Инфракрасное излучение в энергетике атмосферы.

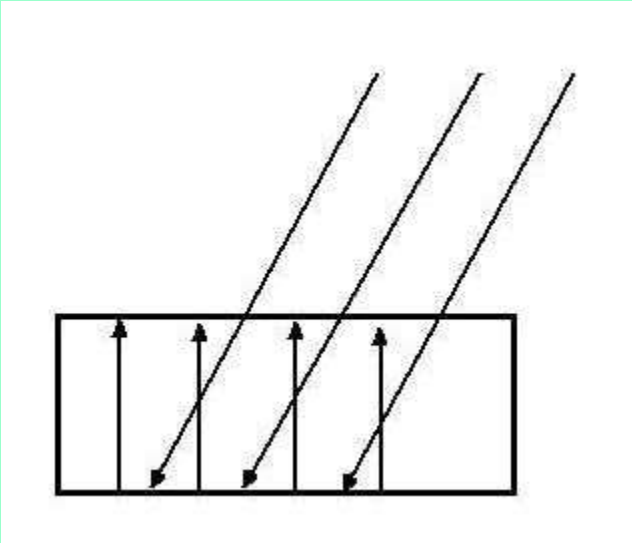
Б.М.Смирнов

ОИВТ РАН

Содержание

1. Стандартная модель и энергетика атмосферы Земли.
2. Глобальная температура Земли.
3. Углекислый газ в атмосфере
4. Атмосферная вода.
5. Химическое равновесие в атмосфере.
6. Парниковый эффект в атмосфере Земли.

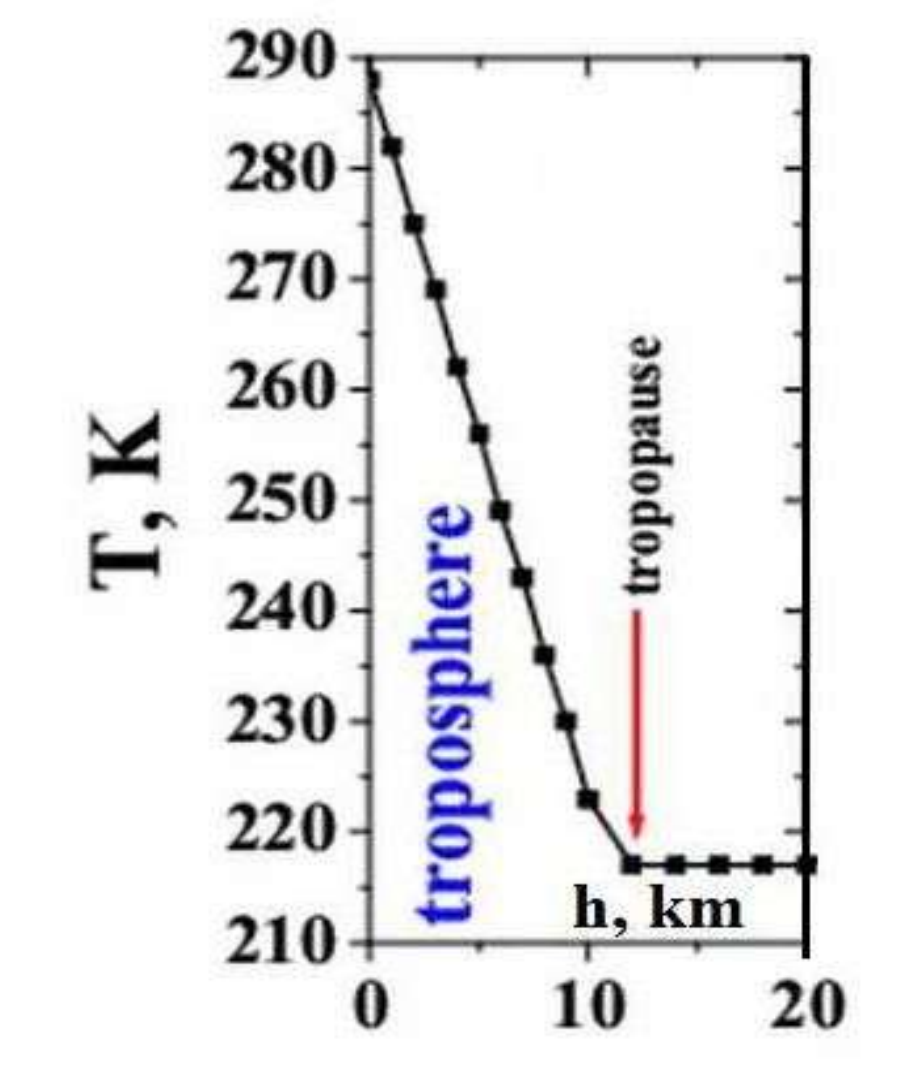
Парниковый эффект



Оптическая толщина слоя : $u = \int k_\omega dh$

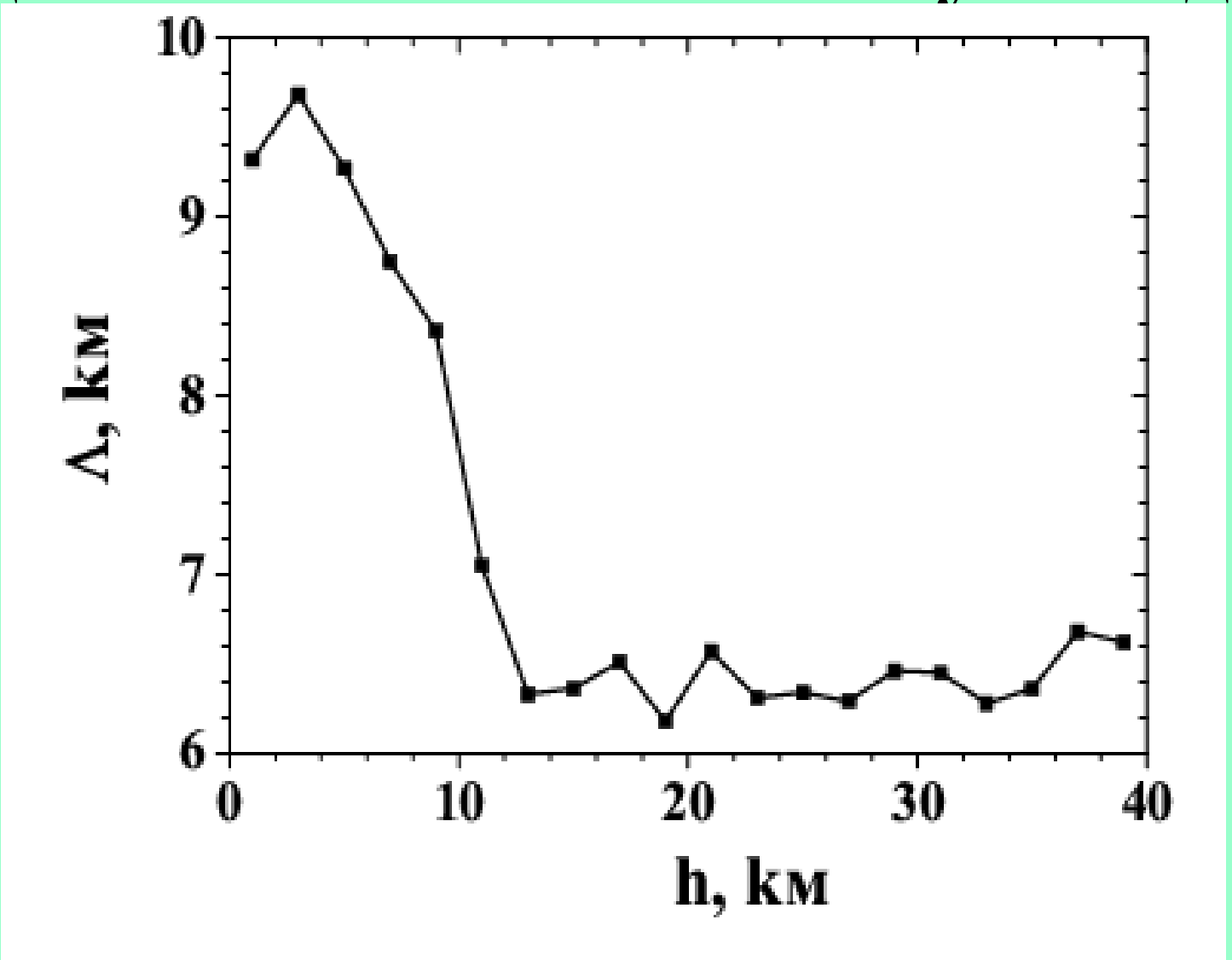
$$P(u) = \exp\left(-\frac{u}{\cos\vartheta}\right)$$

Температура тропосферы



$$\frac{dT}{dh} = -6.5\frac{K}{km}$$

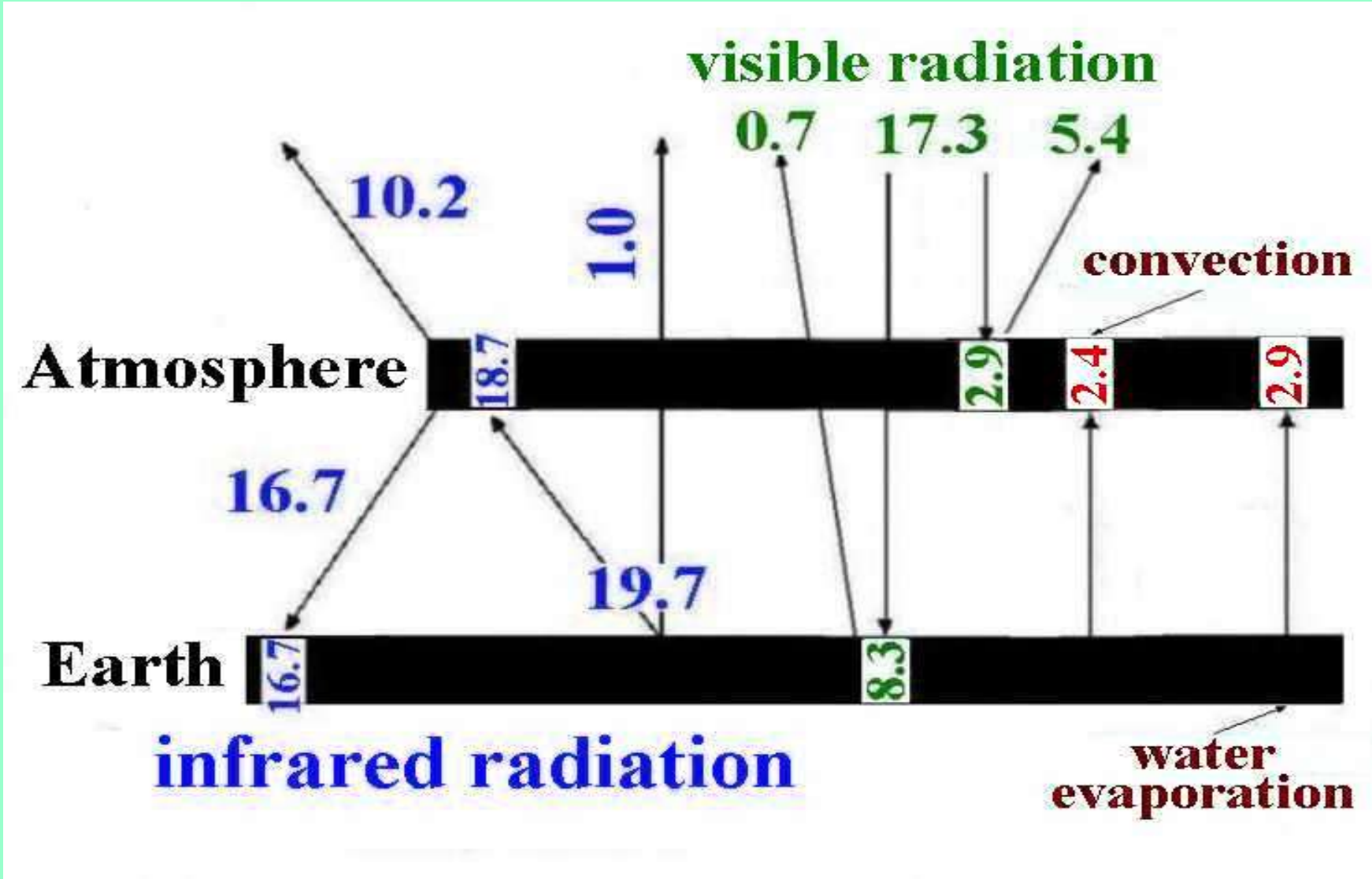
Градиент плотности молекул воздуха



$$N = N_o \exp\left(-\frac{h}{\Lambda}\right)$$

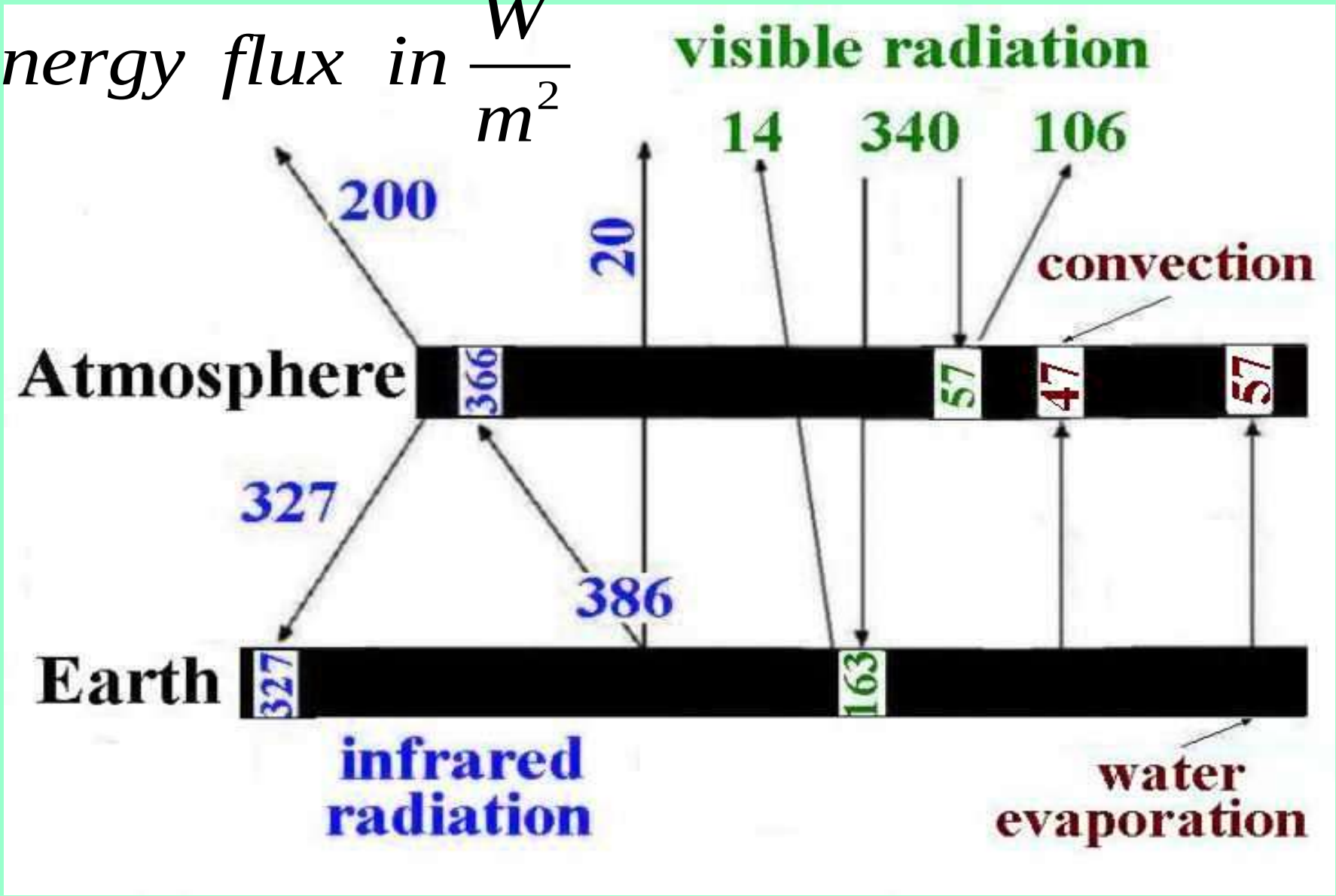
Энергетика атмосферы 1

Powers in 10^{16} *W*



Энергетика атмосферы 2

$$Energy\ \ flux\ \ in\ \frac{W}{m^2}$$



Эмиссия атмосферы

$$P = S \cdot \sigma T^4$$

Температура поверхности Земли → T=287K (288K)

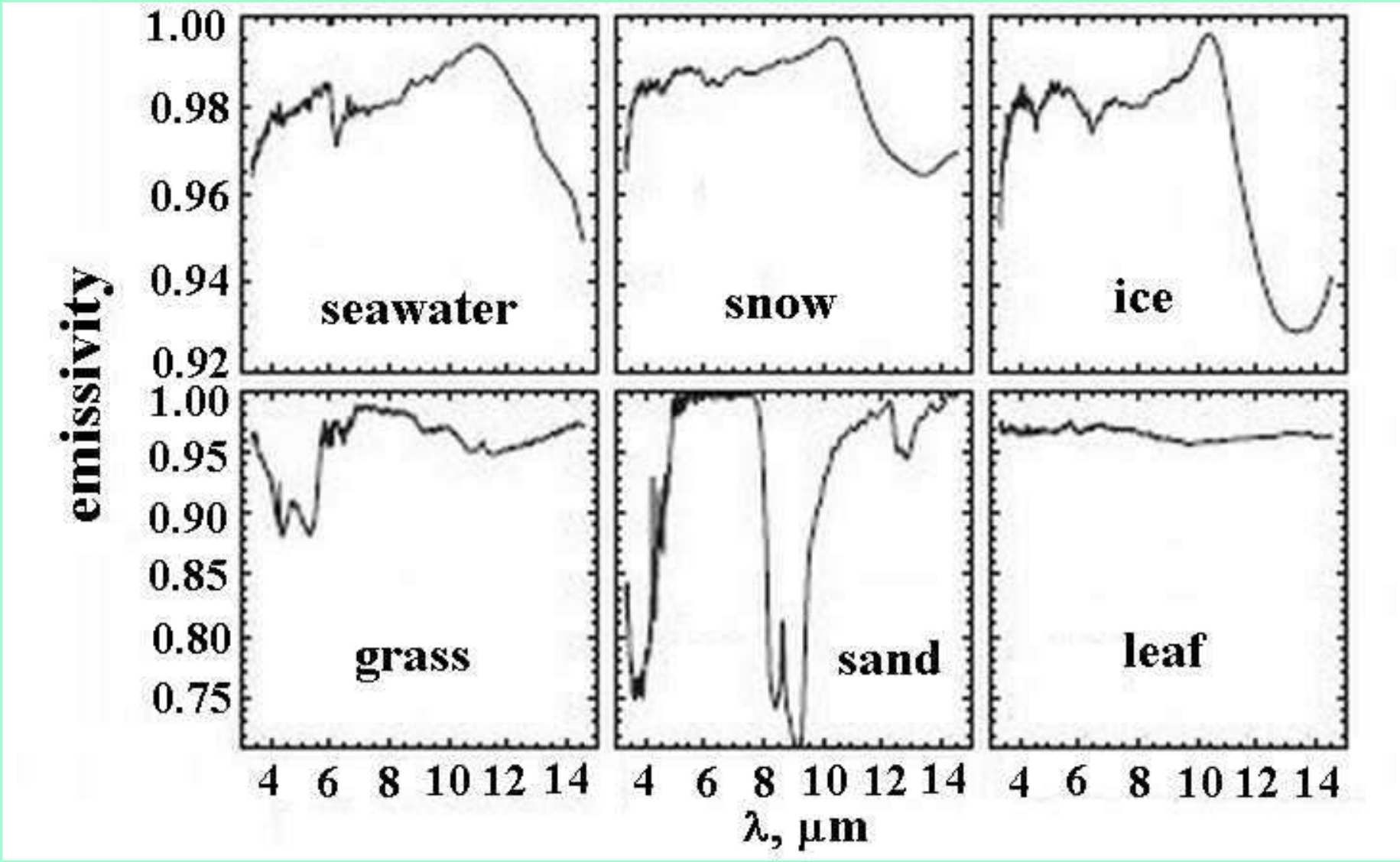
Уходящее излучение → T↑=244K , h↑=6.8км

Излучение на поверхность Земли→ T↓=276K, h↓=1.7км

Уравнения для коэффициента поглощения

$$\int_0^{h_\downarrow} k_\omega dh = \frac{2}{3}, \quad \int_{h_\uparrow}^{\infty} k_\omega dh = \frac{2}{3}$$

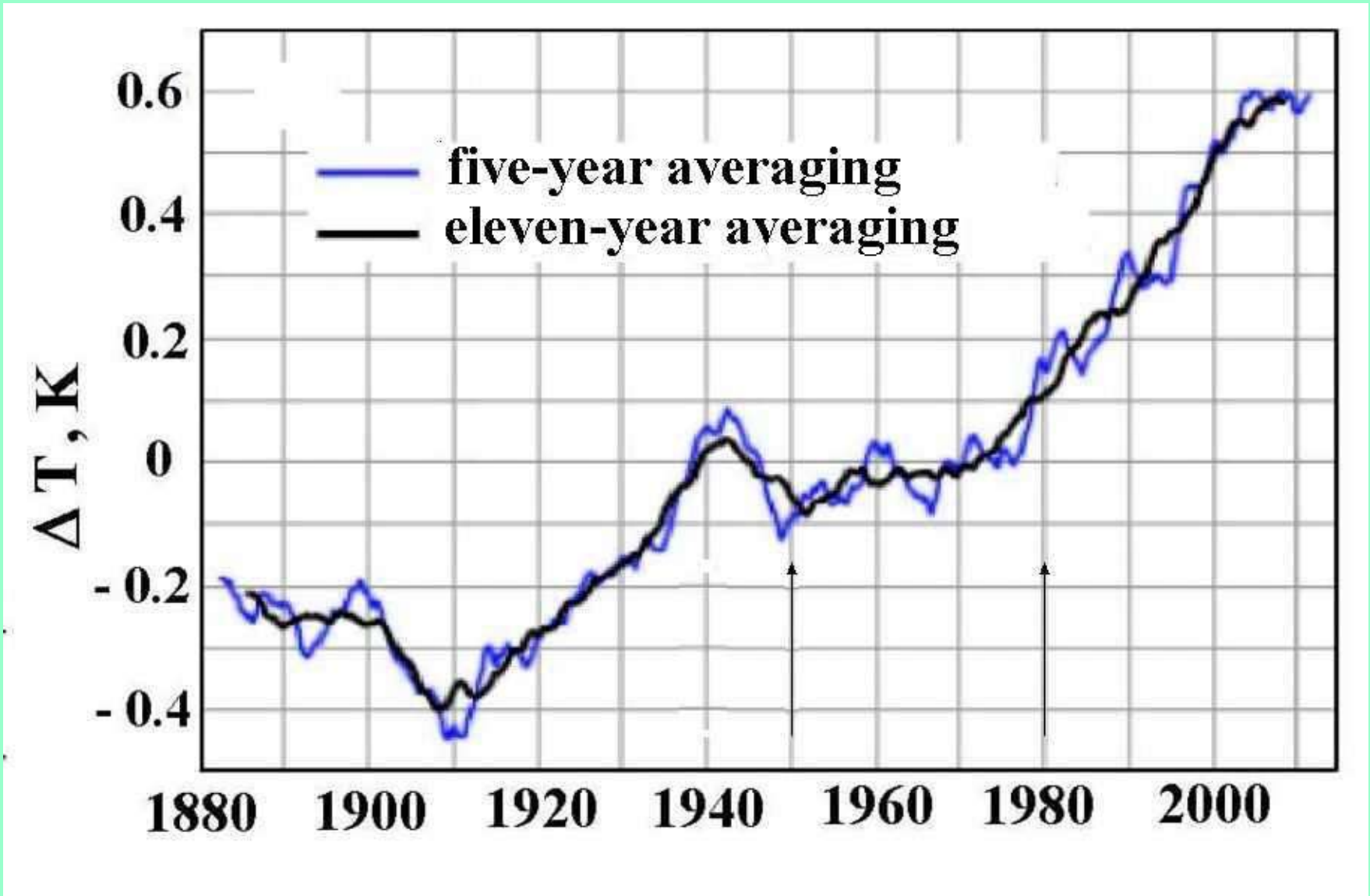
Коэффициент серости поверхности



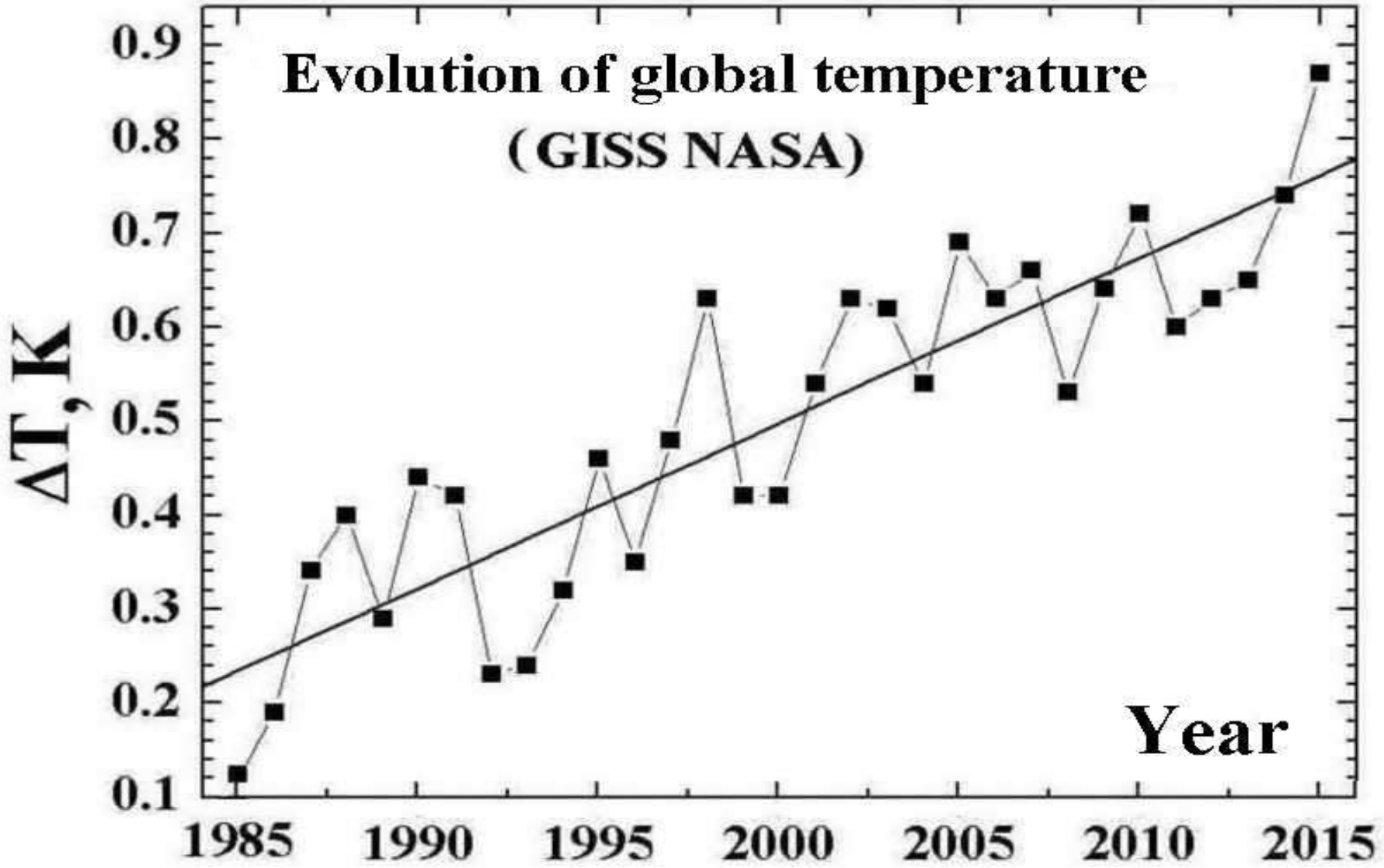
Глобальная температура Земли 2



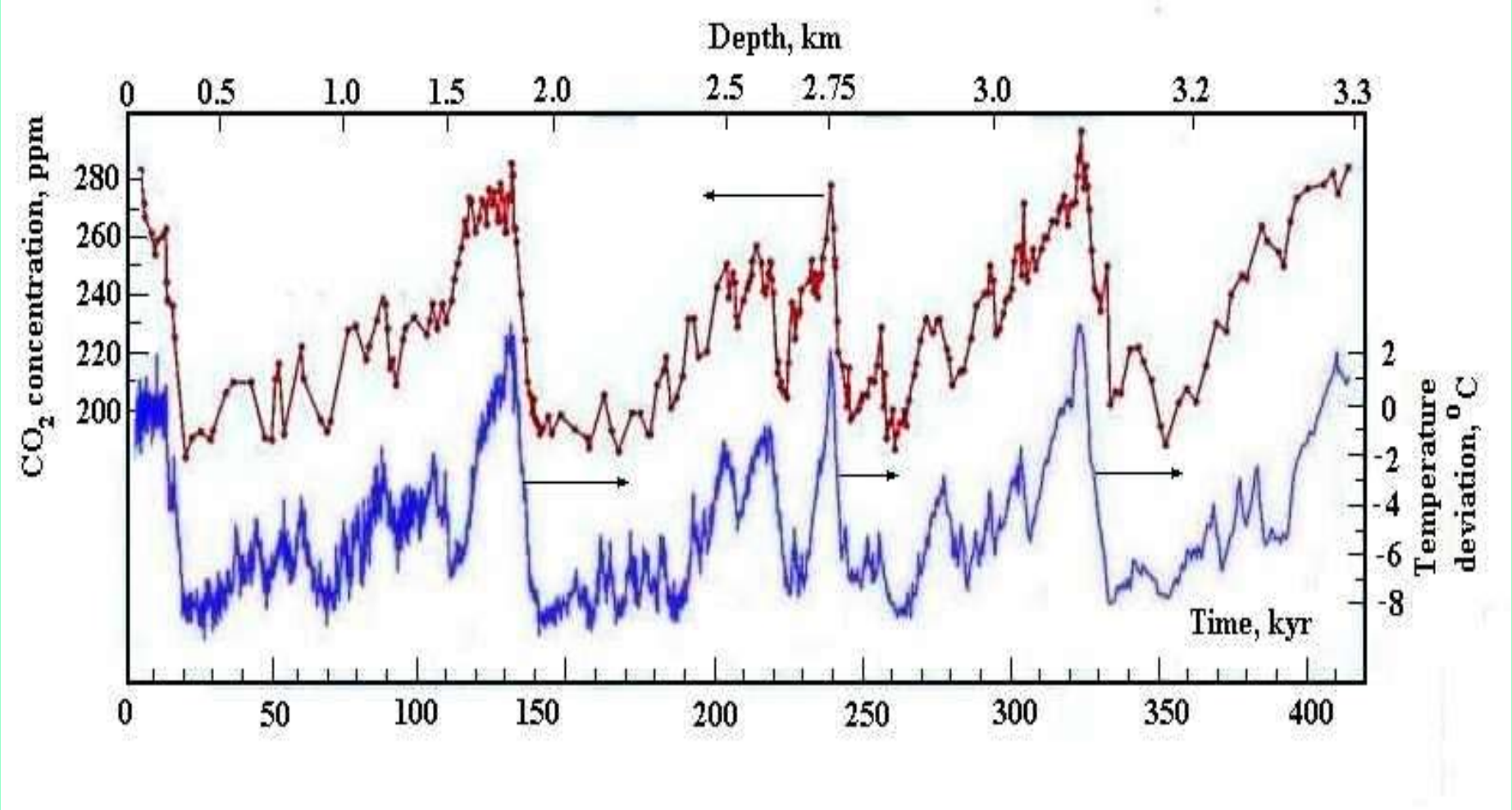
Глобальная температура Земли 1



Глобальная температура Земли 3

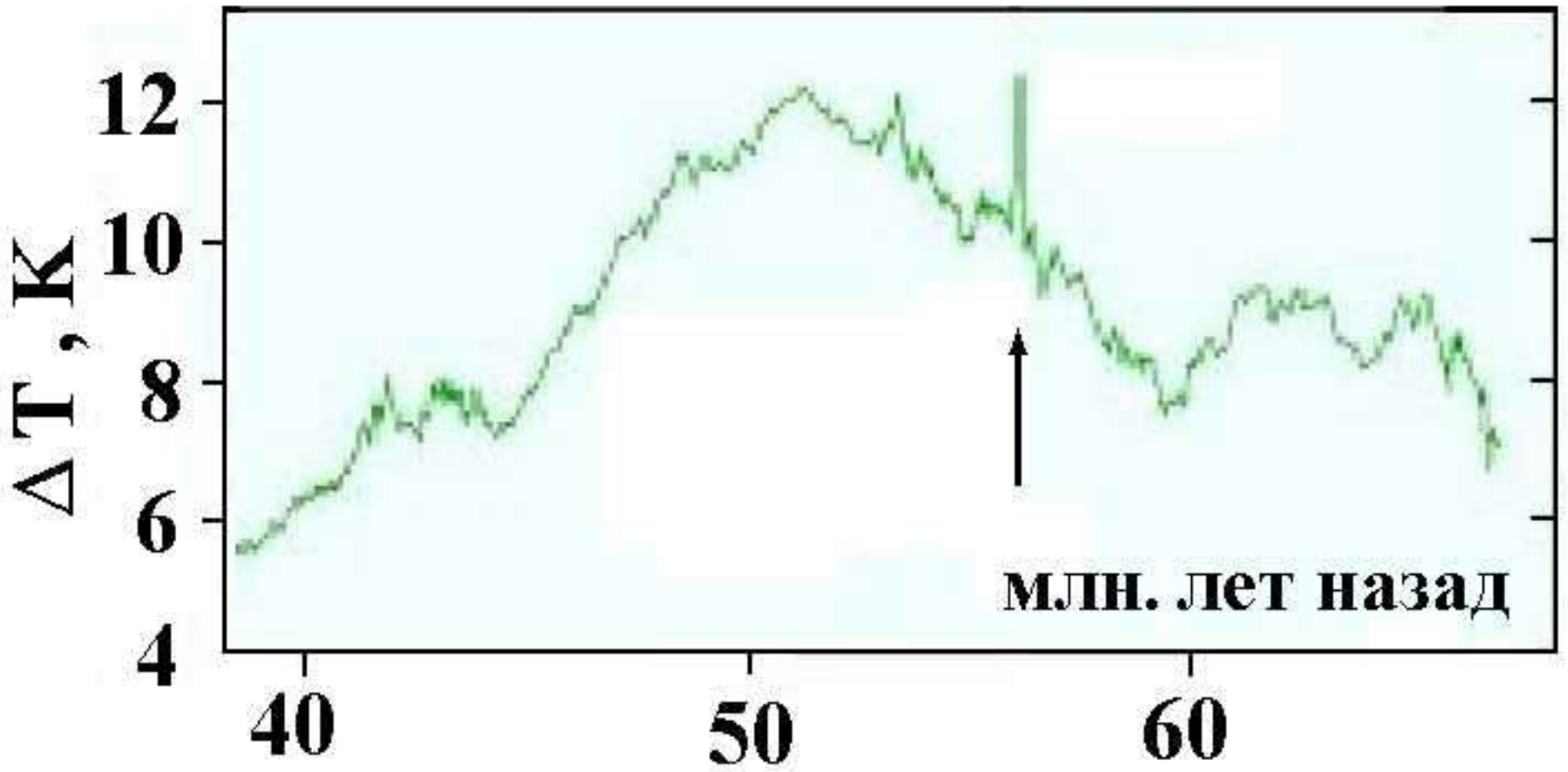


Эволюция температуры и CO_2 в прошлом

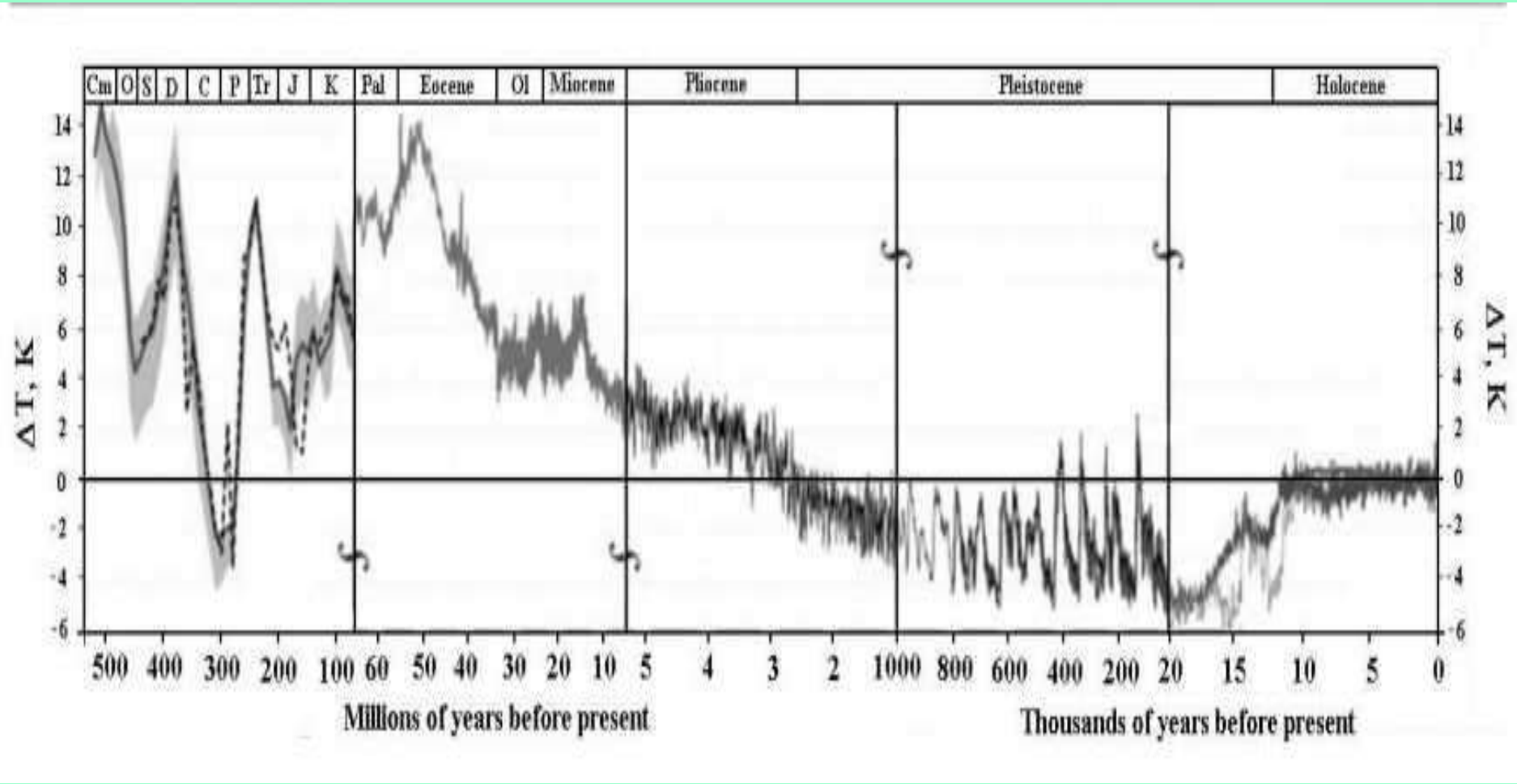


Станция «Восток» на Антарктиде.

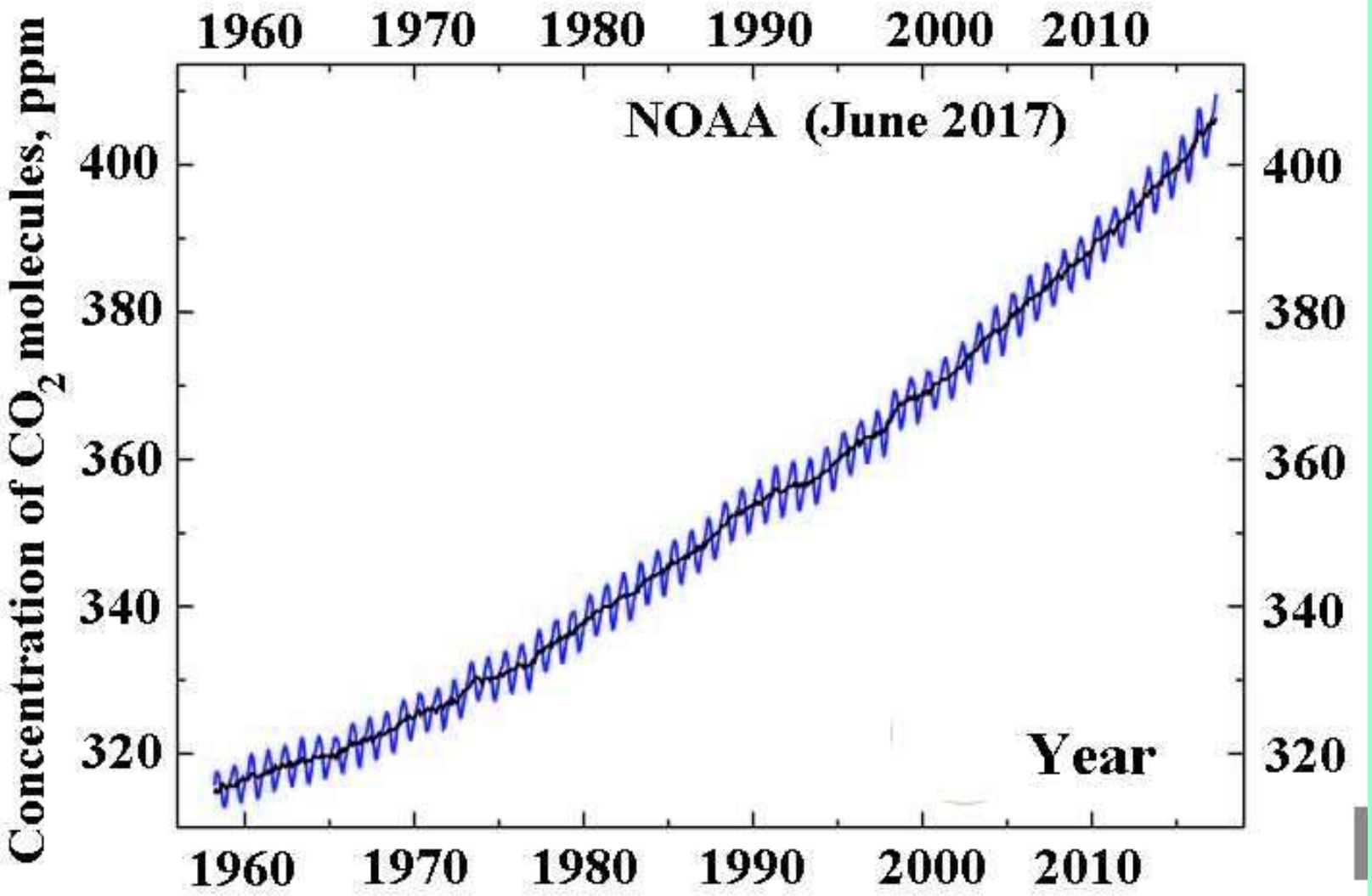
Эоцен



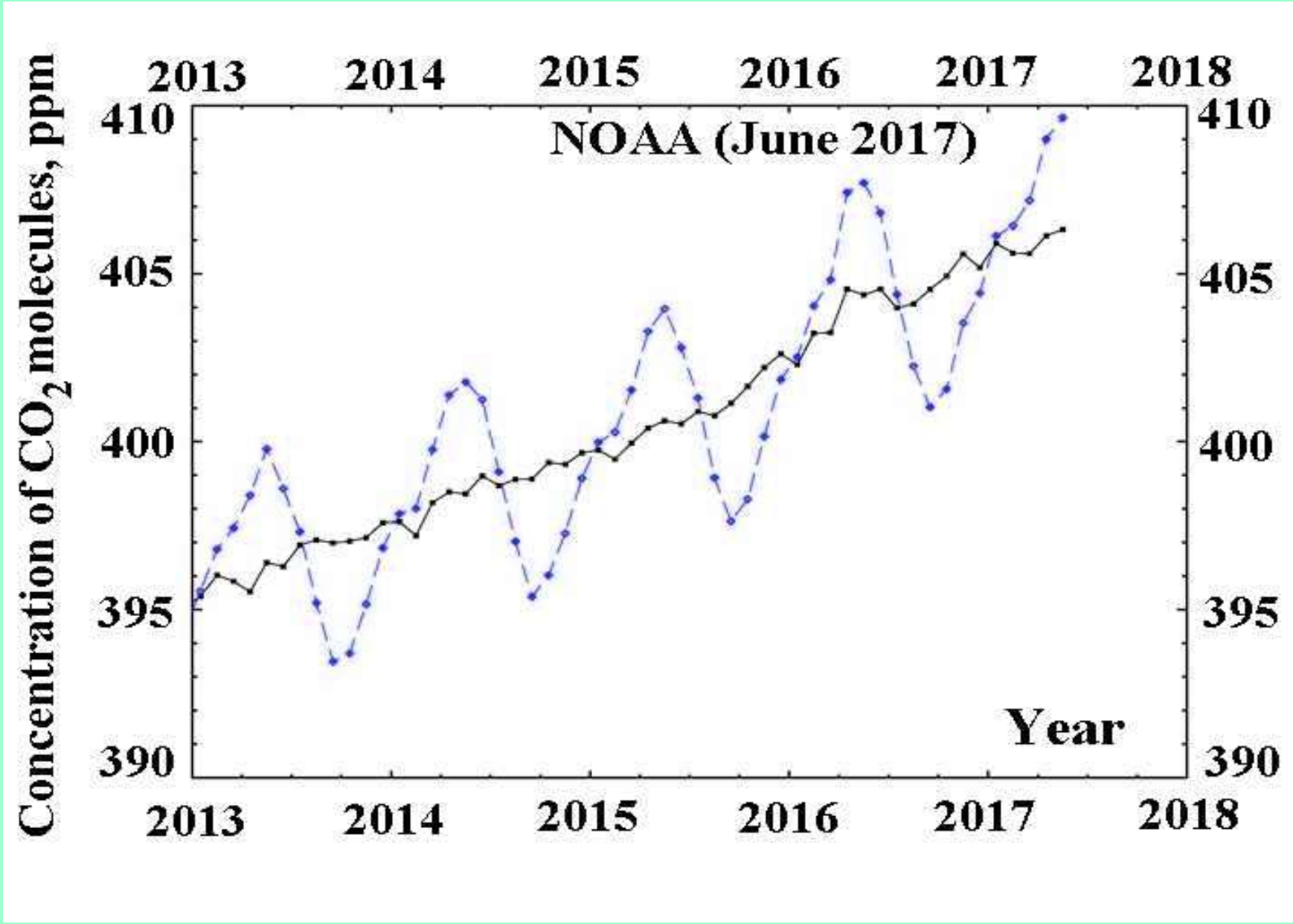
Эволюция температуры в прошлом



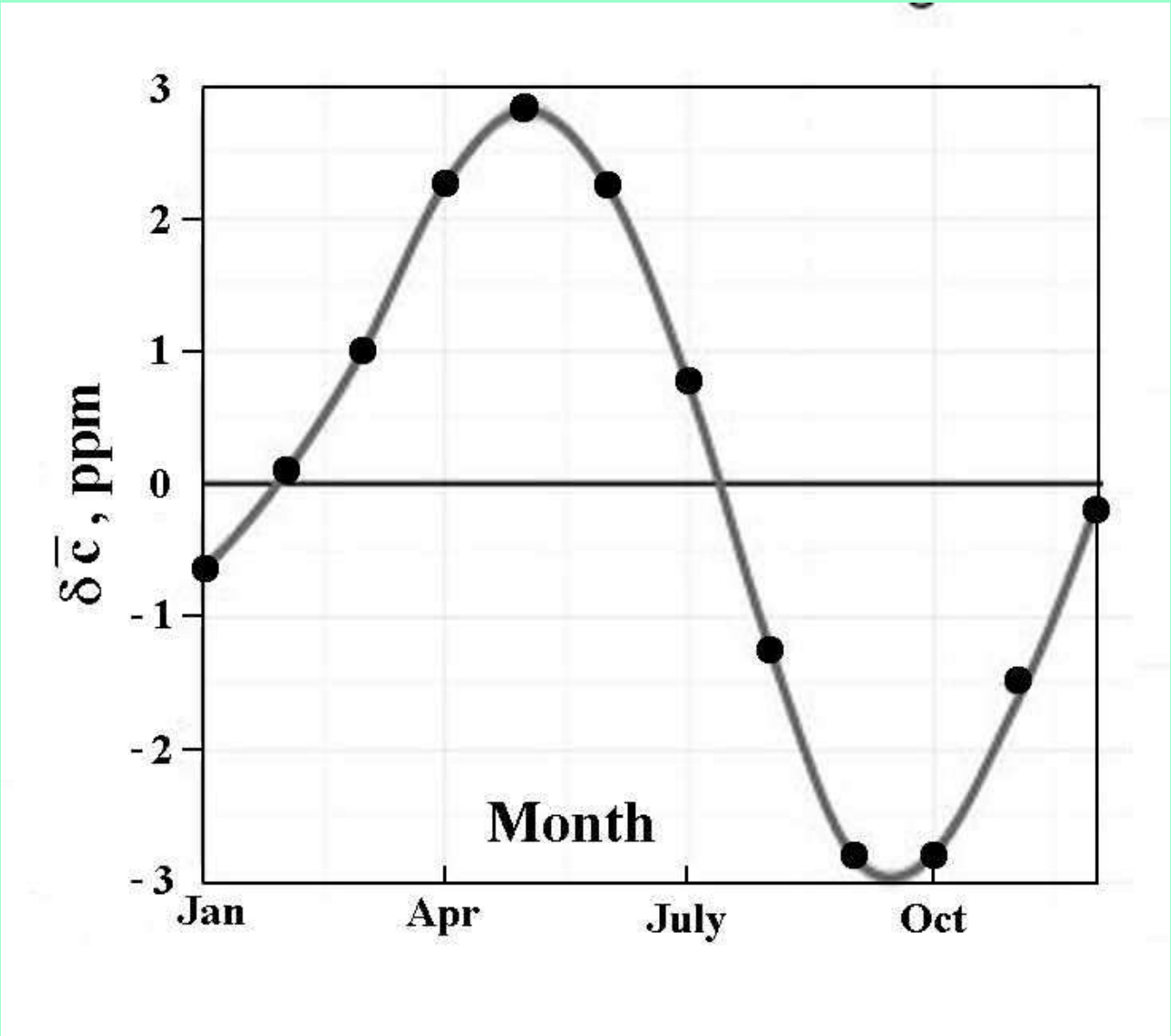
Атмосферный углекислый газ 1



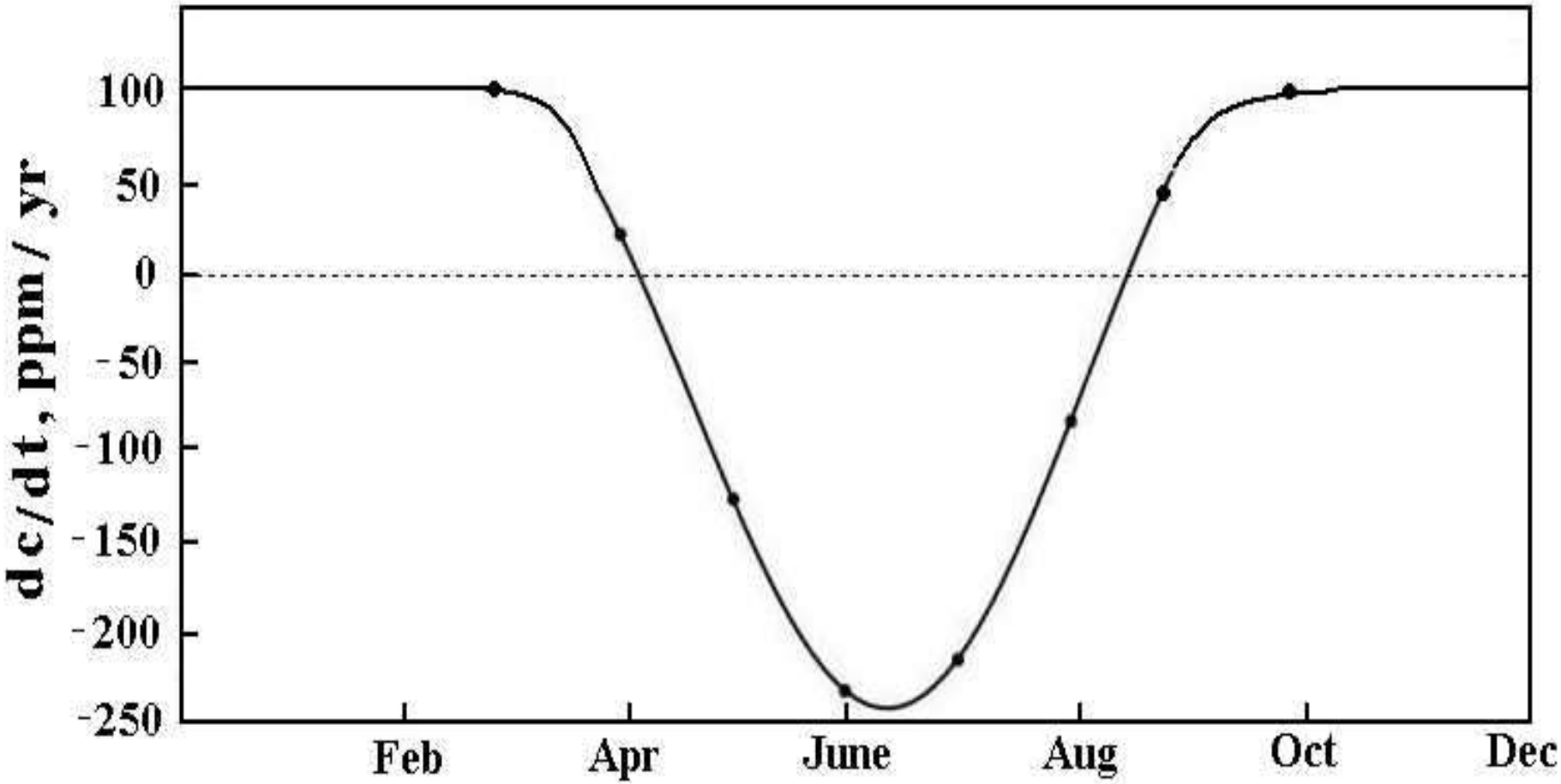
Атмосферный углекислый газ 2



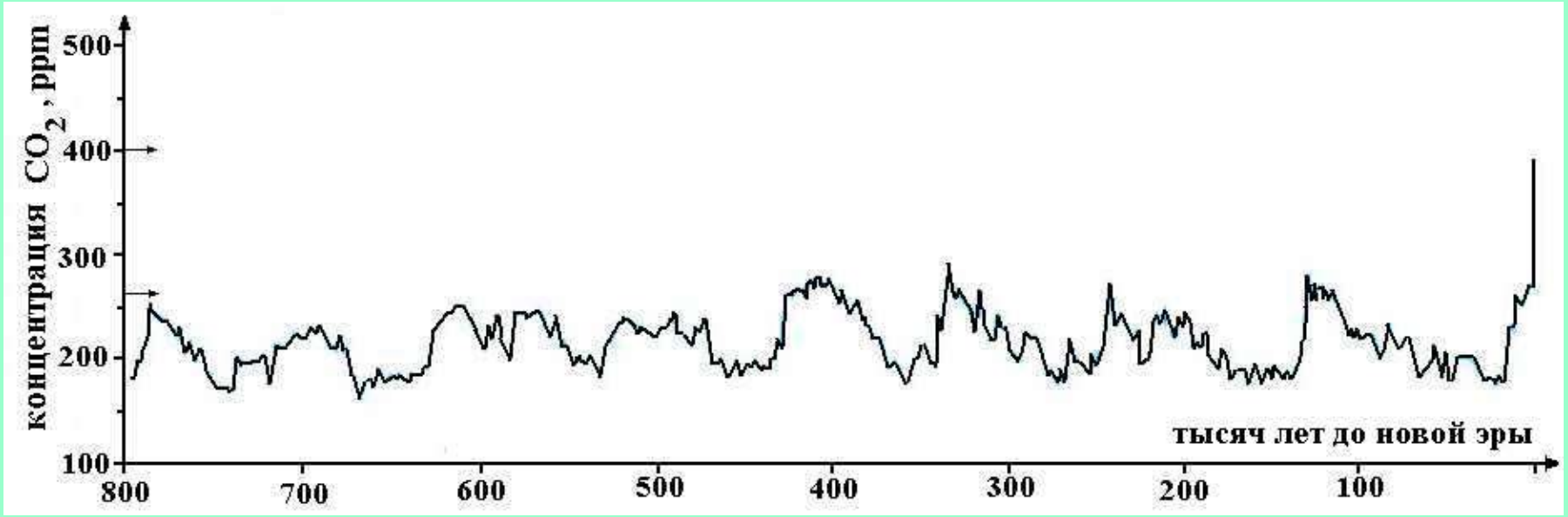
Атмосферный углекислый газ 3



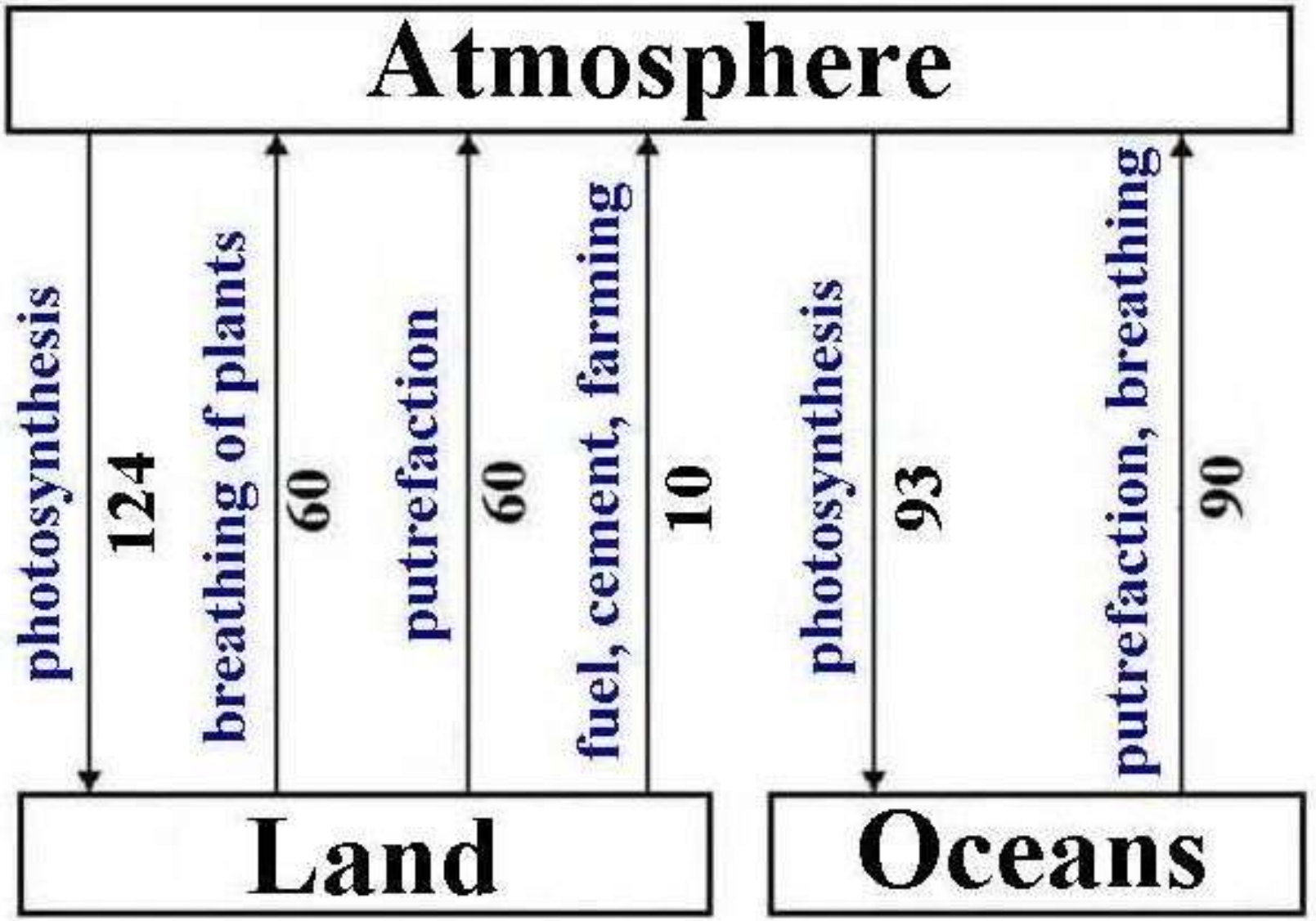
Атмосферный углекислый газ 4



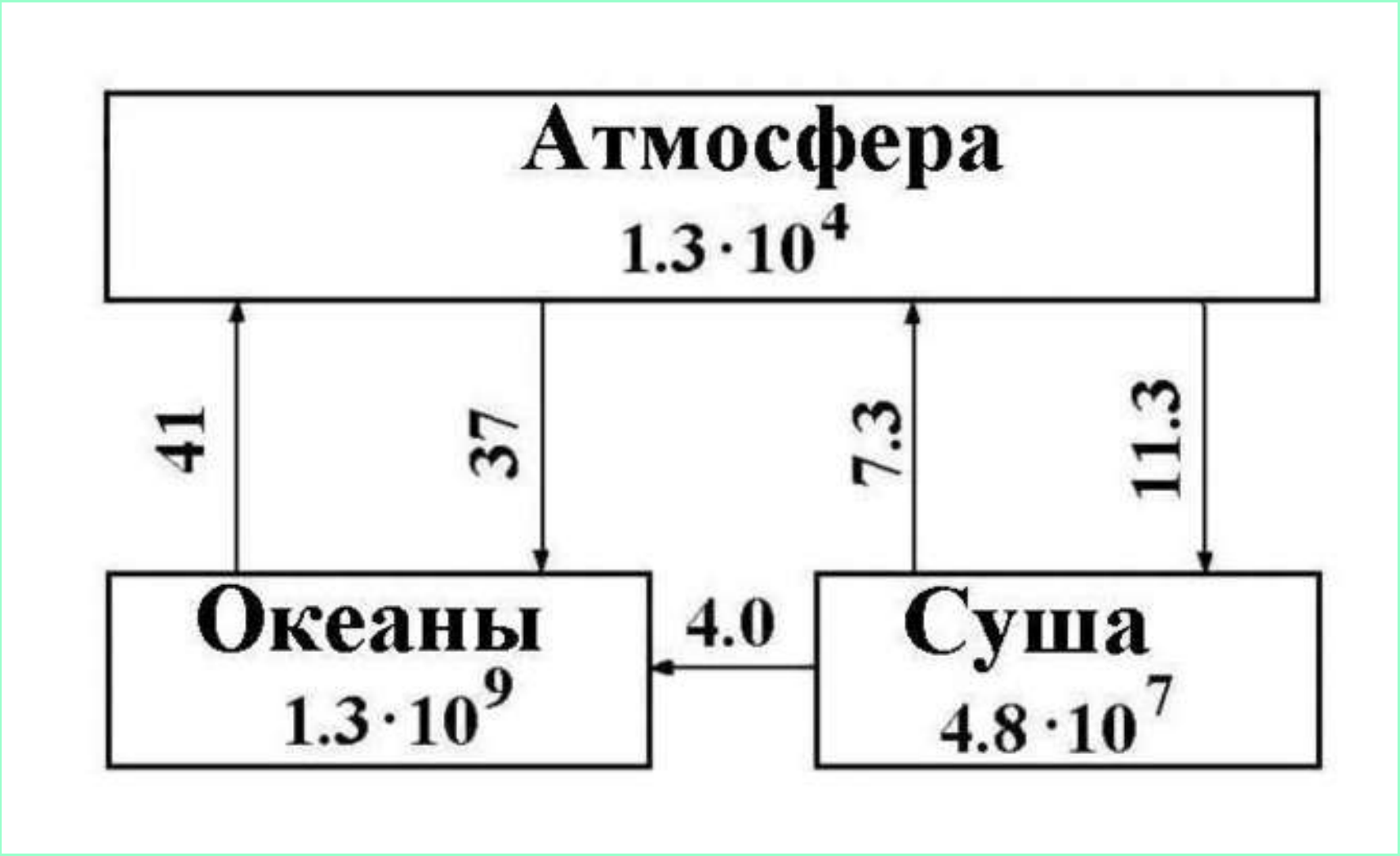
Концентрация атмосферного углекислого газа в прошлом



Баланс атмосферного углерода

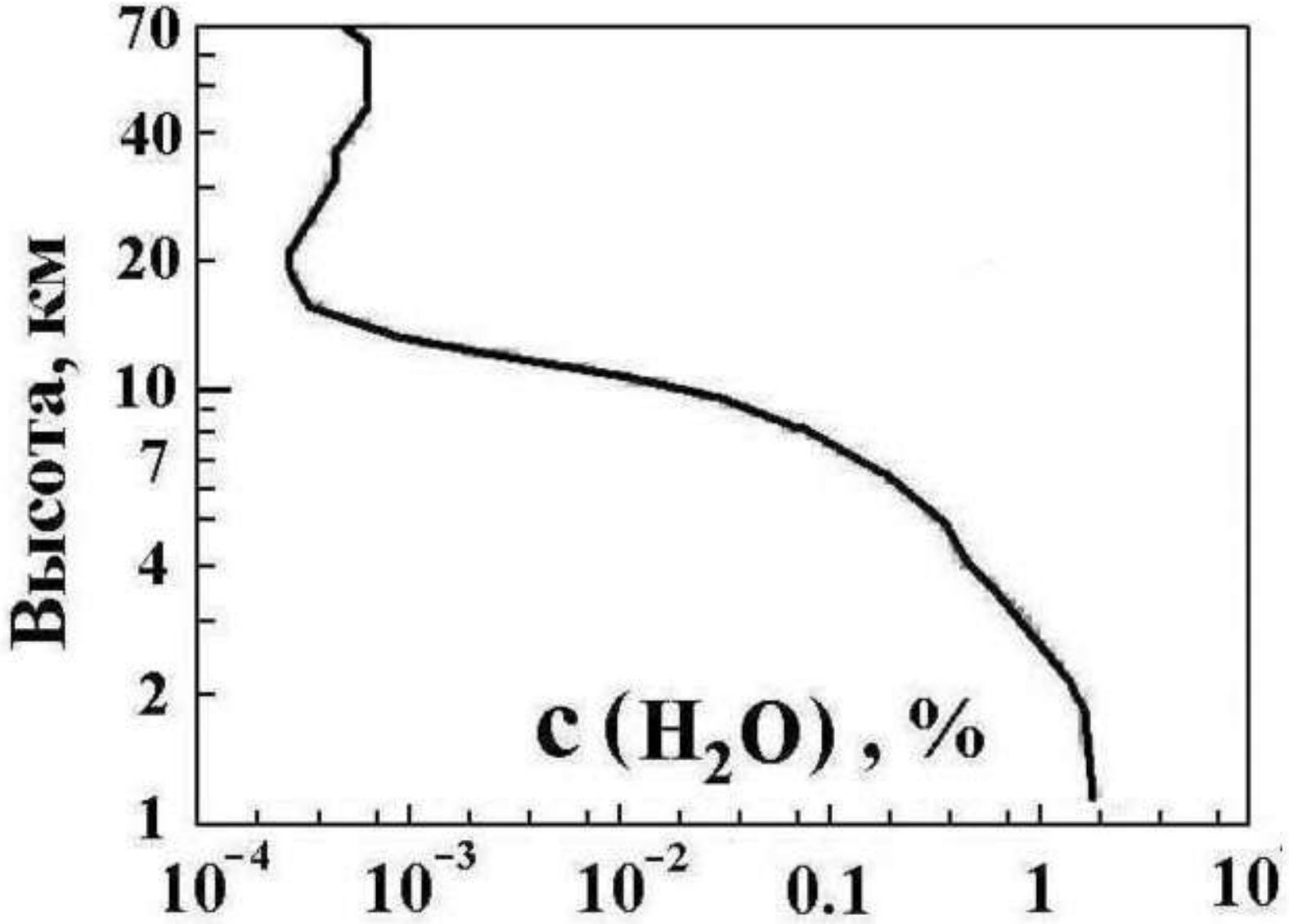


Баланс атмосферной воды



На стрелках – скорость перехода в 10^4 км^3/год, в прямоугольниках – содержание воды в км^3

Плотность водяного пара



Химическое равновесие 1

Равновесие между атмосферным и океаническим CO_2

$$CO_2 + CaO \longleftrightarrow CaCO_3 \qquad \Delta H = 178 \text{ кДж/моль}$$

Изменение концентрации CO_2 из-за изменения глобальной температуры

$$\frac{d \ln c}{dt} = \frac{\Delta H}{T^2} \cdot \frac{d\Delta T}{dt}$$

Скорость изменения глобальной температуры

$$\frac{d\Delta T}{dt} = 0.018 K/yr$$

Это дает :

$$\frac{d \ln c(CO_2)}{dt} = 0.002 yr^{-1}$$

Реальная скорость изменения концентрации CO_2 молекул

$$\frac{d \ln c}{dt} = 0.006 yr^{-1}$$

Вывод : Примерно треть скорости изменения концентрации молекул CO_2 определяется тепловым равновесием, две трети – изменением условий фотосинтеза.

Химическое равновесие 2

Изменение концентрации атмосферного водяного пара в результате изменения глобальной температуры

$$\frac{d\ln c(H_2O)}{dt} = \frac{\varepsilon_b}{T^2}\cdot\frac{d\Delta T}{dt}$$

$$\varepsilon_b = 0.43 \text{ эВ}$$

$$\frac{d\Delta T}{dt} = \frac{d\ln c(H_2O)}{dt}\cdot\left|\frac{dT}{dh}\right| h_{\downarrow}$$

$$dT/dt = 0.013K/\text{год}$$

Химическое равновесие между связанной водой на поверхности Земли и атмосферным водяным паром

$$\frac{d\Delta T}{dt} = \frac{\delta}{1-\chi},\ \chi = 1 - \frac{\varepsilon_b}{T^2}\cdot\left|\frac{dT}{dh}\right| h_{\downarrow}$$

$$\chi = 0.74$$

δ – изменение глобальной температуры в отсутствии обратной связи.

Равновесная чувствительность климата (ECS)

Равновесная чувствительность климата (ECS) - изменение средней температуры Земли при удвоении концентрации углекислого газа (Arrenius 1896).

В случае равновесия между атмосферным и океаническим углекислым газом имеем

$$ECS = (2.0 \pm 0.3)K$$

То же в прошлом

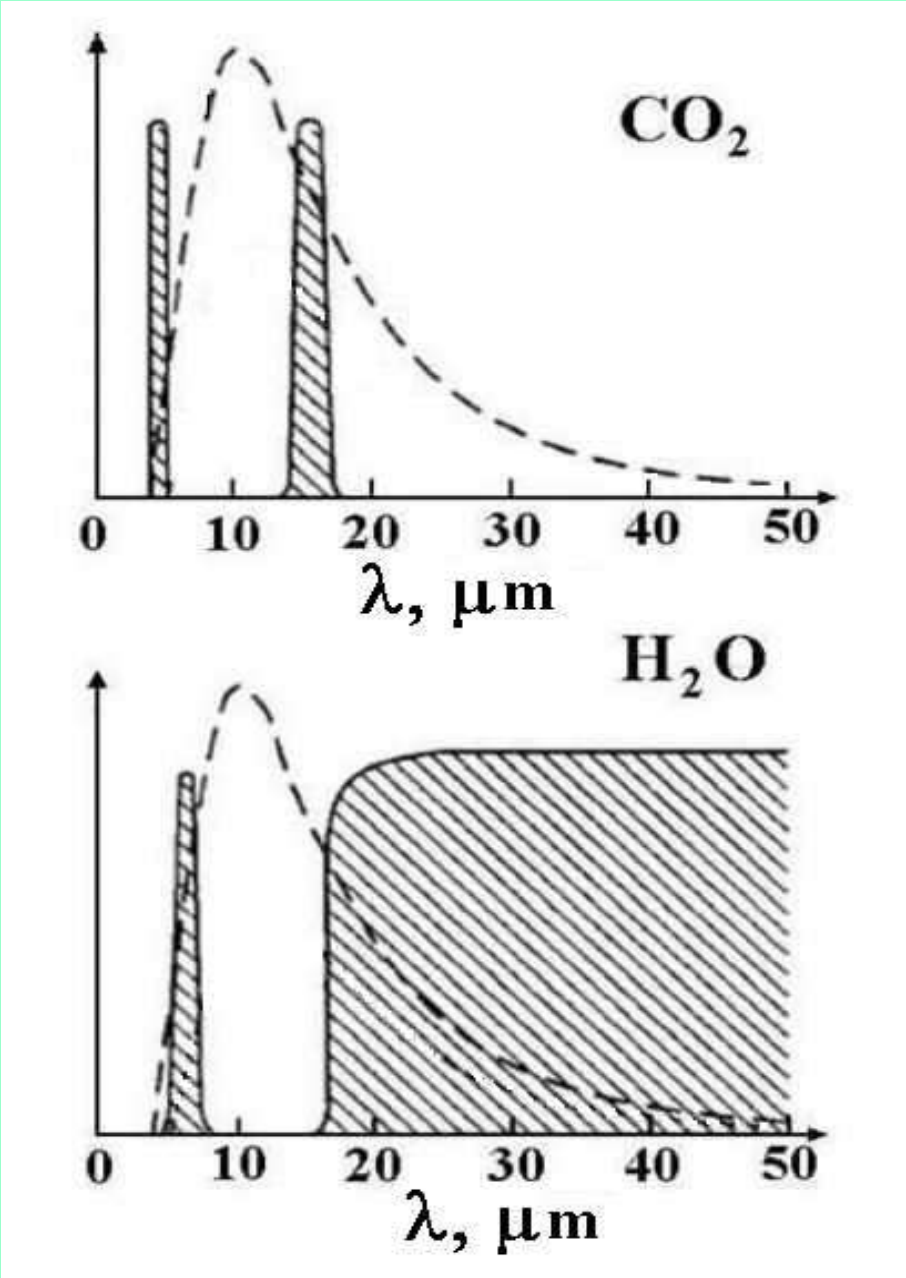
$$ECS = (3.0 \pm 1.5)K$$

В случае если все параметры атмосферы, кроме углекислого газа, неизменны, имеем

$$ECS = (0.3 \pm 0.1)K$$

Вывод : Накопление углекислого газа в атмосфере вносит малый вклад в изменение температуры Земли (10-20)%, а вклад деятельности человека за последние века ~ 0.02K

Спектр поглощения CO_2 и H_2O



Twomey, 1991

Особенности эмиссии атмосферных молекул

Термодинамическое равновесие для колебательно возбужденных молекул

$$N_a k_{rel} \gg \frac{1}{\tau_r}$$

$$k_{rel} = 5 \cdot 10^{-16} cm^3/s$$

$$N_a \gg 2 \cdot 10^{15} cm^{-3}$$

$$N_i = \frac{g_i}{g_o} N_o \exp\left(-\frac{\Delta\varepsilon}{T}\right)$$

Вывод : Температура излучения газового слоя совпадает с температурой газа в слое.

Параметры излучения слоя :

k_ω - коэффициент поглощения на частоте ω,

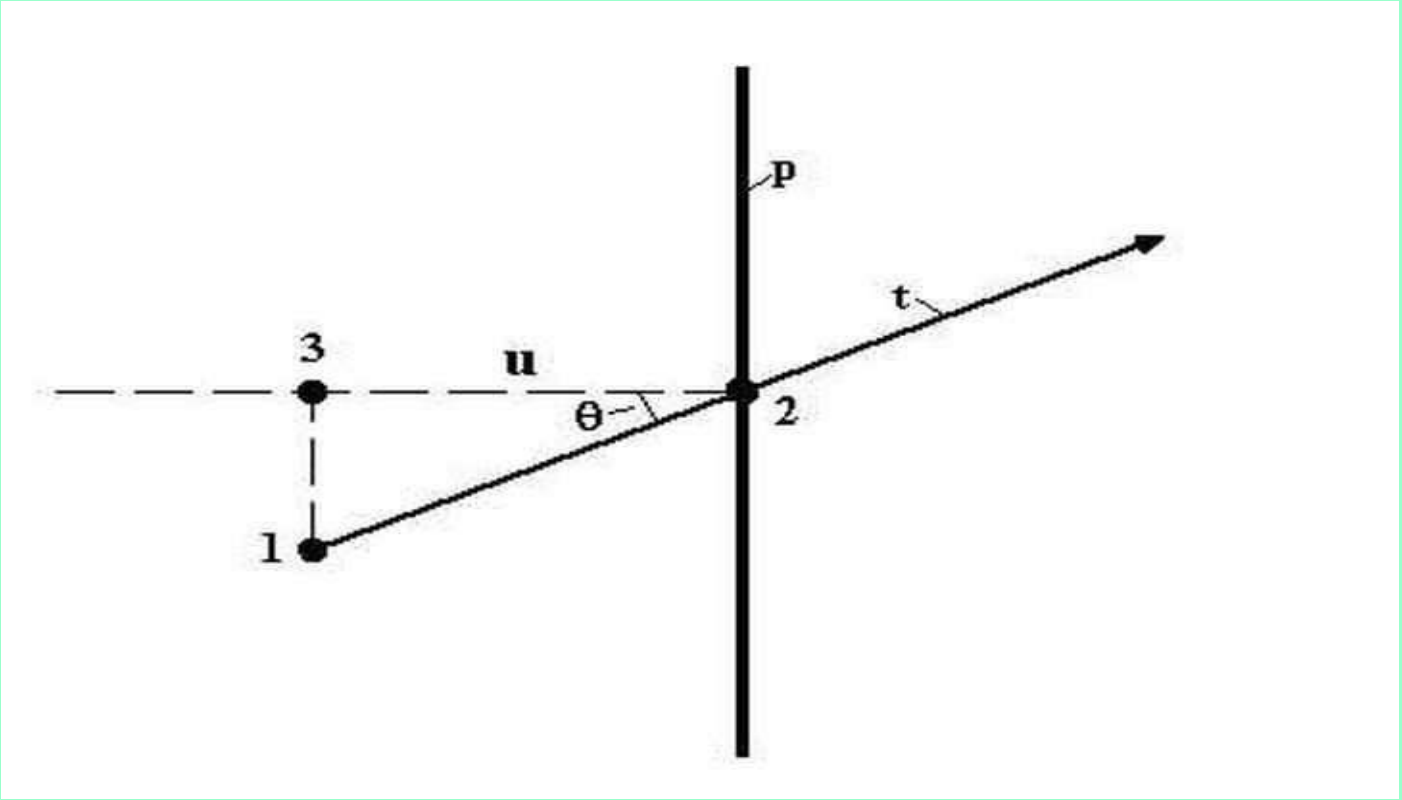
u_ω - оптическая толщина на этой частоте.

$$k_\omega = N_i \sigma_\omega \left[1 - \exp\left(-\frac{\hbar\omega}{T}\right)\right]$$

$$u_\omega(h_1, h_2) = \int_{h_1}^{h_2} k_\omega dh$$

$$u(\omega) = u_\omega(0, \infty) = \int_0^\infty k_\omega dh$$

Излучение однородного слоя



Потоки равновесного слоя

$$i_\omega = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^2} \cdot \left[\exp\left(\frac{\hbar\omega}{T} \right) - 1 \right]^{-1}, \quad j_\omega = \frac{i_\omega}{4} \rightarrow u_\omega >> 1$$

Излучение неоднородного слоя 1

Поток от бесконечного неравновесного слоя

$$j_\omega = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2}\int_0^1 d\cos\theta \int_0^\infty du_\omega \exp\left(-\frac{u_\omega}{\cos\theta}\right) F(u_\omega),$$

$$F(u_\omega) = \left[\exp\left(\frac{\hbar\omega}{T}\right) - 1\right]^{-1} = F(u_o) + (u_\omega - u_o)F'(u_o) + \frac{(u_\omega - u_o)^2}{2}F''(u_o),$$

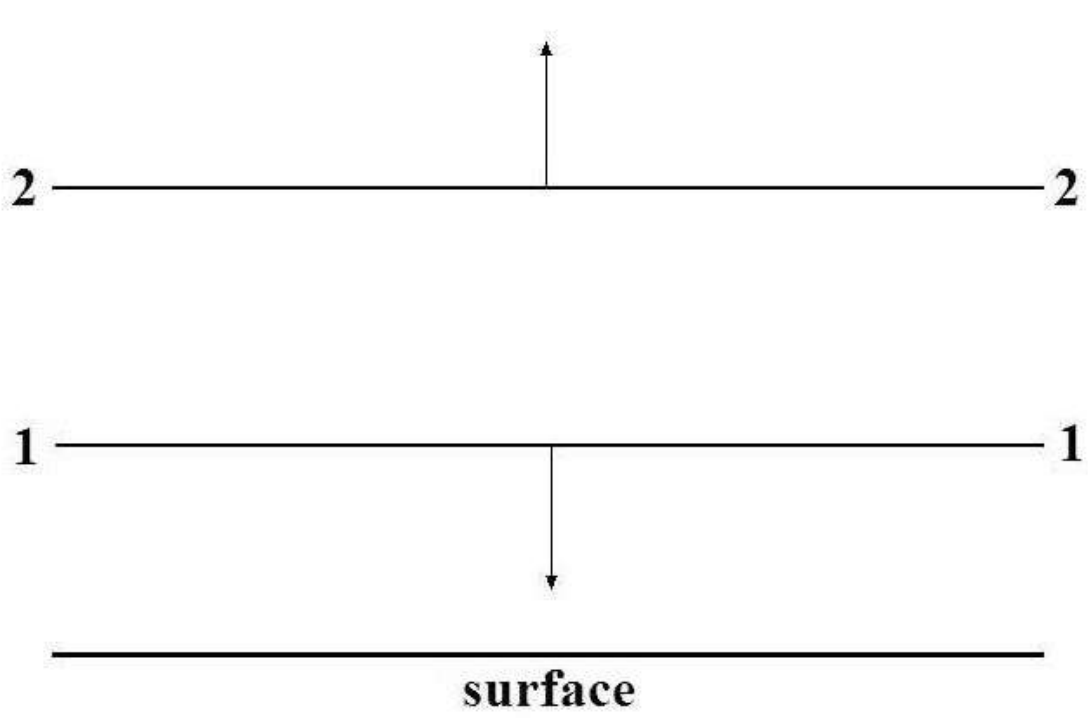
$$u_o = \frac{2}{3} \rightarrow j_\omega = j_\omega(T_o)(1-\alpha)$$

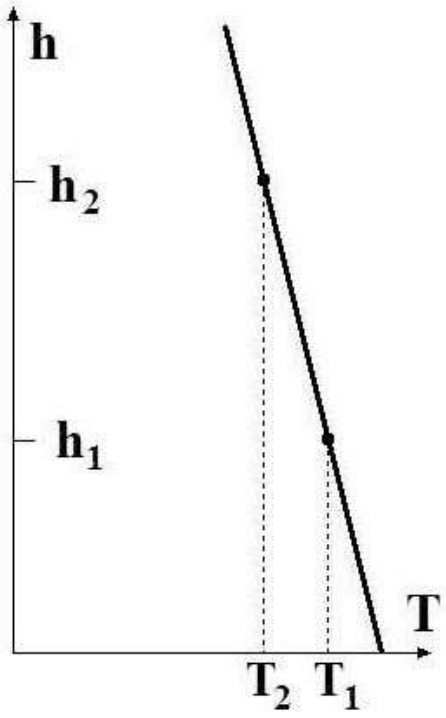
Для приземной атмосферы $\alpha \approx 0.01$

$$\alpha = \frac{5}{18}\cdot\left(\frac{\hbar\omega}{T^2}\cdot\frac{dT}{du_\omega}\right), du_\omega = k_\omega dh$$

Condition $\alpha << 1 \rightarrow k_\omega >> \frac{\hbar\omega}{2T^2}\cdot\frac{dT}{dh}$ $\hbar\omega = 3T \rightarrow u_\omega >> 0.2$

Излучение неоднородного слоя 2





$$J_\omega = j_\omega(1-\alpha),\ j_\omega = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2c^2}\left[\exp\left(\frac{\hbar\omega}{T_\omega}\right)-1\right]^{-1}$$

$$u(\omega) = 2/3$$

$$\alpha = \frac{5}{18}\left(\frac{\hbar\omega}{T^2}\cdot\frac{dT}{du}\right)^2$$

$$\int_{h_\gamma(\omega)}^{\infty} k_\omega dh = 2/3,\quad \int_{0}^{h_\downarrow(\omega)} k_\omega dh = 2/3$$

Излучение плоского неоднородного слоя

$$J_\omega = j_\omega g(u),\ g(u) = 2\int_0^1 d\cos\theta \int_0^u dx \exp\left(-\frac{x}{\cos\theta}\right)$$

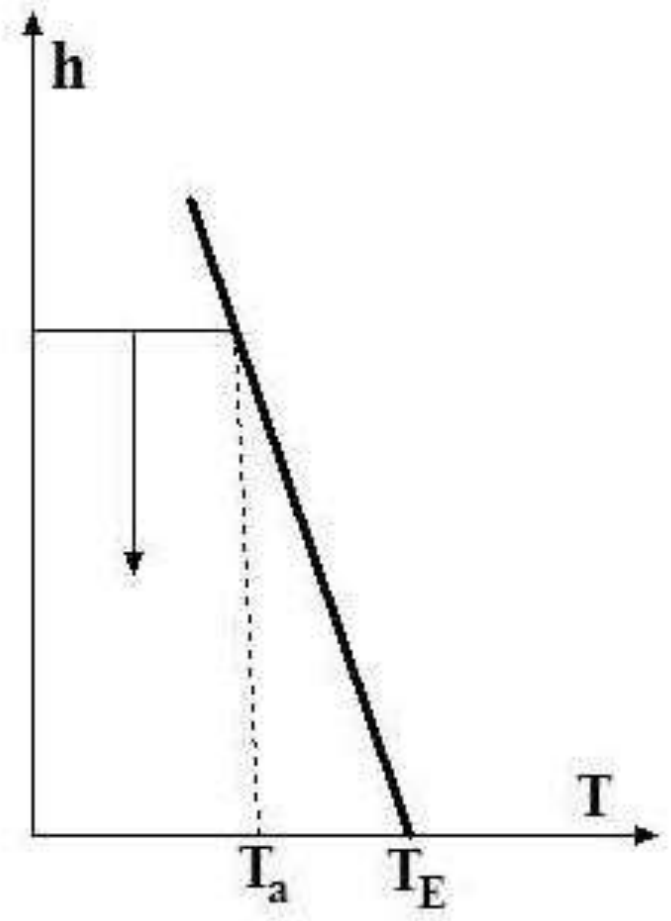
$$g(x) = 1 - \exp(-1.6x).$$

$$j_\omega = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2 c^2}\left[\exp\left(\frac{\hbar\omega}{T}\right) - 1\right]^{-1}$$

$$u_{ef} = 2\int_0^1 d\cos\theta \int_0^u x dx \exp\left(-\frac{x}{\cos\theta}\right)$$

$$u_{ef}(u) = \frac{u}{2\exp(-u) + 1.5u}$$

$$T_\omega = T_E - \frac{T_E - T_a}{2\exp(-u_\omega) + 1.5u_\omega}$$



Оптическая толщина атмосферы

$$J_{\downarrow} = 327\,\frac{W}{m^2},\ J_{\uparrow} = 200\,\frac{W}{m^2},\ \rightarrow T_{\downarrow} = 276K,\ T_{\uparrow} = 244K$$

$$\int_0^{h_{\downarrow}} \kappa_{\omega} d\omega = \frac{2}{3},\ \int_{h_{\uparrow}}^{\infty} \kappa_{\omega} d\omega = \frac{2}{3},\ \rightarrow h_{\downarrow} = 1.9km,\ h_{\uparrow} = 6.8km$$

$$\frac{du}{dh} \equiv \kappa_{\omega} = A\exp\left(-\frac{h}{\lambda}\right) \rightarrow \lambda = 5.3km,\ A = 0.46km^{-1},\ u = A\lambda = 2.4$$

Другая модель : $k_{\omega} = k_o,\ h < L;\quad k_{\omega} = 0,\ h > L$

$$k_o = 0.35km^{-1},\ L = 8.7km,\ u = k_o L = 3.0$$

Средняя оптическая толщина атмосферы

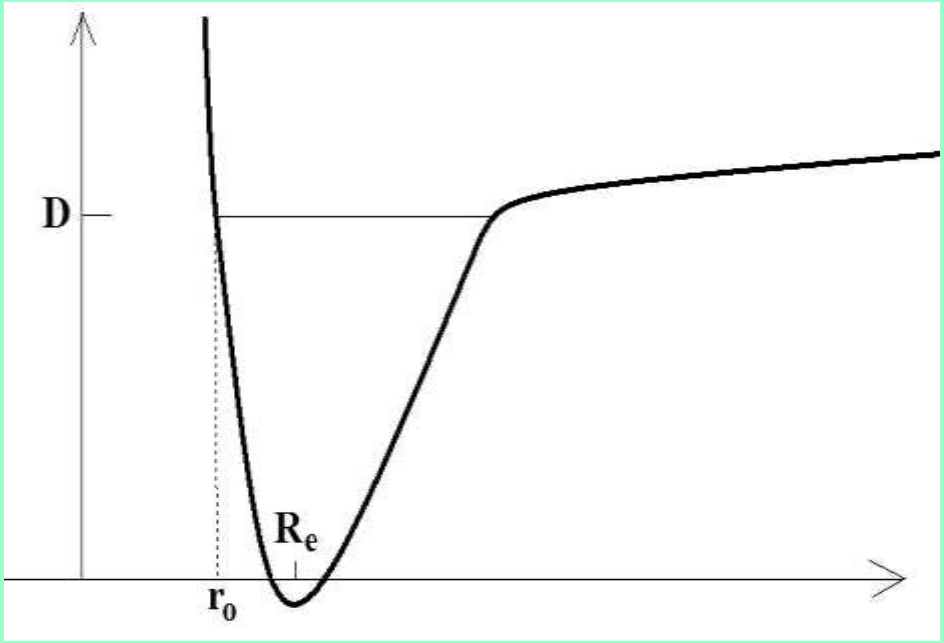
$$u = 2.7 \pm 0.3$$

Предел для лоренцевской формы линии

$$CO_2 - CO_2$$

$$U(R) = D\left[\left(\frac{R_e}{R}\right)^{12} - 2\left(\frac{R_e}{R}\right)^{6}\right],\ D = (38 \pm 7)meV,\ R_e = 0.36nm$$

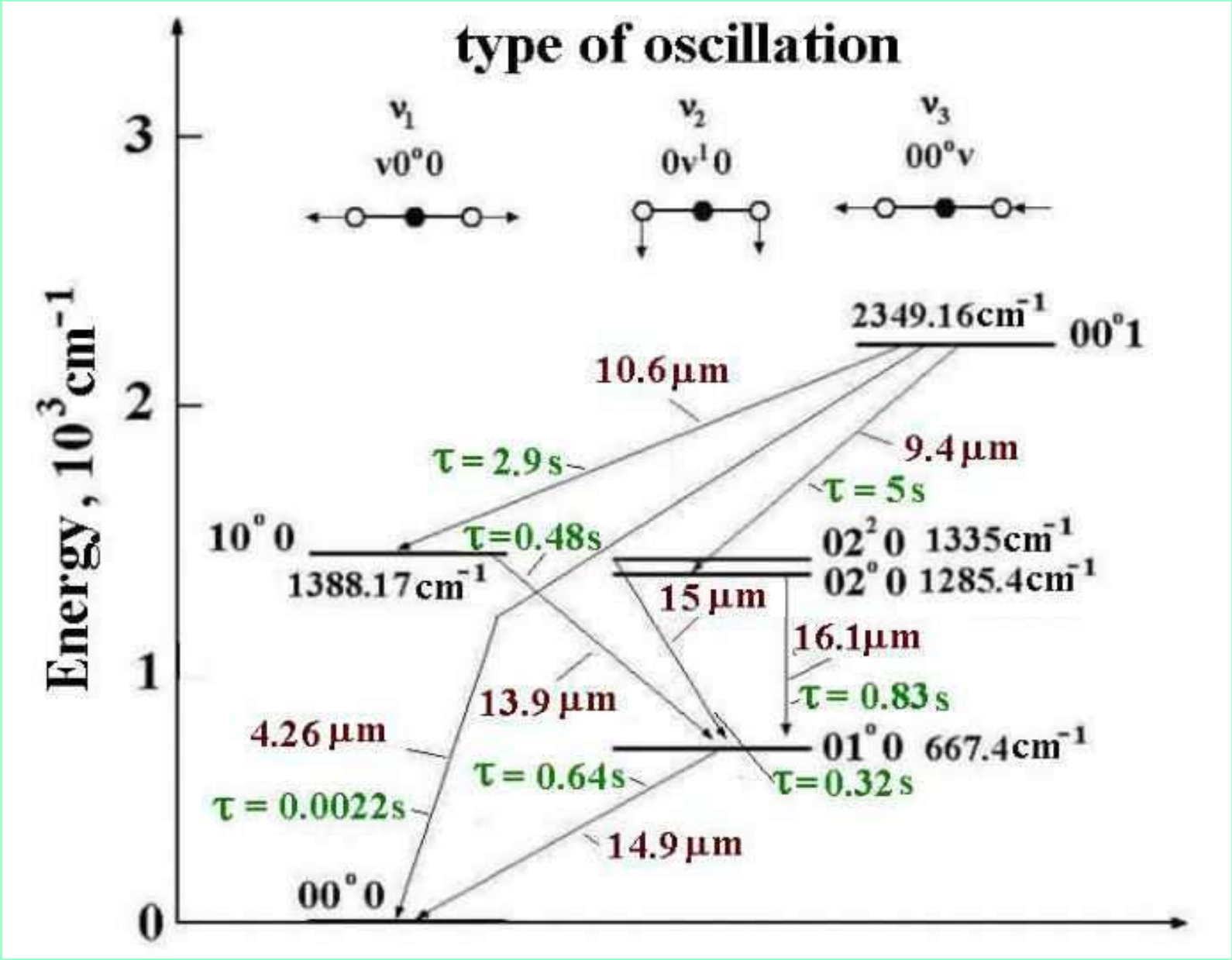
$$\tau_b = \int_{R_e}^{r_o} \frac{dR}{v_R} = \frac{R_e}{10 \cdot \sqrt{\frac{2D}{m}}};\ \Delta\omega = \left|\omega_b - \omega_o\right| = \frac{1}{\tau_b} = 70cm^{-1}$$



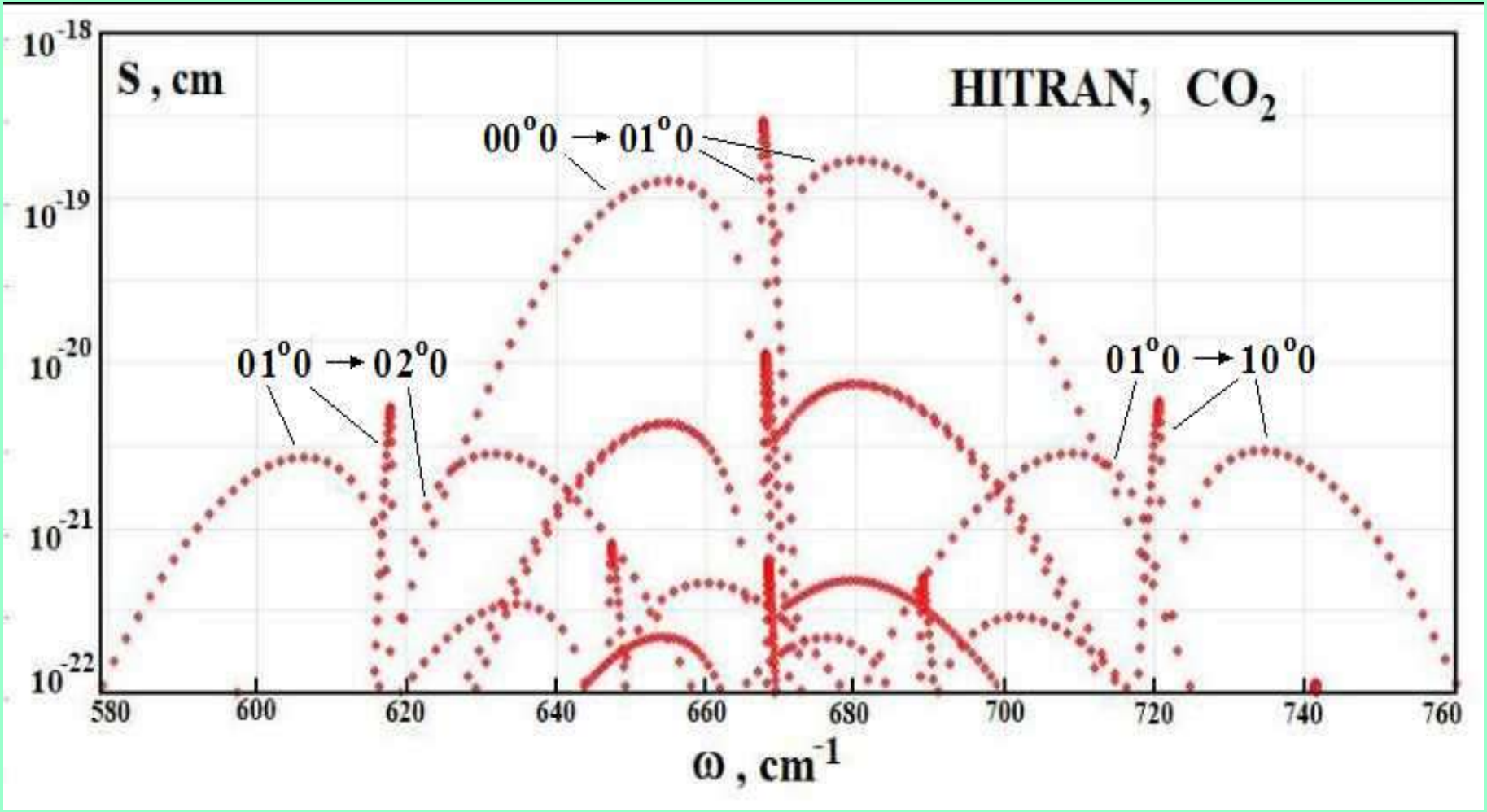
$$CO_2 - N_2$$

$$\Delta\omega = \left|\omega_b - \omega_o\right| = \frac{1}{\tau_b} = 50cm^{-1}$$

Спектр молекулы CO_2



HITRAN –CO2



HITRAN – high-resolution transmission molecular absorption database.

Оптические параметры атмосферы

σ_ω – *сечение поглощения*,

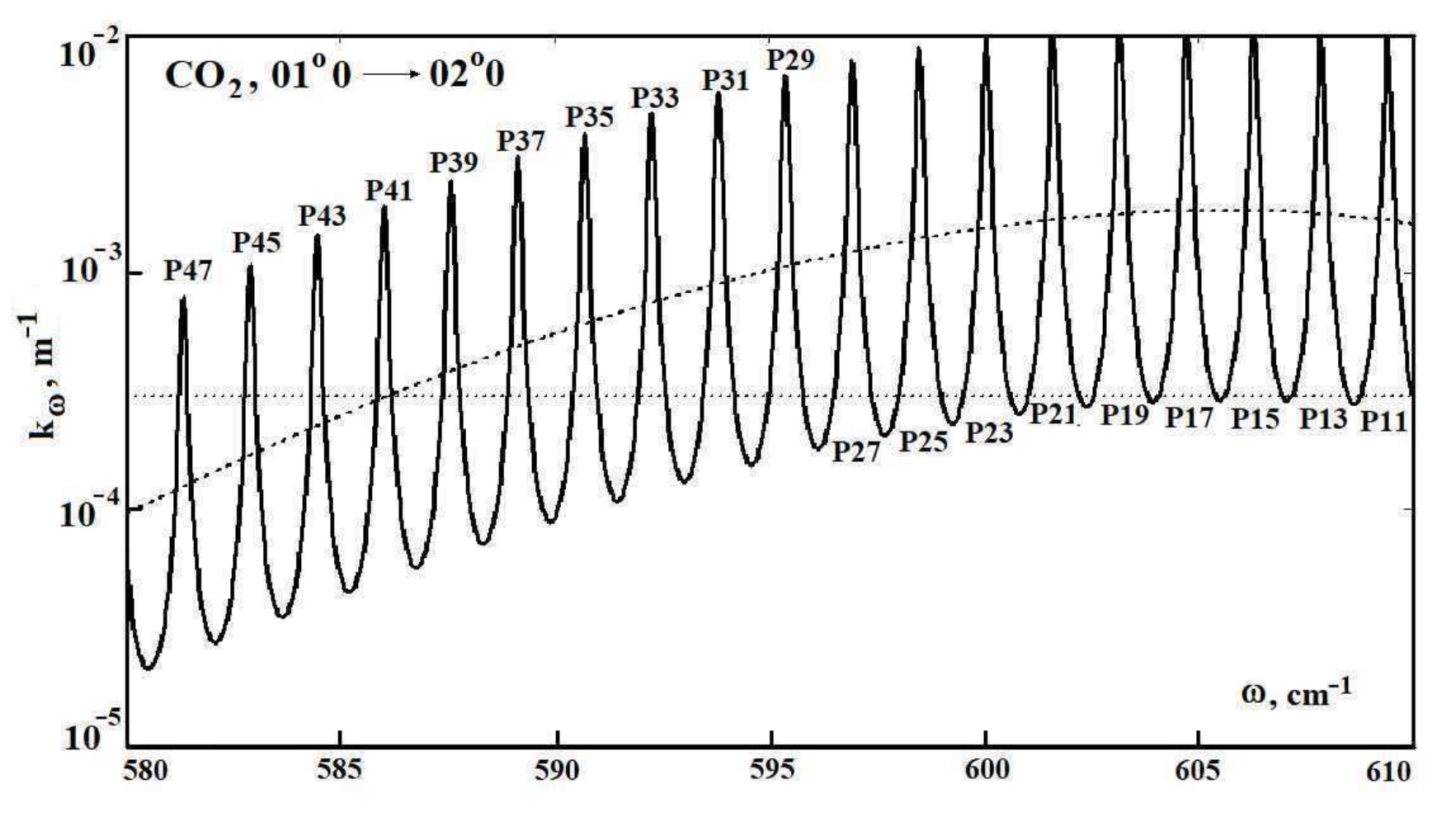
$S_j = f_j \int \sigma_\omega d\omega$ – *интенсивность перехода*,

f_j – *вероятность для данного момента* j,

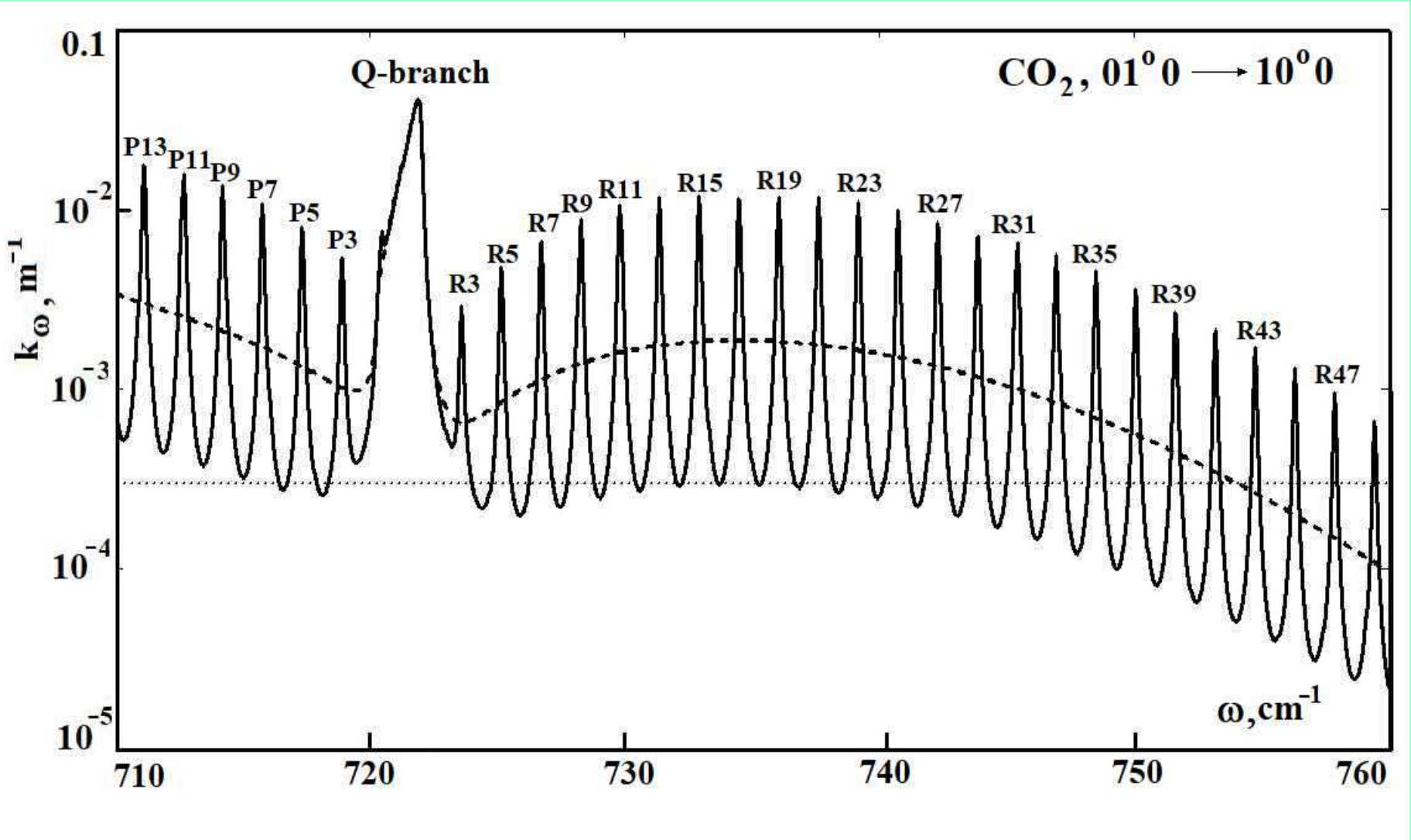
$k_\omega = N_v f_j \sigma_\omega \left(1 - \exp(-\hbar\omega / T)\right)$ – *коэффициент поглощения*,

$u_\omega = \int k_\omega dh$ – *оптическая толщина атмосферы*

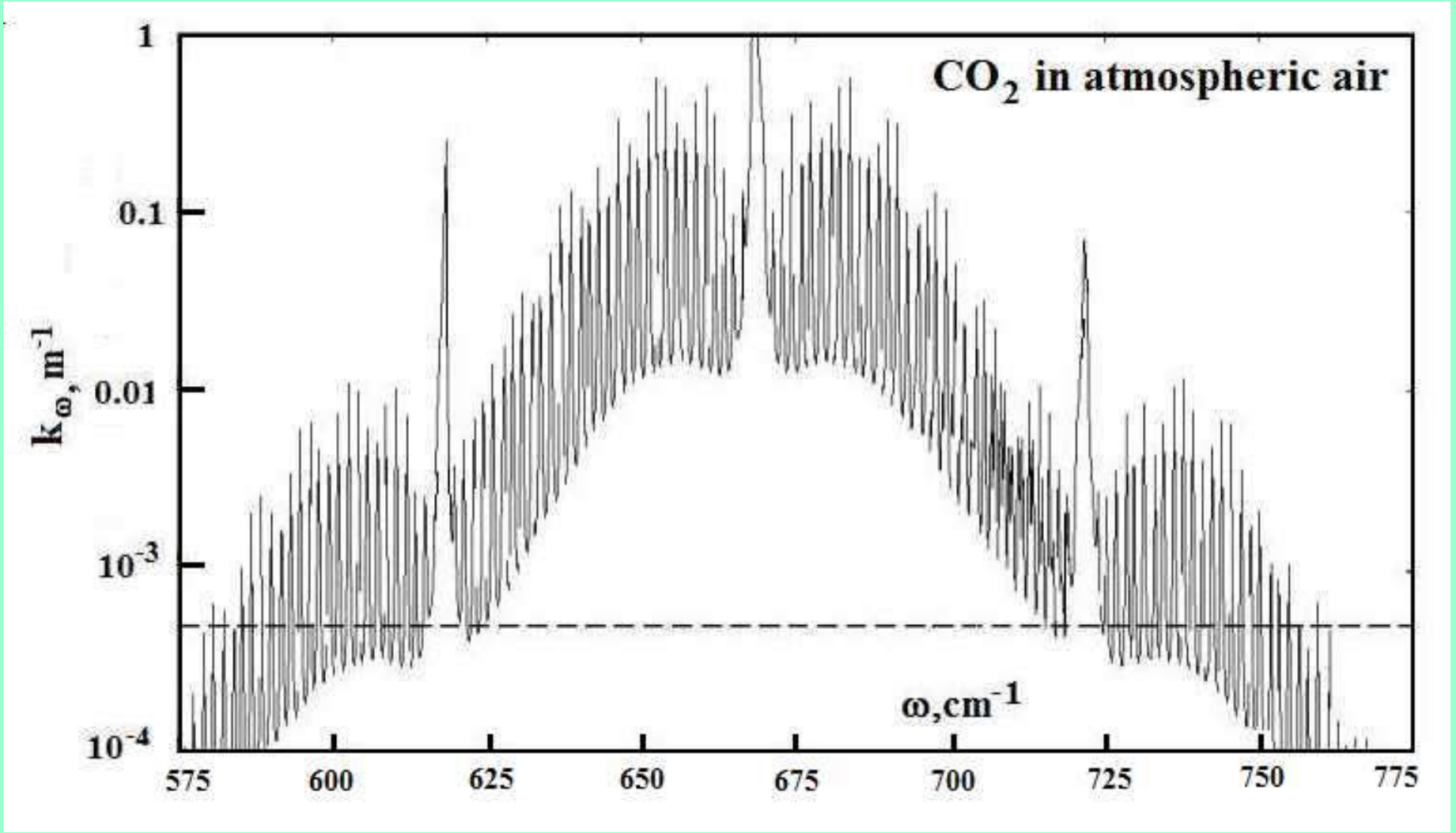
Коэффициент поглощения молекул углекислого газа в атмосфере



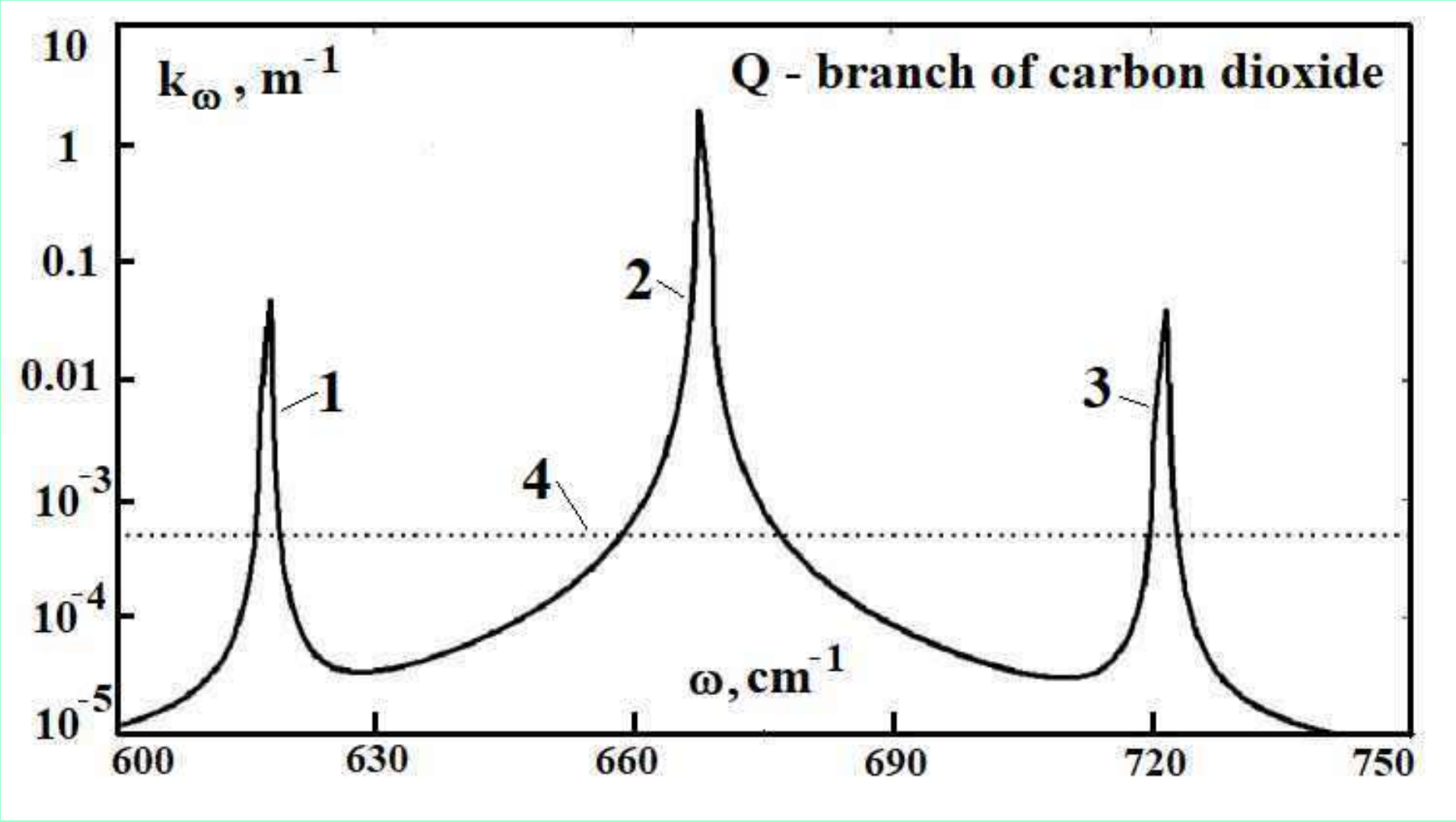
Коэффициент поглощения молекул углекислого газа в атмосфере



Коэффициент поглощения CO2 молекулами



Коэффициент поглощения Q-ветви



Коэффициент поглощения для регулярной модели

Коэффициент поглощения при ударном уширении

$$k_\omega = \frac{\pi^2 c^2}{\omega^2 \tau} N_o \frac{\hbar(\omega-\omega_o)}{T} \exp\left[-\frac{\hbar^2(\omega-\omega_o)^2}{4BT}\right]\left[1-\exp\left(-\frac{\hbar\omega}{T}\right)\right]\sum_j \frac{\nu}{\pi[(\omega-\omega_j)^2+\nu^2]}$$

Колебательно-вращательные переходы

$$\omega_j = \omega_o \pm 2B(j+1/2)/\hbar$$

Коэффициент поглощения

$$k_\omega = S \sinh\frac{\pi\hbar\nu}{B}\left[\cosh\frac{\pi\hbar\nu}{B} - \cos\frac{\pi\hbar(\omega-\omega_o)}{B}\right]^{-1}$$

$$S = \frac{\pi^2\omega^2}{c^2}\frac{\hbar N_a c_m}{2B\tau}\frac{\hbar(\omega-\omega_o)}{T}\exp\left[-\frac{\hbar^2(\omega-\omega_o)^2}{4BT}\right]\left[1-\exp\left(-\frac{\hbar\omega}{T}\right)\right]$$

Модели эмиссии атмосферы

Три типа излучателей атмосферы :
молекулы воды, микрокапли воды, молекулы углекислого газа

1. **Модель не зависящего от частоты коэффициента поглощения.**
2. **Коэффициент поглощения атмосферной воды не зависит от частоты.**
3. **Коэффициент поглощения микрокапель воды не зависит от частоты.**

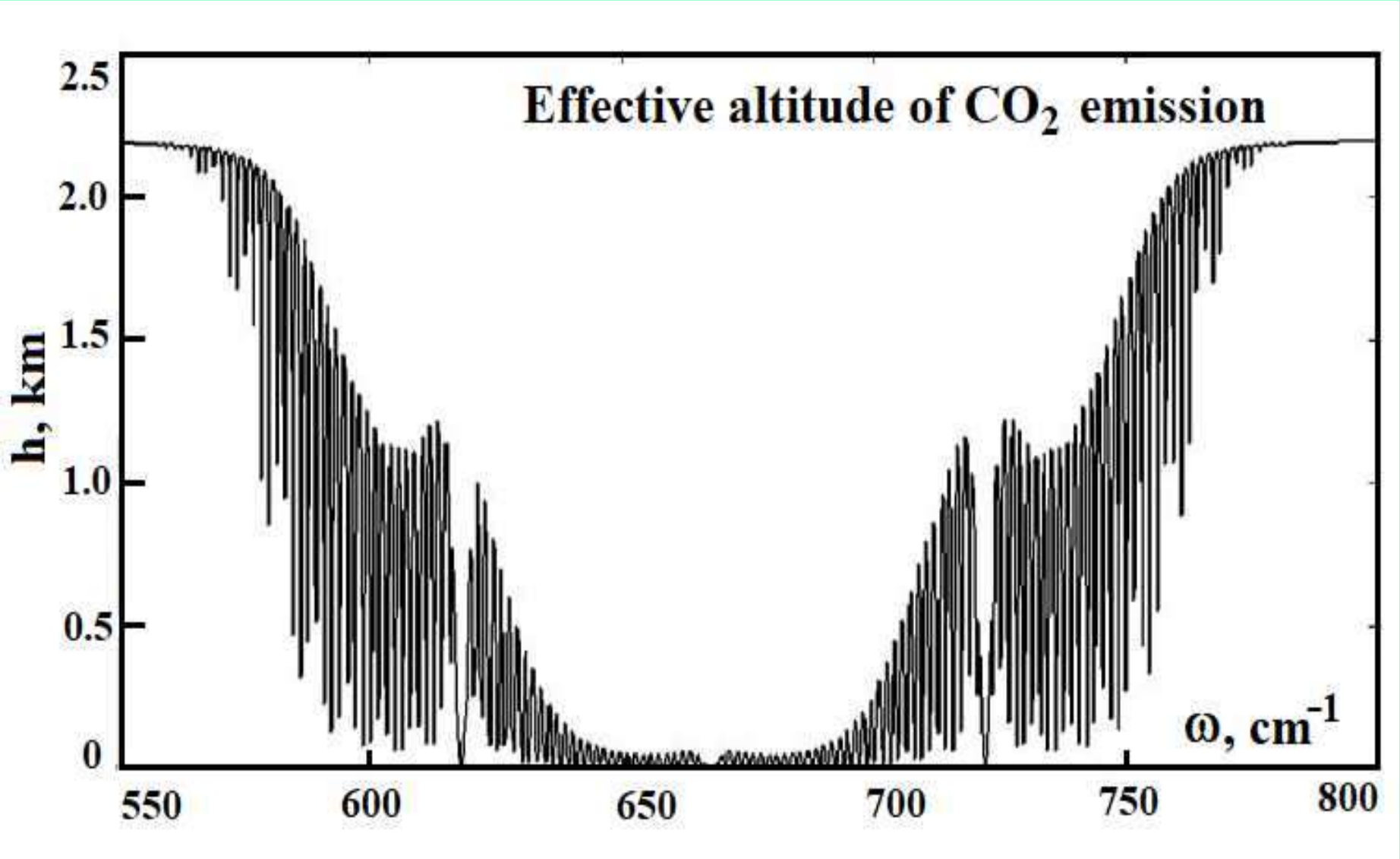
Два метода анализа парникового эффекта

Ширина полосы поглощения ($u_\omega >> 1$) существенно больше ширины переходных областей ($u_\omega \sim 1$).

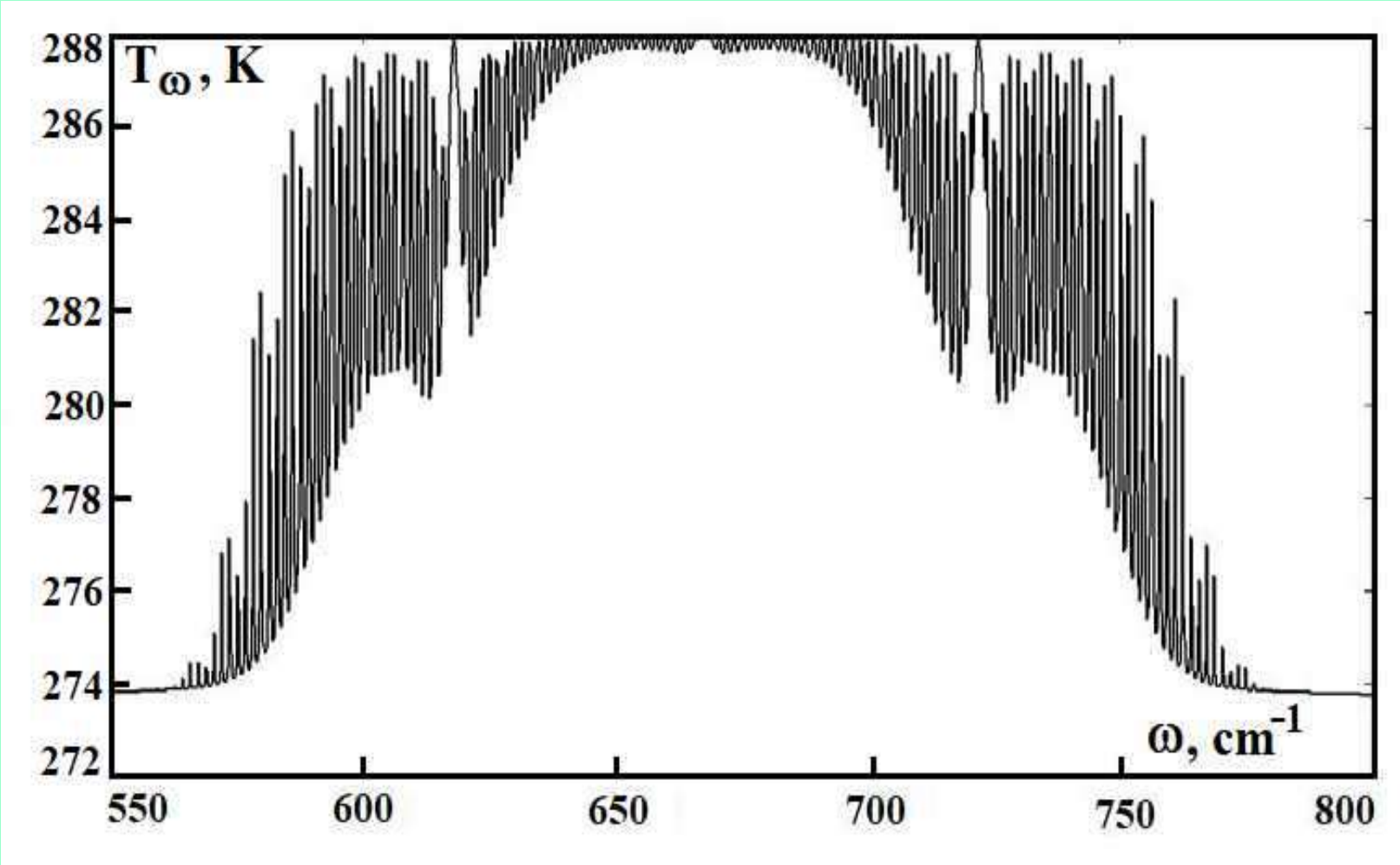
Для определения ширины полосы поглощения достаточно использовать коэффициент поглощения, усредненный по осцилляциям.

Изменение потока излучения за счет изменения ее концентрации определяется переходной областью. При его нахождении необходимо учесть осцилляционную структуру спектра поглощения, наличие других оптически активных компонент и температурную зависимость коэффициента поглощения.

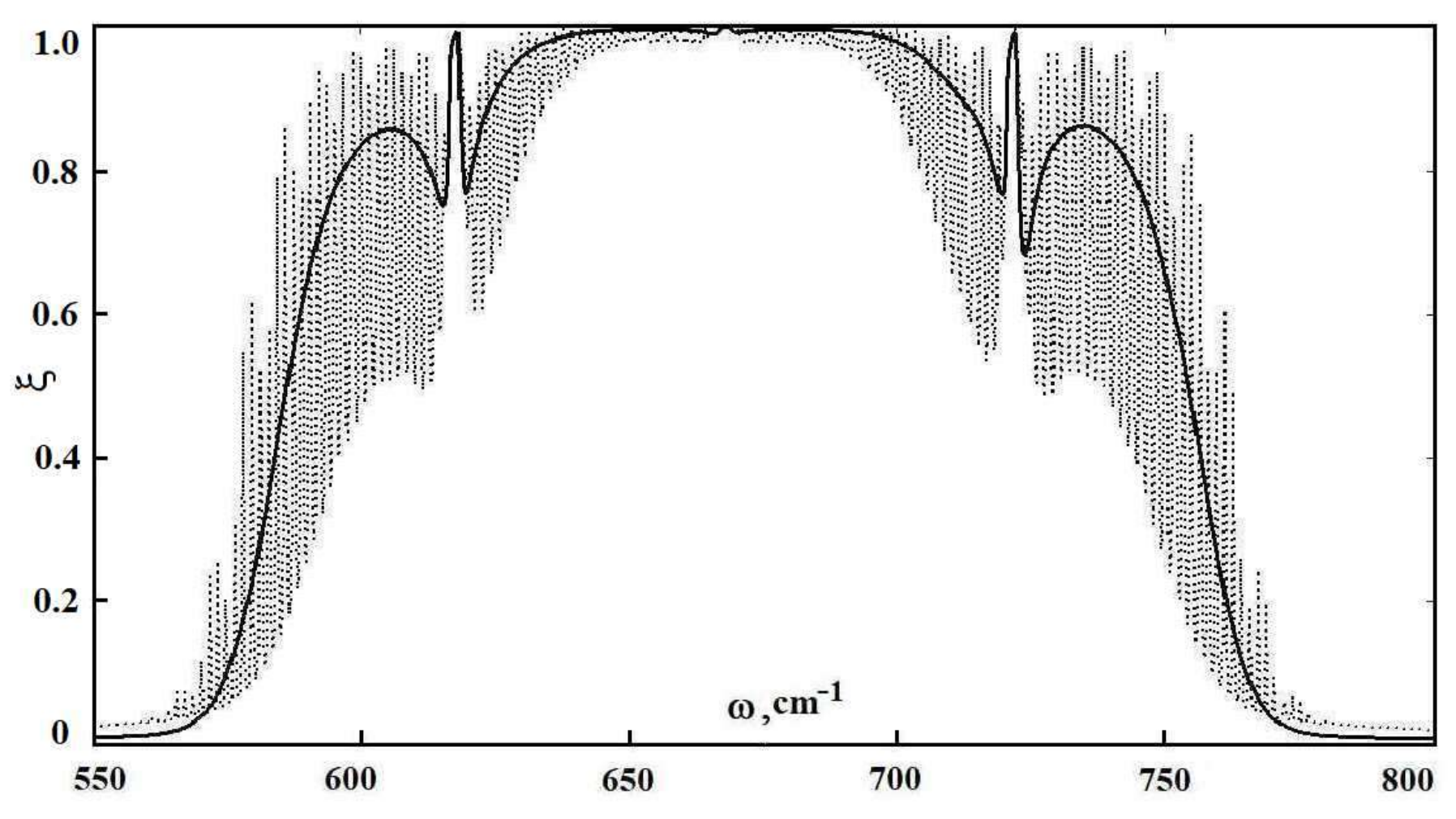
Эффективная высота поглощения



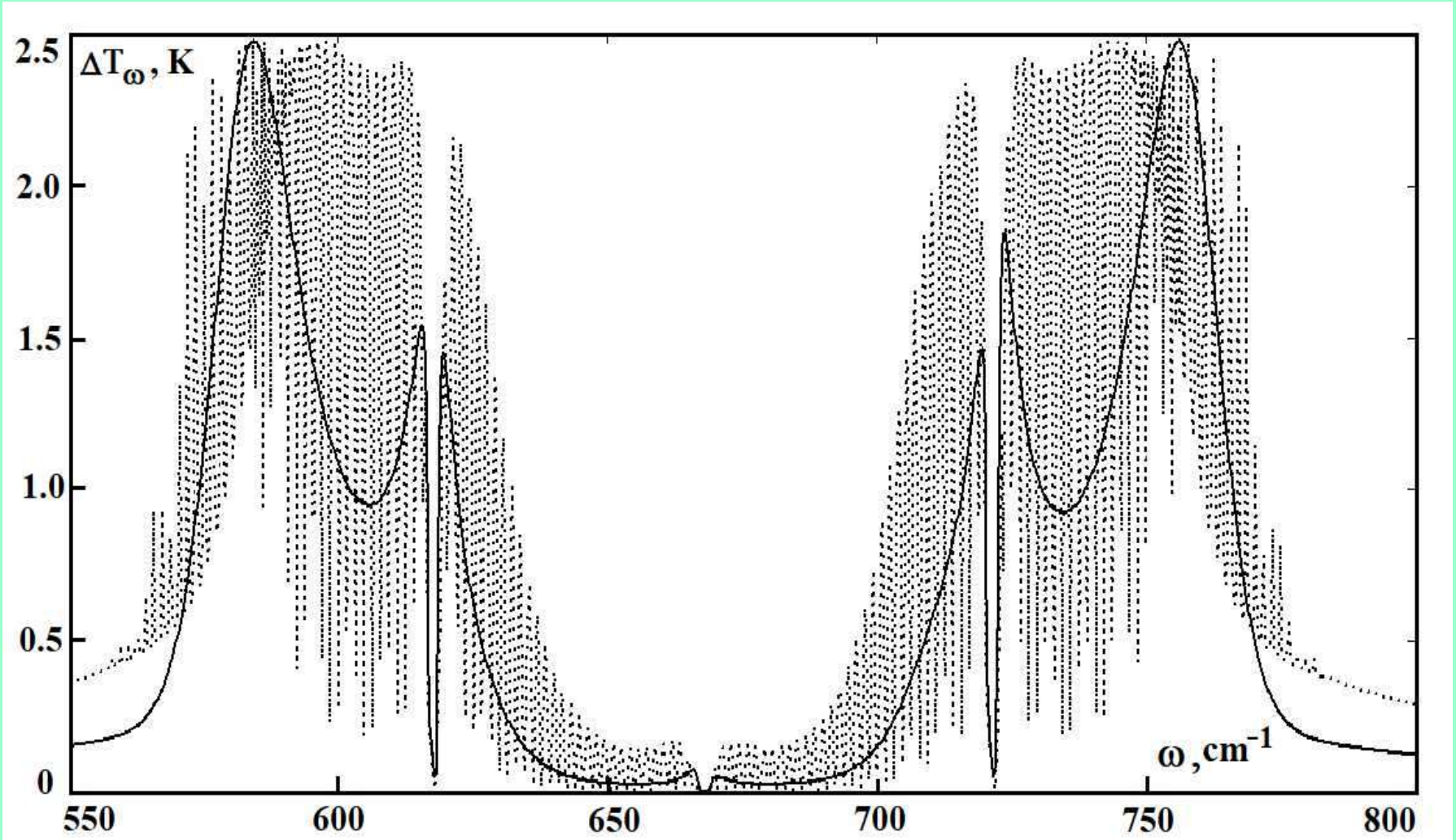
Температура излучения, создаваемого CO2 молекулами



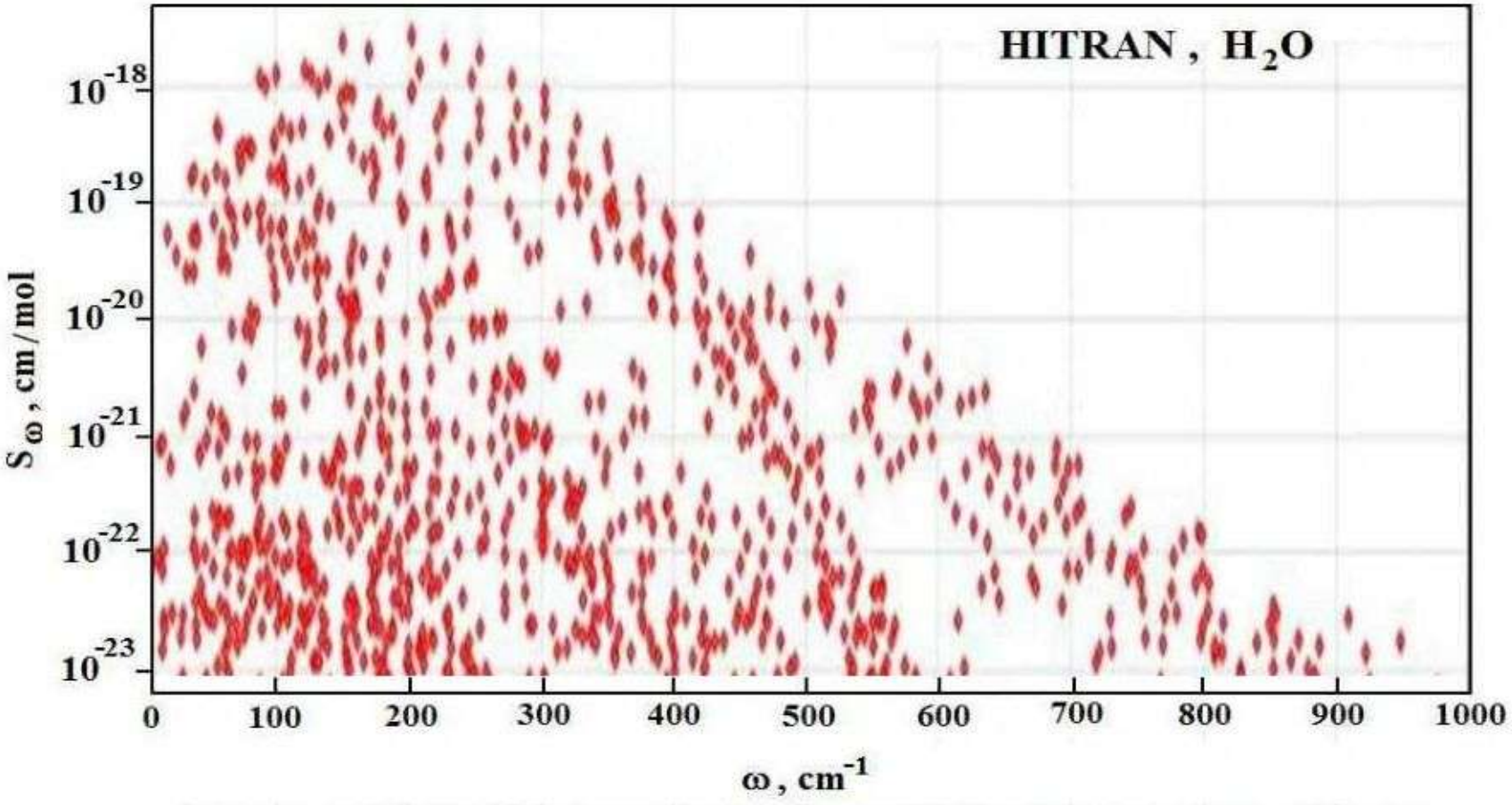
Часть потока излучения, создаваемого CO2 молекулами



Рост температуры излучения при удвоении концентрации CO2

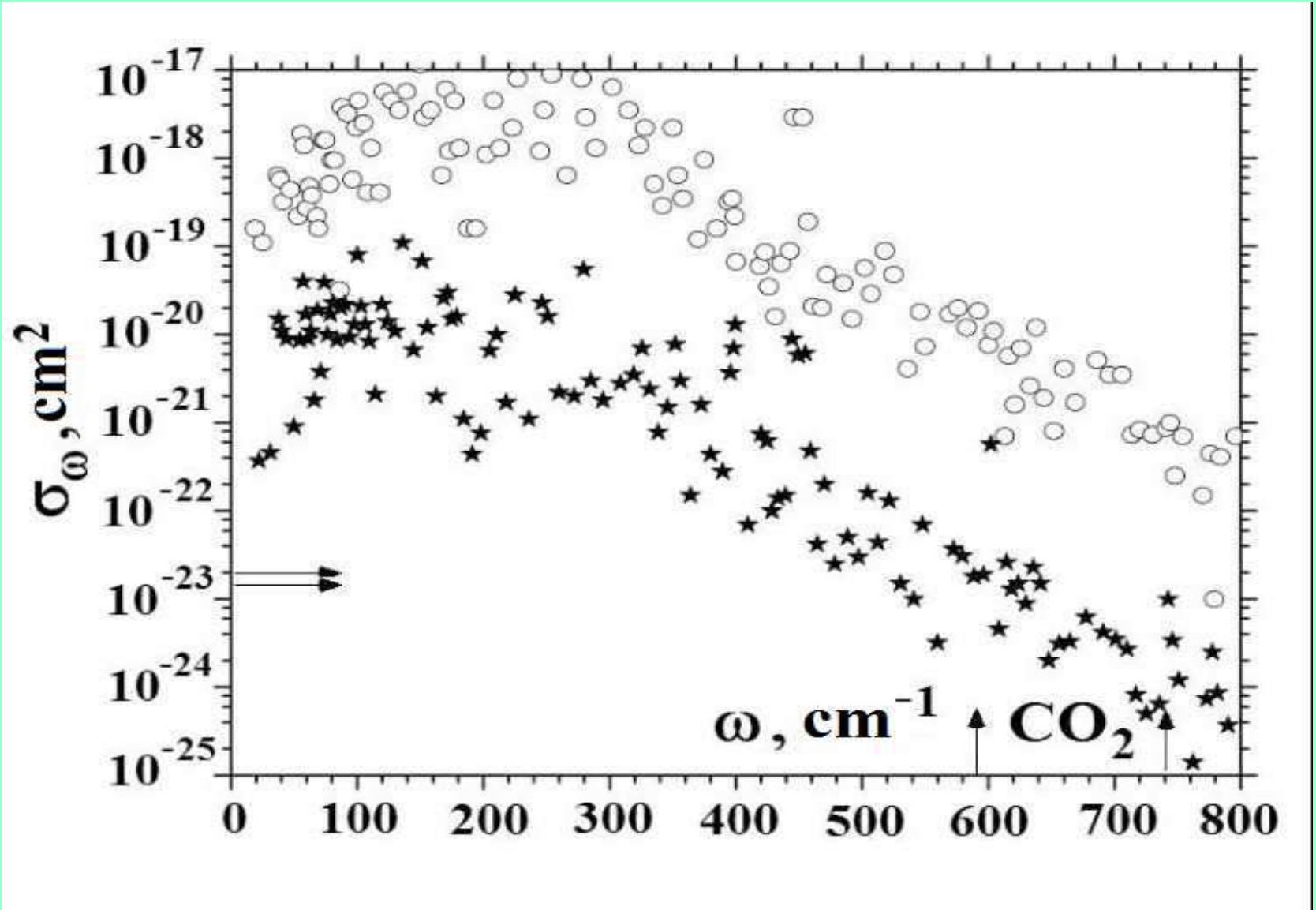


HITRAN –H2O

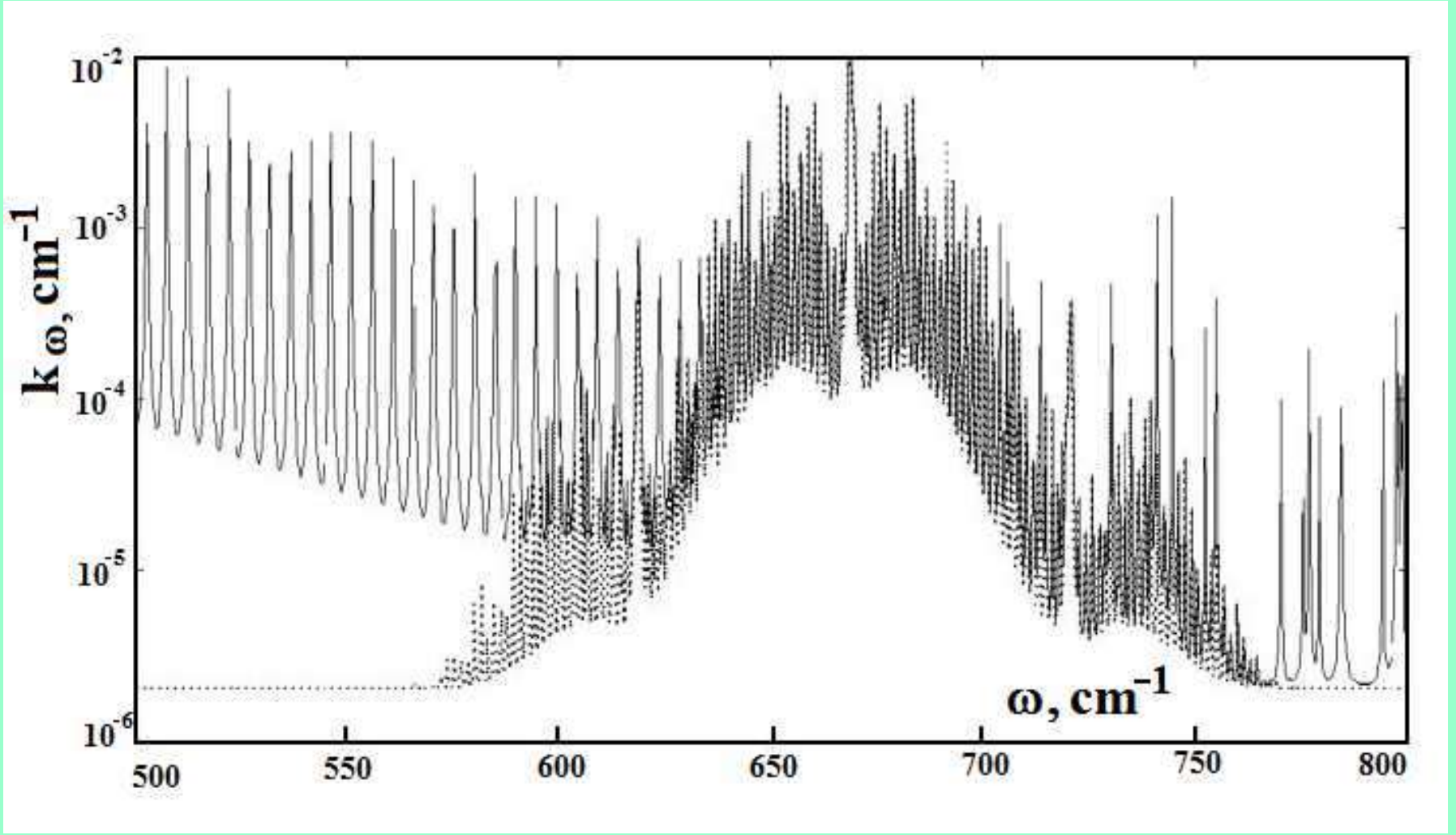


$$\sigma_\omega = 1/(N(H_2O)\cdot\Lambda), \quad \sigma_\omega = 10^{-23} cm^2$$

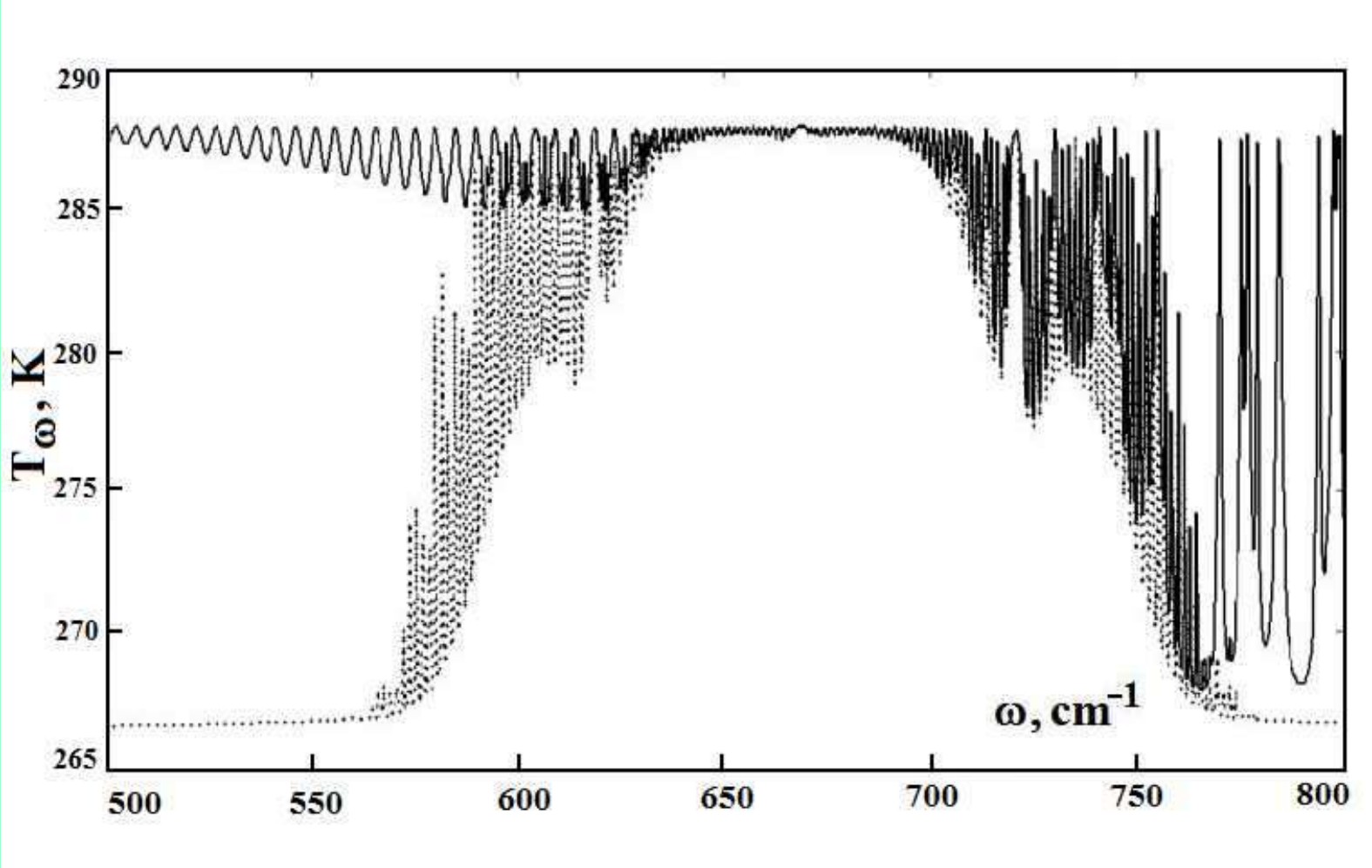
Сечение поглощения атмосферными молекулами воды



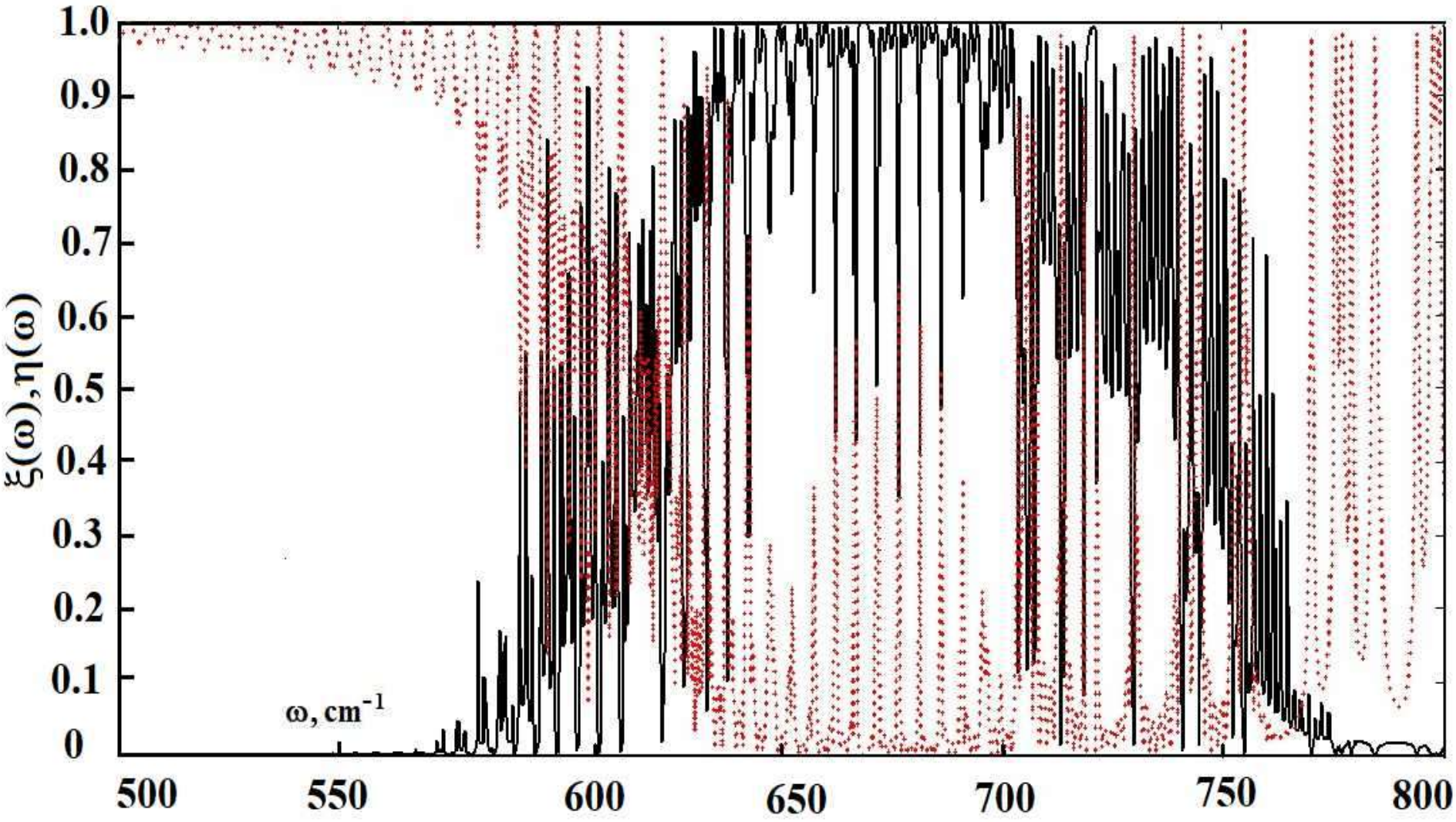
Коэффициент поглощения атмосферной водой и угл. газом.



Температура излучения за счет атмосферной воды и углекислого газа.



Часть потока излучения, создаваемого H2O и CO2 молекулами



Излучение атмосферы в сторону Земли.

$$J_{\downarrow} = 327 W / m^2$$

$$J_{\downarrow}(CO_2) = 44 W / m^2 \ (14\%)$$

$$J_{\downarrow}(H_2O) = 168 W / m^2 \ (51\%)$$

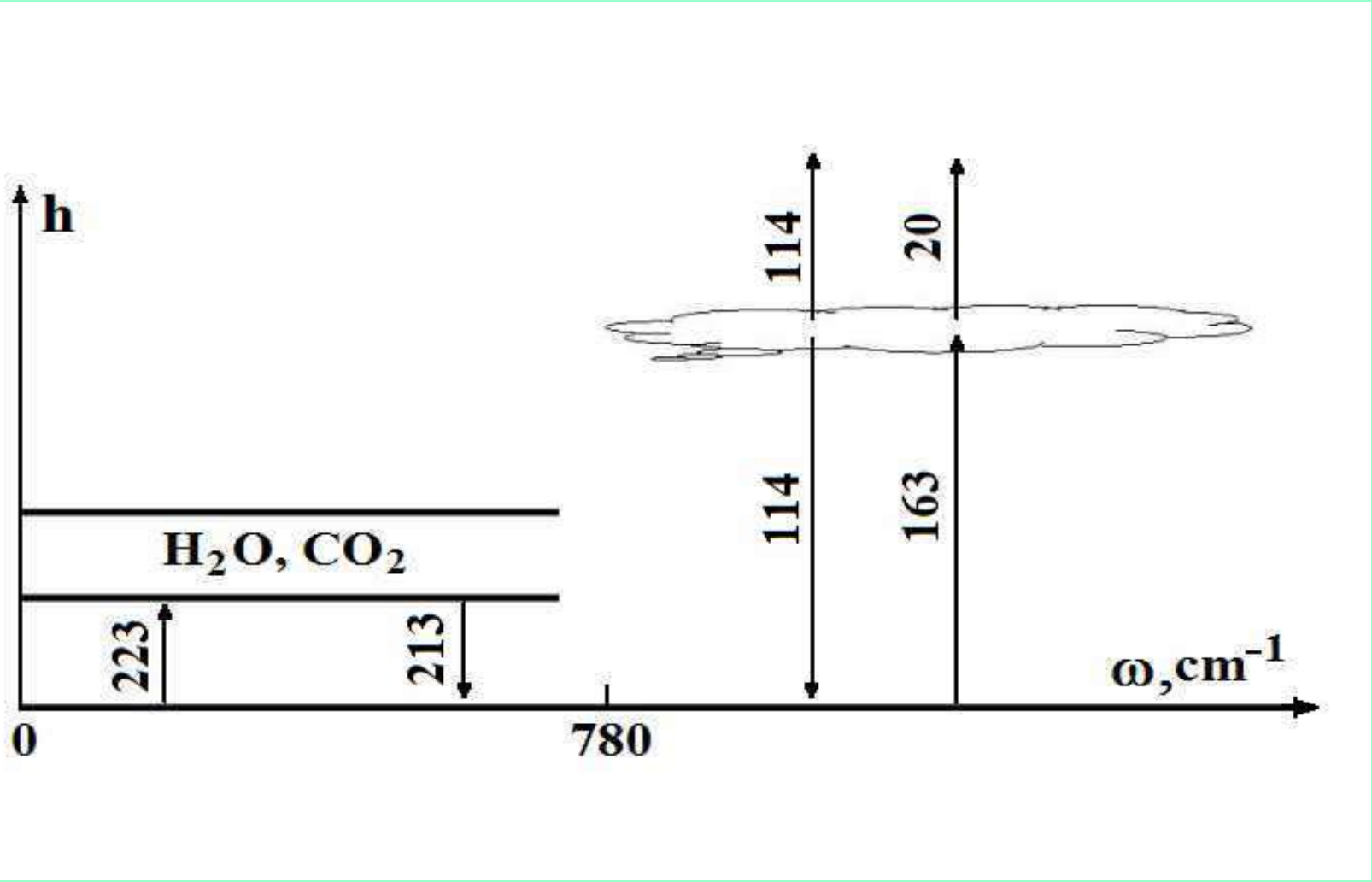
$$J_{\downarrow}(drops) = 115 W / m^2 \ (35\%)$$

Удвоение концентрации CO2 $\Delta J = (0.6 \pm 0.1) \frac{W}{m^2}$

Увеличение конц. H2O на 10% $\Delta J = 4.0 \frac{W}{m^2}$

Увеличение массы микрокапель на 10% $\Delta J = 3.8 \frac{W}{m^2}$

Потоки ИК излучения в атмосфере



$$P = 0.12,\ u = 1.1,\ g(u) = 0.84,\ T_\omega = 274K,\ h = 1.4km$$

Парниковые компоненты в атмосфере

Сечение поглощения микрокаплей

$$\sigma_{abs} = \frac{\pi r^2}{1 + C\frac{r}{\lambda}}$$

Удельная масса

$$M_d = \frac{4}{3}\rho u\left(r + C\lambda\right)$$

Удельная масса парниковых компонент в атмосфере

Молекулы воды	$2.6 g/cm^2$
Молекулы CO2	$0.6 g/cm^2$
Микрокапли	$(2-3)\cdot 10^{-3} g/cm^2$

Изменения в атмосфере

Удвоение CO2 в атмосфере

$$\Delta J_1 = (1.1 \pm 0.2)\frac{W}{m^2}, \quad \Delta J_2 = (0.6 \pm 0.1)\frac{W}{m^2}$$

Увеличение атмосферной воды на 10%

$$\Delta J_1 = 2.3\frac{W}{m^2}, \quad \Delta J_2 = 4.0\frac{W}{m^2}$$

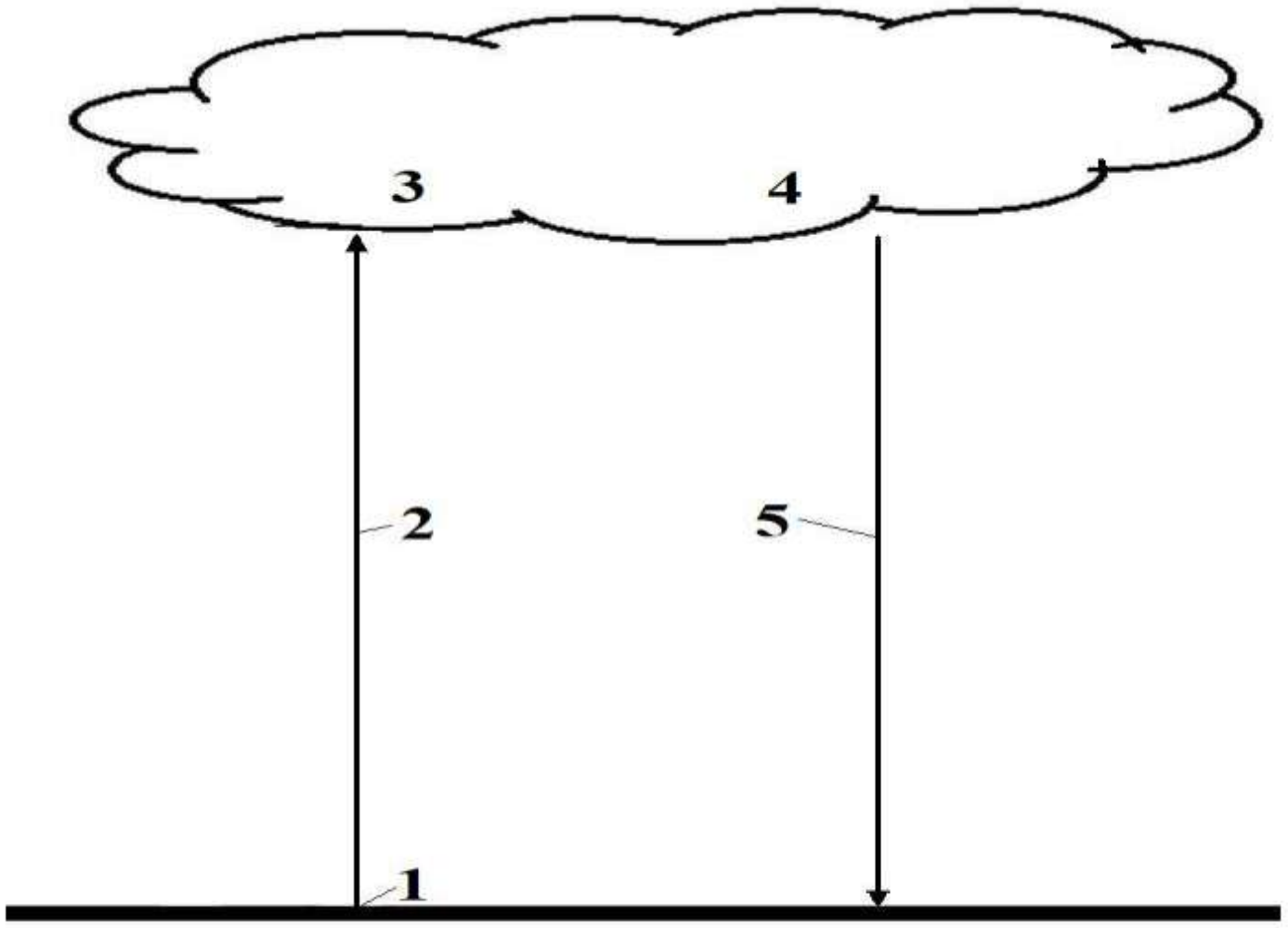
Вклад микрокапель $\Delta J_2 = 3.8\frac{W}{m^2}$

Индекс 1 относится к усреднению коэффициента поглощения атмосферной воды по спектру

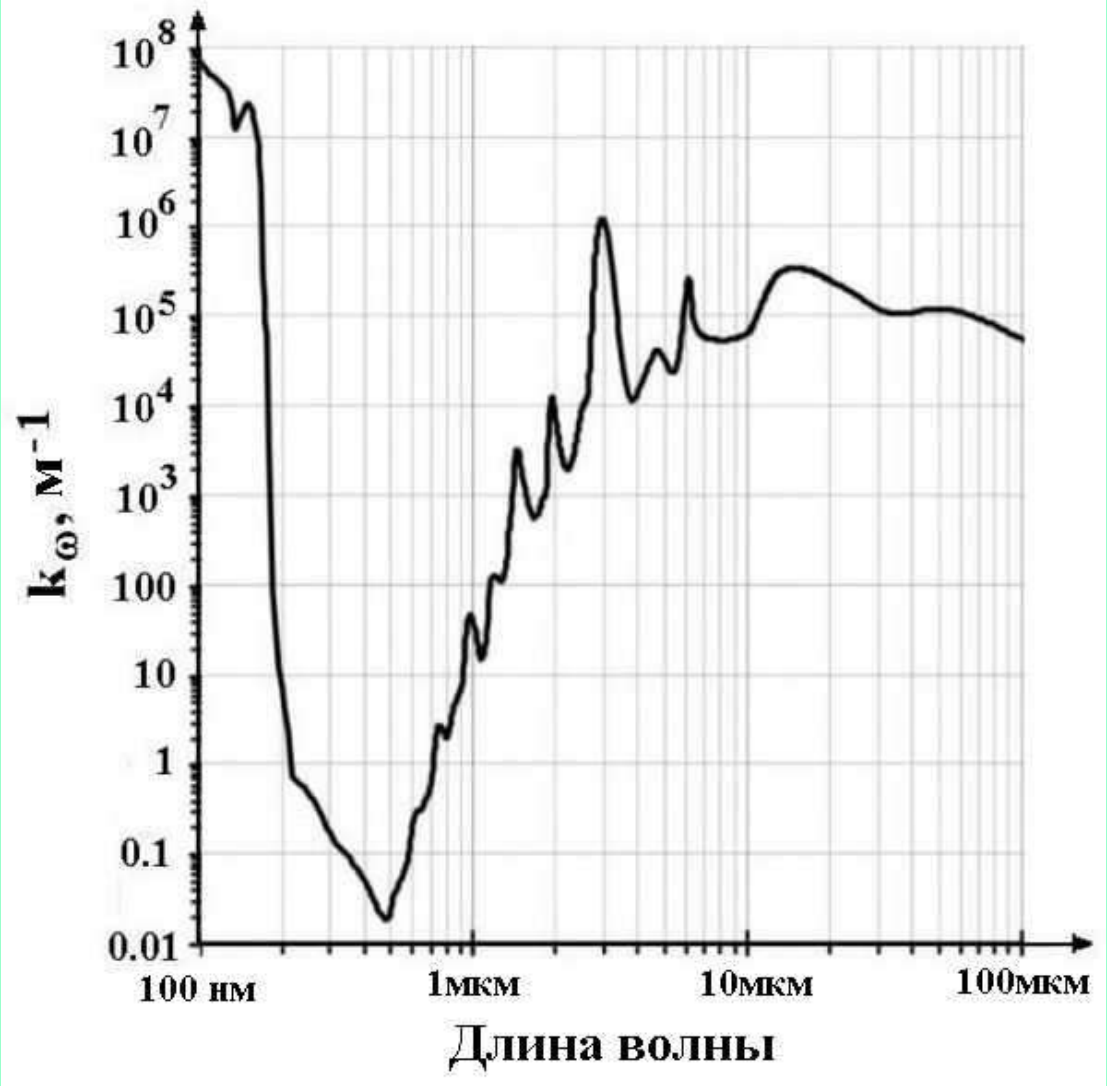
Вывод

Углекислый газ вносит небольшой вклад (14%) в парниковый эффект, изменение его содержания в атмосфере некритично. Основное внимание в этой проблеме должно быть уделено микрокаплям воды.

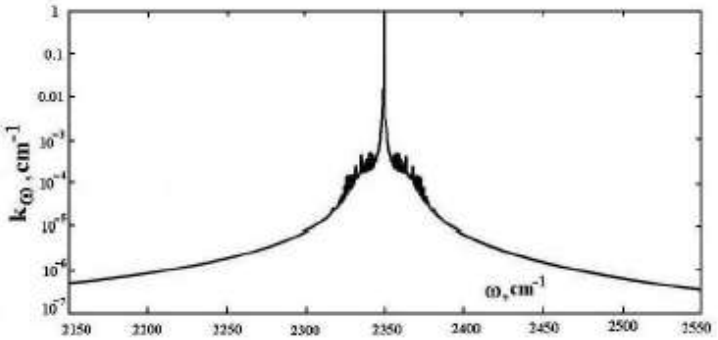
Круговорот воды в природе

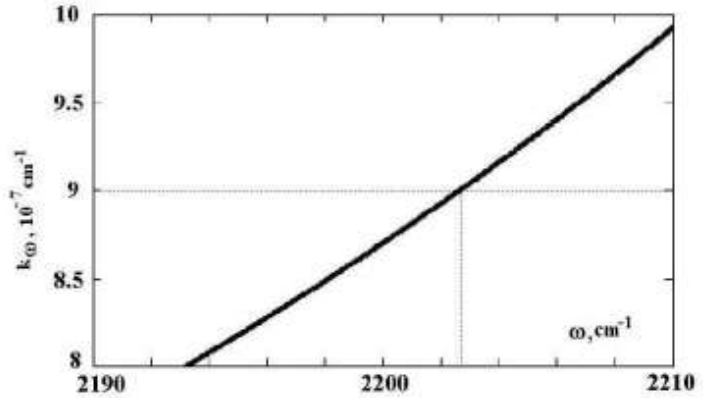


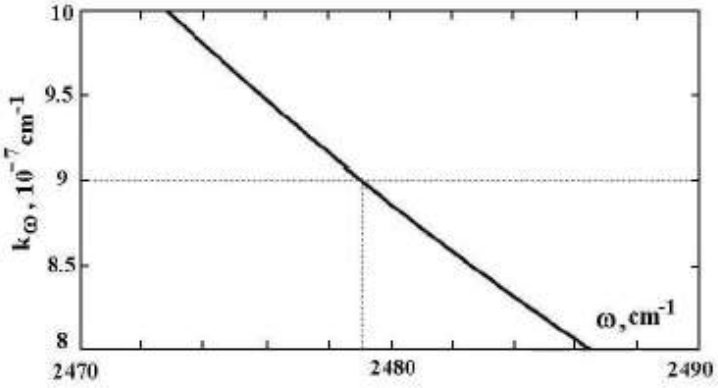
Коэффициент поглощения слоя жидкой воды



Резонансный переход CO_2 (001 → 000)





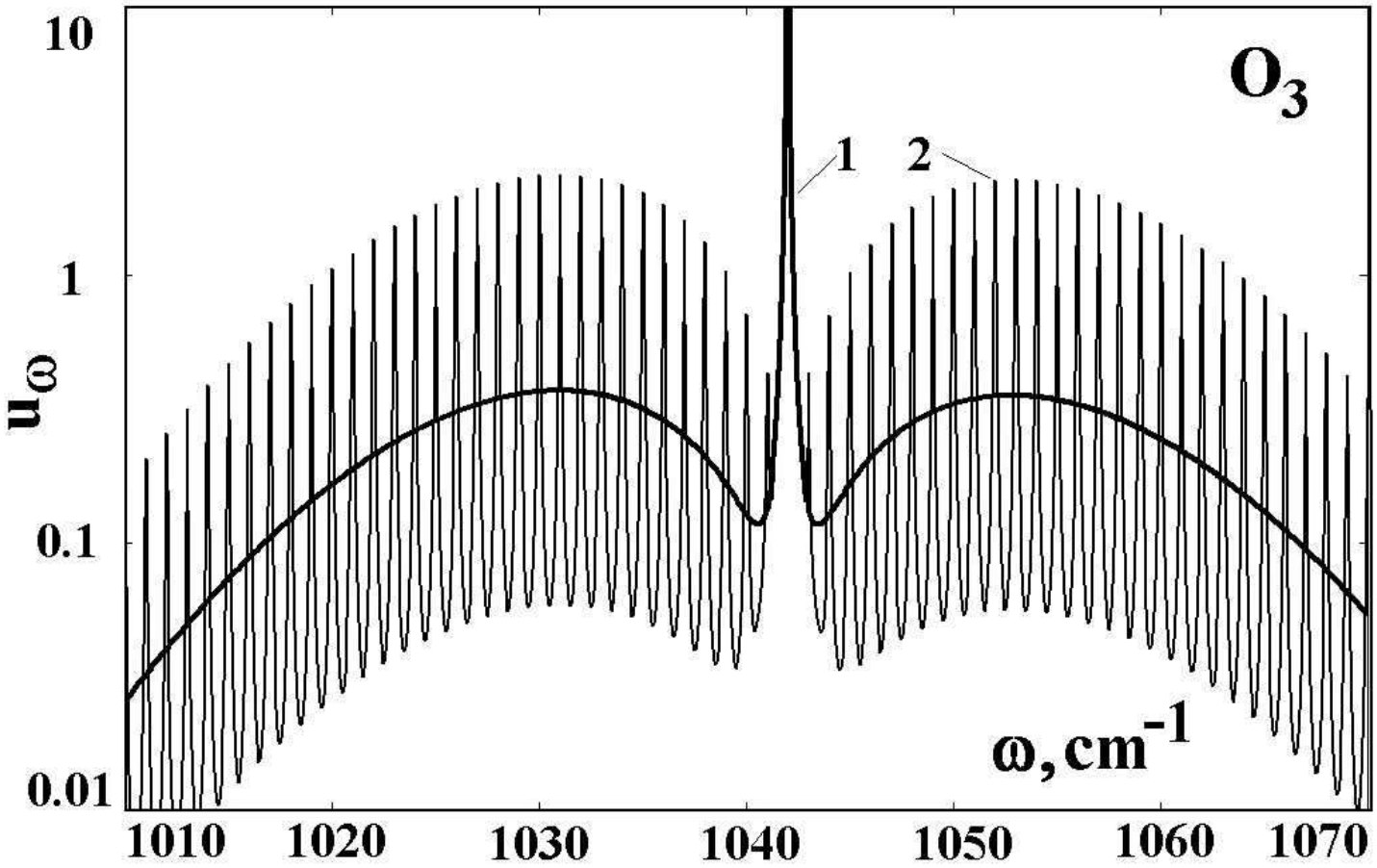


$$\hbar\omega_o/T_E = 12$$

$$\omega_{1b} = 2202cm^{-1},\ \omega_{2b} = 2479cm^{-1}$$

$$J_\downarrow = 0.4W/m^2$$

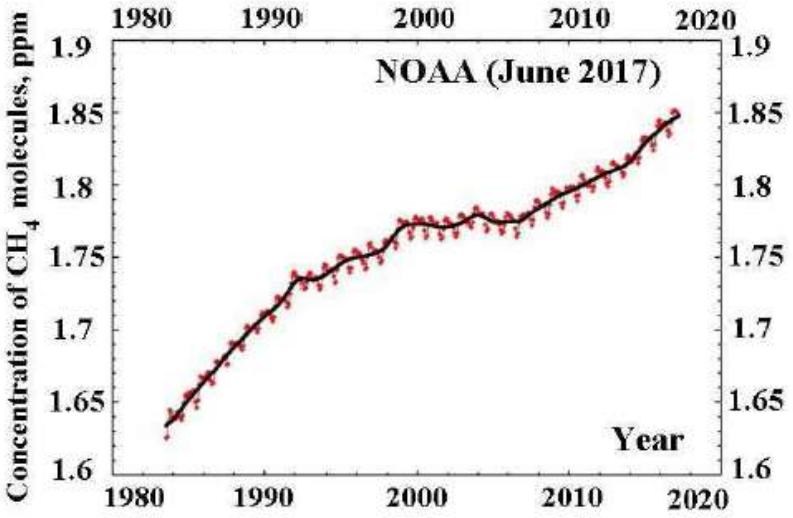
Озон в парниковом эффекте

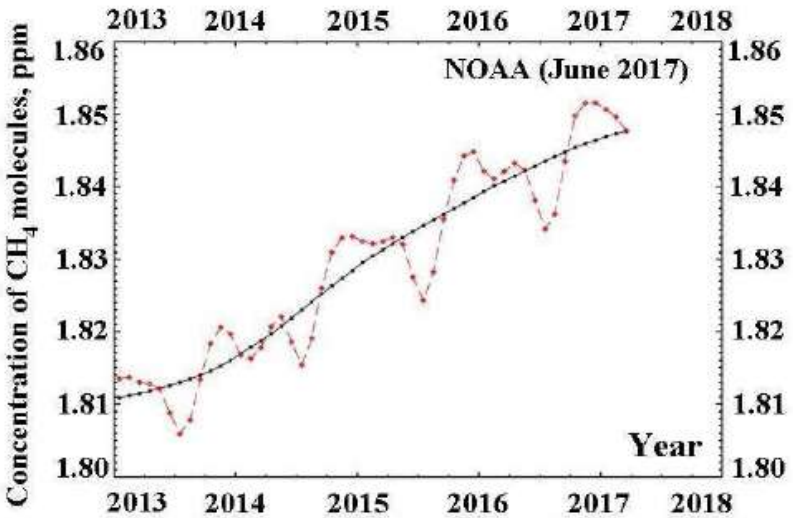


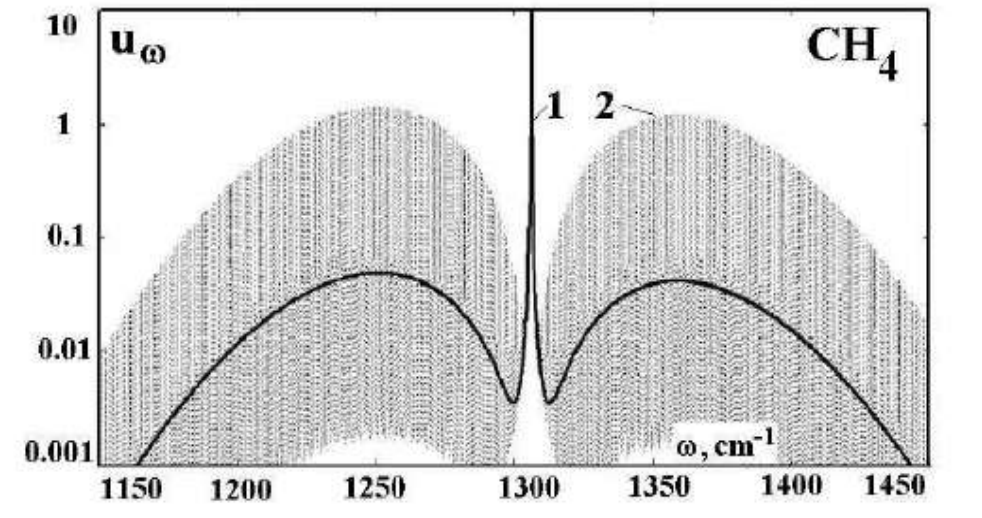
$E = Bj(j+1) + (A-B)k^2$ $A = 3.55cm^{-1}$ $B = 0.445cm^{-1}$, $C = 0.395cm^{-1}$

$\omega_{1b} = 1014cm^{-1}$, $\omega_{2b} = 1069cm^{-1}$ $J(O_3) = 2.5W/m^2$

Метан в атмосфере Земли

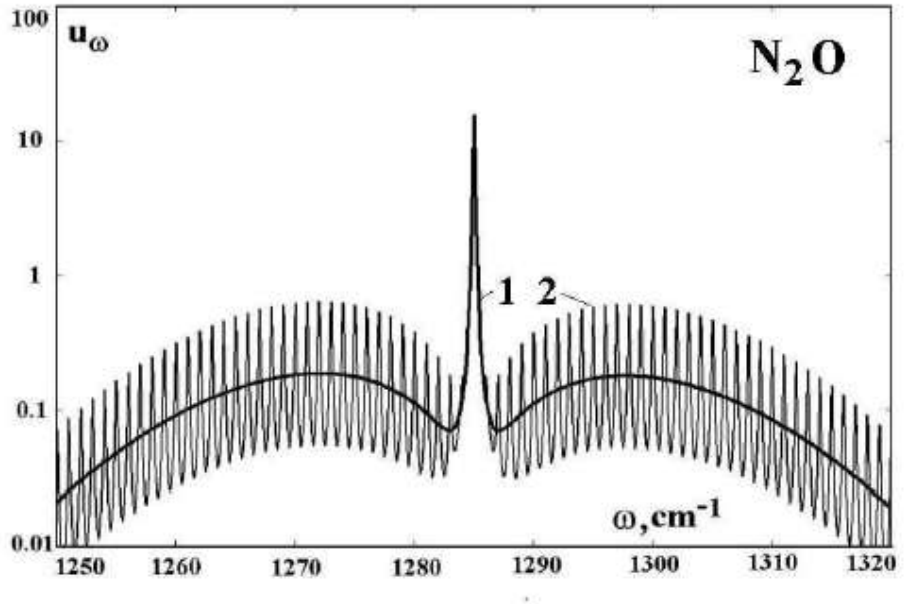


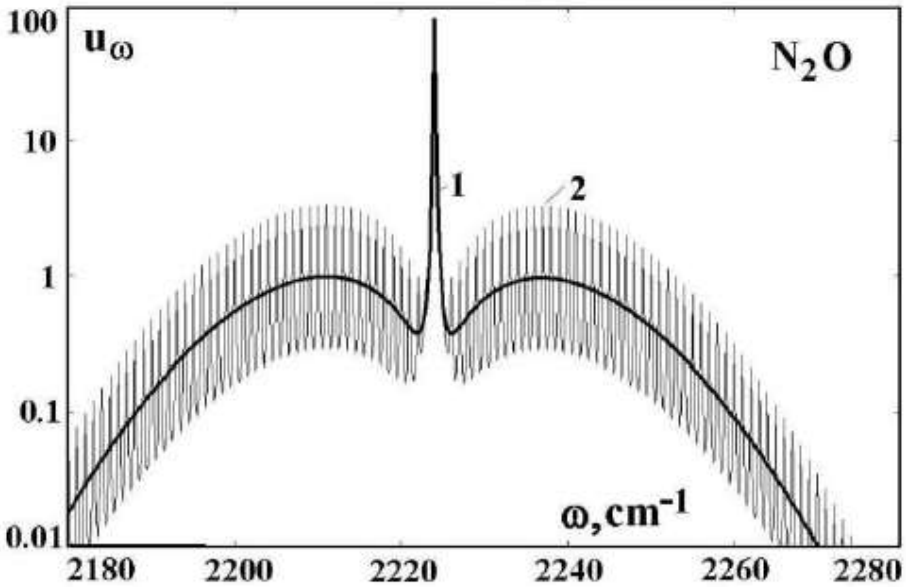




$$J_\downarrow = 0.9 W/m^2$$

Закись азота в атмосфере Земли





$$J_1 = 1.5W / m^2 ,$$

$$J_2 = 0.4W / m^2 ,$$

$$J = 1.9W / m^2$$

Излучение примесных газов на поверхность Земли

Полный поток

$$J = J(CO_2^*) + J(CH_4) + J(N_2O) = (0.4 + 0.9 + 1.9)\frac{W}{m^2} = 3.2\frac{W}{m^2}$$

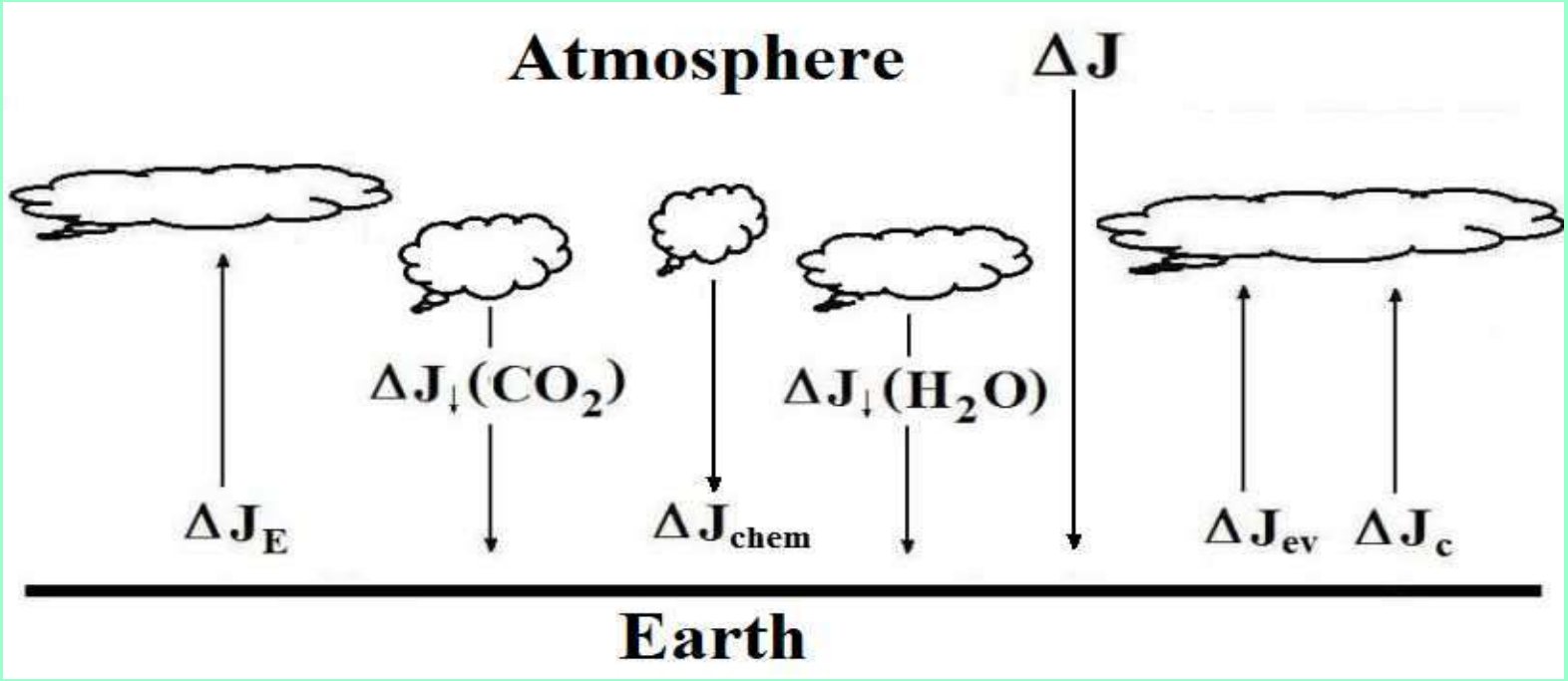
Поток на поверхность Земли

$$J_\downarrow = \frac{h_\downarrow}{\Lambda} \cdot J = 0.9\frac{W}{m^2}$$

Вклад в изменение температуры

$$\Delta T \approx 0.3K$$

Радиационное действие

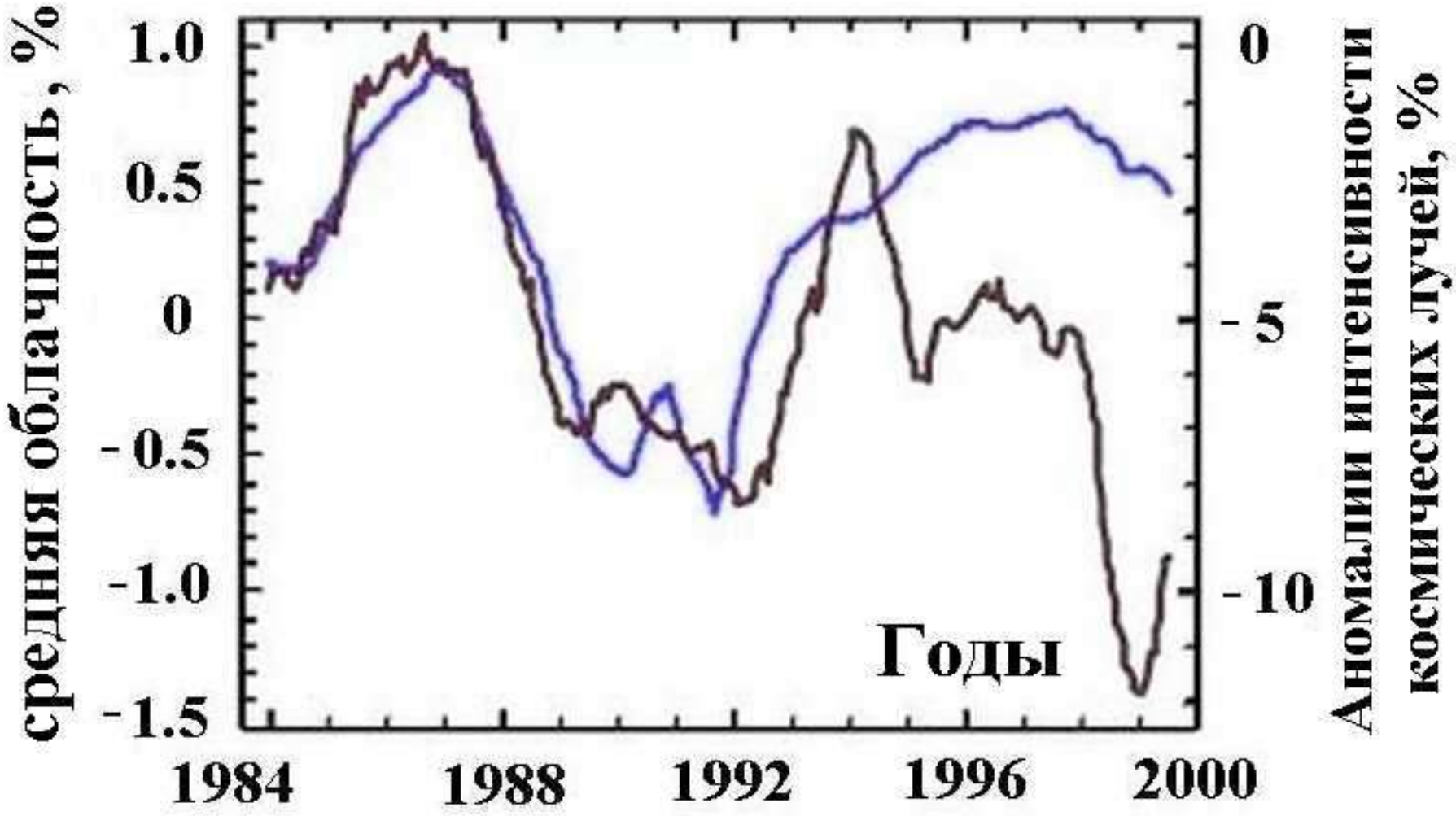


$$F = \frac{dJ}{dT}, F_E = 5.4\frac{W}{m^2 \cdot K}, F_{ev} = 3.4\frac{W}{m^2 \cdot K}, F_c = 0.2\frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$F_{\downarrow} = 2.7\frac{W}{m^2 \cdot K}, F_E = 2.5\frac{W}{m^2 \cdot K}, \quad F = 3.8\frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$S = \frac{1}{F} = 0.26\frac{K \cdot m^2}{W} \qquad \Delta J(CO_2) = 0.6\frac{W}{m^2} \rightarrow \Delta T = 0.16K$$

Космические лучи и климат



Спасибо !

Эмиссия парниковых газов 2013 г.

Страна	Доля от полной эмиссии, %
Китай	22.7
США	15.6
Индия	5.7
Россия	5.4
Япония	2.9
Бразилия	2.6
Германия	2.1
Индонезия	1.9
Канада	1.7
Мексика	1.6
Южная Корея	1.6
Великобритания	1.4
Австралия	1.3
Италия	1.2
Франция	1.2
Саудовская Аравия	1.2
ЮАР	1.1