

Радиационные процессы в атмосфере и их описание в моделях.

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

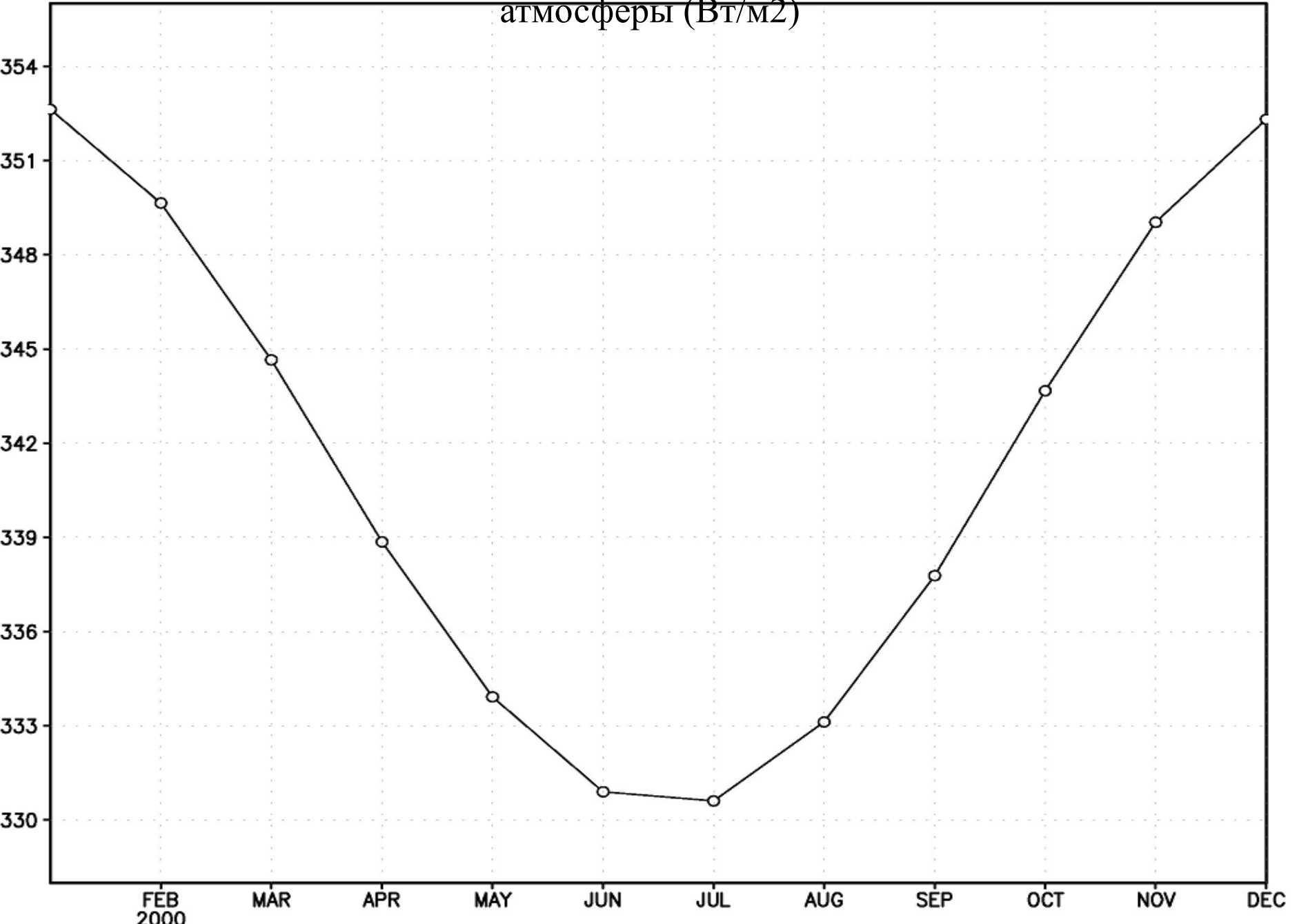
Параметры орбиты:

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

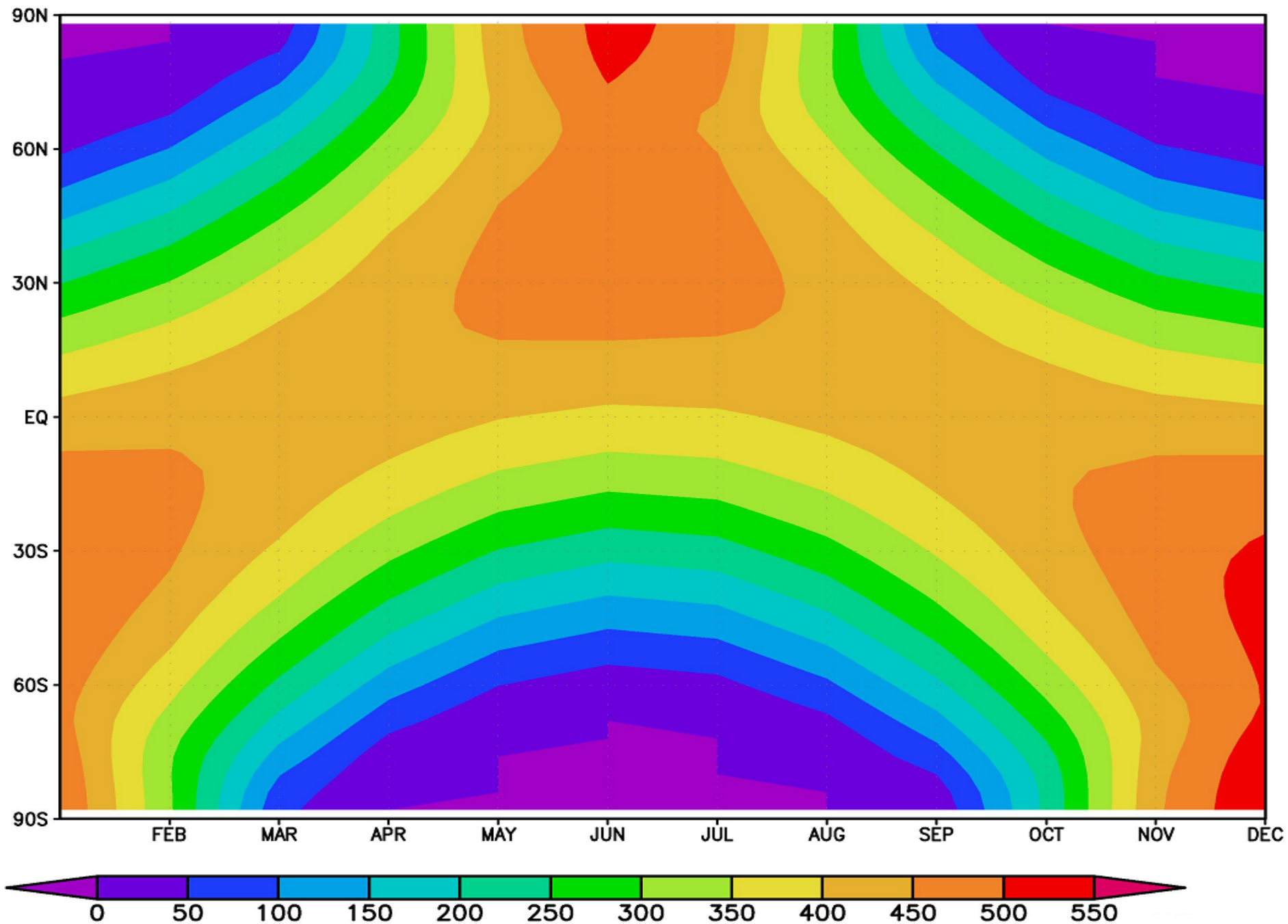
3. Эксцентриситет. Сейчас 0.0172

4. Дата перигелия. Сейчас начало января.

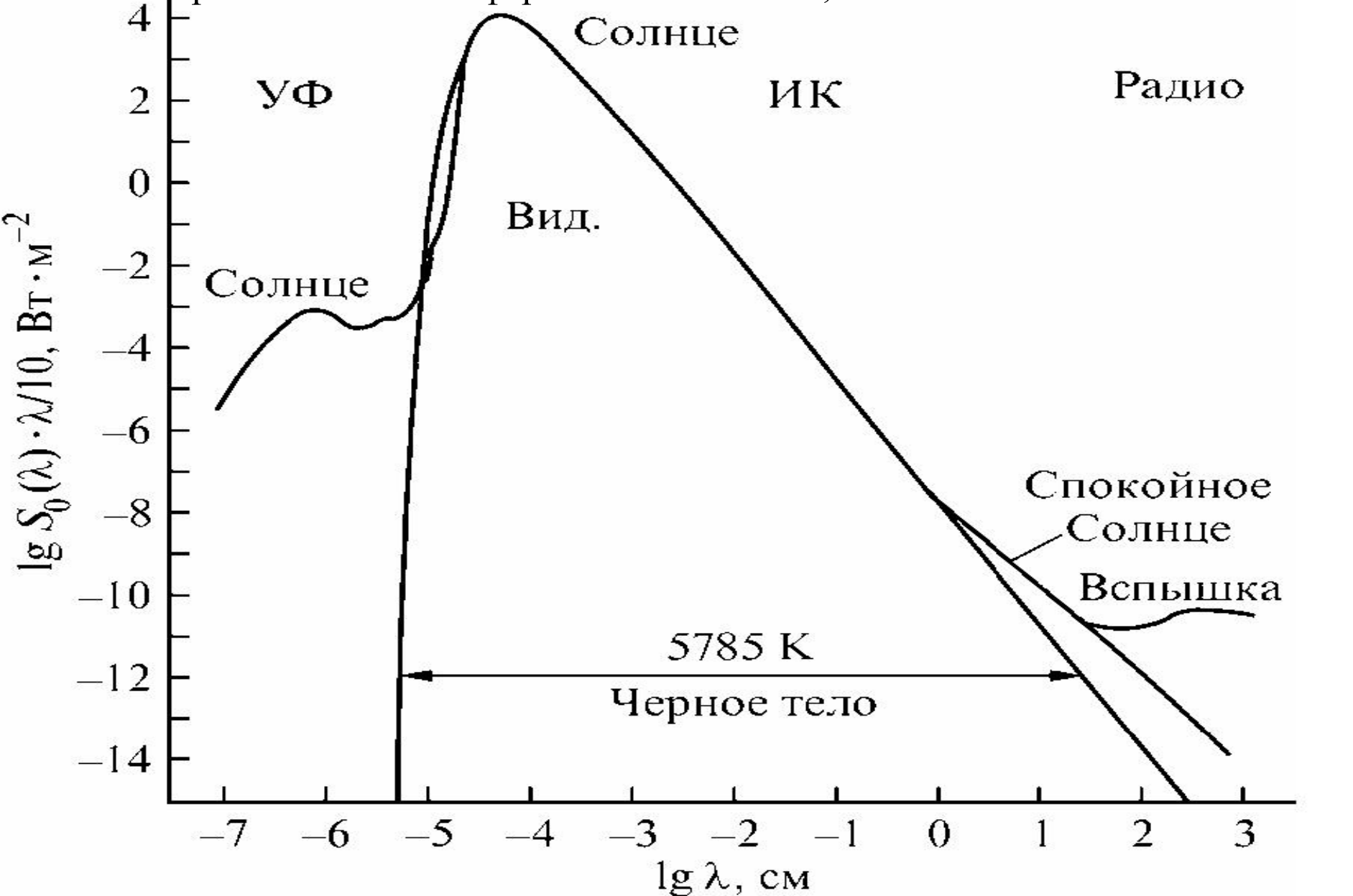
Годовой ход интегрального солнечного излучения приходящего к верхней границе атмосферы (Вт/м2)



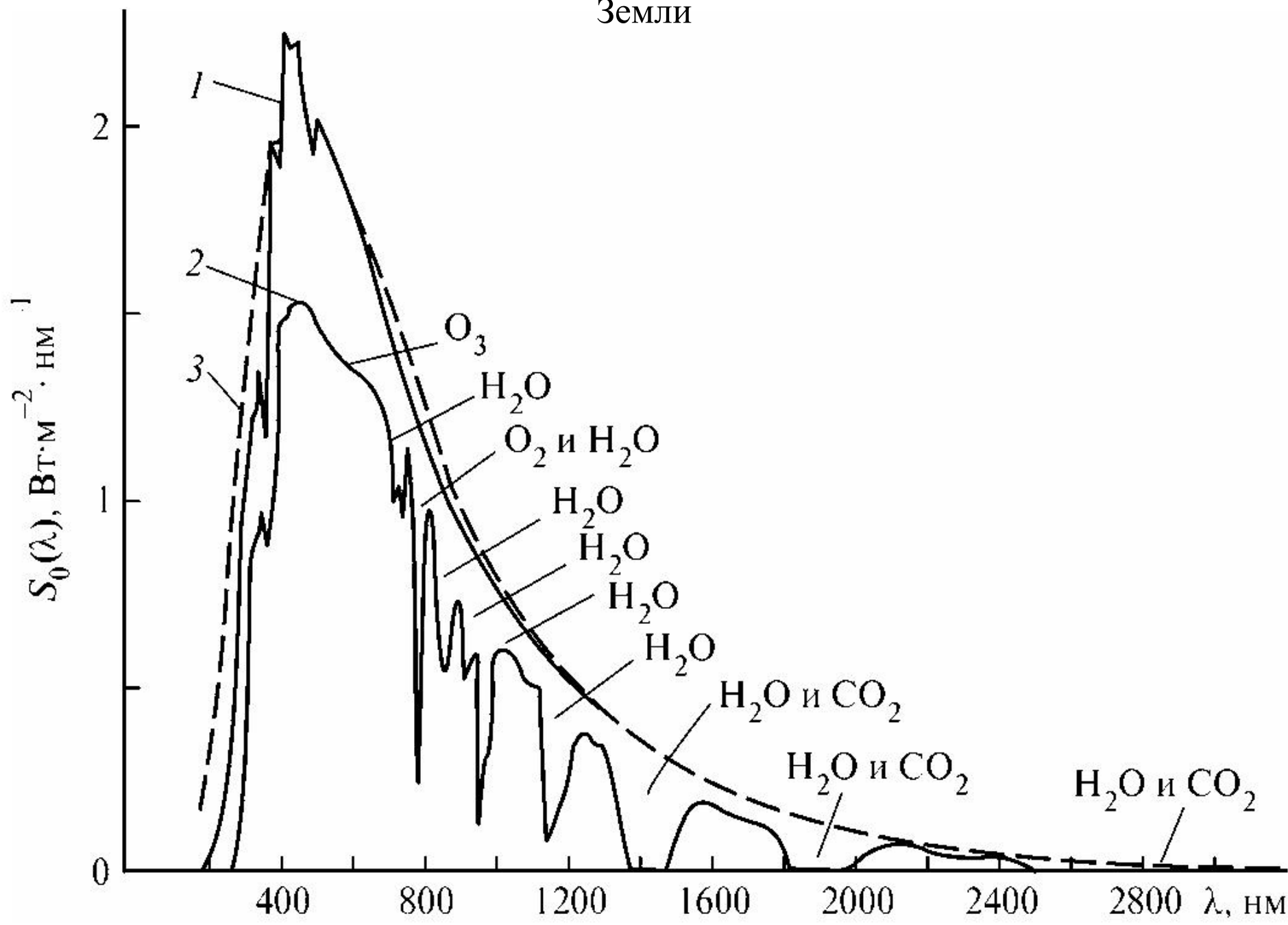
Распределение солнечного излучения по широте и времени года



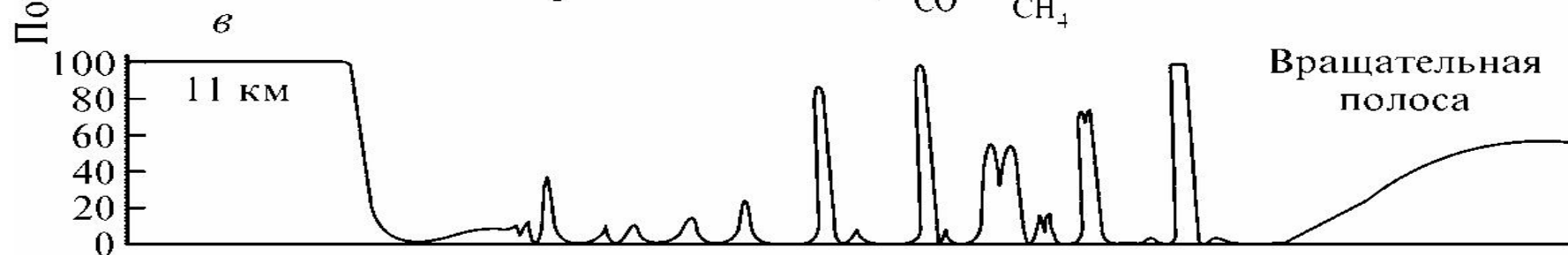
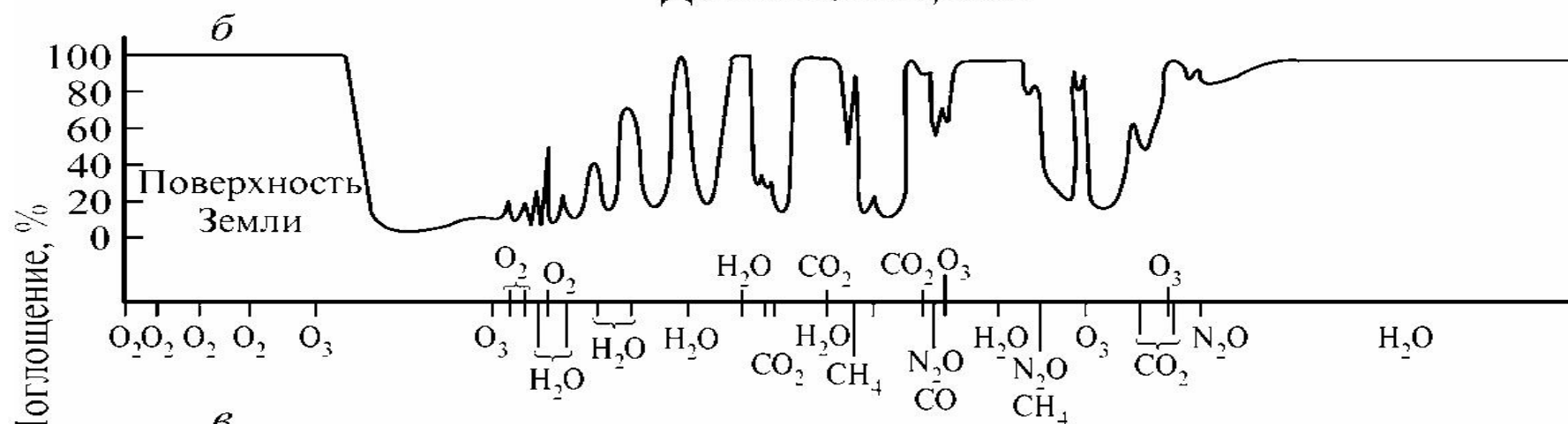
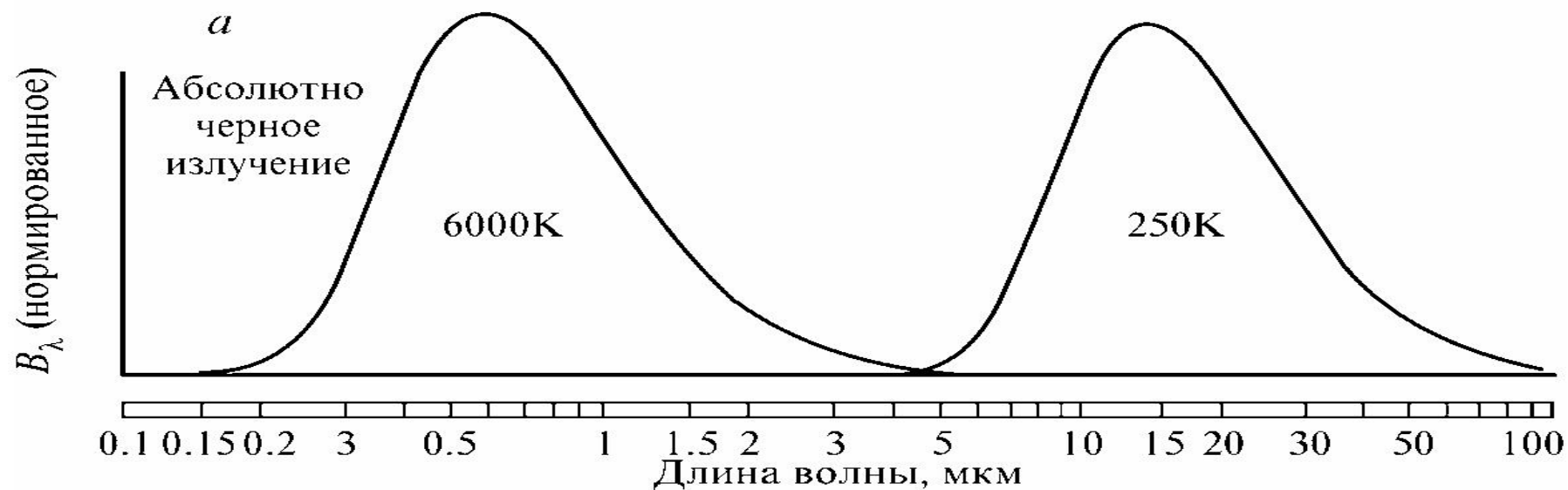
Спектр солнечного излучения на верхней границе атмосферы по сравнению со спектром идеального черного тела. Рисунки из: Тимофеев ЮМ, Васильев АВ. Основы теоретической атмосферной оптики. СПб, 2007.



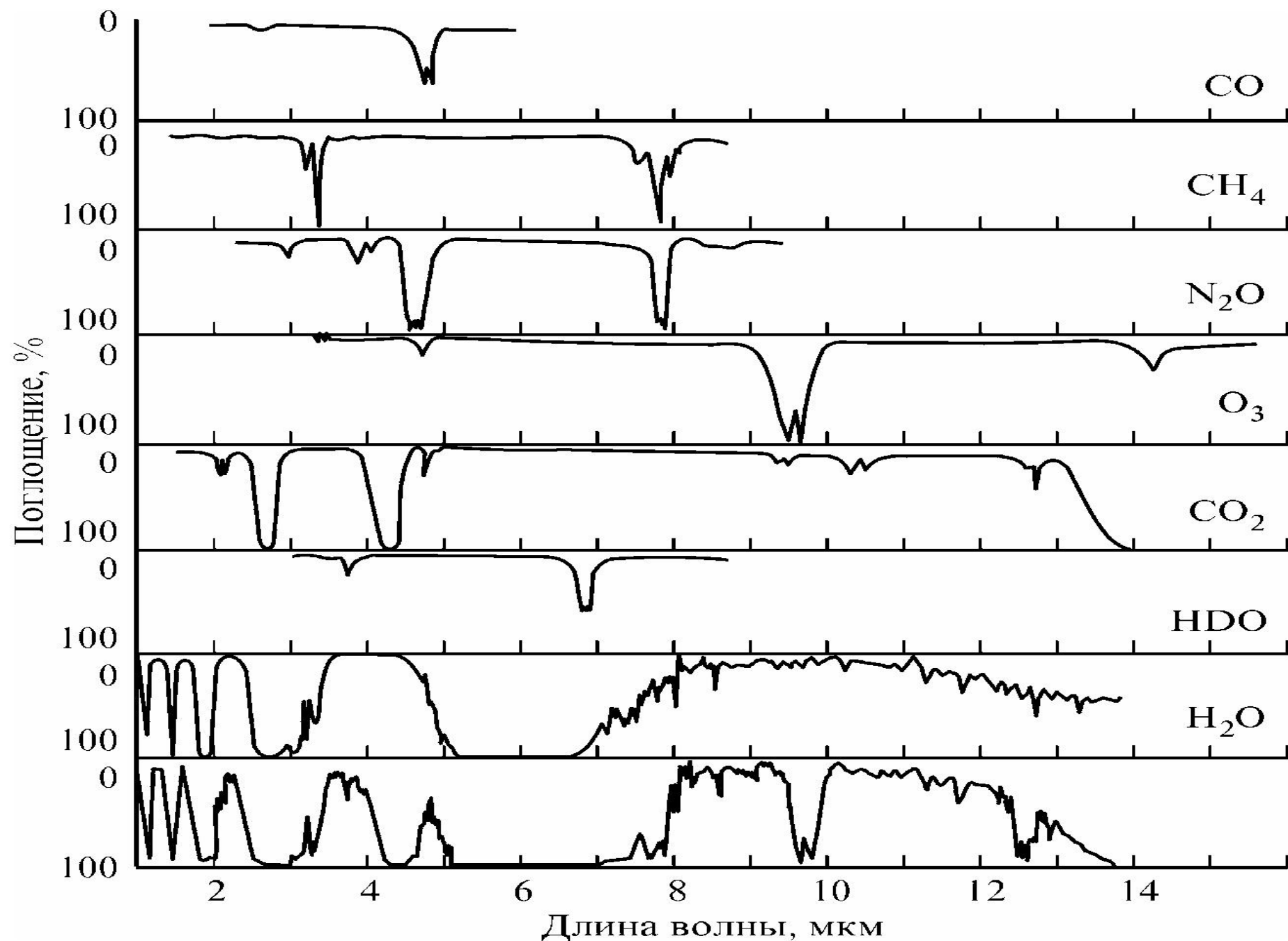
Спектр солнечного излучения на верхней границе атмосферы и у поверхности Земли



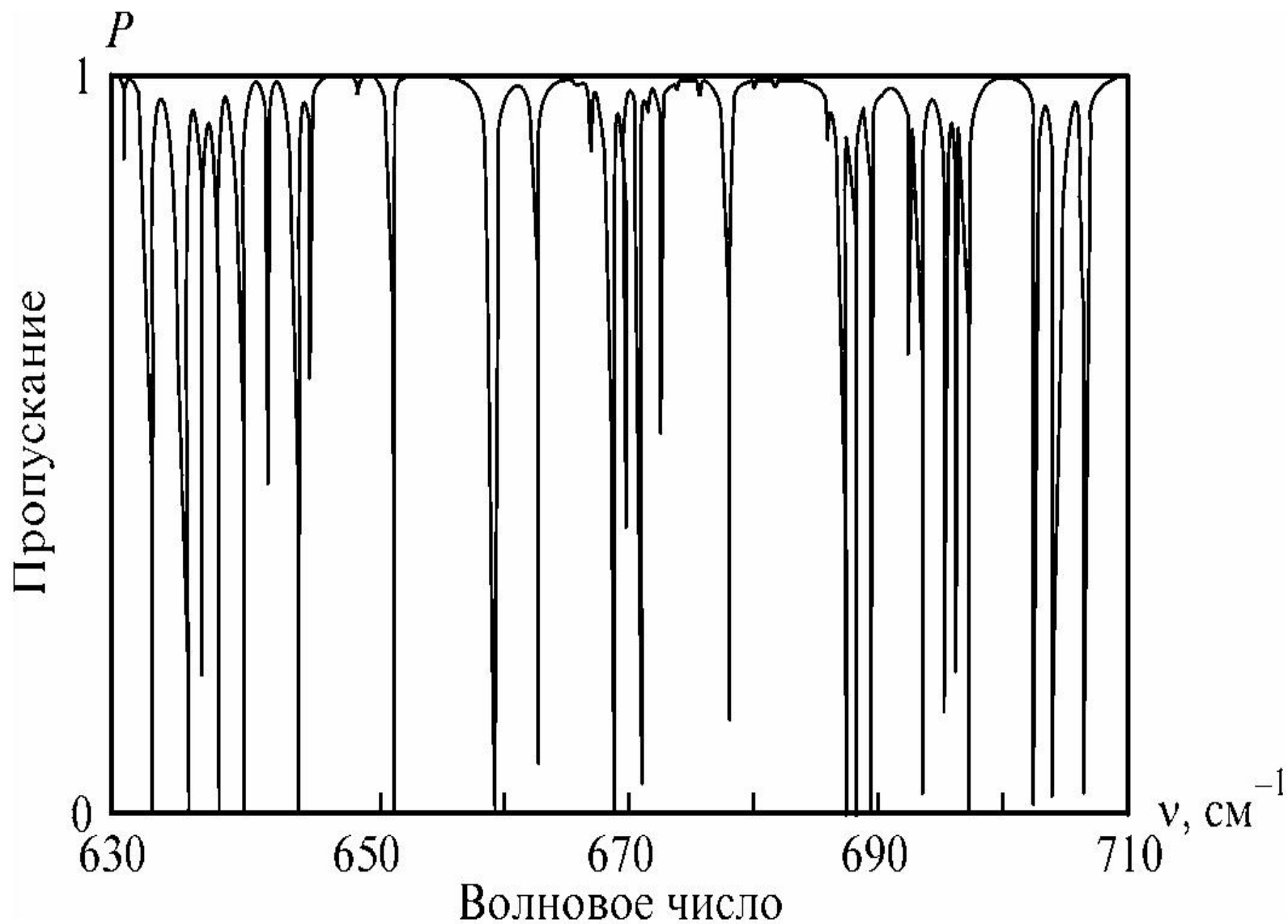
Поглощение излучения атмосферой в солнечном и тепловом диапазоне.

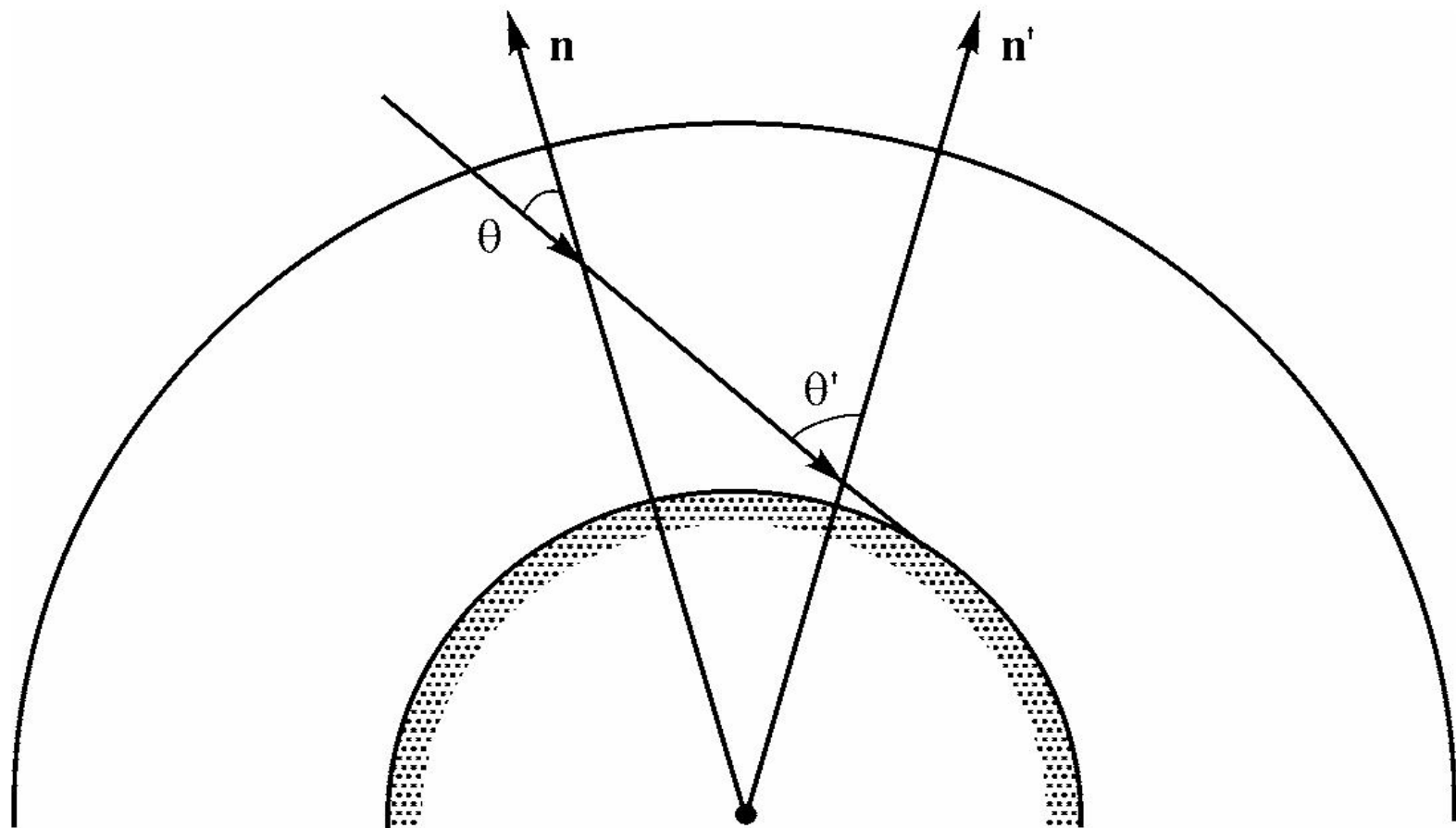


Поглощение излучения различными атмосферными газами



Более подробная функция пропускания обусловленная водяным паром

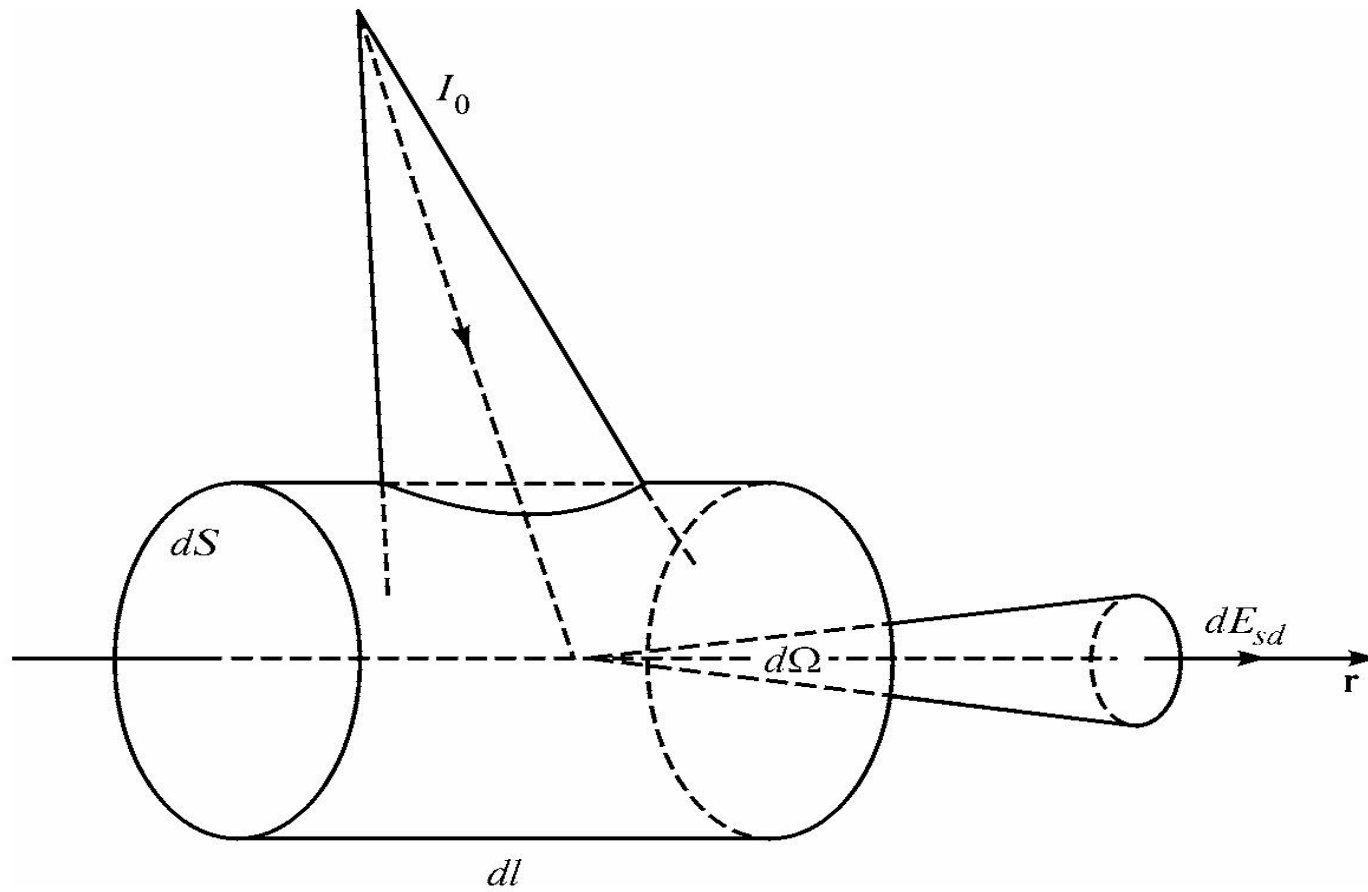




$$\cos \theta \frac{dI}{dz} = -\alpha(z) I + \varepsilon(z) \quad \tau_0 = \int_0^{\infty} \alpha(z) dz$$

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

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	$H_2O_{\text{,конт.}}, CO_2, N_2O$	9.69
4	620 - 720	$H_2O_{\text{,конт.}}, CO_2$	10.96
5	720 - 800	$H_2O_{\text{,конт.}}, CO_2$	7.57
6	800 - 980	$H_2O_{\text{,конт.}}$	12.90
7	980 - 1100	$H_2O_{\text{,конт.}}, O_3$	5.77
8	1100 - 1380	$H_2O_{\text{,конт.}}, CH_4, N_2O$	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:

$$F_{\Delta\nu}^{\downarrow}(p) = - \int_0^p B_{\Delta\nu}[T(p')] \frac{\partial \tau_{\Delta\nu}(p, p')}{\partial p'} dp',$$

$$F_{\Delta\nu}^{\uparrow}(p) = B_{gr} \tau_{\Delta\nu}(p, p_s) + \int_p^{p_s} B_{\Delta\nu}[T(p')] \frac{\partial \tau_{\Delta\nu}(p, p')}{\partial p'} dp', \quad (108)$$

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

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 k -распределений:

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

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 двух-параметрического представления типа Куртиса–Годсона, приведенные в работе [29]. Функции пропускания метана CH_4 и закиси азота N_2O приведены в работе [28]:

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

для CH_4 :

$$\tau_{CH_4} = 0.41 + 0.59 \tau, \quad (111)$$

для N_2O :

$$\begin{array}{ll} \text{в полосе 3} & \tau_{N_2O} = 0.31 + 0.69 \tau, \end{array} \quad (112)$$

$$\begin{array}{ll} \text{в полосе 8} & \tau_{N_2O} = 0.27 + 0.73 (0.39 \tau_1 + 0.61 \tau_2). \end{array} \quad (113)$$

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:

$$\begin{aligned} F_n^\downarrow &= - \sum_{m=1}^{n-1} B_m^* (\tau_{nm} - \tau_{nm+1}), \quad n = 2, N, \\ F_n^\uparrow &= B_{gr} \tau_{nm} + \sum_{m=n}^{N-1} B_m^* (\tau_{nm} - \tau_{nm+1}), \quad n = 1, N-1, \end{aligned} \tag{119}$$

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 τ , альбедо однократного рассеяния ω и параметра асимметрии индикатрисы рассеяния g .

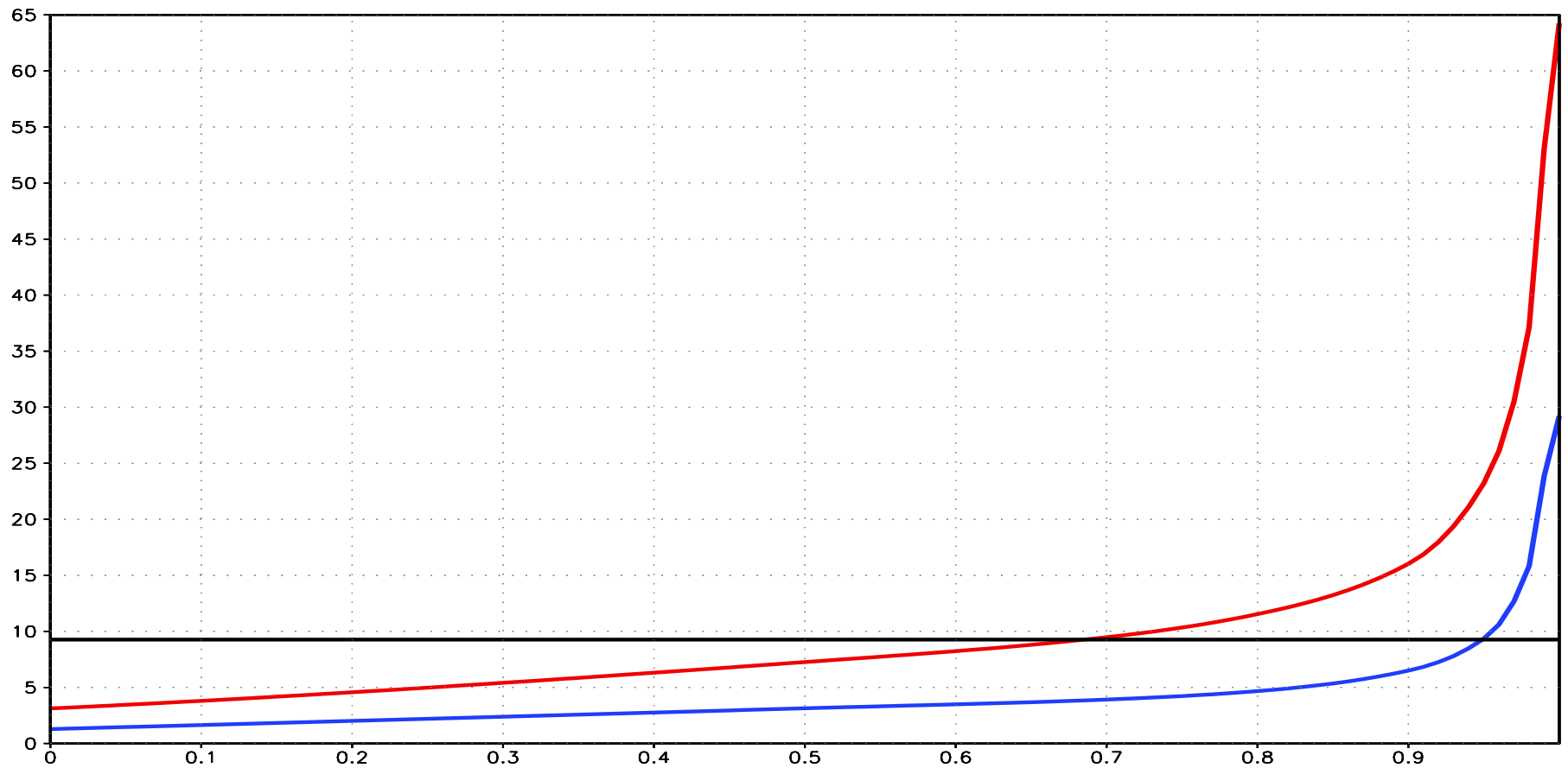
Суммарные оптические характеристики для всего модельного слоя вычисляются следующим образом:

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

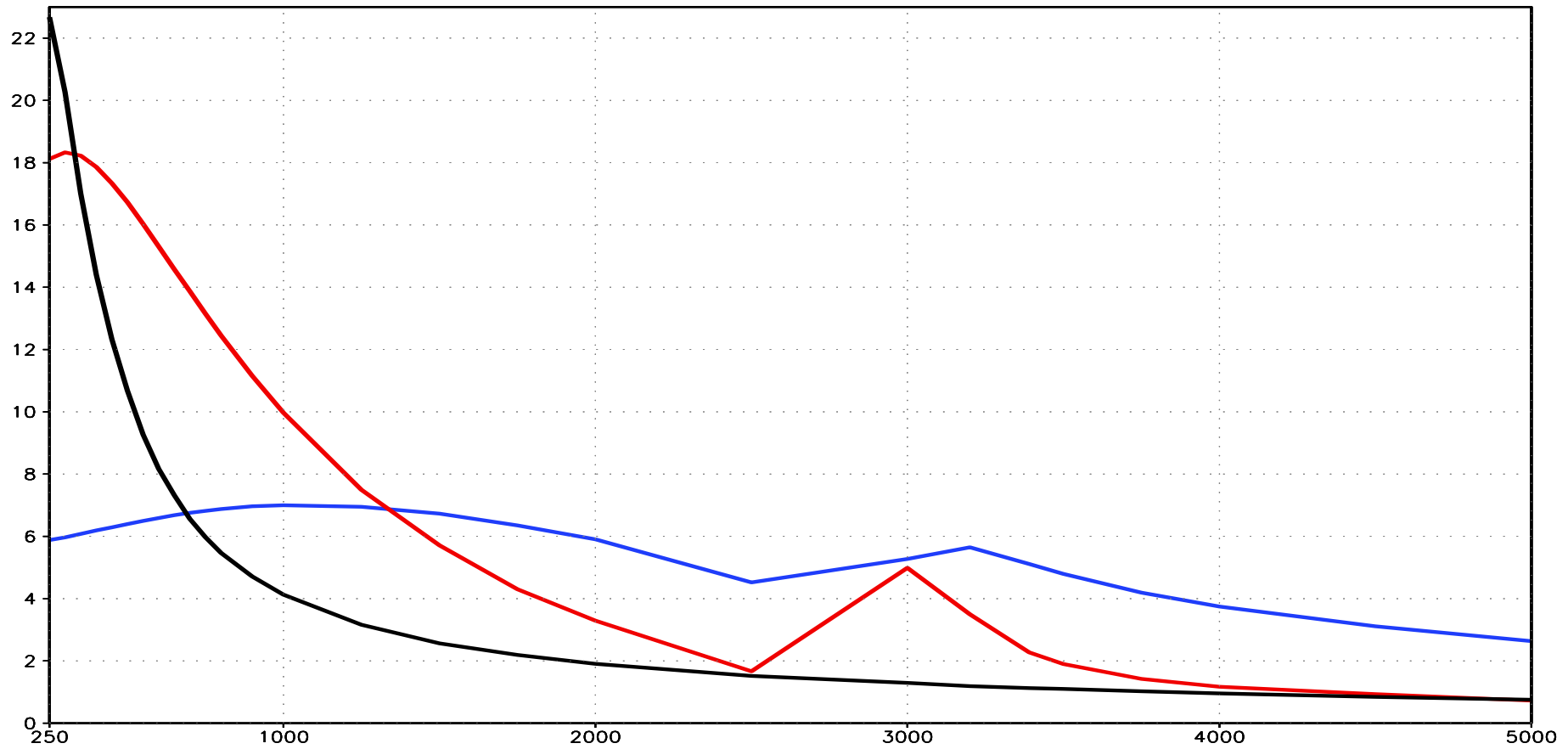
$$\omega = \frac{\sum \omega_i \tau_i}{\tau},$$

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

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. $r_{hum}=0.90$



Учет малых газовых составляющих в модели климата:

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

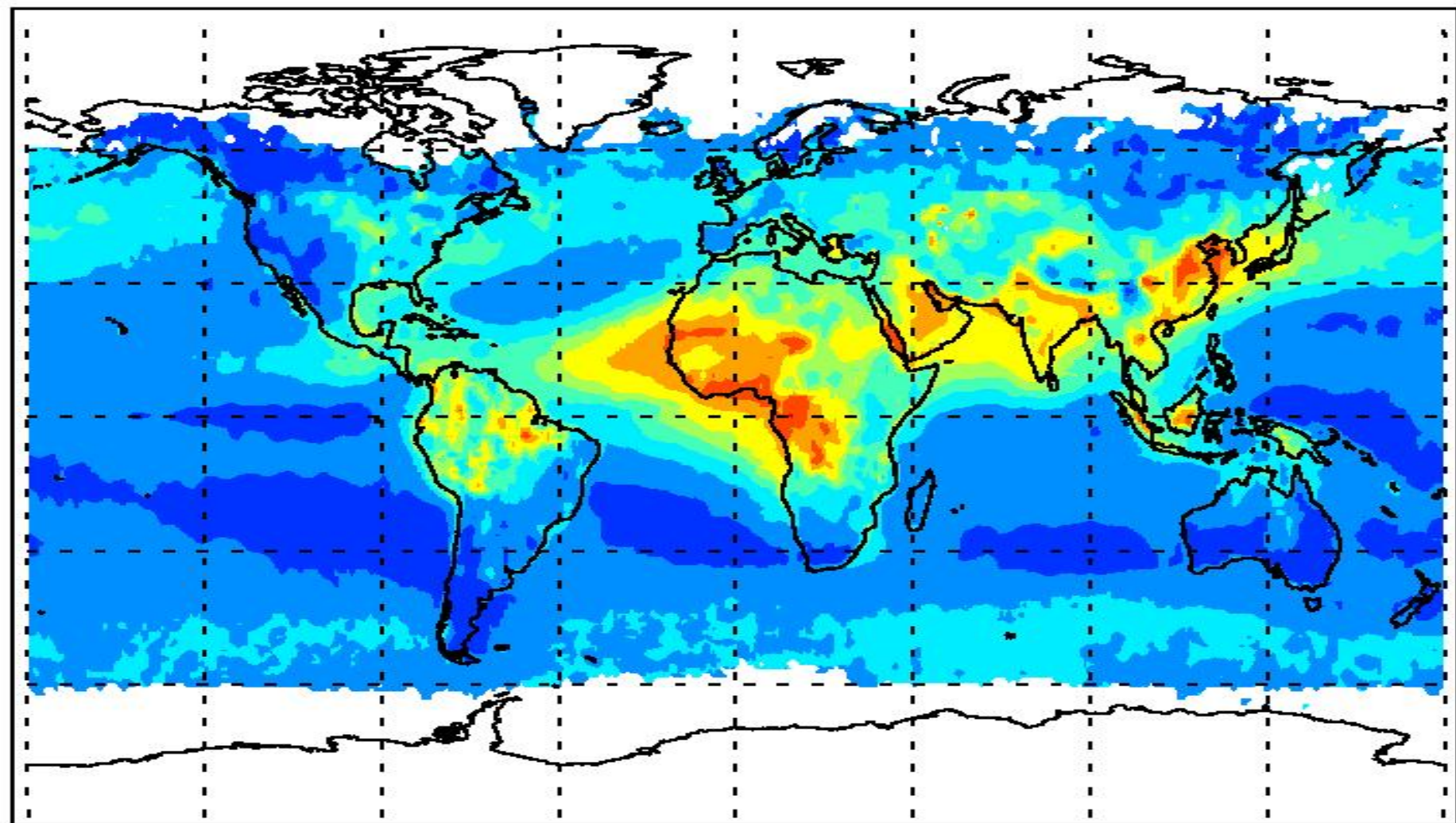
O_3 — предписанное трехмерное распределение, зависящее от времени

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.

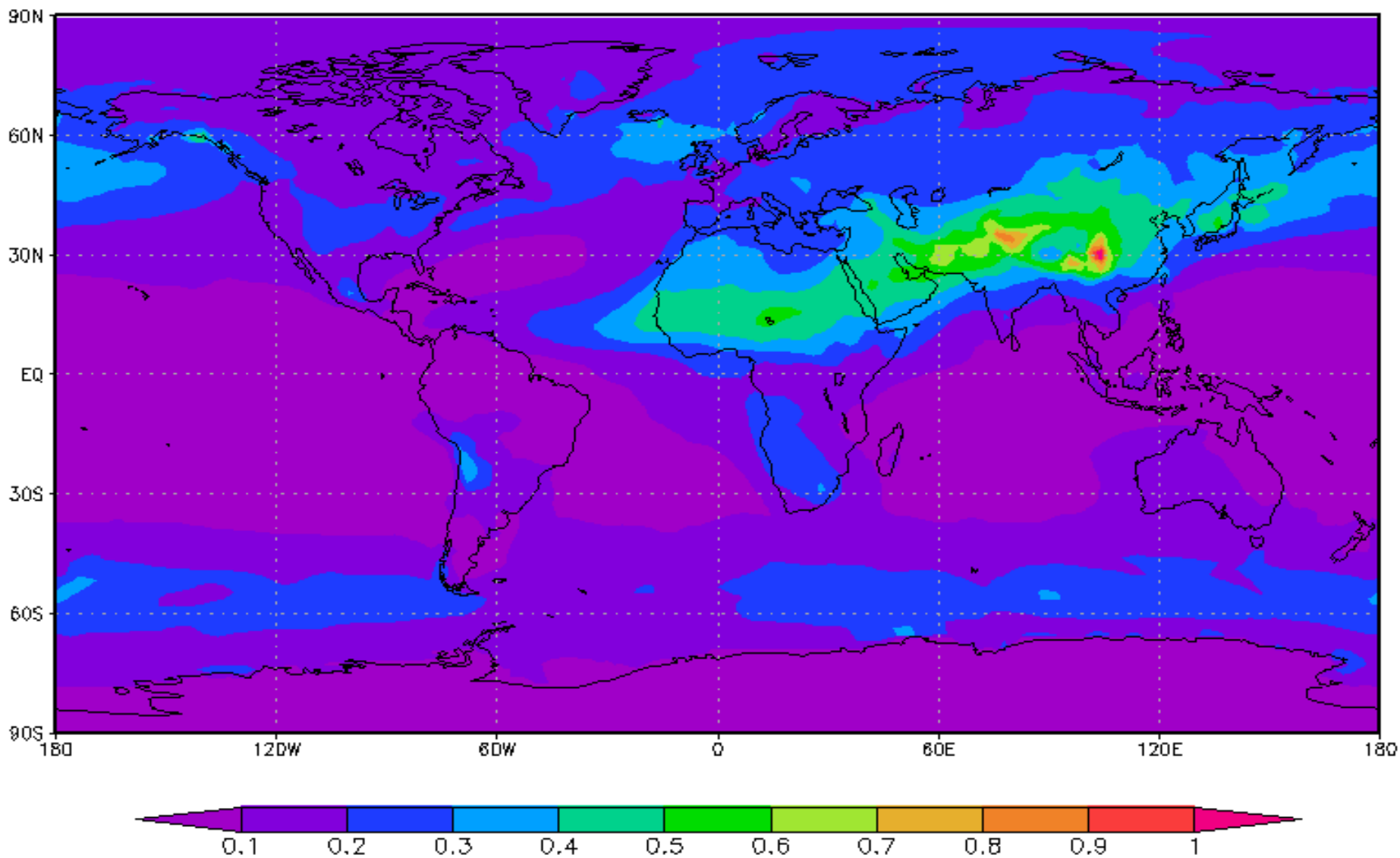
Наблюдаемая со спутника оптическая толщина аэрозолей

AOD MISR+MODIS



Оптическая толщина аэрозолей для 550 нм

Total AOD at $\lambda=550\text{nm}$, $\langle\tau_{550}\rangle=0.1578$



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).

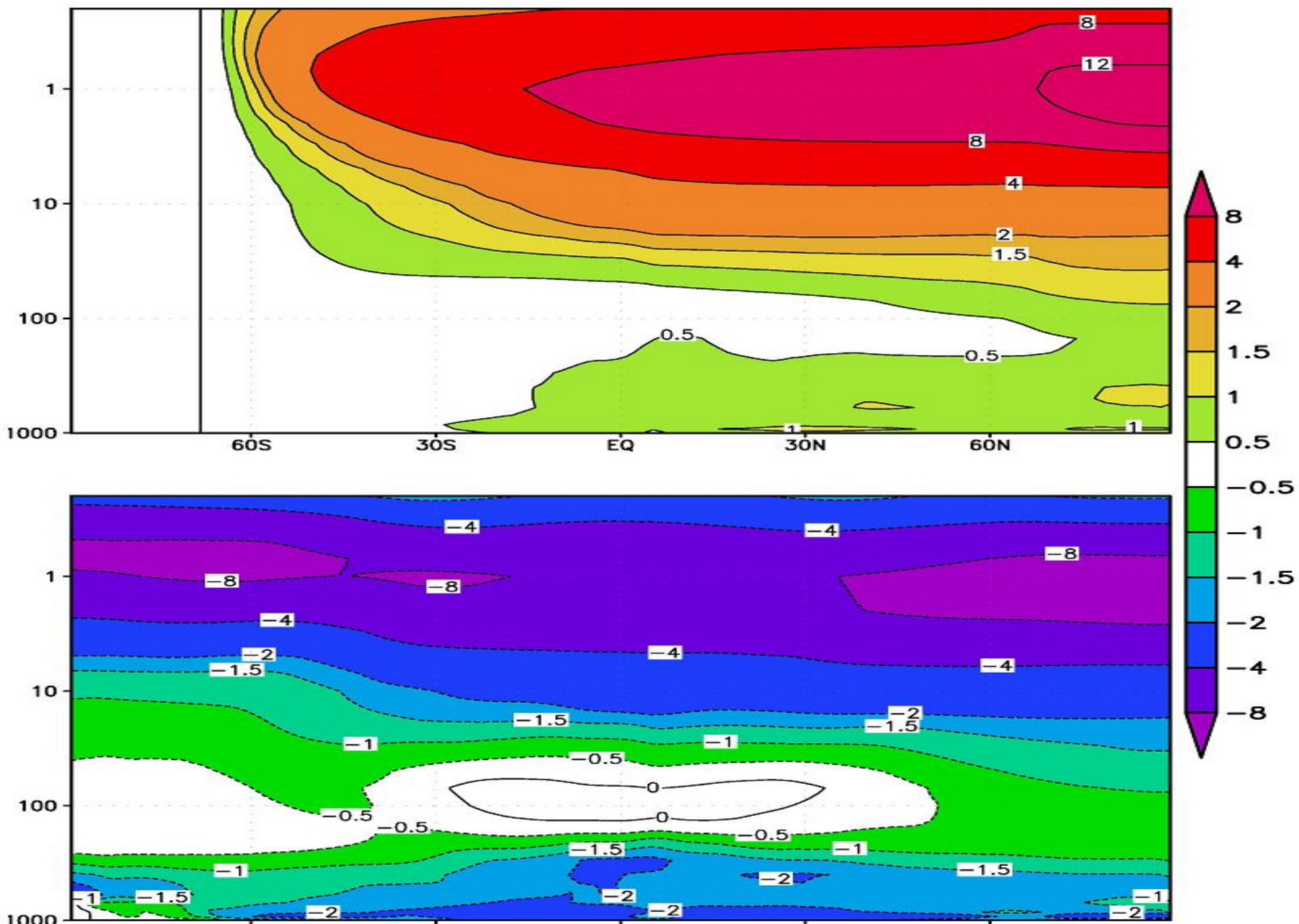
Считается, что внутри каждого яруса реализуется максимальное перекрывание, между ярусами – случайное.

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:

$$\rho C_P \partial T / \partial t = \partial (F_{\downarrow} + D - F_{\uparrow} - U) / \partial z$$

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



То же для декабря

The figure displays two panels of oceanographic data for December, showing a cross-section of the ocean from 60°S to 60°N latitude and 1 to 1000 meters depth. The top panel shows positive values, with a color scale ranging from 0.5 (light green) to 8 (red). The bottom panel shows negative values, with a color scale ranging from -8 (purple) to 0 (white). Both panels use contour lines to represent the data, with labels indicating specific values.

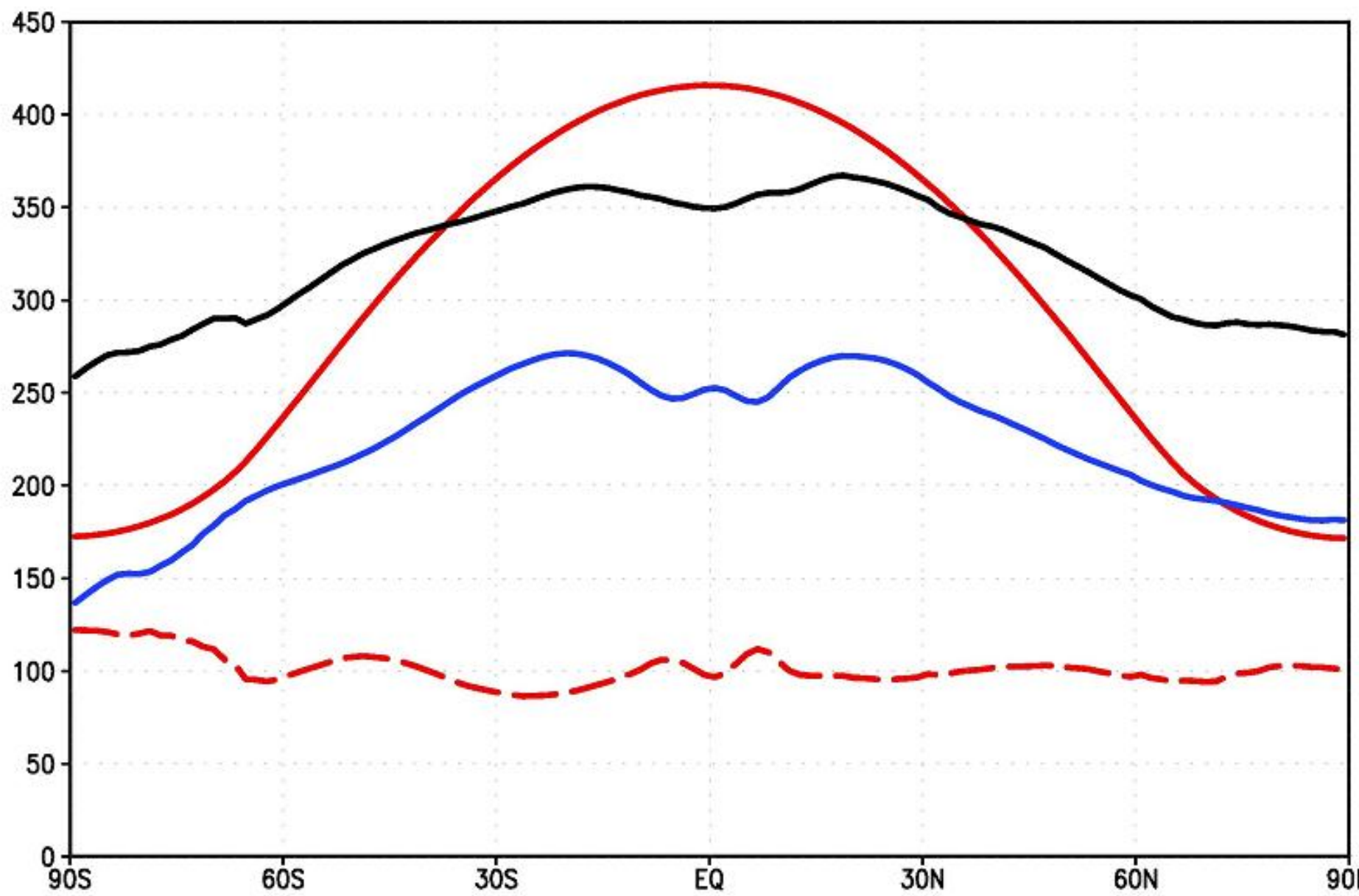
Top Panel (Positive Values):

- Latitude: 60S, 30S, EQ, 30N, 60N
- Depth: 1, 10, 100, 1000
- Color scale: 0.5, 1, 1.5, 2, 4, 8
- Contour labels: 0.5, 1, 1.5, 2, 4, 8

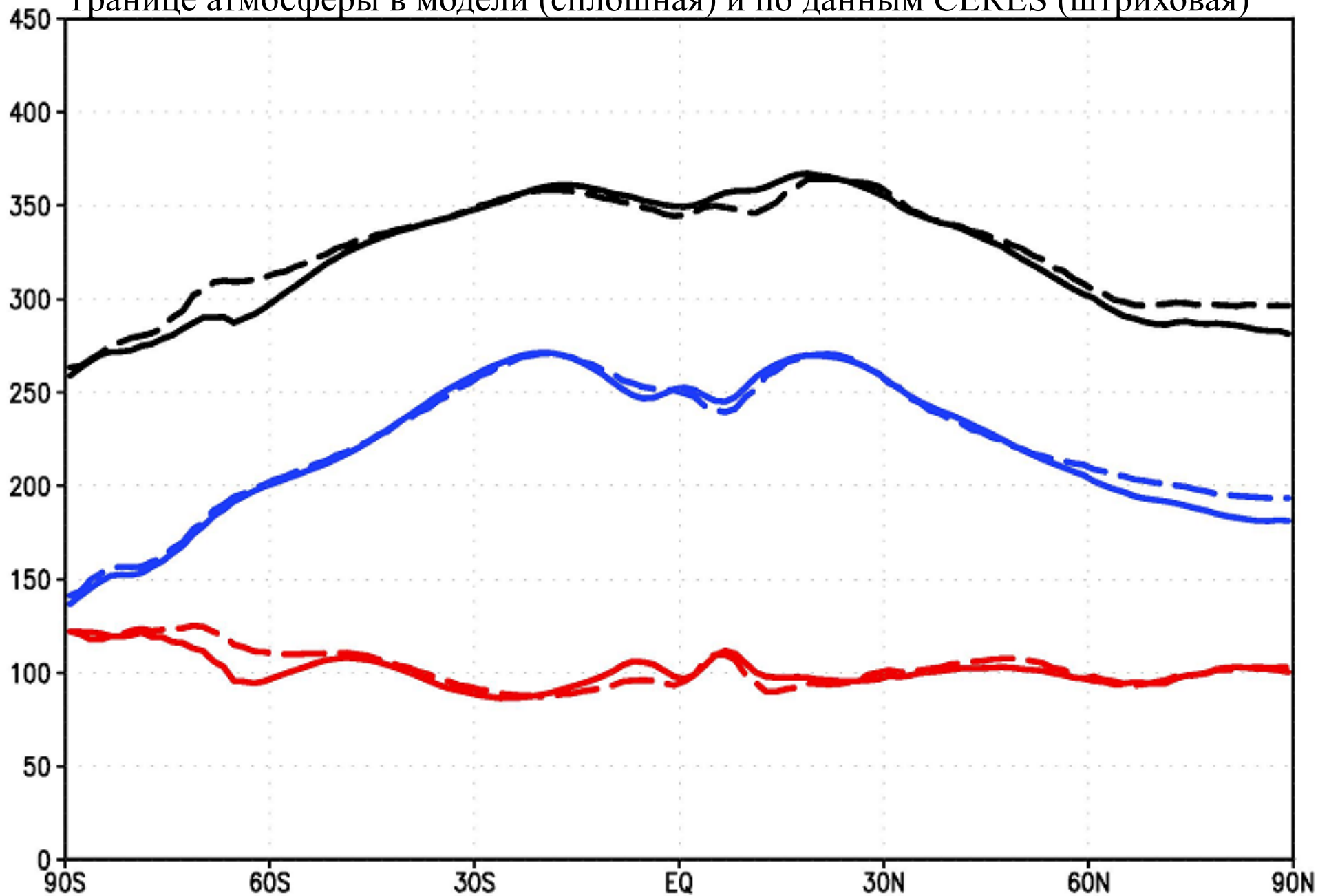
Bottom Panel (Negative Values):

- Latitude: 60S, 30S, EQ, 30N, 60N
- Depth: 1, 10, 100, 1000
- Color scale: -8, -4, -2, -1.5, -1, -0.5, 0
- Contour labels: -8, -4, -2, -1.5, -1, -0.5, 0

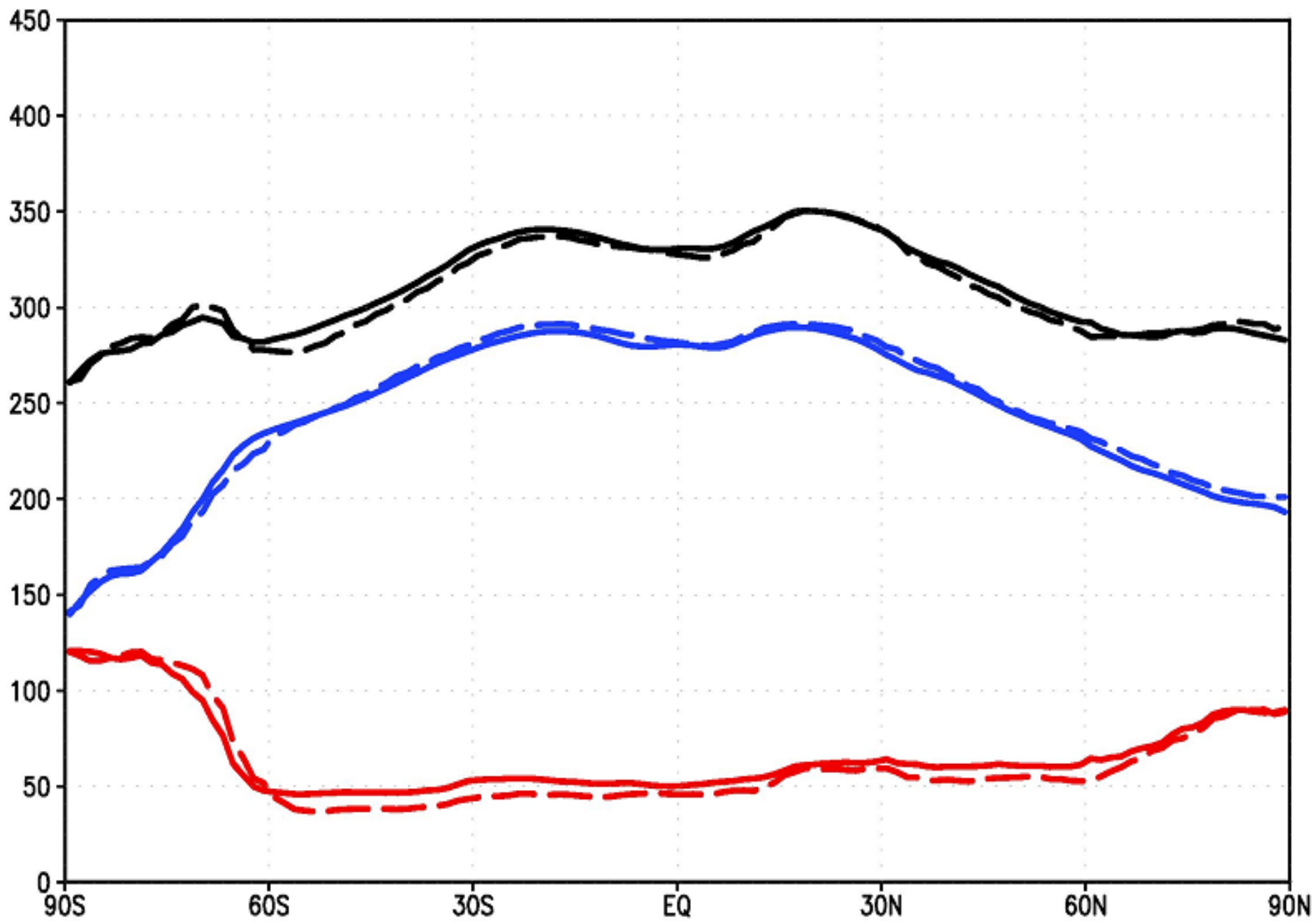
Среднегодовые потоки радиации (Вт/м2) на верхней границе атмосферы в модели климата. Сплошная красная линия – приходящая солнечная радиация, штриховая красная линия – уходящая солнечная, синяя – уходящая тепловая, черная – сумма уходящей солнечной и тепловой.



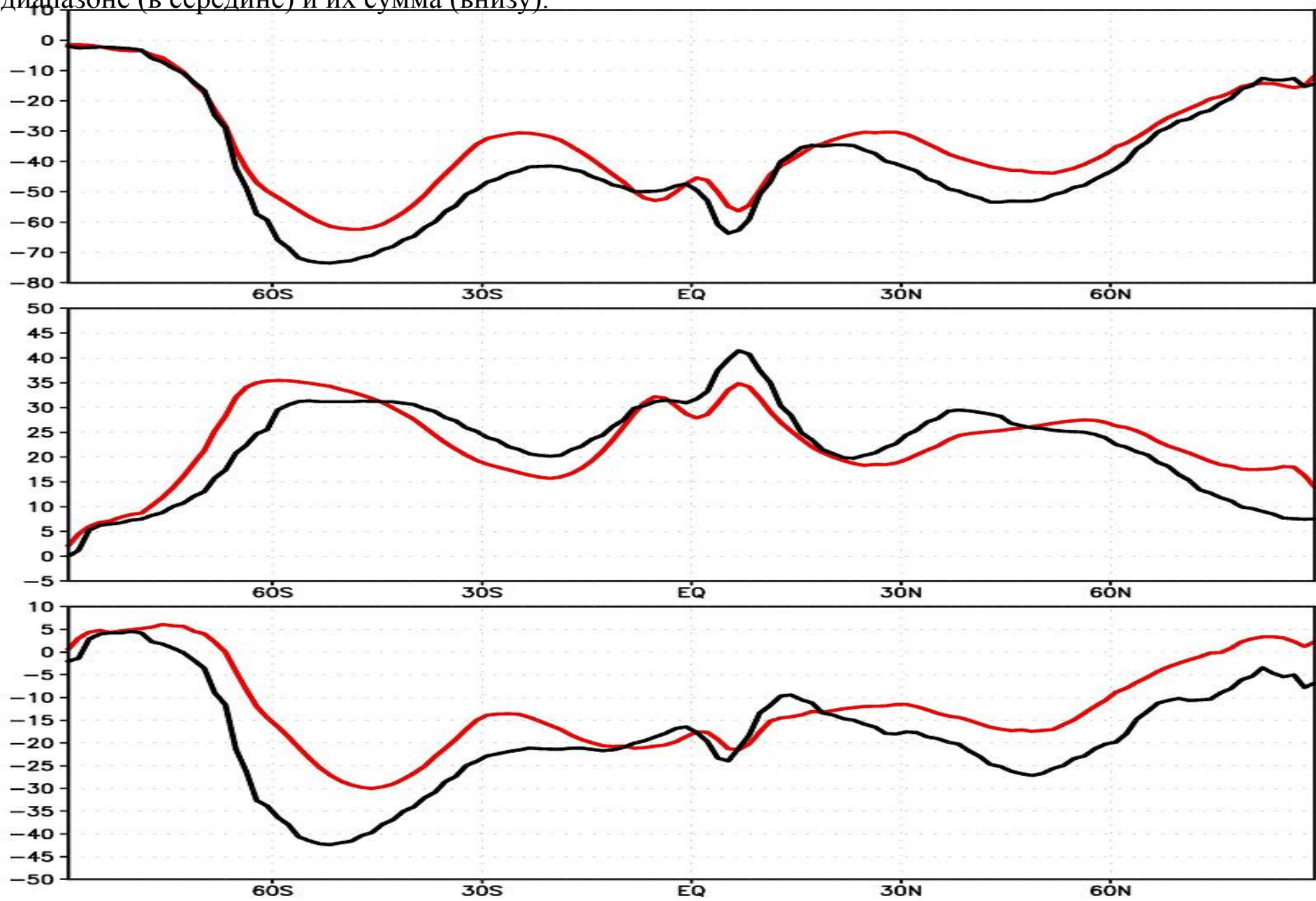
Уходящая длинноволновая (синий) и солнечная (красный) радиация на верхней границе атмосферы в модели (сплошная) и по данным CERES (штриховая)



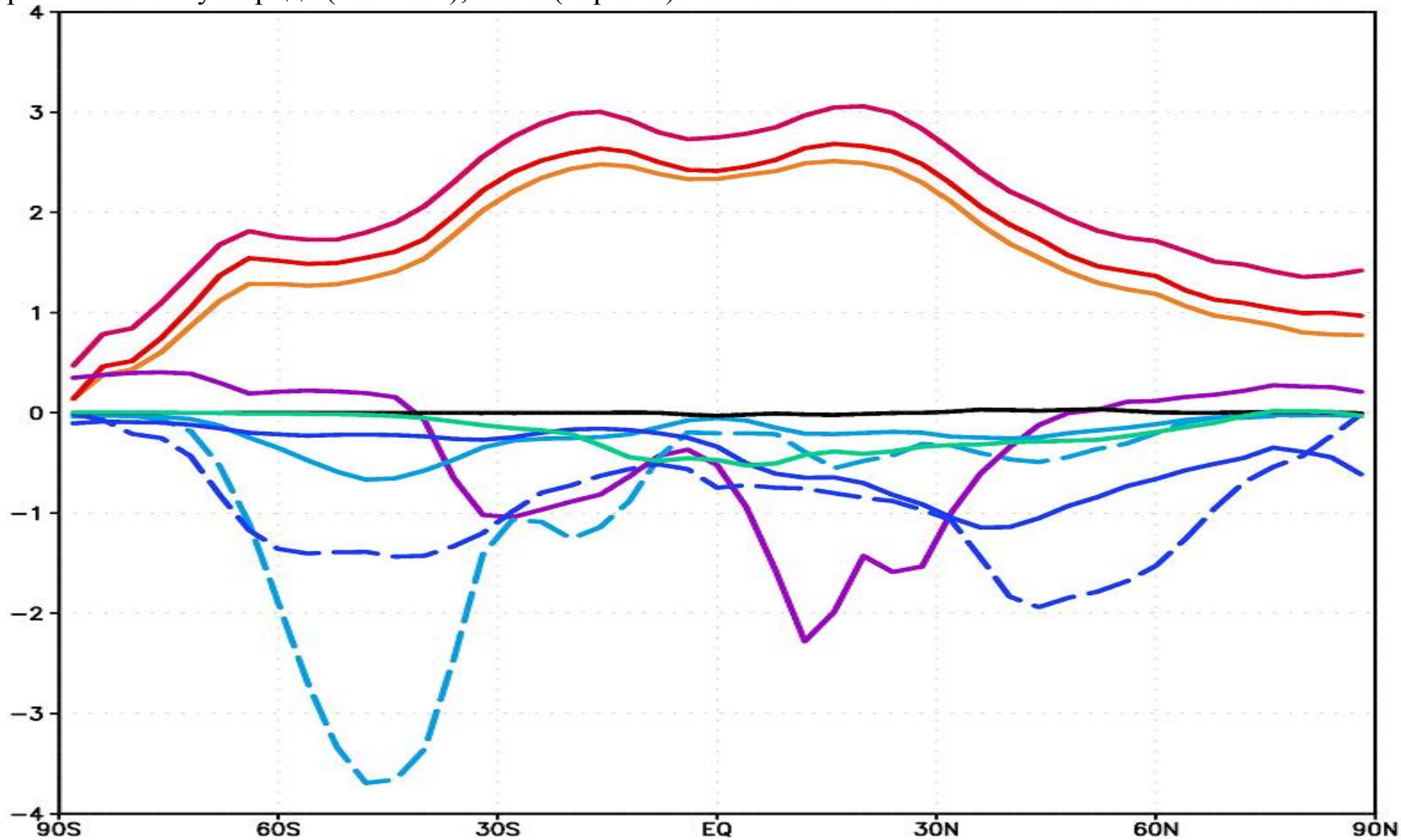
То же для ясного неба



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 нагрева (К/сут) вследствие наличия озона (желтый) и CO2 (темно-красный) в модели

