}}(z)\right) ,$$

$$\pi_n(\cos\theta) = \frac{1}{\sin\theta}\,P_n^{(1)}(\cos\theta) , \qquad \tau_n(\cos\theta) = \frac{d}{d\theta}\,P_n^{(1)}(\cos\theta) , \qquad (5.4)$$

$$Q_{oca} = \frac{2}{x^2}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}(2n+1)\cdot\mathrm{Re}(a_n + b_n) , \qquad x = \frac{2\pi a}{\lambda}$$

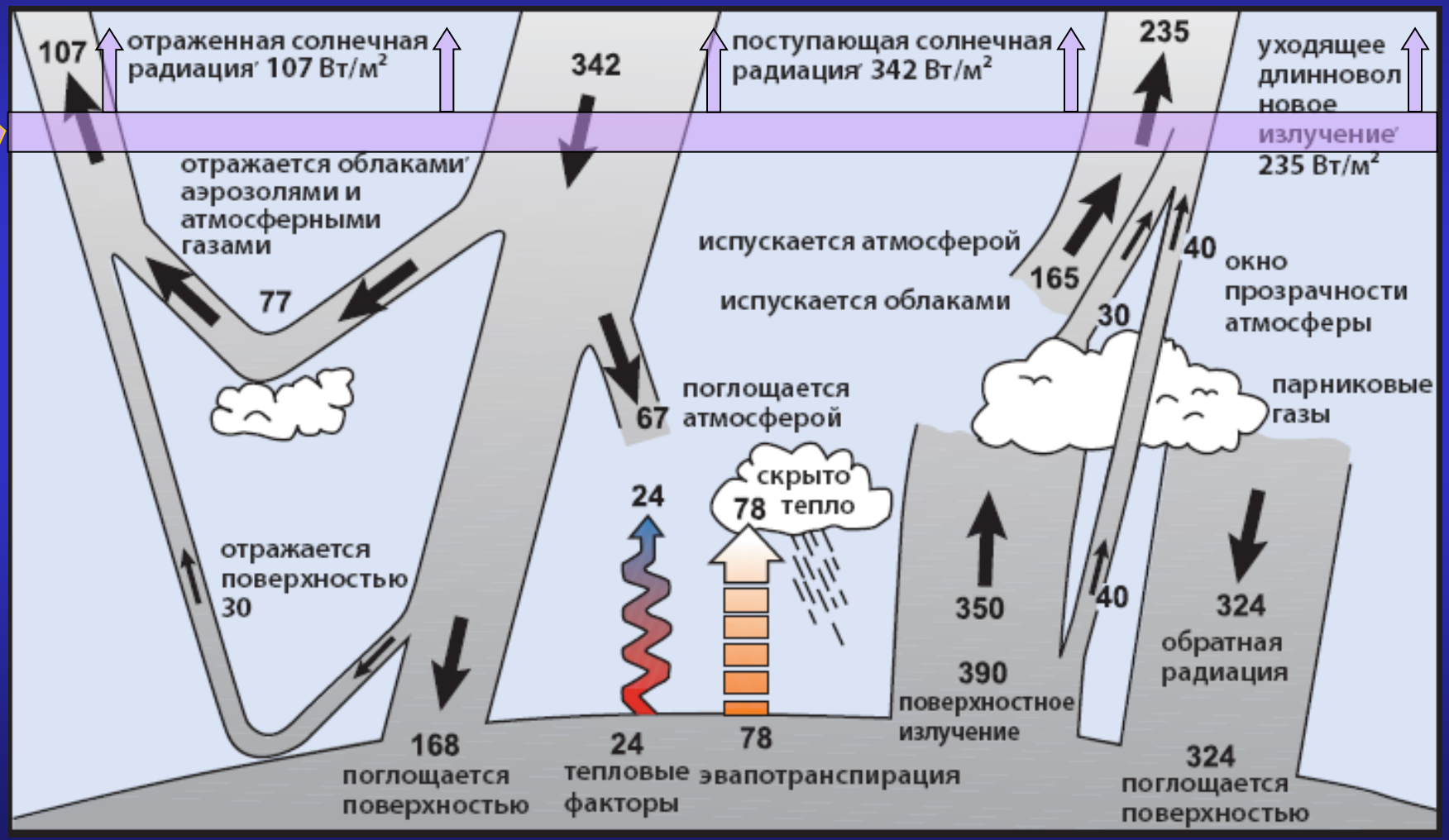
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} , \qquad m = n - i\cdot\nu , \qquad y = m\,x , \qquad i = \sqrt{-1} ,$$

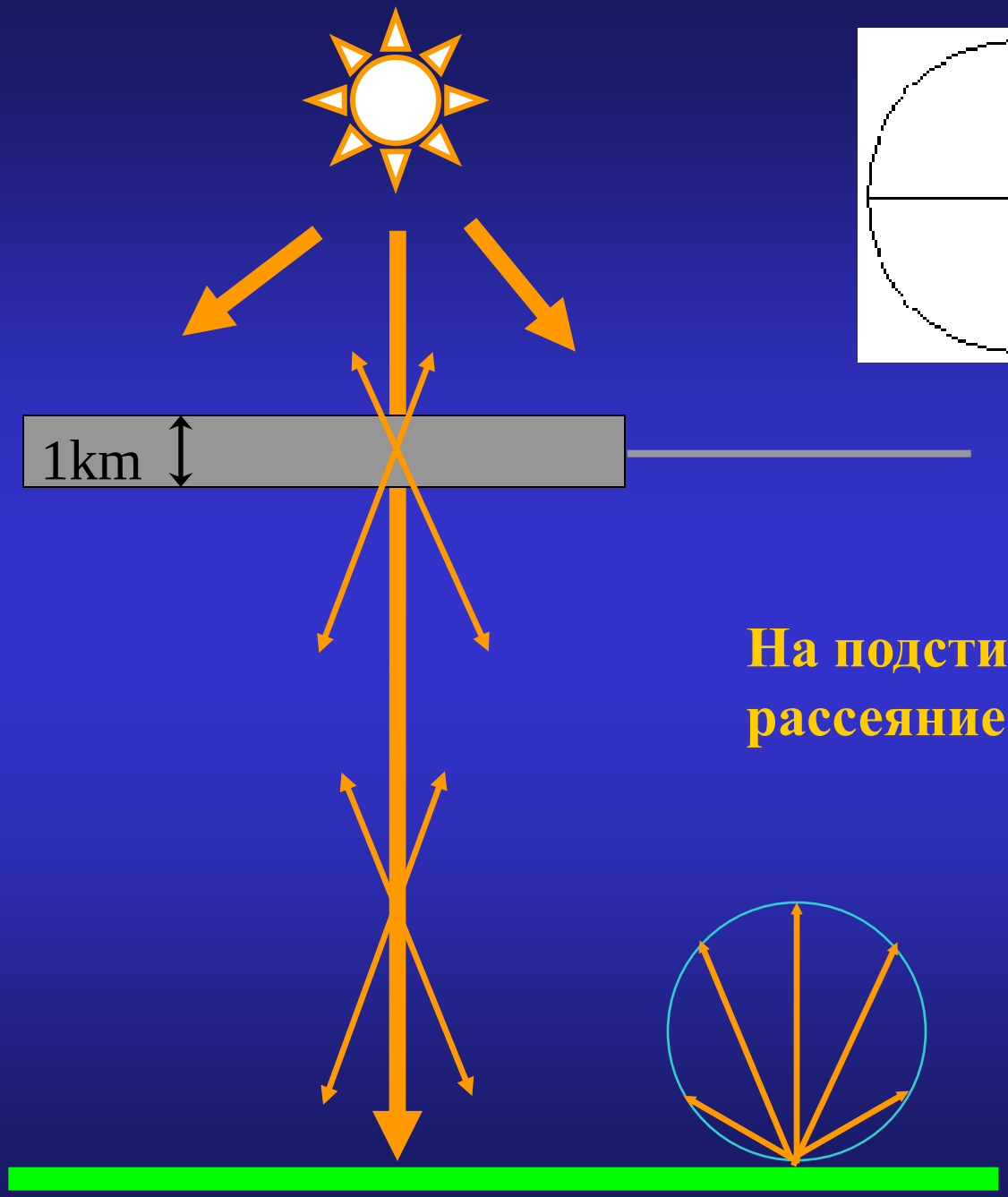
Уравнения Максвелла.

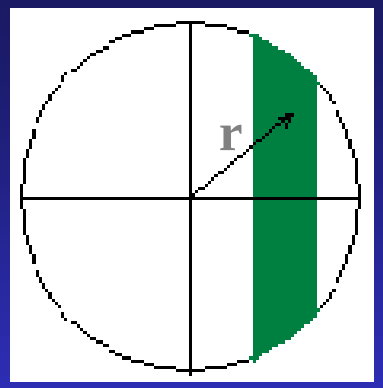
$$\mathrm{rot}\,\vec{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \mathrm{div}\,\vec{D} = 4\pi\rho \qquad \vec{D} = \varepsilon\vec{E}$$

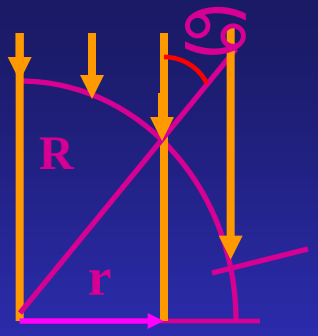
$$\mathrm{rot}\,\vec{H} = \frac{4\pi}{c}\vec{j} + \frac{1}{c}\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \qquad \mathrm{div}\,\vec{B} = 0 \qquad \vec{B} = \mu\vec{H}$$

Один из возможных способов противодействия потеплению климата: слой искусственно созданного аэрозоля









На подстилающей поверхности рассеяние по закону Ламберта.

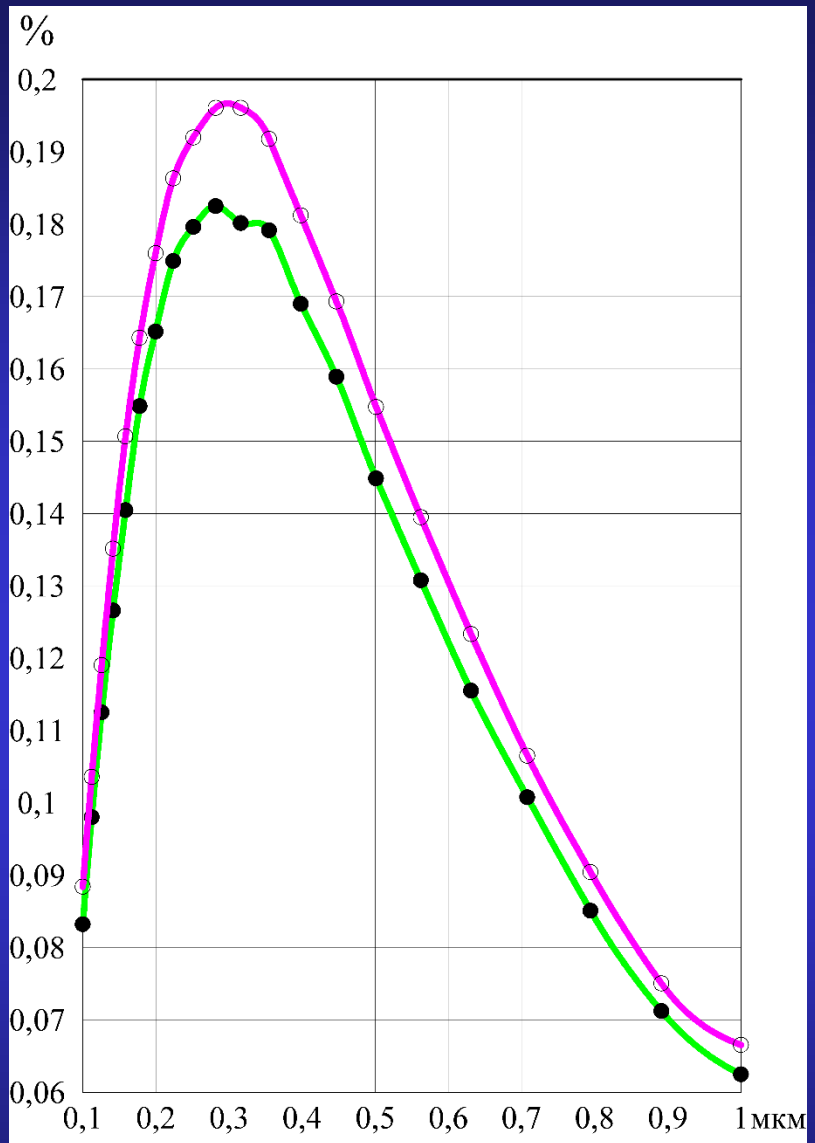


Рис. 1

Относительное уменьшение потока радиации, поглощаемого земной поверхностью, в зависимости от радиуса частиц монодисперсного сернокислотного аэрозоля в количестве 1 Мт , равномерно распределенного в слое инжекции в нижней стратосфере на высоте 12 км.

Альбедо ➡ 0.25 ; ➡ 0.23

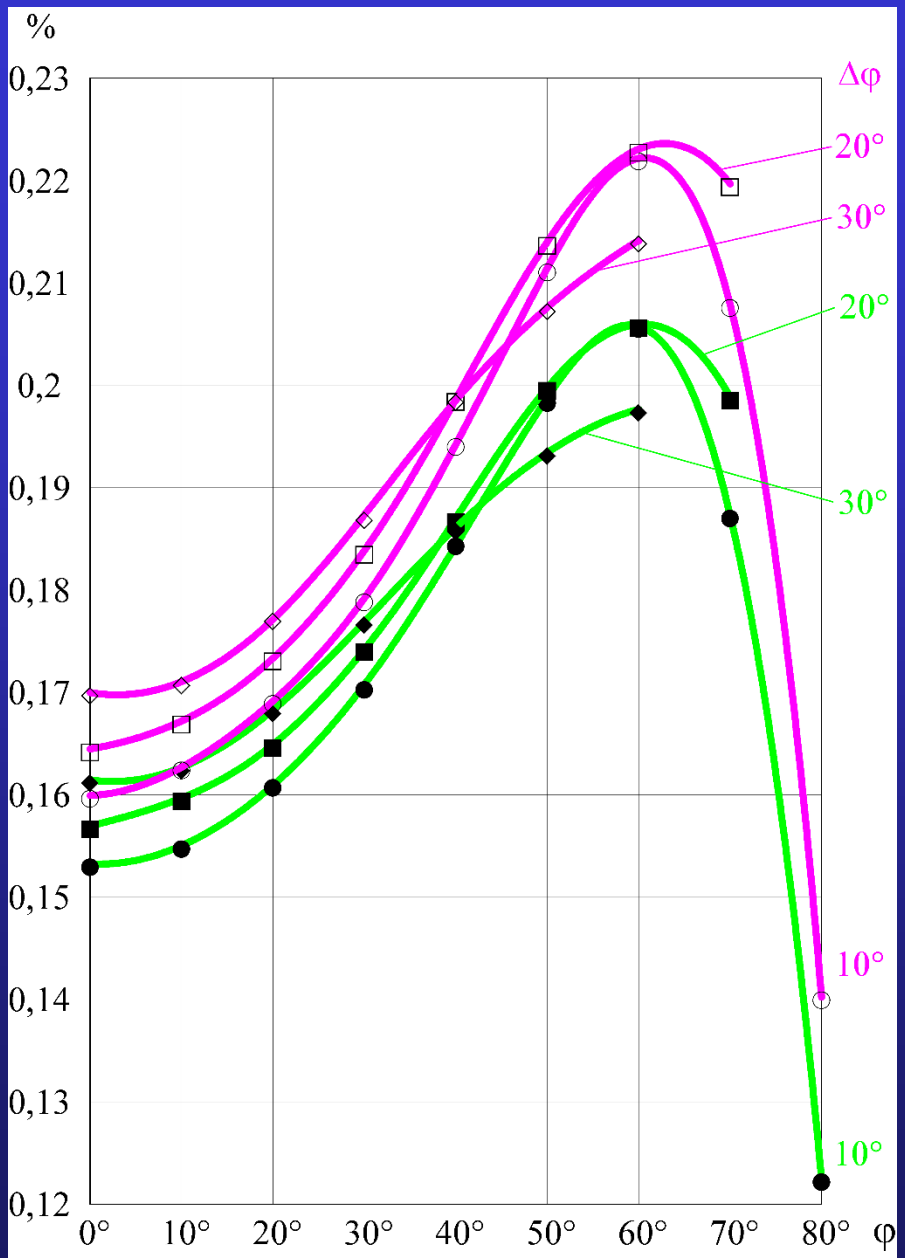


Рис. 2

Относительное уменьшение потока радиации, поглощаемой земной поверхностью, в зависимости от месторасположения зоны, содержащей 1 Мт монодисперсного сернокислотного аэрозоля, радиус Частиц которого 0.3 мкм. Аэрозоль равномерно распределен в границах широтной зоны $\varphi \pm \Delta\varphi$. Изменение эффективности ослабления солнечной радиации аэрозолем при смещении зоны в более высокие широты, представлено ростом эффективности на 35 % в пределах $0° \le \varphi \le 60°$, сменяемым почти двукратным спадом на участке $60° \le \varphi \le 80°$ для $\Delta\varphi = 10°$.

Альбедо ➡ 0.25 ; ➡ 0.23

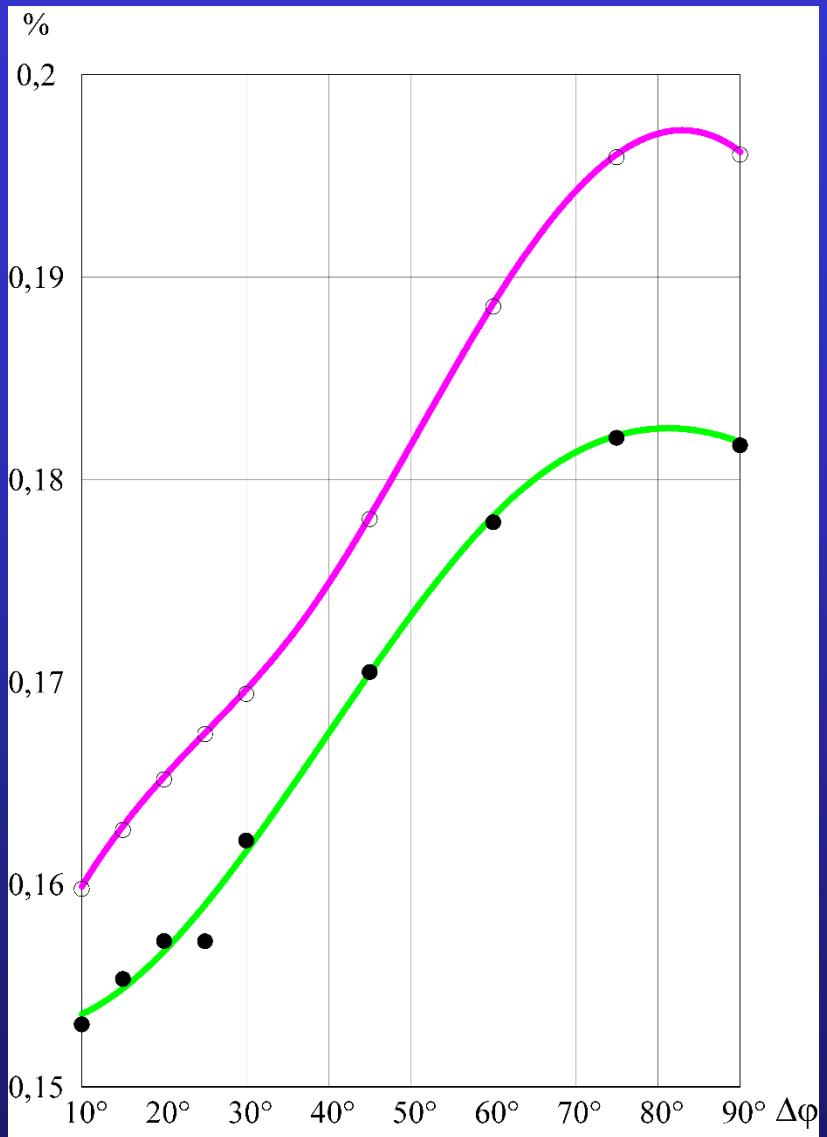


Рис. 3

Относительное уменьшение потока солнечной радиации, поглощаемой земной поверхностью, в зависимости от ширины экваториальной зоны 0° ± Δφ , содержащей 1 Мт монодисперсного сернокислотного аэрозоля, радиус частиц которого 0.3 мкм.

Увеличение Δφ от 10° до 90° сопровождается, приблизительно, 20% ростом эффективности использования сернокислотного аэрозоля.

Альбедо ➡ 0.25 ; ➡ 0.23

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ