Представление потоков тепла, влаги и импульса в климатических моделях. Радиационные потоки.

Володин Е.М. ИВМ РАН.
E-mail: volodinev@gmail.com

Модель климатической системы включает в себя два основных блока:

модель общей циркуляции атмосферы и
модель общей циркуляции океана,

а также дополнительные блоки:
углеродный цикл,
цикл метана,
химию атмосферы,
аэрозольный блок,
параметризацию некоторых электрических явлений

Модель атмосферы включает в себя

1. Решение уравнений гидротермодинамики конечно-разностным методом
2. Параметризацию атмосферной радиации
3. Параметризацию турбулентности в пограничном слое
4. Параметризацию потоков на поверхности, а также самой поверхности (растительность, почва, сток рек и др.)
5. Параметризацию конвекции и конденсации
6. Гравитационно-волновое сопротивление
7. Вспомогательные блоки (фильтрация у полюсов, горизонтальная диффузия,…)

Для расчета солнечного излучения на верхней границе атмосферы задаются:

1. Солнечная постоянная

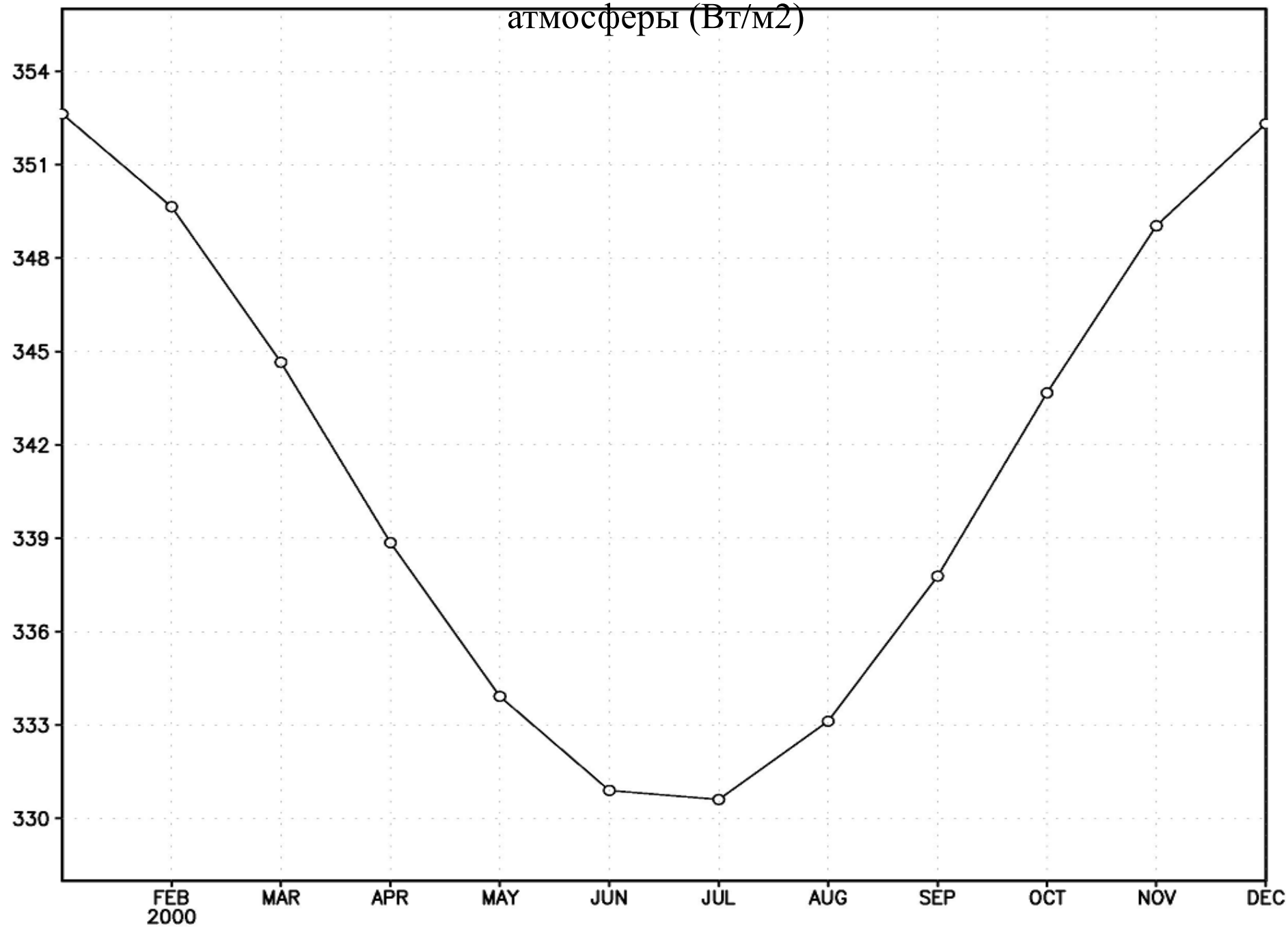
Параметры орбиты:

2. Наклон оси вращения Земли к плоскости Эклиптики. Сейчас 23.446 градусов

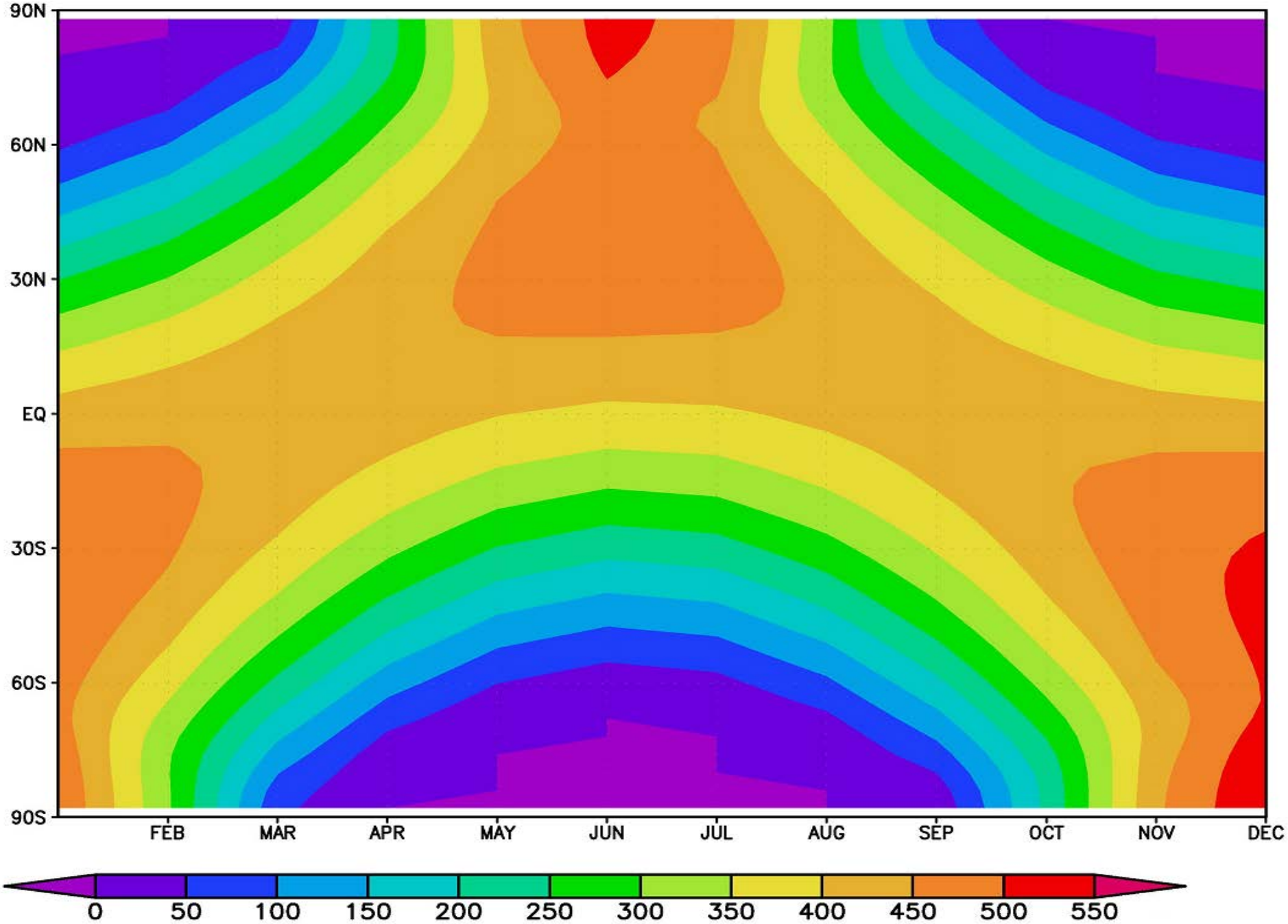
3. Эксцентриситет. Сейчас 0.0172

4. Дата перигелия. Сейчас начало января.

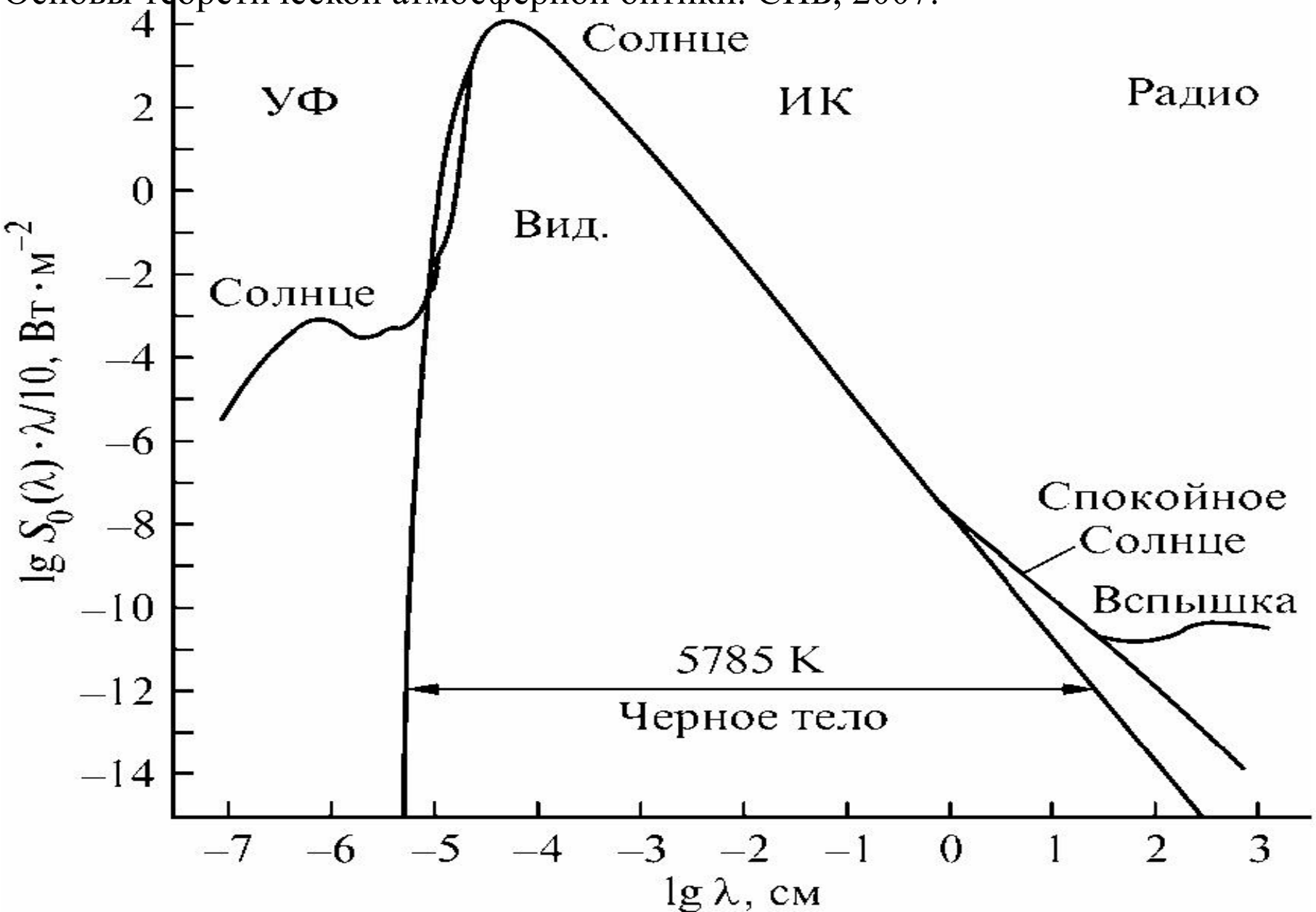
Годовой ход интегрального солнечного излучения приходящего к верхней границе атмосферы (Вт/м2)



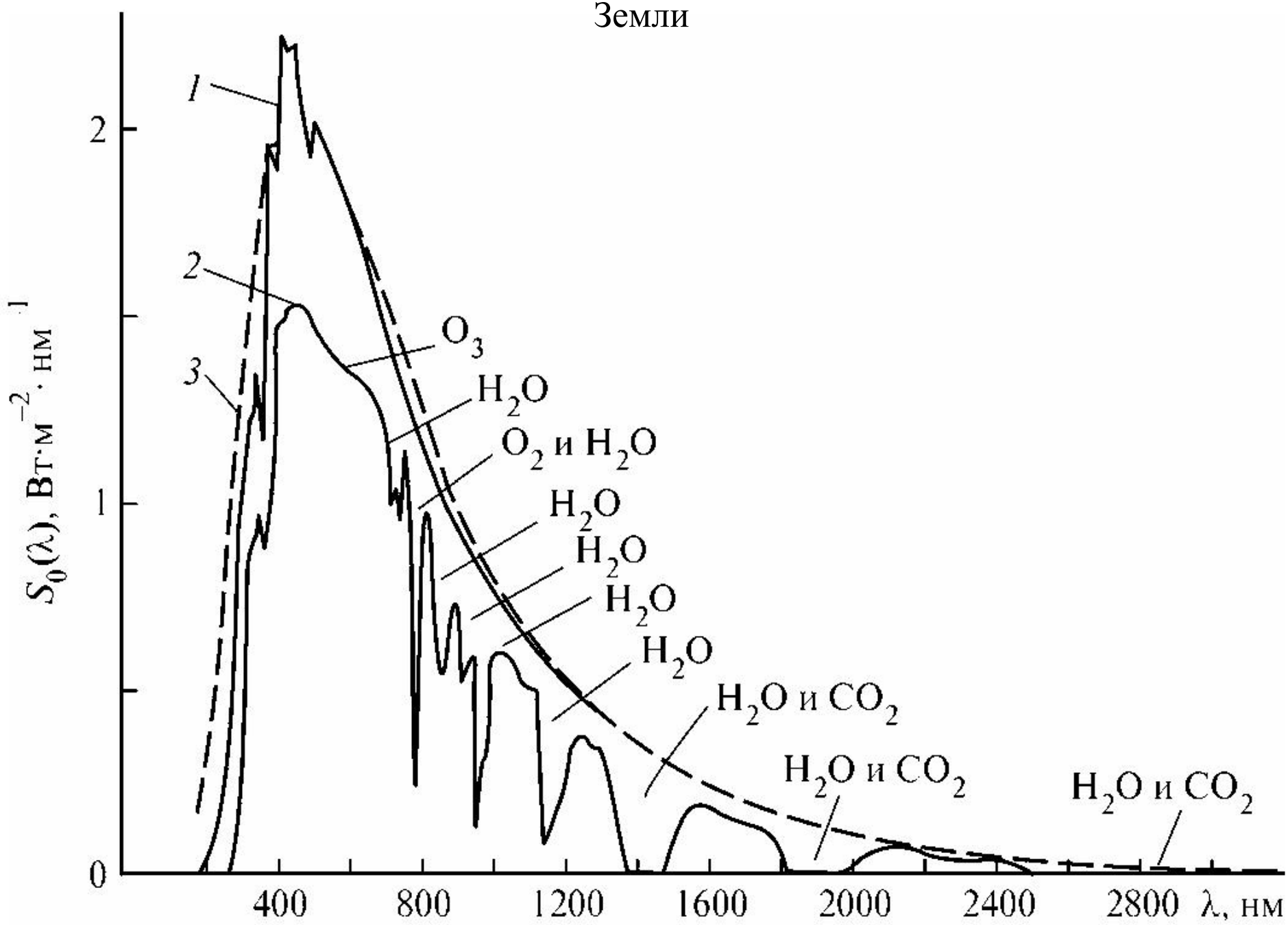
Распределение солнечного излучения по широте и времени года



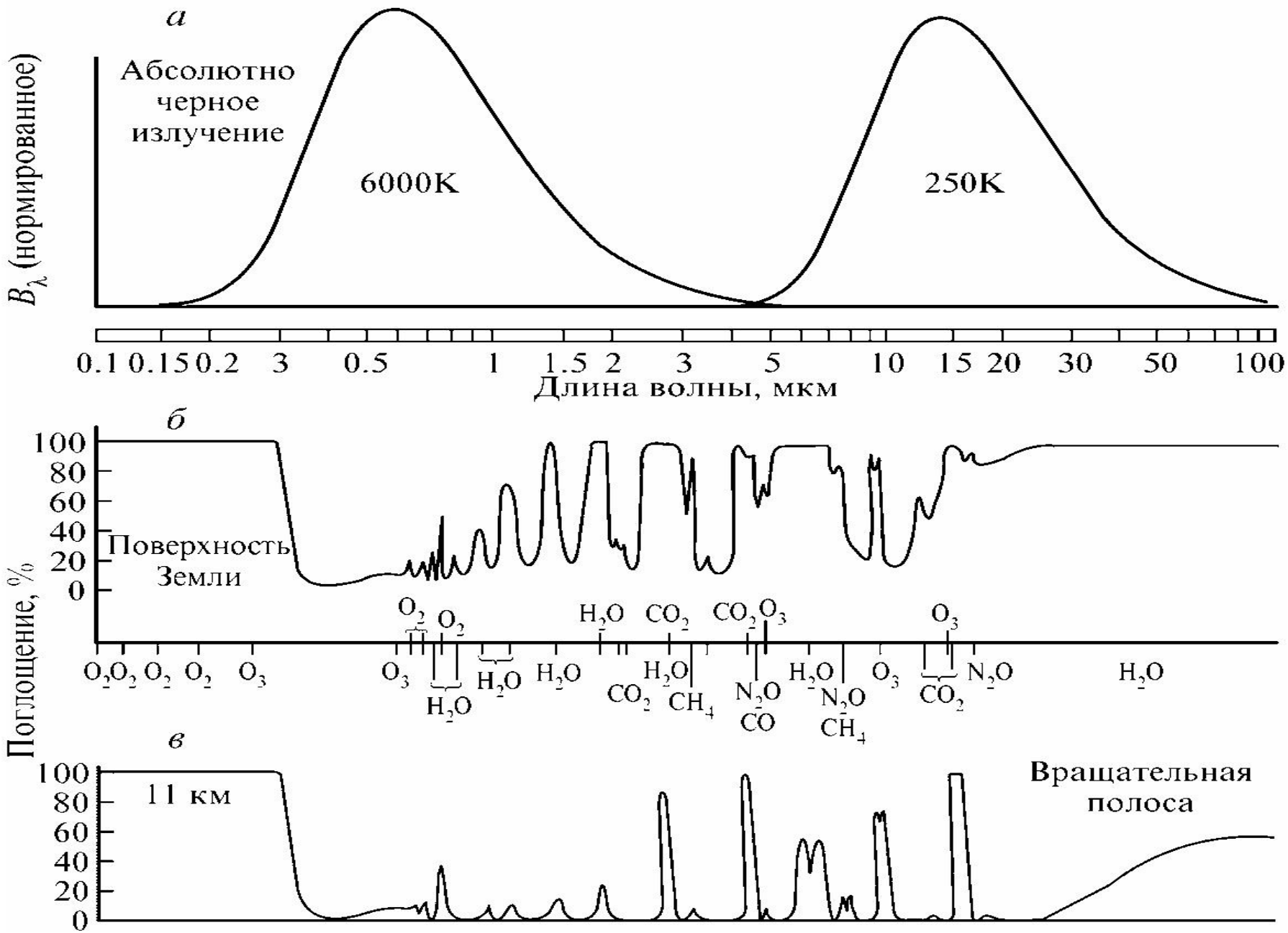
Спектр солнечного излучения на верхней границе атмосферы по сравнению со спектром идеального черного тела. Рисунки из:Тимофеев ЮМ, Васильев АВ. Основы теоретической атмосферной оптики. СПБ, 2007.



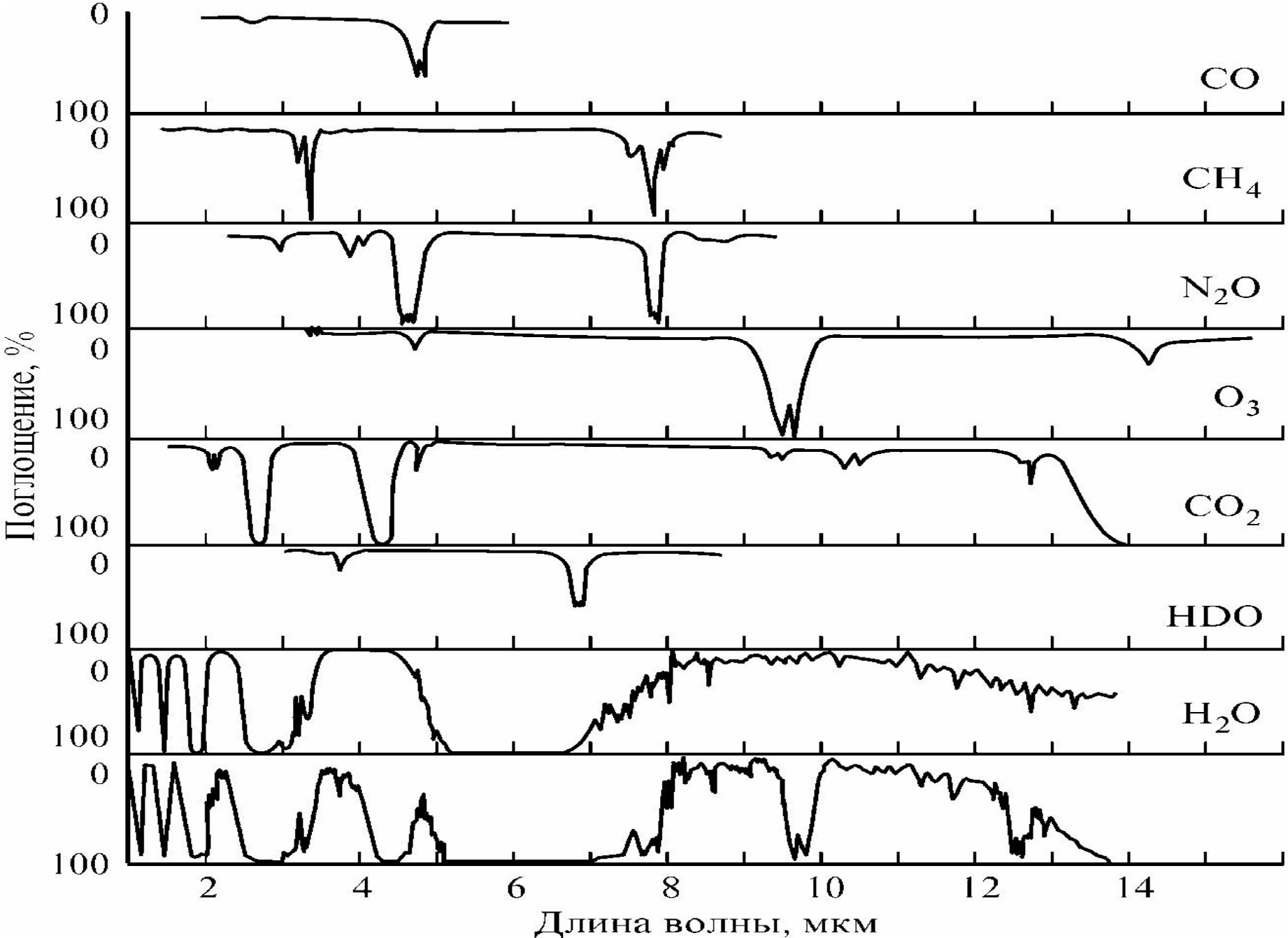
Спектр солнечного излучения на верхней границе атмосферы и у поверхности Земли



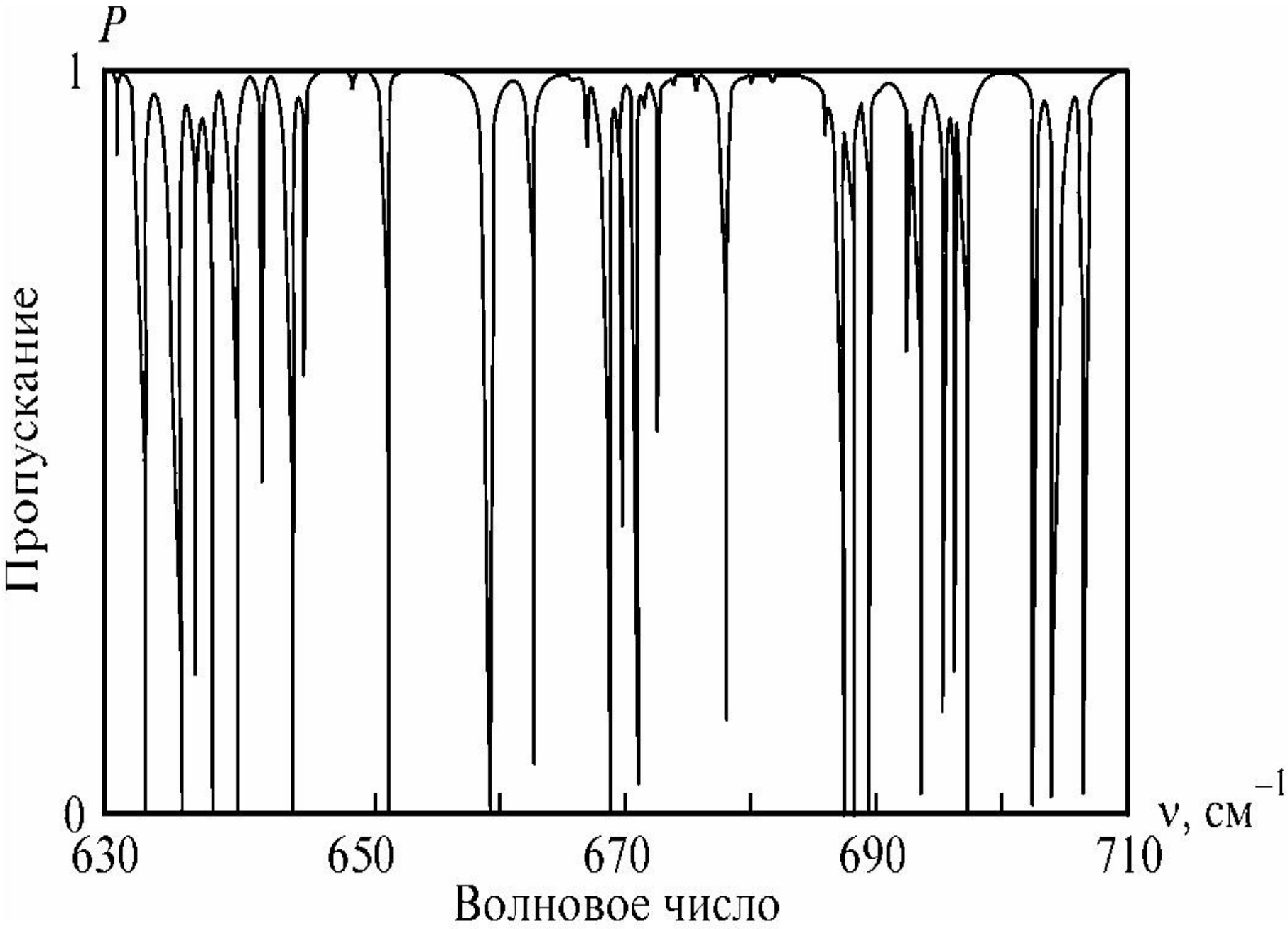
Поглощение излучения атмосферой в солнечном и тепловом диапазоне.

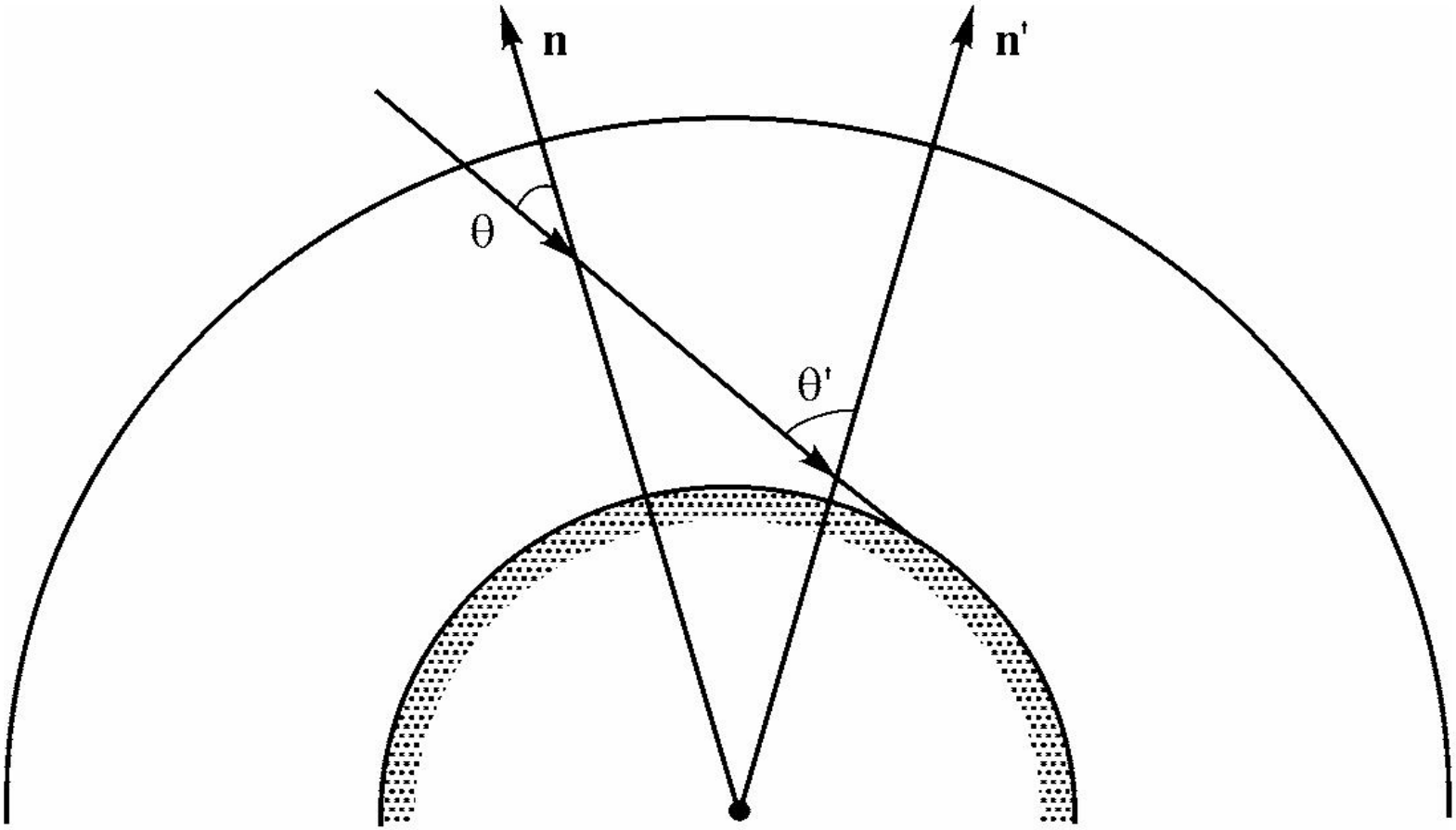


Поглощение излучения различными атмосферными газами



Более подробная функция пропускания обусловленная водяным паром

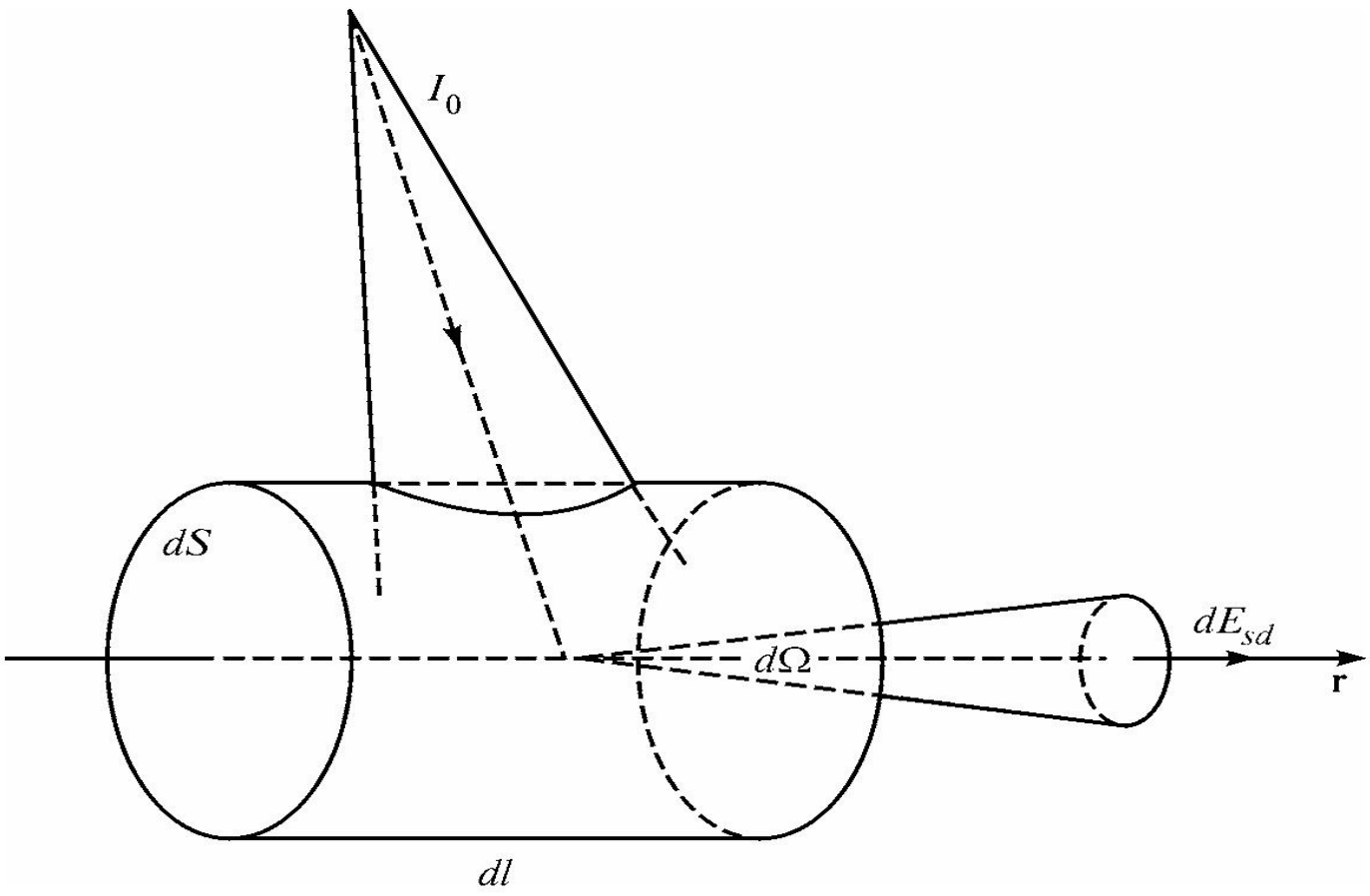




$$\cos\theta \, \frac{dI}{dz} = -\alpha(z) I + \varepsilon(z) \qquad \tau_0 = \int_0^\infty \alpha(z)\, dz$$

$$I(z) = I_0 \exp\left(-\sec\theta \int_0^z \alpha(z')\, dz' \right)$$

Уравнение в случае ненулевого рассеяния



$$\cos\theta \frac{dI}{dz} = -\alpha(z) I + \frac{1}{4\pi} \sigma(z) \int_{4\pi} x(z, \vec{r}) I(\vec{r}) d\Omega$$

Приближения:

1. Весь спектральный диапазон разбивается лишь на небольшое количество интервалов.
2. Плоско-параллельное приближение.
3. Двухпотоковое приближение (поток излучения вверх и вниз).

Атмосферная радиация: длинноволновое излучение

Номер интервала	Спектральная ширина ($см^{-1}$)	Поглощающие компоненты	Доля излучения при 250 K (%)
1	0 - 340	H_2O	17.28
2	340 - 540	H_2O	24.35
3	540 - 620	H_2O,конт.,CO_2, N_2O	9.69
4	620 - 720	H_2O,конт.,CO_2	10.96
5	720 - 800	H_2O,конт.,CO_2	7.57
6	800 - 980	H_2O,конт.	12.90
7	980 - 1100	H_2O,конт.,O_3	5.77
8	1100 - 1380	H_2O,конт.,CH_4, N_2O	7.40
9	1380 - 1900	H_2O	3.60
10	1900 - 3000	H_2O	0.47

Для расчета нисходящих и восходящих потоков теплового излучения в модельной атмосфере используются формулы:

$$F^{\downarrow}_{\Delta\nu}(p) = -\int\limits_{0}^{p} B_{\Delta\nu}[T(p')]\frac{\partial\tau_{\Delta\nu}(p,p')}{\partial p'}\,dp',$$

$$F^{\uparrow}_{\Delta\nu}(p) = B_{gr}\tau_{\Delta\nu}(p,p') + \int\limits_{p}^{p_s} B_{\Delta\nu}[T(p')]\frac{\partial\tau_{\Delta\nu}(p,p')}{\partial p'}\,dp', \tag{108}$$

$$B_{gr} = \delta_{\Delta\nu}B_{\Delta\nu}(T_s) + (1-\delta_{\Delta\nu})F^{\downarrow}_{\Delta\nu}(p_s),$$

где p , p_s – давление в атмосфере и на подстилающей поверхности, T_s , $\delta_{\Delta\nu}$ – температура и излучательная способность этой поверхности, $B_{\Delta\nu}(T)$ – функция Планка, проинтегрированная по спектральному участку $\Delta\nu$, $\tau_{\Delta\nu}(p,p')$ – функция пропускания диффузного излучения между уровнями p и p' .

Функции пропускания водяного пара, углекислого газа, а также континуальное поглощение водяным паром представлены в виде к–распределений:

$$\tau(W) = \sum_{i=1}^{6} c_i \exp(-1.66\, k_i\, W), \tag{109}$$

где W – эффективная масса поглощающего вещества в слое (p, p'), определенная с учетом профилей температуры и давления в этом слое. Таблицы коэффициентов c_i, k_i приведены в работе [30]. Функция пропускания озона в полосе 9.6 мкм трудно поддается подобному разложению. Поэтому для озона используются таблицы двухпараметрического представления типа Куртиса–Годсона, приведенные в работе [29]. Функции пропускания метана CH_4 и закиси азота N_2O приведены в работе [28]:

$$\tau(W) = \exp\left(-\frac{aW}{1 + bW^n}\right). \tag{110}$$

для CH_4 :

$$\tau_{CH_4} = 0.41 + 0.59\,\tau, \tag{111}$$

для N_2O :

$$\text{в полосе 3} \qquad \tau_{N_2O} = 0.31 + 0.69\,\tau, \tag{112}$$

$$\text{в полосе 8} \qquad \tau_{N_2O} = 0.27 + 0.73\,(0.39\,\tau_1 + 0.61\,\tau_2). \tag{113}$$

Здесь τ , τ_1 , τ_2 определяются по (110) для соответствующего газа. Для закиси азота в полосе 8 введены целых два подынтервала, каждый со своей функцией пропускания. Поэтому средневзвешенная по $\Delta\nu$ функция пропускания определяется таким двухэтапным способом.

Переход к конечно-разностным выражениям приводит к формулам:

$$F_n^{\downarrow} = -\sum_{m=1}^{n-1} B_m^* \left(\tau_{nm} - \tau_{nm+1}\right), \qquad n = 2, N,$$

$$F_n^{\uparrow} = B_{gr}\, \tau_{nm} + \sum_{m=n}^{N-1} B_m^* \left(\tau_{nm} - \tau_{nm+1}\right), \qquad n = 1, N-1, \tag{119}$$

Коротковолновое излучение

номер	длина волны, нм
1	0-200
2	200-245
3	245-265
4	265-275
5	275-285
6	285-295
7	295-305
8	305-350
9	350-700
10	700-5000

В солнечной части спектра учитывается взаимодействие излучения со следующими веществами: O_3, O_2, CO_2, H_2O, облака, аэрозоли.

Для вещества I определяем оптическую толщину $\boldsymbol{\tau}$, альбедо однократного рассеяния $\boldsymbol{\omega}$ и параметра асимметрии индикатрисы рассеяния $\boldsymbol{g}$.

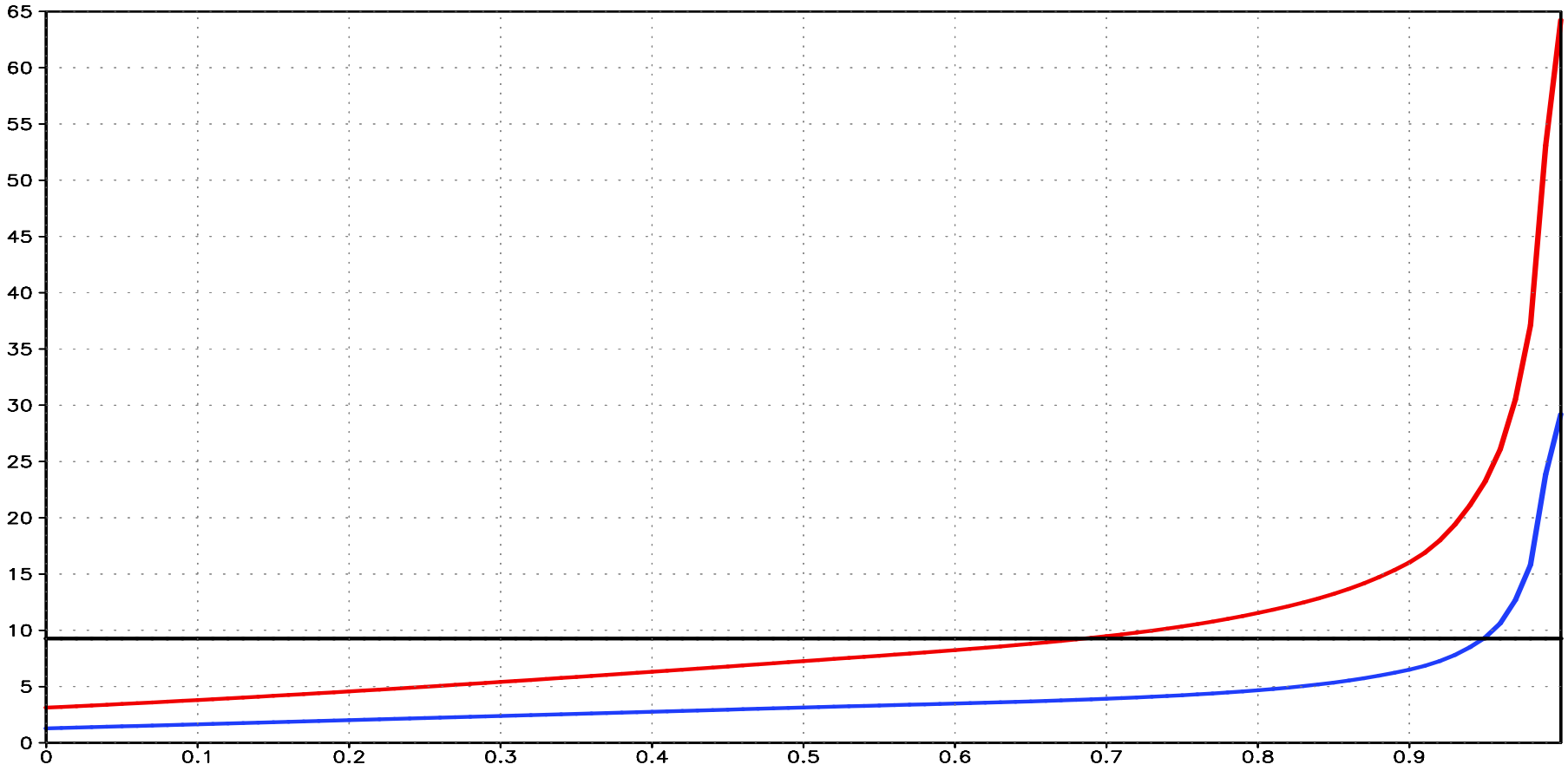
Суммарные оптические характеристики для всего модельного слоя вычисляются следующим образом:

$$\tau = \sum \tau_i,$$

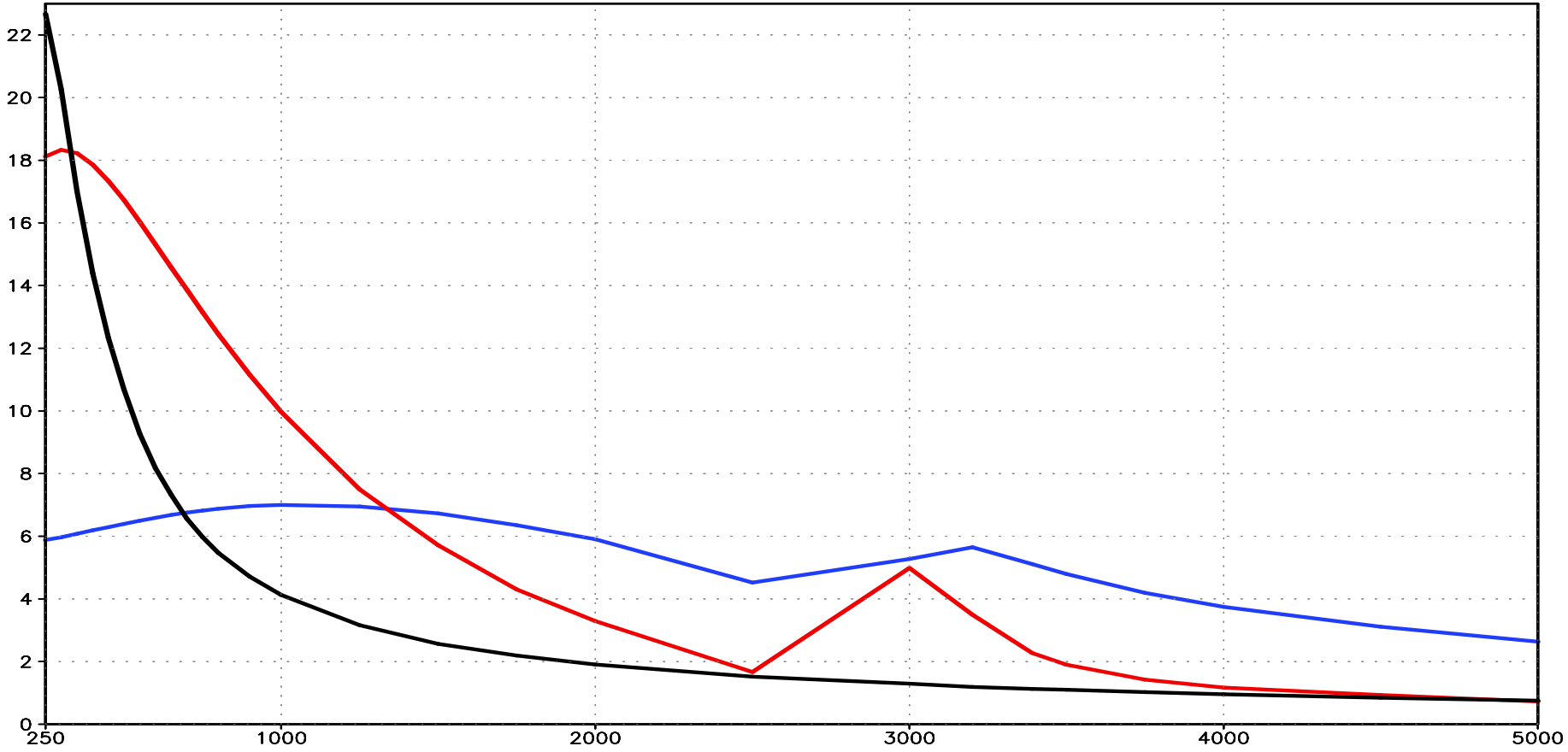
$$\omega = \frac{\sum \omega_i \tau_i}{\tau},$$

$$g = \frac{\sum g_i \omega_i \tau_i}{\omega \tau},$$

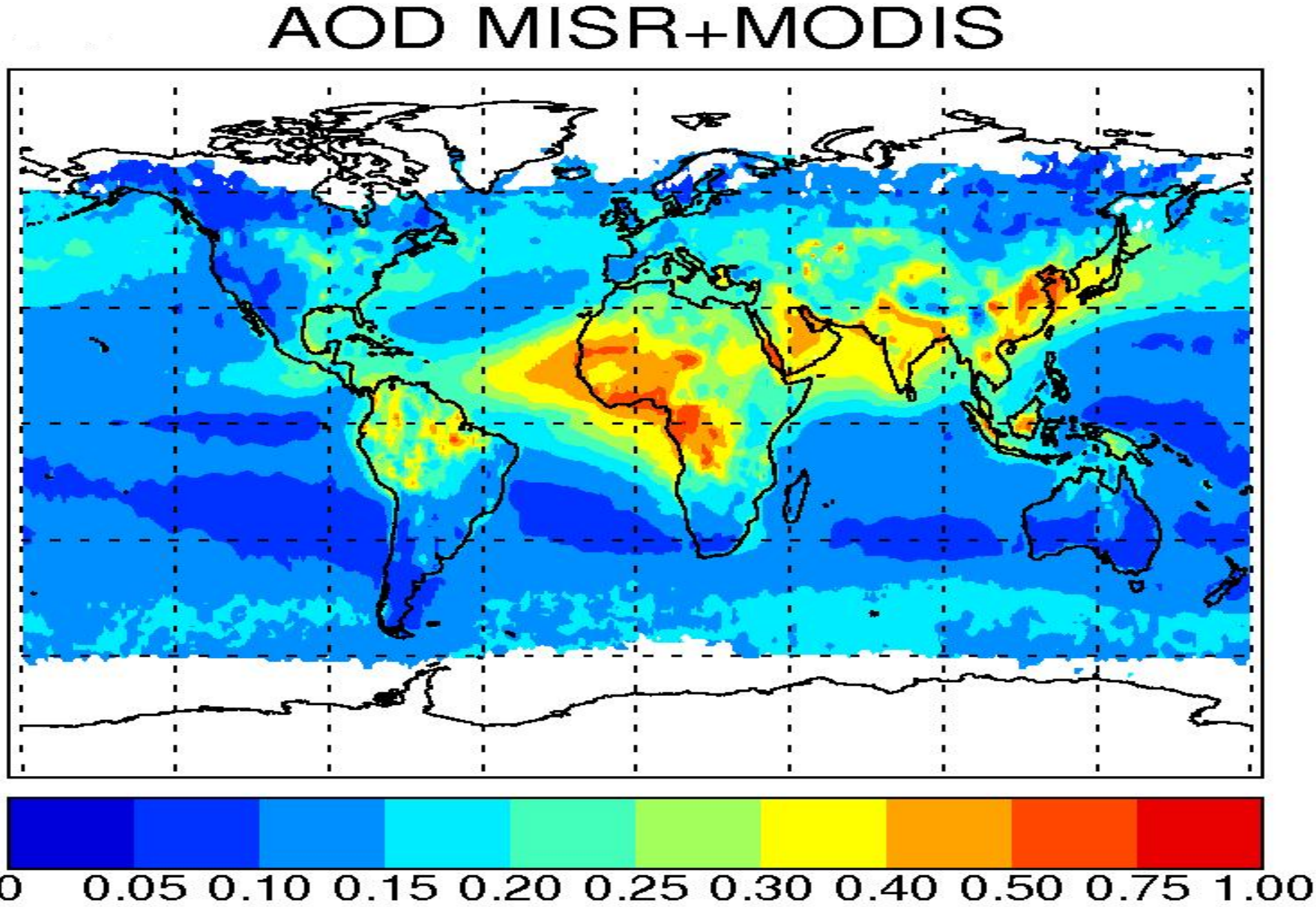
Зависимость k от относительной влажности для пыли (черн), морской соли (синий), сульфатного аэр. (красный)



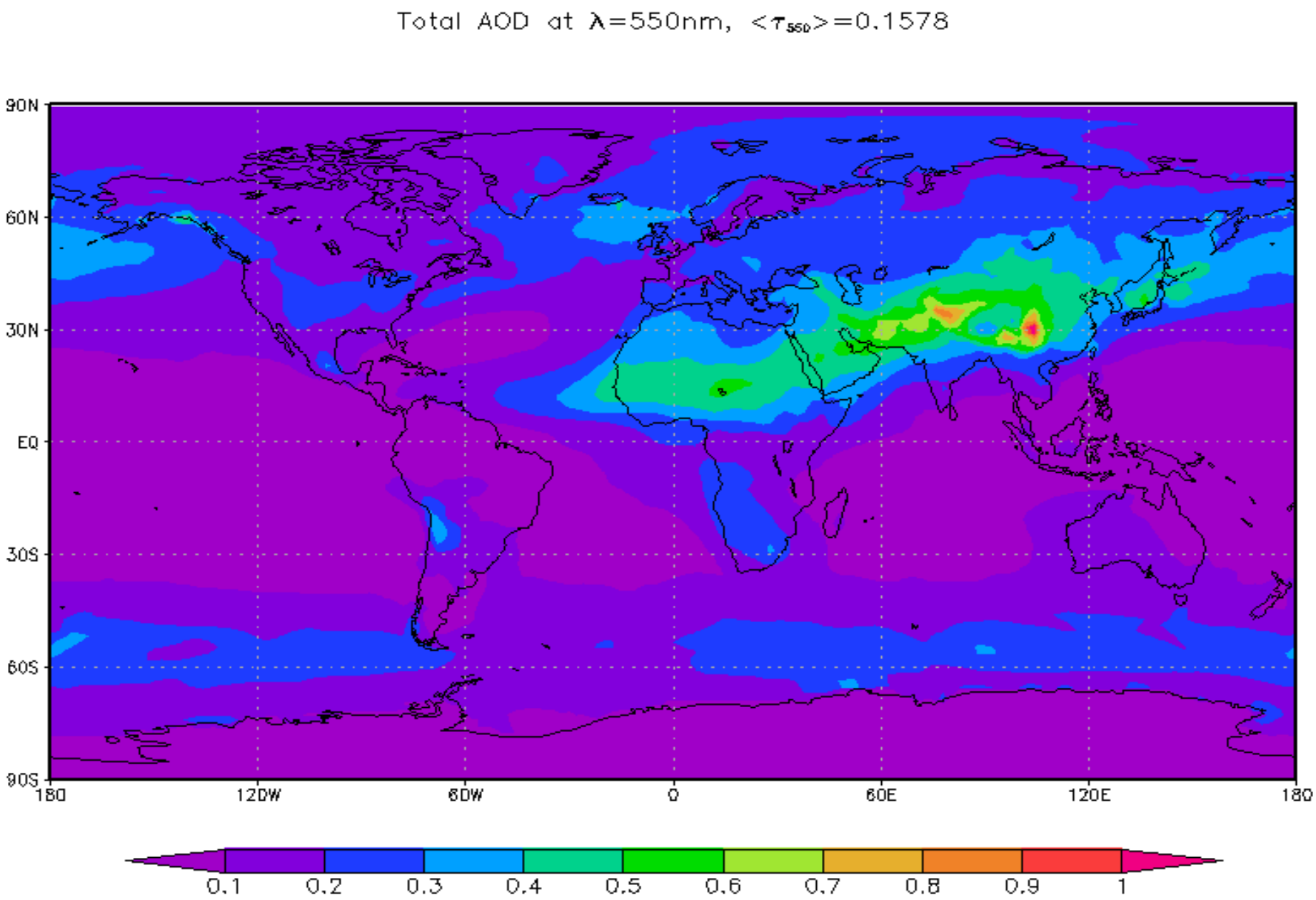
Зависимость к-та поглощения пыли (черн), соли (синий) и сульфатов (красн) от длины волны. rhum=0.90



Наблюдаемая со спутника оптическая толщина аэрозолей



Оптическая толщина аэрозолей для 550 нм



Для нисходящего D и восходящего U потока излучения решаются следующие уравнения:

$$\frac{dD}{d\tau} = \gamma_2 U - \gamma_1 D + f_1,$$

$$\frac{dU}{d\tau} = \gamma_1 U - \gamma_2 D + f_2,$$

$$f_1 = \pi S_0 \omega \gamma_4 e^{-\tau/\mu_0},$$

$$f_2 = -\pi S_0 \omega \gamma_3 e^{-\tau/\mu_0}$$

с граничными условиями при $\tau = 0$ и $\tau = \tau_0$ соответственно:

$$D_1 = 0,$$

$$U_{L+1} = A_{dif} D_{L+1} + A_{dir} \pi S_0 \mu_0 e^{-\tau_0/\mu_0}.$$

В приближении дельта-Эддингтона константы определяются как

$$\gamma_1 = (7 - \omega(4 + 3g))/4,$$

$$\gamma_2 = -(1 - \omega(4 - 3g))/4,$$

$$\gamma_3 = (2 - 3g\mu_0)/4,$$

$$\gamma_4 = 1 - \gamma_3.$$

Для учета радиационных свойств облачности должна быть использована гипотеза о перекрывании облаков, находящихся на различных уровнях. В данном случае считается, что существуют облака трех ярусов:

верхние (выше 400 гПа),

средние (400-700 гПа),

нижние (ниже 700 гПа).

Считается, что внутри каждого яруса реализуется максимальное перекрывание, между ярусами – случайное.

В общем случае надо в каждой ячейке модельной сетки рассматривать случаи: ясное небо, облака верхнего яруса, облака среднего яруса, облака нижнего яруса, облака верхнего и среднего яруса, верхнего и нижнего, среднего и нижнего, верхнего среднего и нижнего ярусов. Всего 8 случаев.

Окончательно для тенденции температуры имеем:

$$\rho C_P \, \partial T/\partial t = \partial(F\downarrow + D - F\uparrow - U)/\partial z$$

Учет малых газовых составляющих в модели климата:

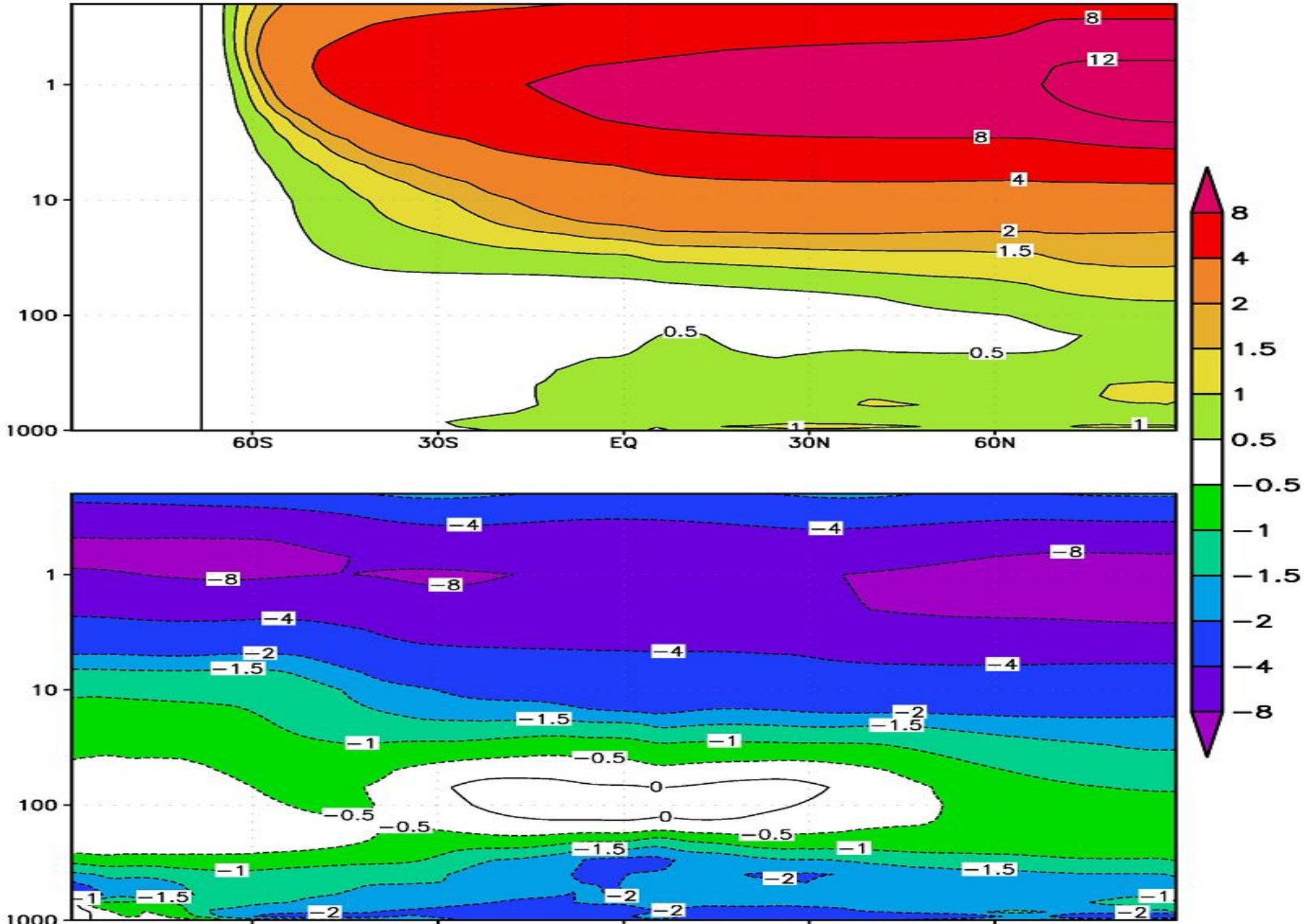
O_2, CO_2, CH_4, N_2O – предписанная концентрация, одна и та же во всей атмосфере

O_3 – предписанное трехмерное распределение, зависящее от времени

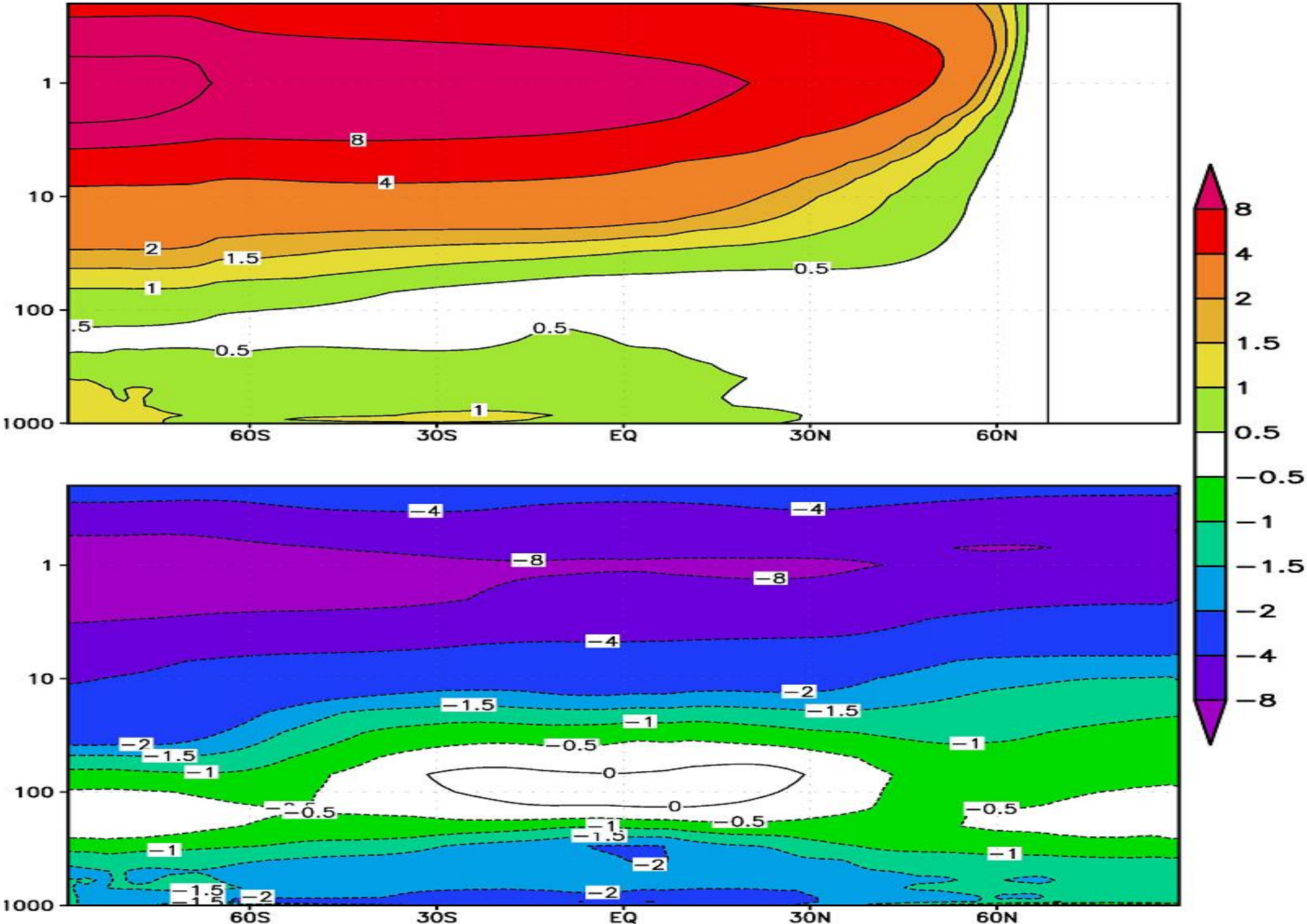
H_2O, облака – моделируемое трехмерное распределение, зависящее от времени

Аэрозоли: мелкая и крупная морская соль, мелкая и крупная минеральная пыль, сульфатный аэрозоль, сажа, органический углерод. Моделируемое трехмерное распределение, зависящее от времени.

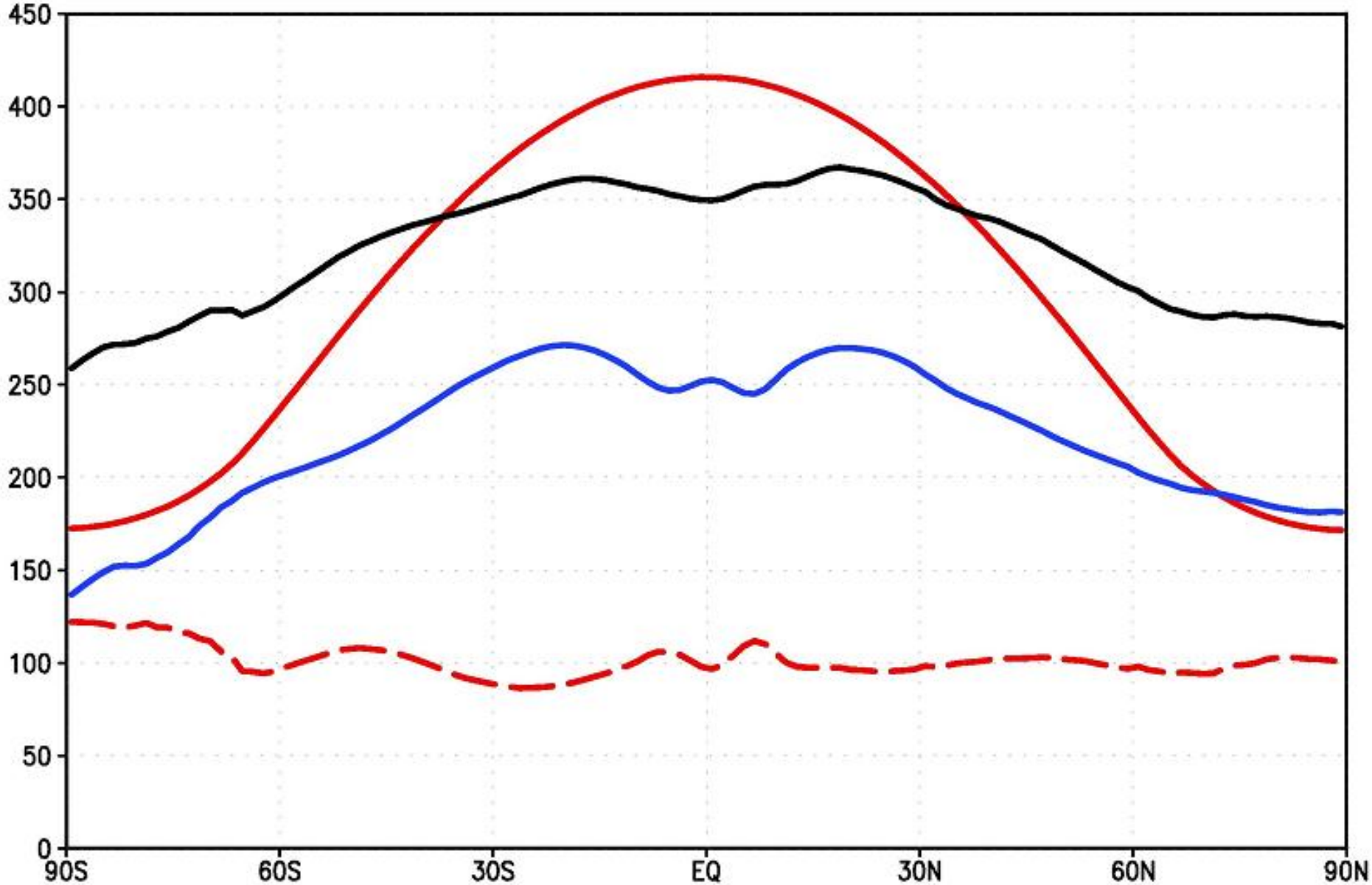
Солнечное нагревание и длинноволновое выхолаживание (К/сут)в модели, июнь



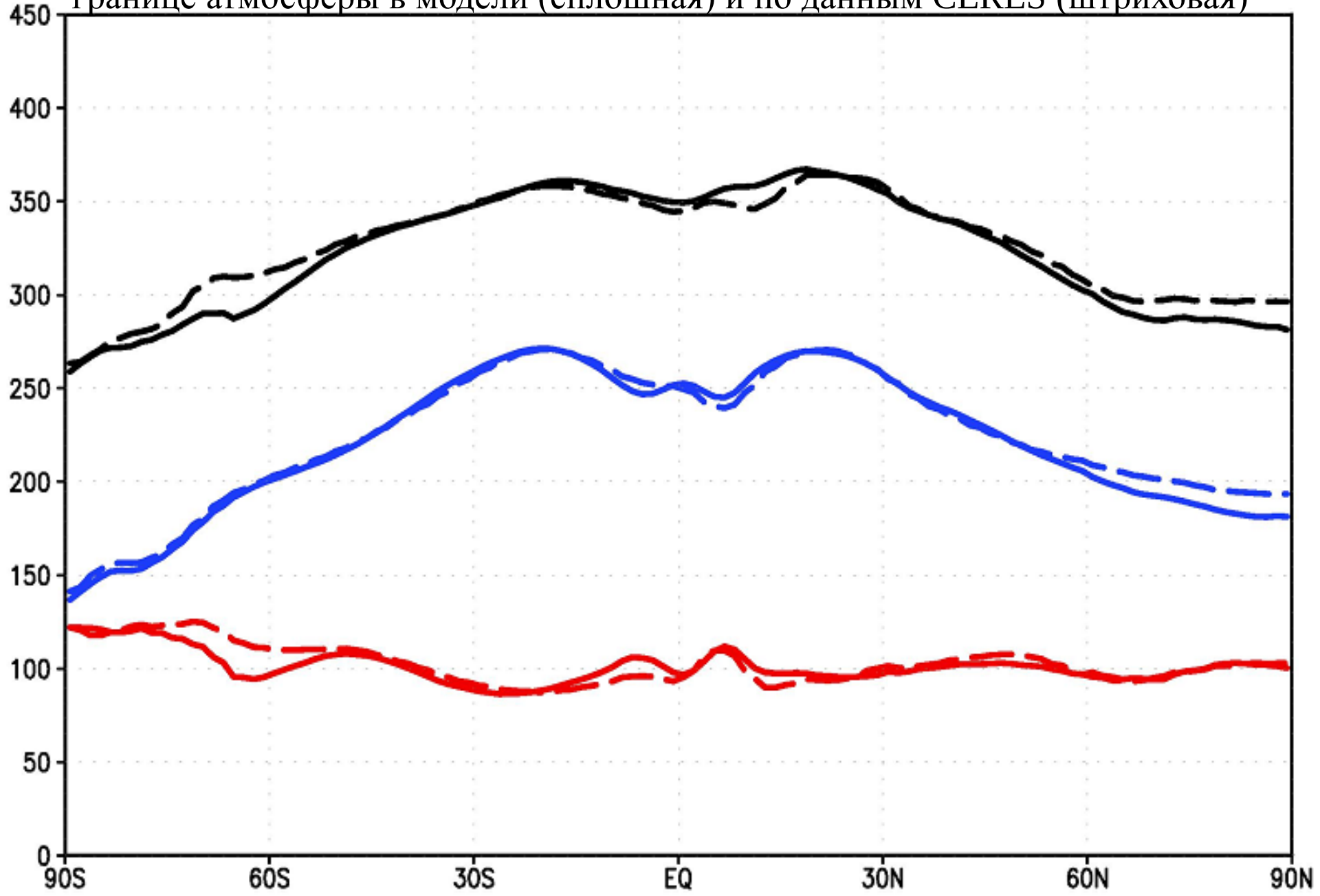
То же для декабря



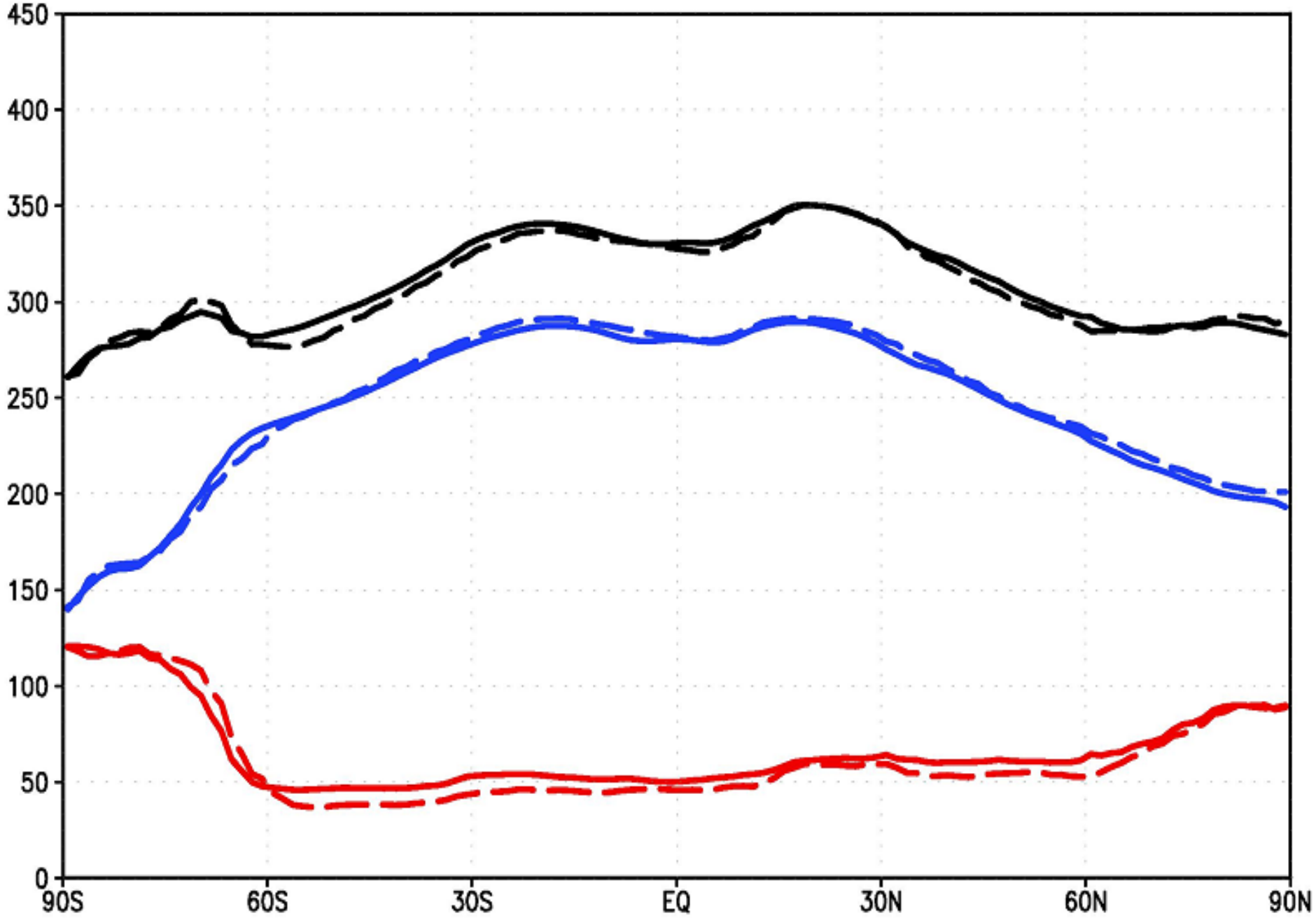
Среднегодовые потоки радиации (Вт/м2) на верхней границе атмосферы в модели климата. Сплошная красная линия – приходящая солнечная радиация, штриховая красная линия – уходящая солнечная, синяя – уходящая тепловая, черная – сумма уходящей солнечной и тепловой.



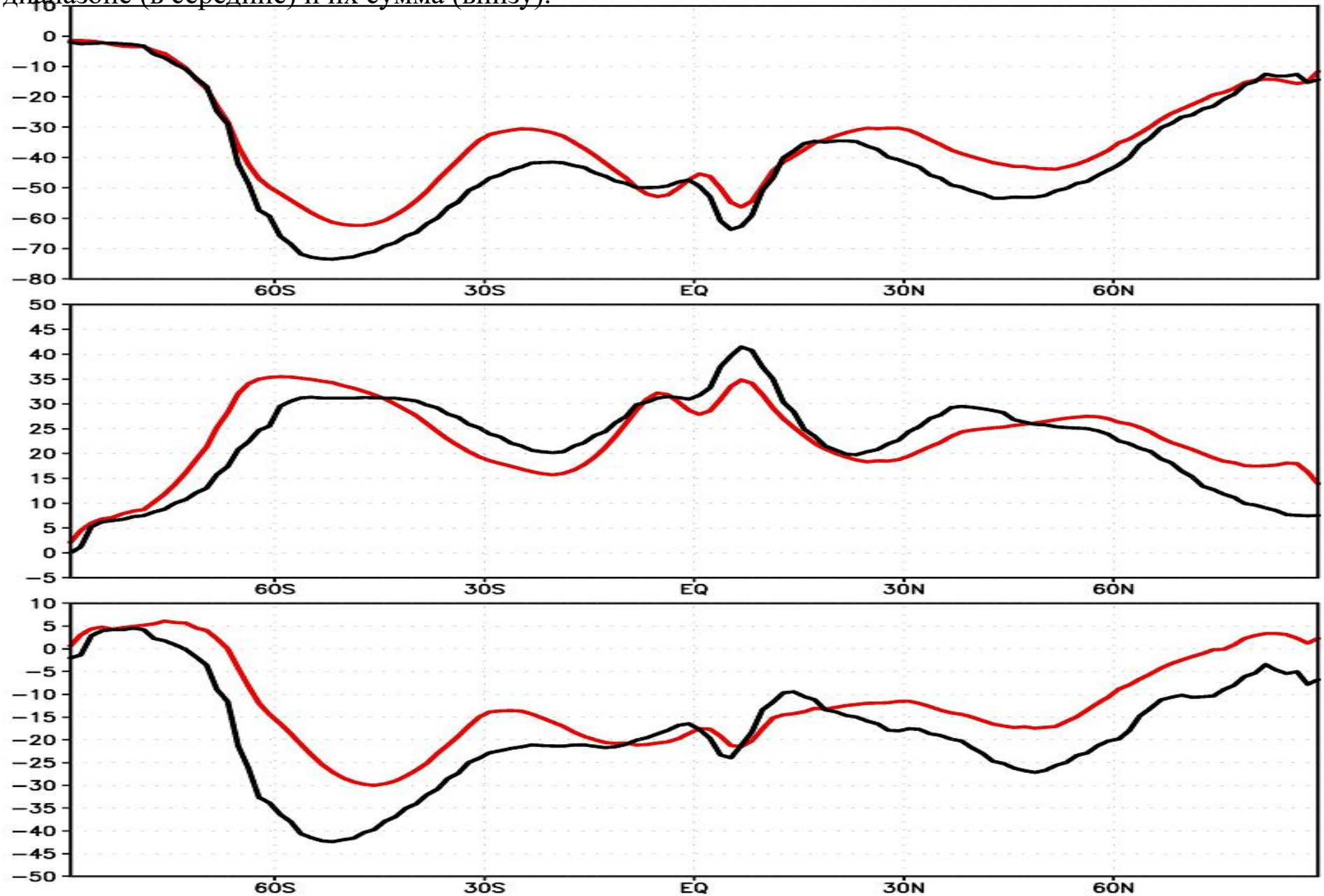
Уходящая длинноволновая (синий) и солнечная (красный) радиация на верхней границе атмосферы в модели (сплошная) и по данным CERES (штриховая)



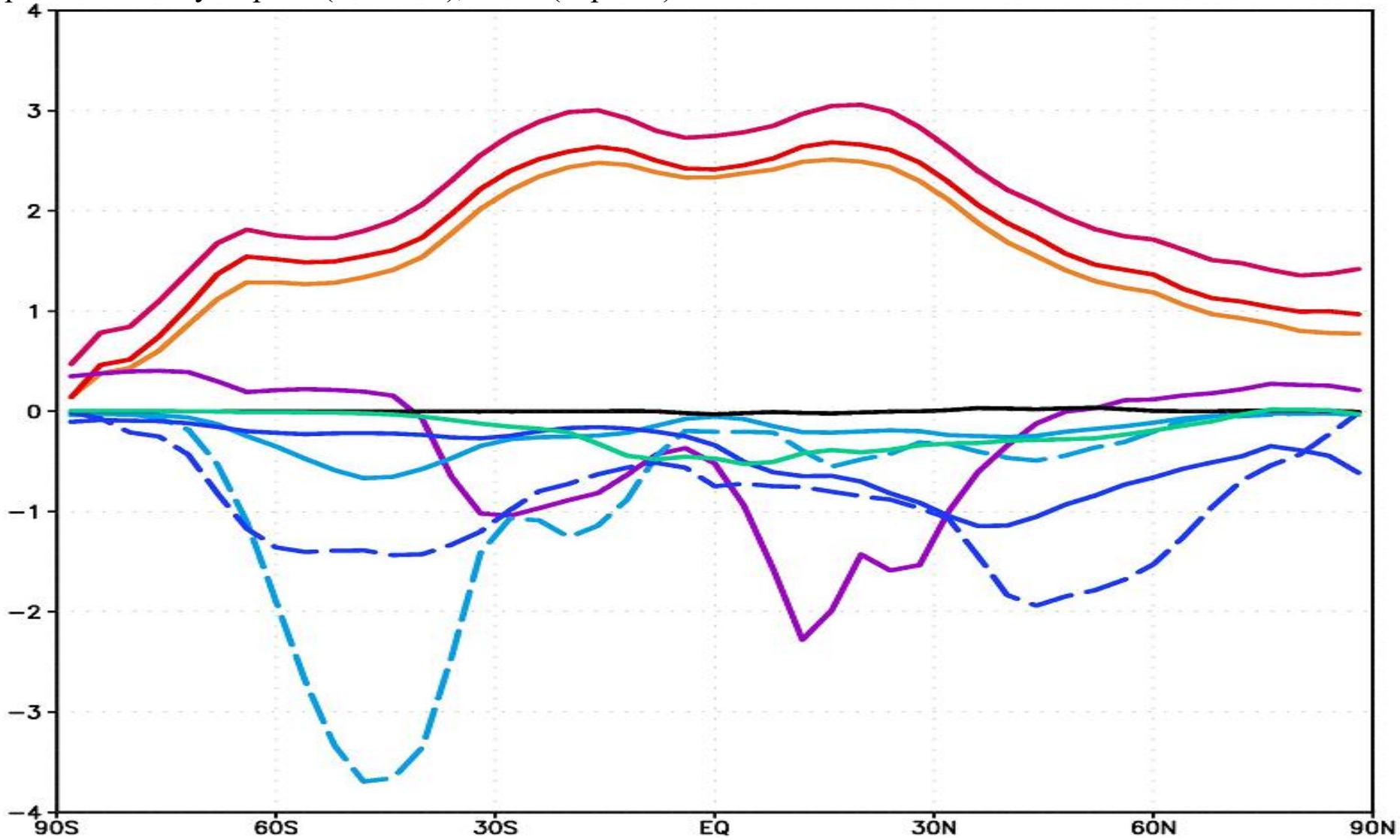
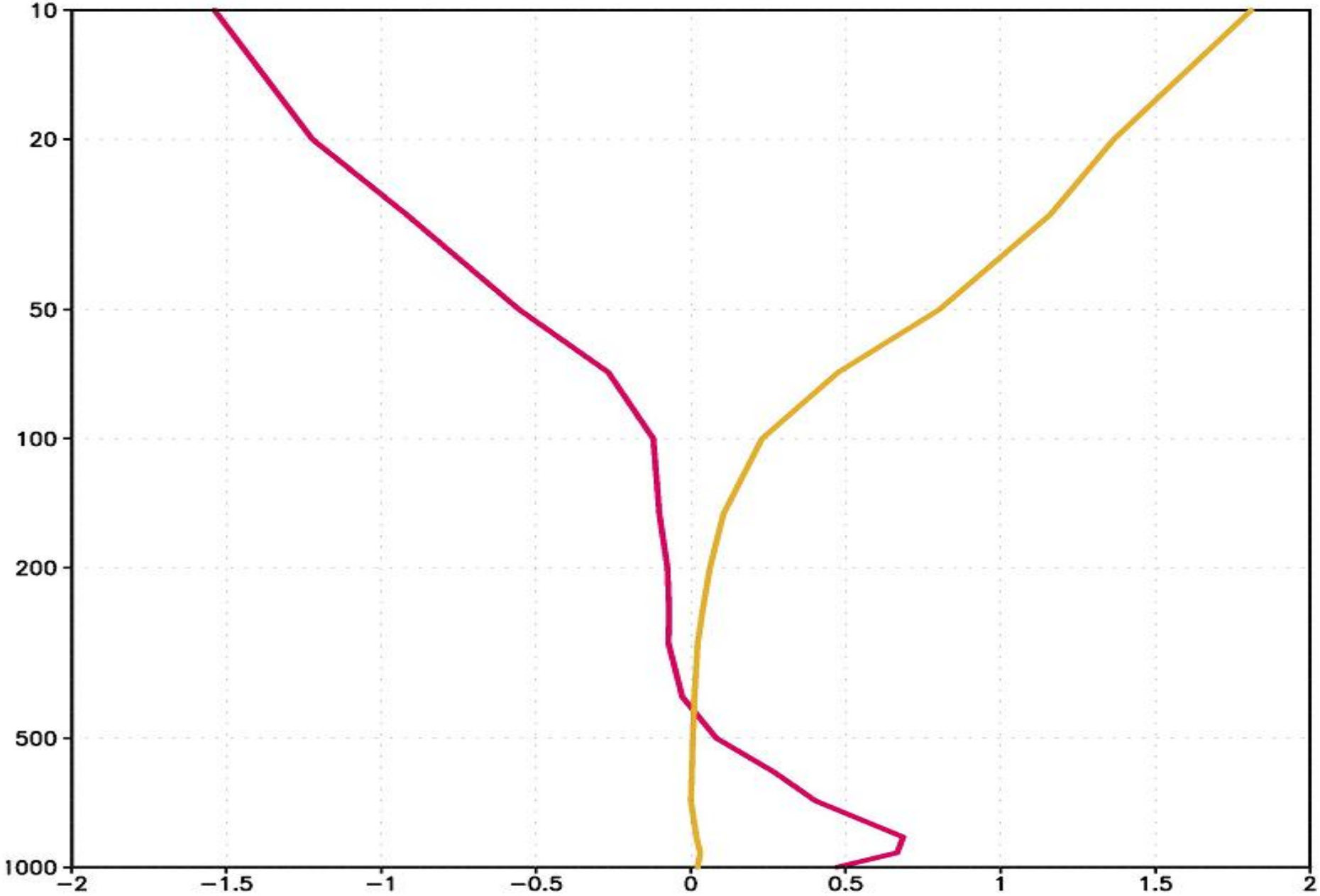
То же для ясного неба



Радиационно-облачный форсинг (Вт/м2) на верхней границе атмосферы по данным модели климата (красный) и данных CERES, Loeb et al. (2009) (черный) в солнечном диапазоне (вверху), тепловом диапазоне (в середине) и их сумма (внизу).



Радиационные форсинги (Вт/м2) на верхней границе атмосферы вследствие наличия в атмосфере CO2 (темно-красный, значения умножены на 0.1), CH4 (красный), N2O (оранжевый), минеральной пыли (фиолетовый), сульфатного аэрозоля (сплошной синий – прямой эффект, штриховой синий – непрямой эффект), морской соли (сплошной голубой – прямой эффект, штриховой голубой – непрямой эффект), органического углерода (зеленый), сажи (черный).



Скорость радиационного нагревания (K/сут) вследствие наличия озона (желтый) и CO2 (темно-красный) в модели