ПРОГНОЗ-23 ИЗМИРАН 29-31 мая

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ ТРЕХМЕРНОЙ ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ CHARM-DE

Криволуцкий А. А.[1], Черепанова Л.А. [1], Банин М. В.[2]
Куколева А. А.[3], Николаев А.В.[4,5]

[1]ФГБУ «ЦАО», г. Долгопрудный, Россия
[2]НИИМА «ПРОГРЕСС», г. Москва, Россия
[3]МГТУ ГА, г. Москва, Россия
[4]ИМАШ РАН, г. Москва, Россия
[5]ФГБУ «ИПГ», г. Москва, Россия

krivolutsky@mail.ru

Структура доклада
CHARM-DE
(Chemical Atmospheric Research Model with D and E regions)

1)Описание глобальной численной модели

2) Расчет глобальной циркуляции и температурных полей

3) Глобальные поля нейтральных химических составляющих

4) Глобальные поля заряженных составляющих

5) Распространение радиоволн

5) Изменения в цикле активности Солнца

6) Воздействие протонных вспышек на Солнце

7) Перспективы использования модели

8) Публикации

ТРЕХМЕРНАЯ ФОТОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИОННЫХ И НЕЙТРАЛЬНЫХ ХИМИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТ (**CHARM-DE**)

Уравнения модели (0-130 км):

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + U \frac{\partial \mu}{a \cos\theta \partial \lambda} + V \frac{\partial \mu}{a \partial \theta} + W \frac{\partial \mu}{\partial z} = P_{AD} - L\mu$$

P, L – фотохимические источники и стоки

U, V, W –компоненты скорости ветра

Общее число химических реакций – **140;** общее число реакций фотодиссоциации и фотоионизации – **54**

Общее число компонент- 60

Метод «химических семейств» - **Turco, Whitten, 1974**

Адвективный перенос: **Prather, 1986**

Нейтральные составляющие

- **“Химические семейства”**
- **Ox** = O_3 + $O(^3P)$ + $O(^1D)$;
- **NOy** =N + NO + NO_2 + NO_3 + $2N_2O_5$ + HNO_3 + HO_2NO_2 + $ClNO_3$+$N(^2D)$;
- **Cly**=Cl + ClO + OClO + ClOO + HOCl + HCl;
- **HOx**=H + OH + HO_2 + $2H_2O_2$;

Другие составляющие

- CH_3, CH_2O, CH_3O_2, CH_3O_2H, CH_3O, CHO, CO.
- $O_2(^1\Delta_g)$
- **Газы-источники**
- CH_4, CO_2, N_2O, CF_2Cl_2, $CFCl_3$, H_2, Cl_4, Cl_2, CH_3Cl, CH_2Cl,
- O_2, N_2 , H_2O.
-

Реакции фотодиссоциации (**CHARM-DE**)

$O2+h\nu \rightarrow O+O(^1D)$	$N2O5+h\nu \rightarrow NO2+NO3$	$H2O+h\nu \rightarrow H+OH$
$O2+h\nu \rightarrow O+O$	$HNO3+h\nu \rightarrow OH+NO2$	$CF2Cl2+h\nu \rightarrow products$
$O3+h\nu \rightarrow O+O2$	$CLONO2+h\nu \rightarrow Cl+NO3$	$CFCl3+h\nu \rightarrow products$
$O3+h\nu \rightarrow O(^1D)+O2$	$HCl+h\nu \rightarrow H+Cl$	$CH4+h\nu \rightarrow CH3+H$
$H2O2+h\nu \rightarrow OH+OH$	$ClO+h\nu \rightarrow Cl+O$	$CH4+h\nu \rightarrow CH2+H2$
$NO2+h\nu \rightarrow NO+O(1\ D)$	$NO3+h\nu \rightarrow NO+O2$	$CCl4+h\nu \rightarrow products$
$HNO3+h\nu \rightarrow H+NO3$	$H2O2+h\nu \rightarrow OH+OH$	$CH3Cl+h\nu \rightarrow CH3+Cl$
$HOCl+h\nu \rightarrow Cl+HO$	$CO2+h\nu \rightarrow CO+O$	$N2O+h\nu \rightarrow N2+O(1D)$
$N2O5+h\nu \rightarrow 2NO2+O$	$HO2NO2+h\nu \rightarrow HO2+NO2$	$Cl2+h\nu \rightarrow Cl+Cl$
$NO+h\nu \rightarrow N+O$	$NO2+h\nu \rightarrow NO+O$	$NO3+h\nu \rightarrow NO2+O$

Ионизированные составляющие

- Положительно заряженные ионы:
- O_2^+ O_4^+ $O_2^+(H_2O)$ $H^+(H_2O)$ $H^+(H_2O)_3$
- $H^+(H_2O)_4$ $H^+(H_2O)_2$
- NO^+N_2 NO^+CO_2 $NO^+(H_2O)$ $NO^+(H_2O)_2$ $NO^+(H_2O)_3$ NO^+

- Электроны: [e]
- Отрицательно заряженные ионы:
- O_2^- O_3^- O_4^- CO_4^- O^- OH^- CO_3^- $O_2^-(H_2O)$ HCO_3^-
- NO_3^- NO_2^-
-

Ионизирующие факторы

- **1-10 nm** (X-Rays)
- **102,7-111,8 nm** $O_2(^1\Delta_g)$
- $q(z)=n(O_2(^1\Delta_g))\{0{,}549\cdot10^{-9}\exp(-2{,}406\cdot 10^{-20}$
- $N(O_2)+2{,}614\cdot10^{-9}\exp(-8{,}508\cdot10^{-20}N(O_2))\}$
- **121,6 nm (L_α)** NO

$$q_{Ly-\alpha}(z)=\sigma^{i}_{NO}n(NO)I_{\infty}(Ly-\alpha)\exp\left[-\sigma^{a}(O_2)\int_{z}^{\infty}n(O_2)dzCh(z,\chi)\right],$$

- **GCRs** (Heaps, 1978)
-

Модель общей циркуляции атмосферы
(**ARM – A**tmospheric **R**esearch **M**odel)

Диапазон высот: **0-135 км**

Пространственное разрешение: по высоте – **1 км;**

по долготе – **10^0;** по широте – **5^0**

шаг интегрирования по времени – **5 мин.**

Радиационные источники и стоки (параметризации):

нагрев - **O2, O3, H2O (Strobel, 1978; Chou et al., 2002)**;

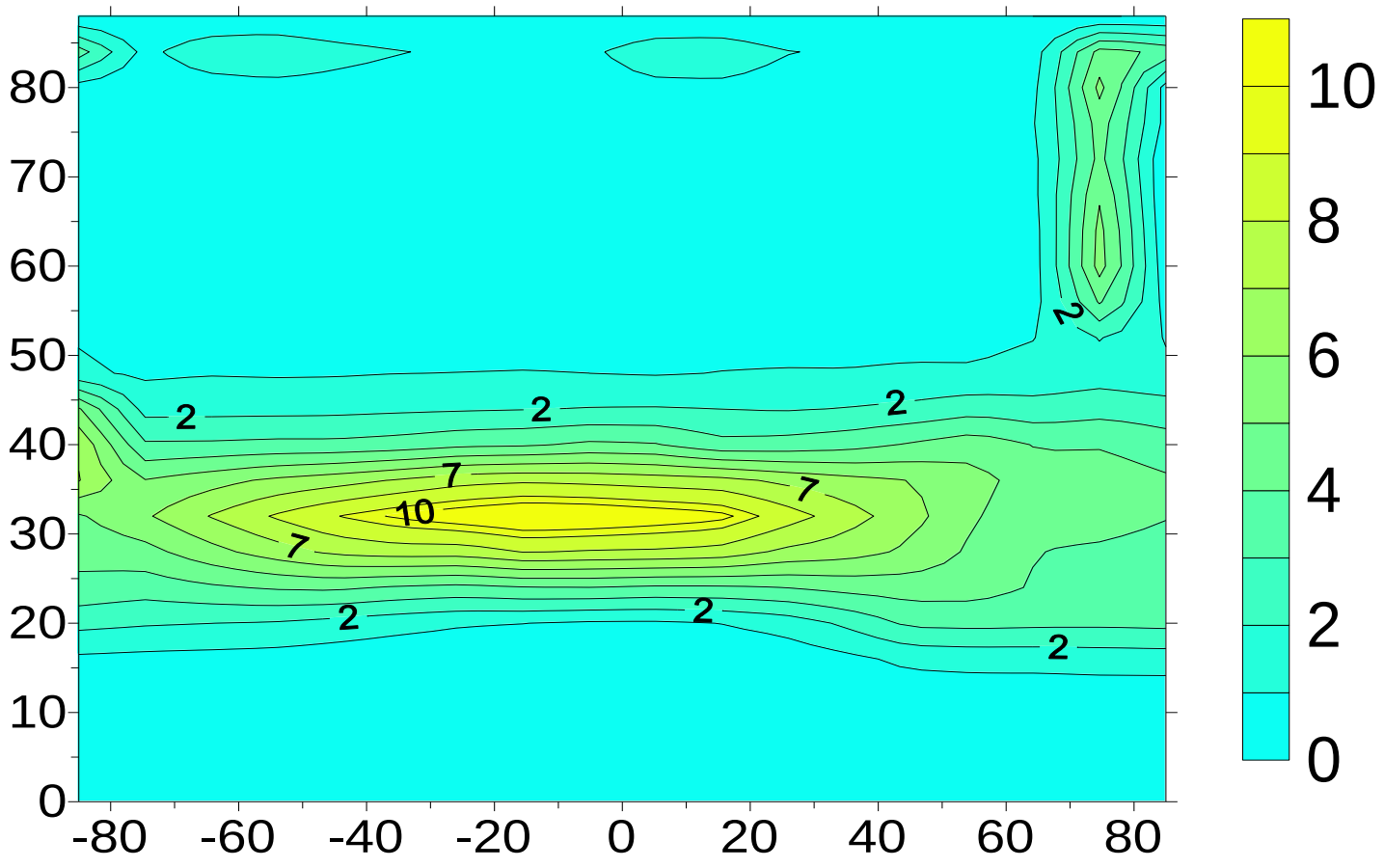
ИК выхолаж.- **CO2, O3, H2O, NO**

(Chou et al., 2002; Fomichev, 2003; Kockarts, 1980),

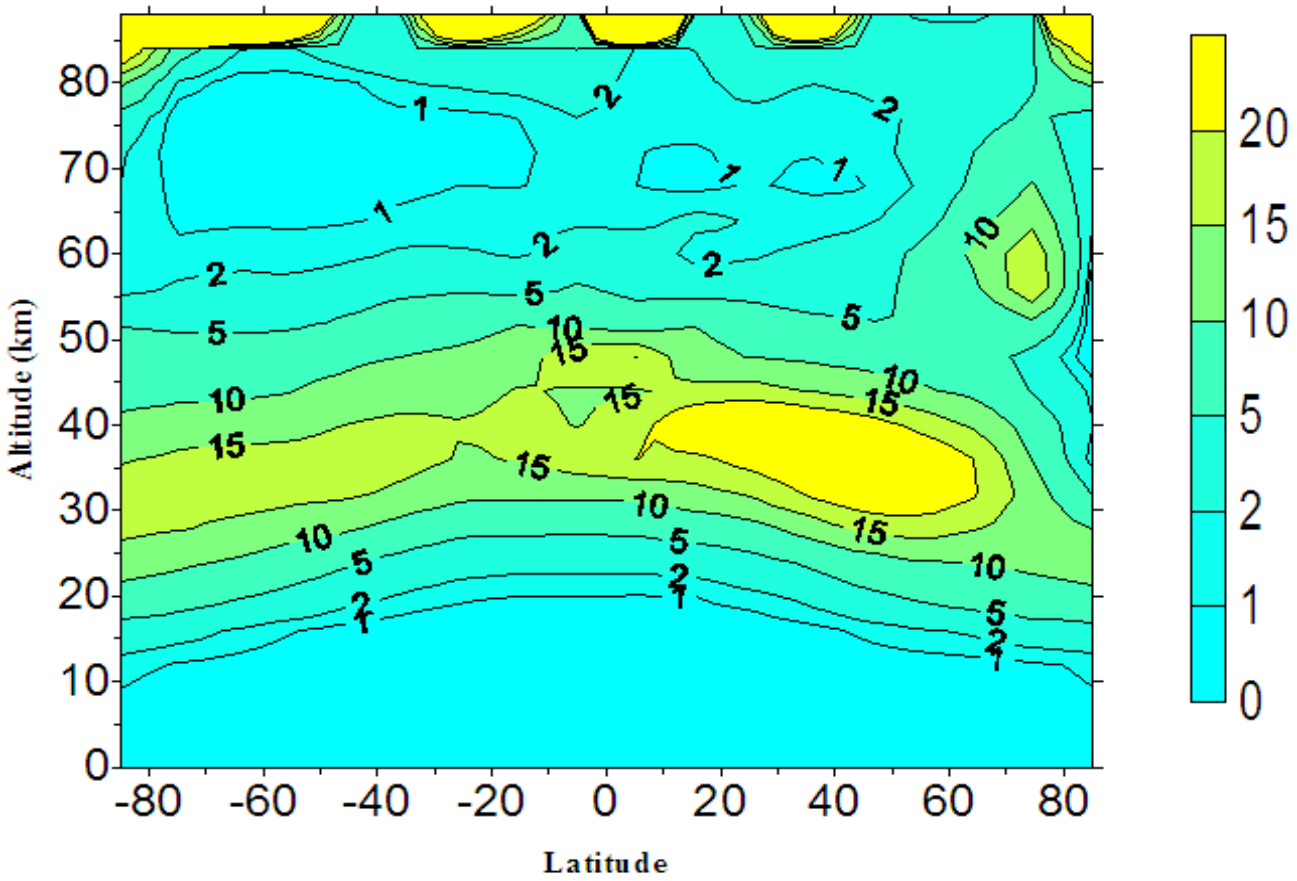
Воздействие **ВГВ (Lindzen, 1981) –** источники на н. гр.

Планетарные волны (источники на нижней границе**)**

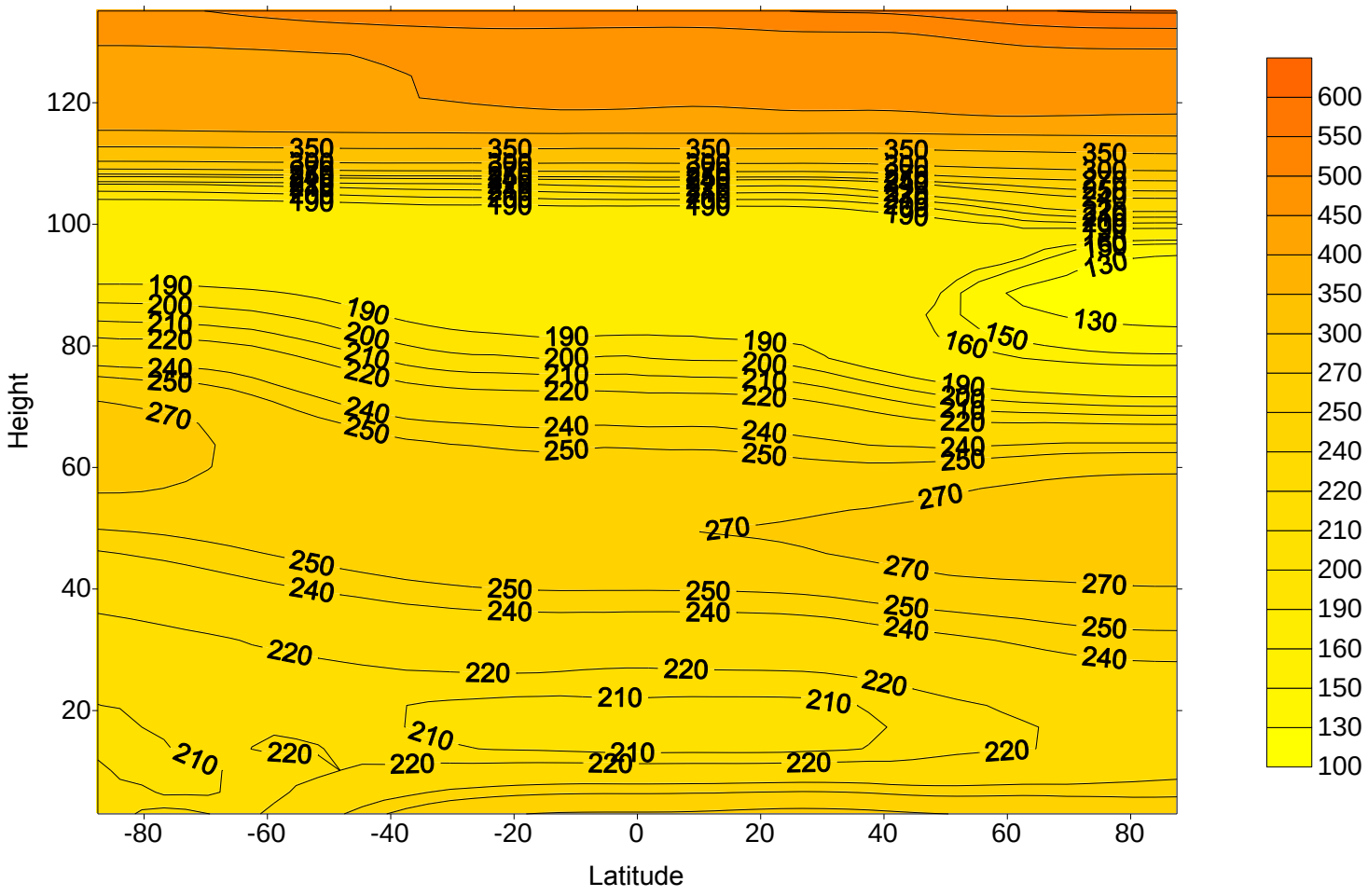
ГЛОБАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА (ppmv)
январь
(расчет по трехмерной фотохимической модели **CHARM-DE**)



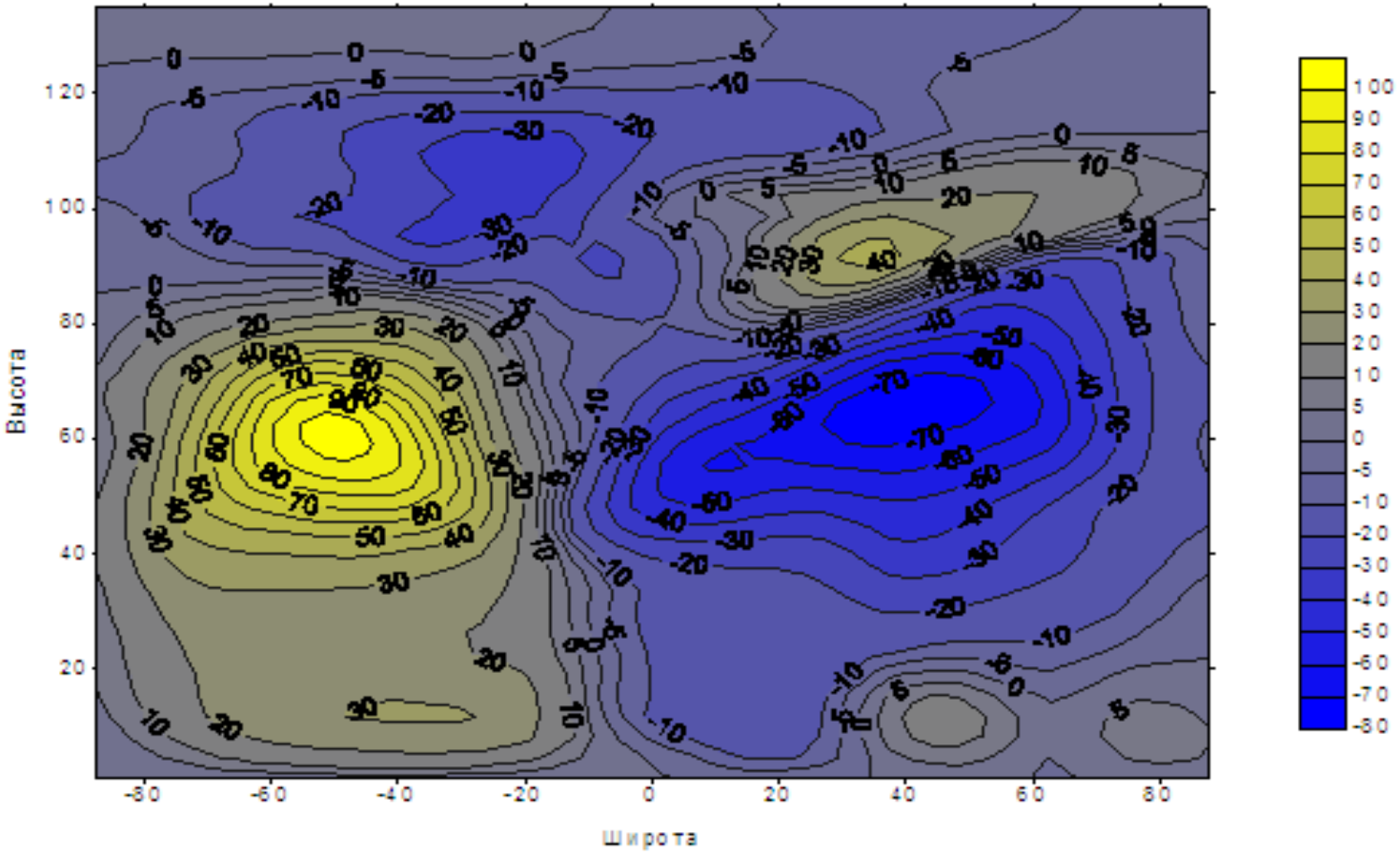
Пространственное распределение **NOy(ppbv)** **CHARM-DE**



Распределение температуры для июля (К)
(расчет по модели общей циркуляции ARM)

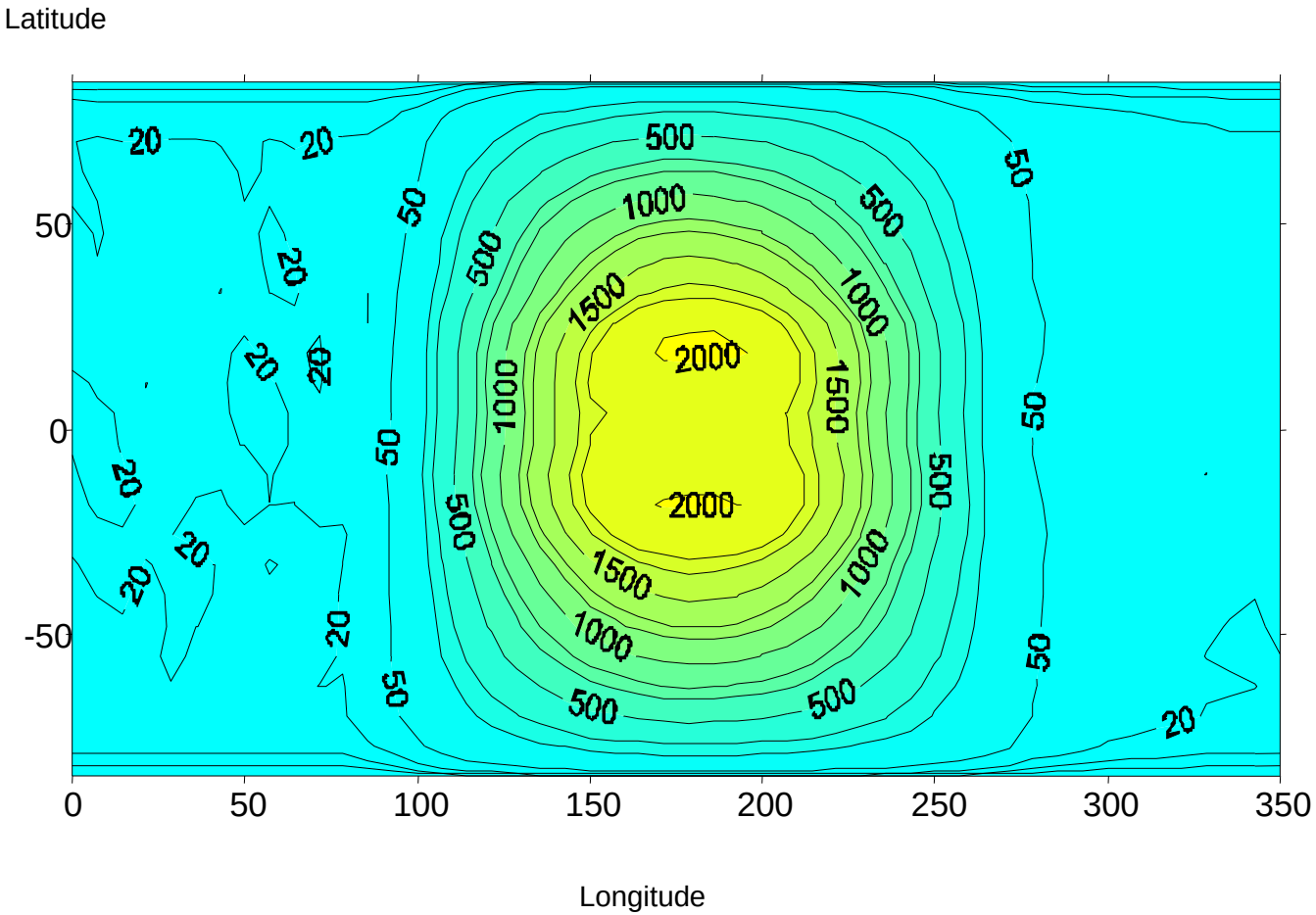


Глобальное распределение зонального ветра (м/с) для июля (расчет по модели общей циркуляции ARM)

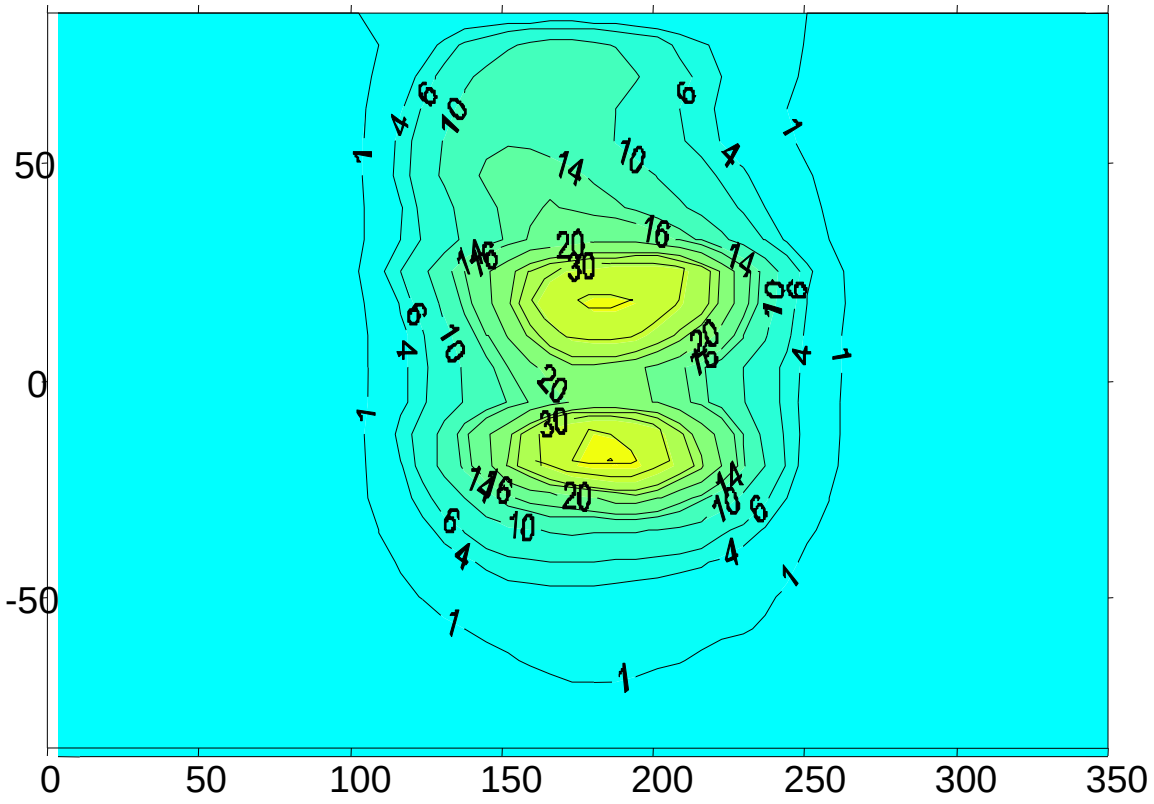


Electron density, 80 km (number/cm**3)

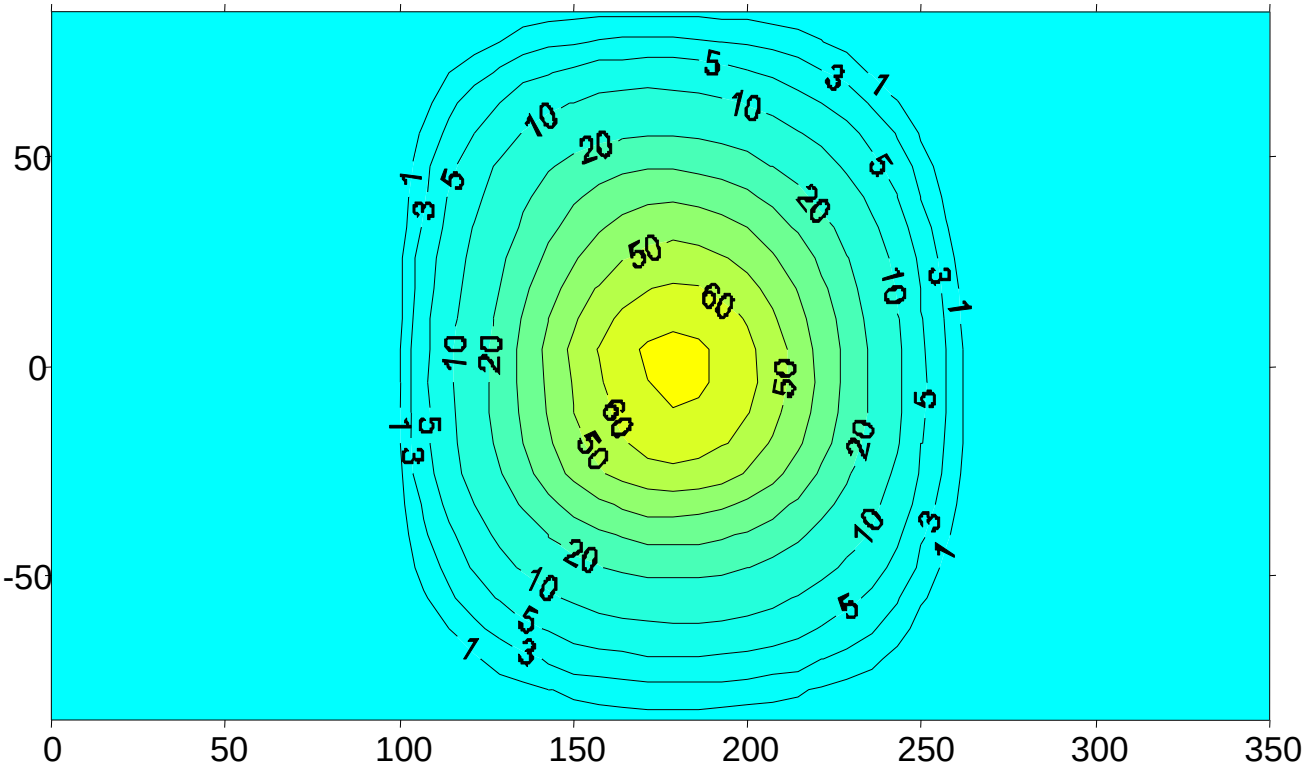
1st January (00:00 UT)



NO^+ (number/m**3) at 80 km

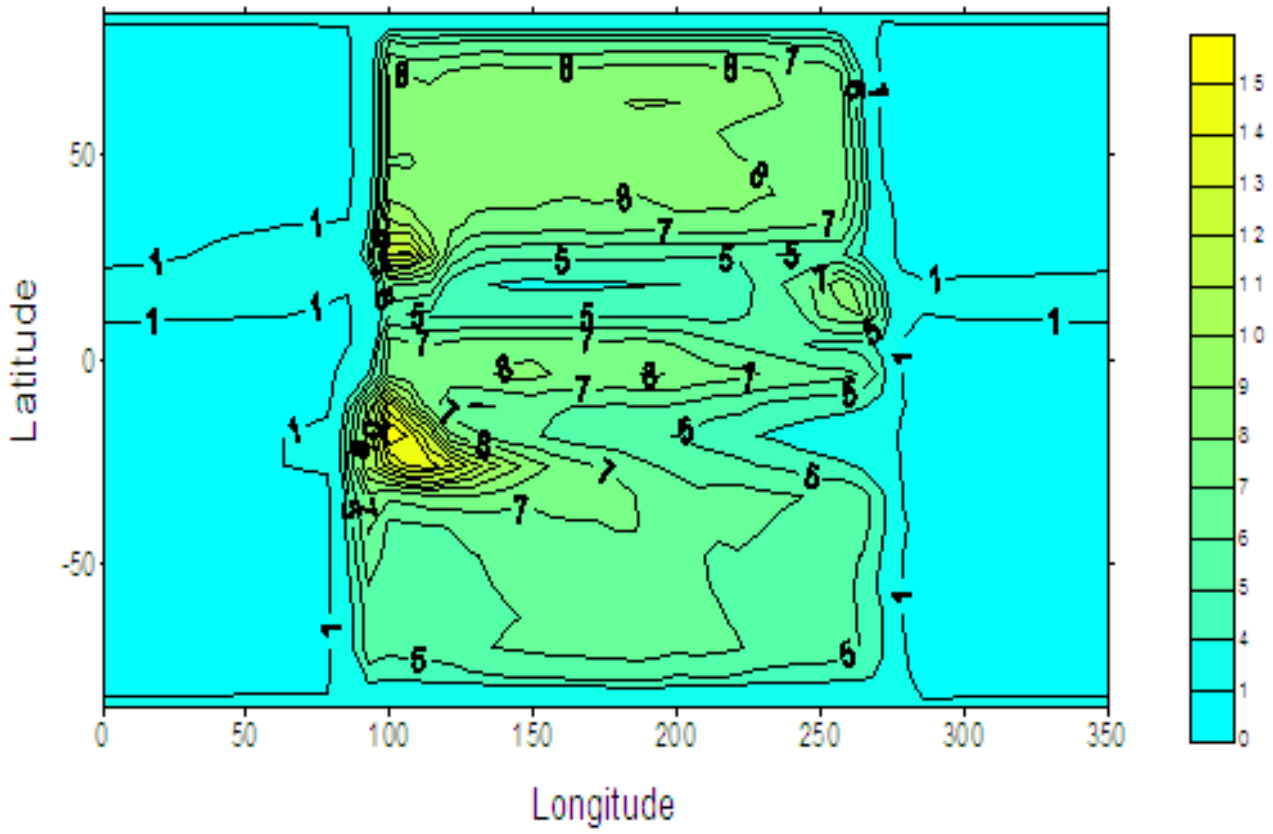


O_2^+ (number/m**3) at 80 km

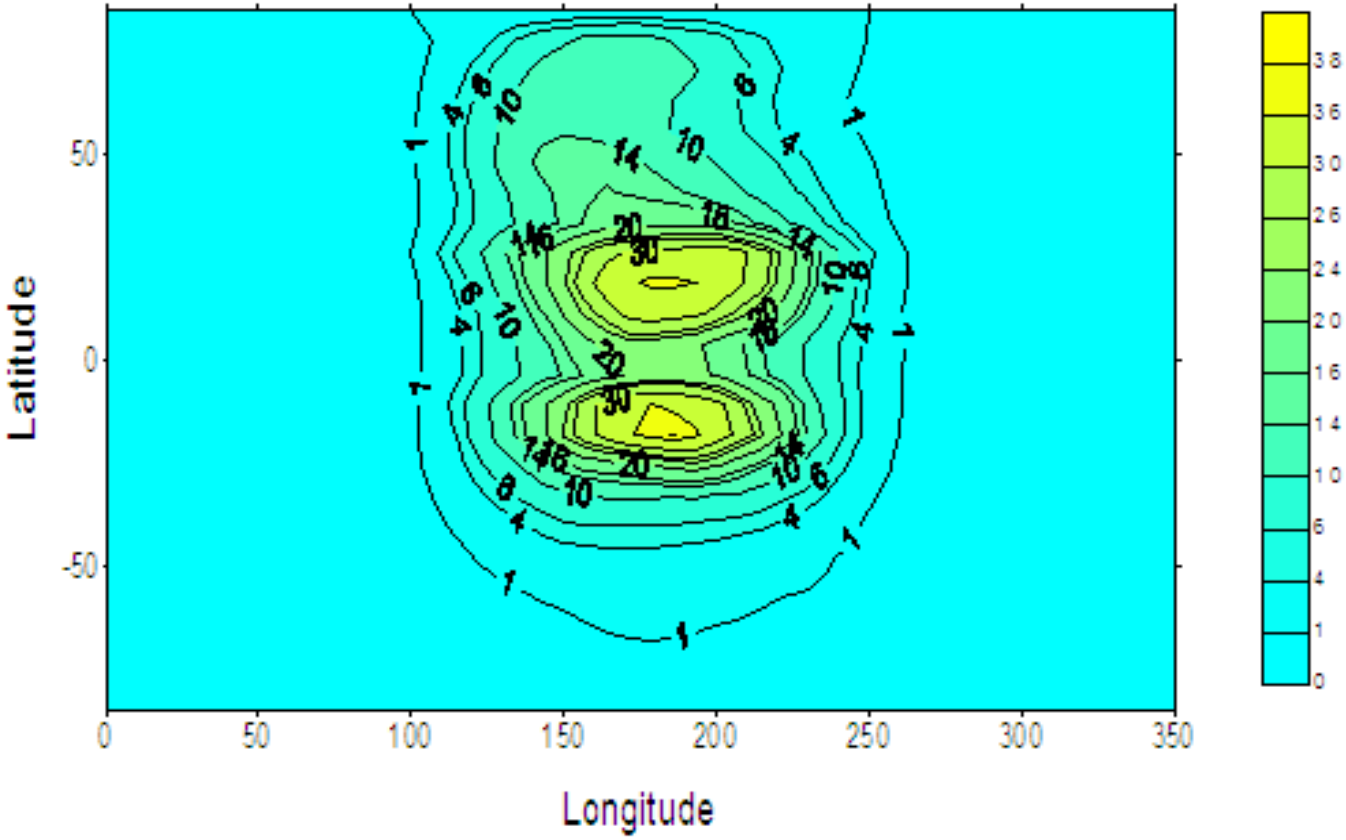


electron density, 60 km (number/cm**3)

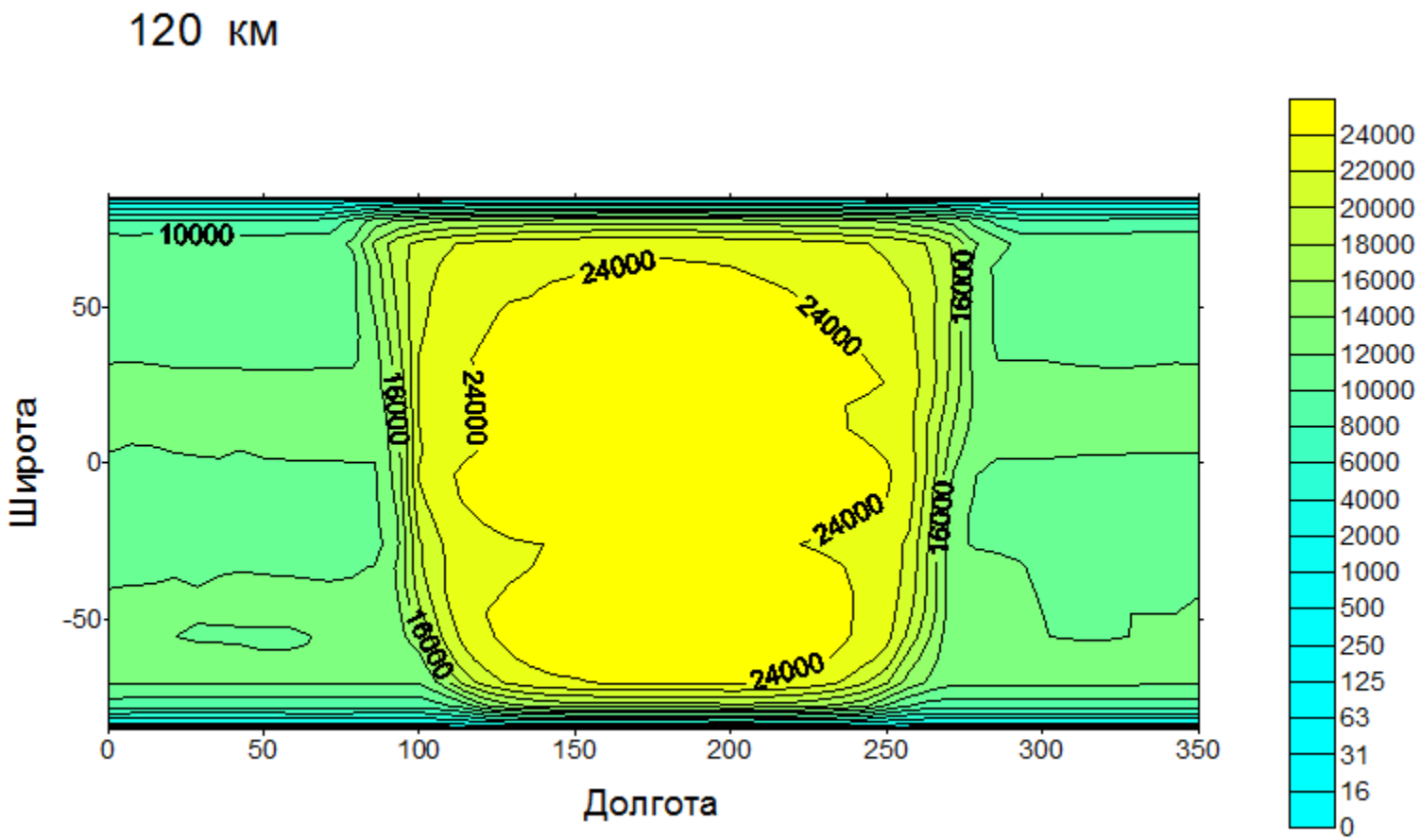
1st March (00:00 UT)



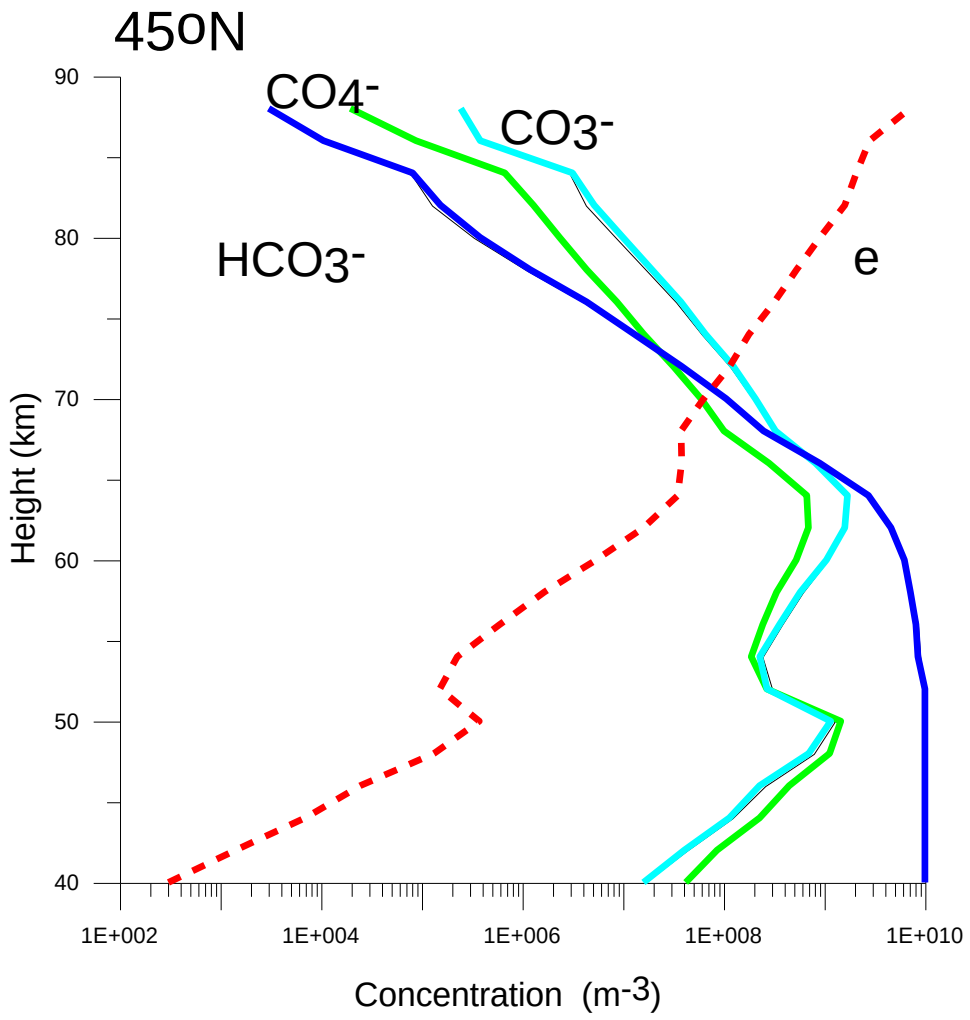
NO^+ (number/cm**3) at 80 km
1st March (00:00 UT)



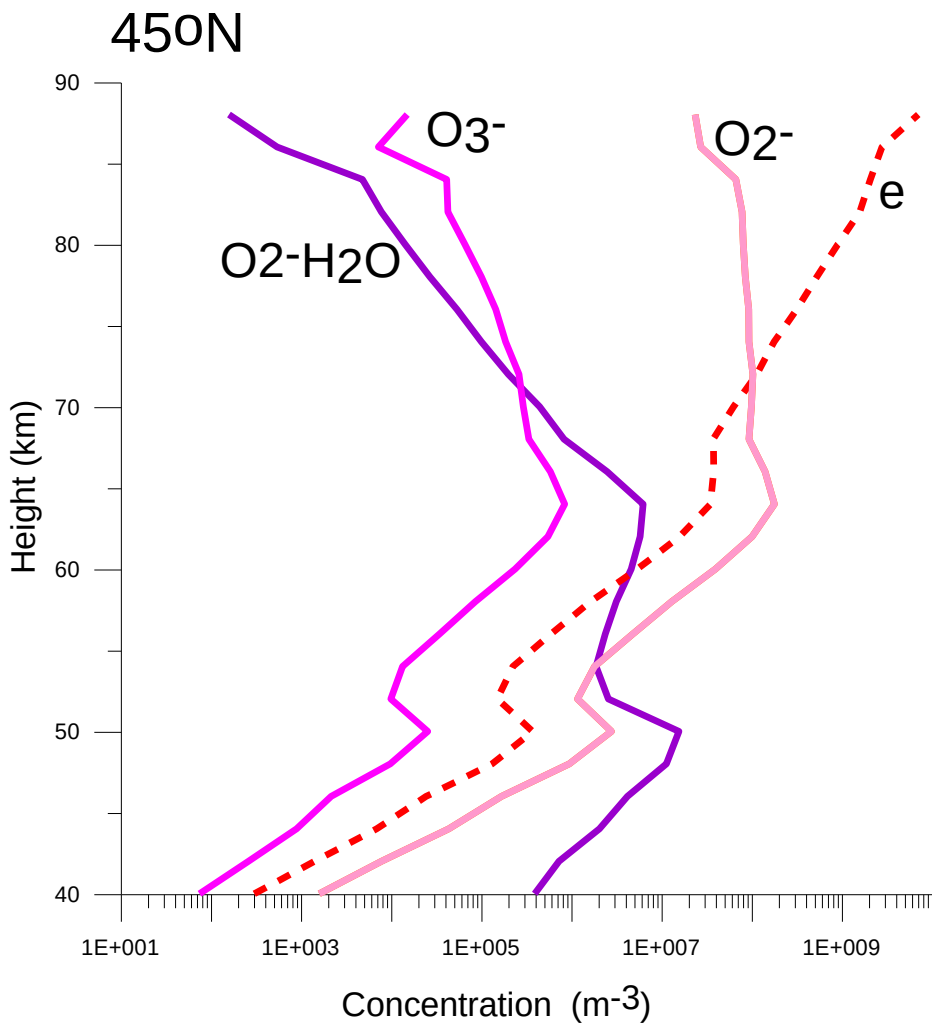
Глобальное распределение электронной концентрации на высоте 120 км (равноденствие)



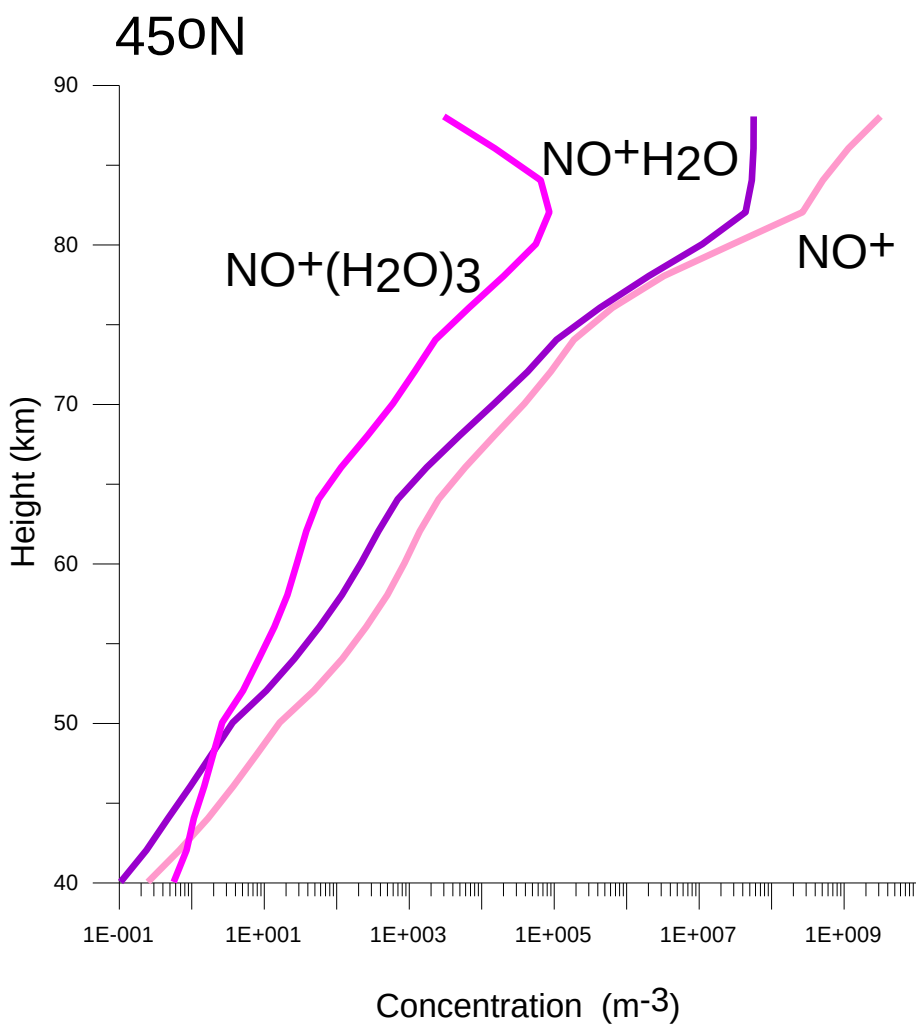
1st March (noon)



1st March (noon)



1st March (noon)

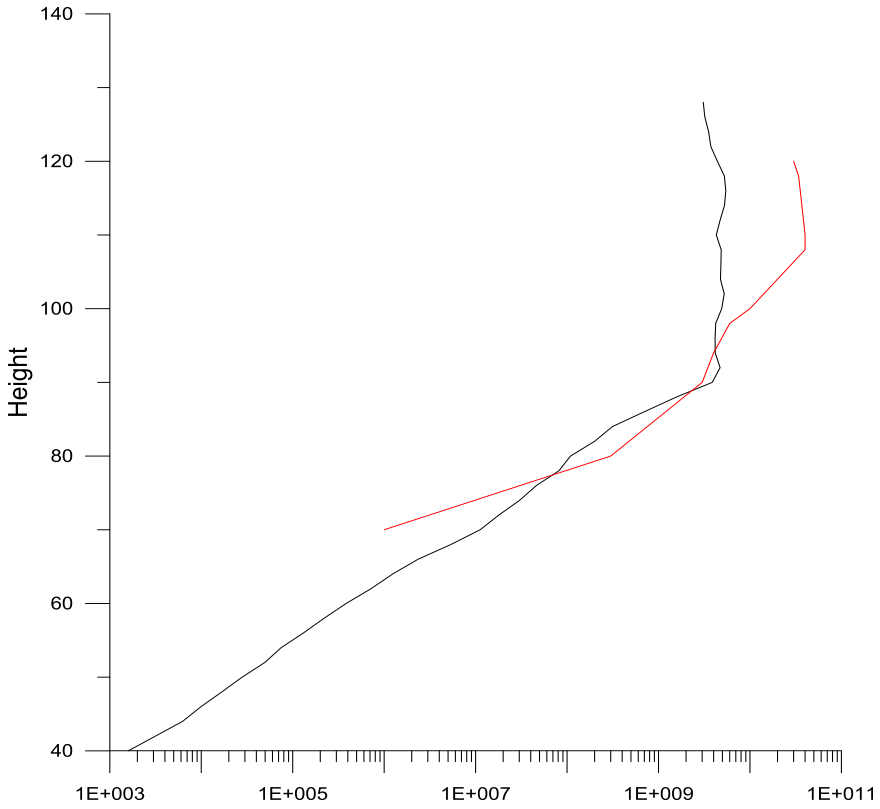


Результаты

Электронная концентрация (средние широты, полдень)

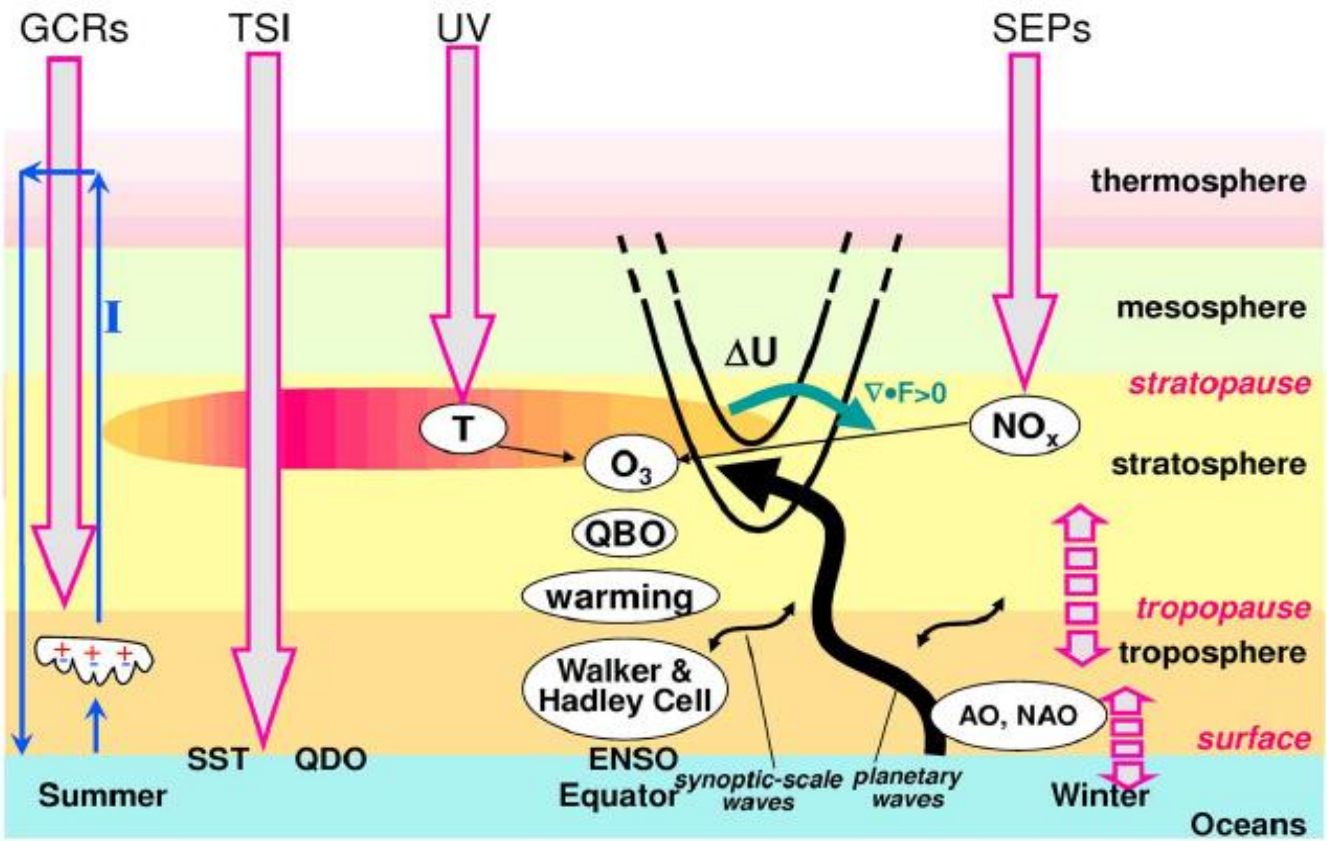
_____ Модель CHARM -DE

_____ Ракеты

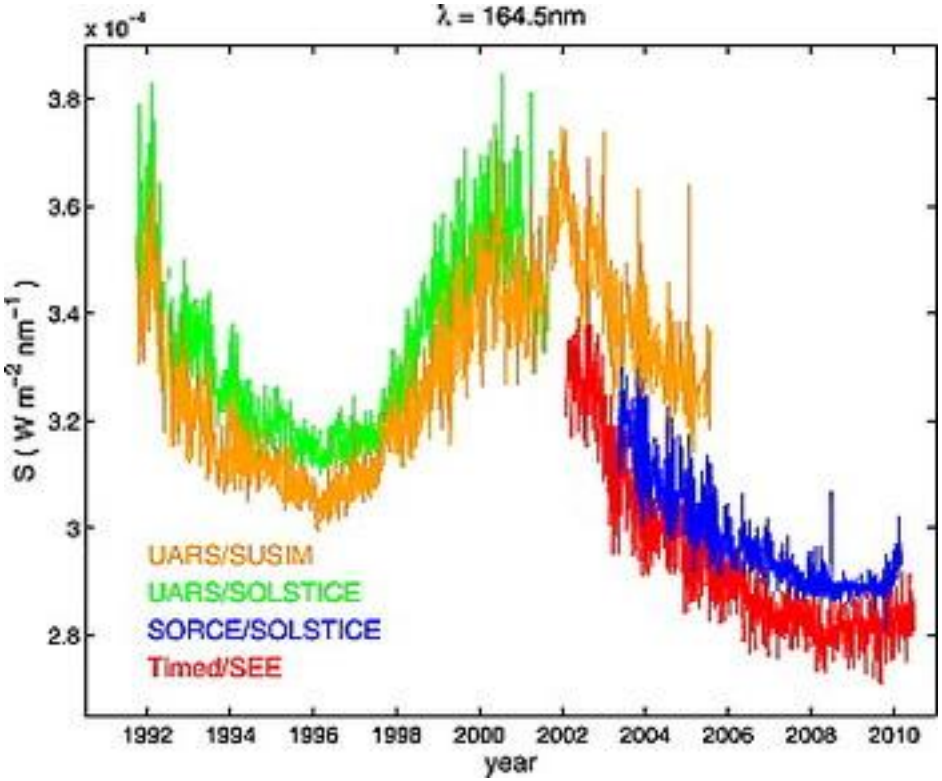


Воздействие факторов солнечной акттивности на атмосферу Земли

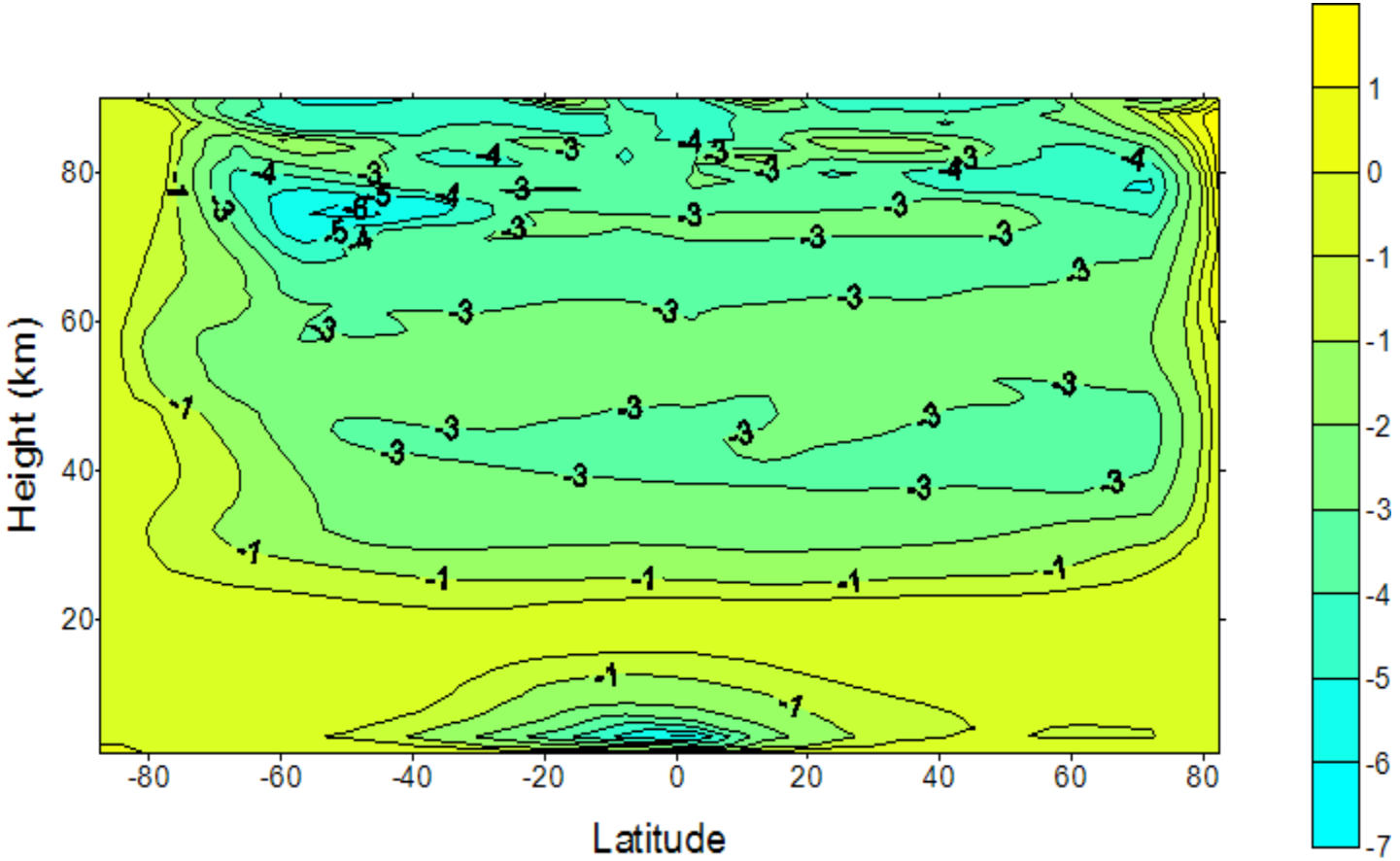
(Gray et al., 2012)



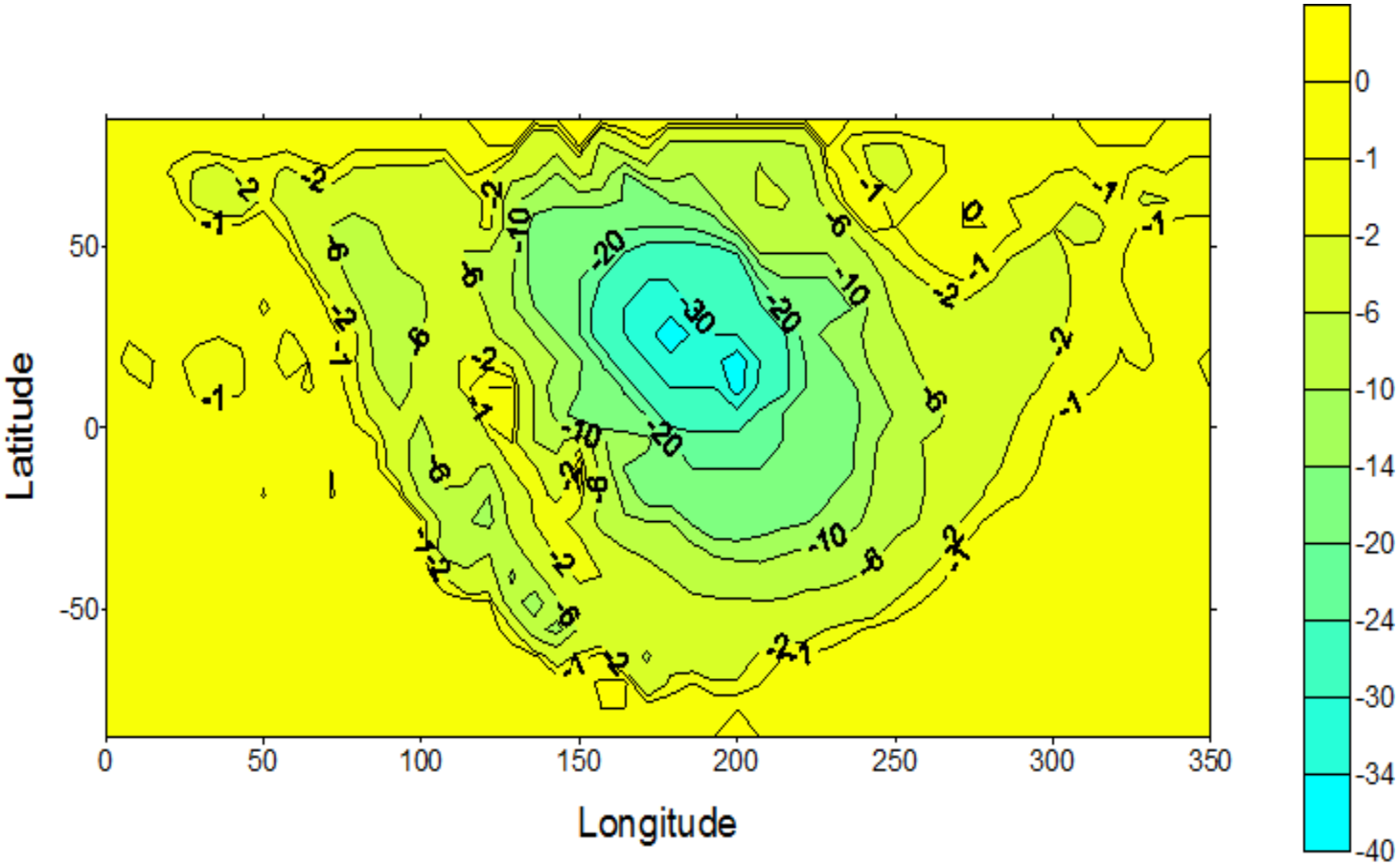
Изменения интенсивности солнечной УФ радиации по данным спутниковых наблюдений



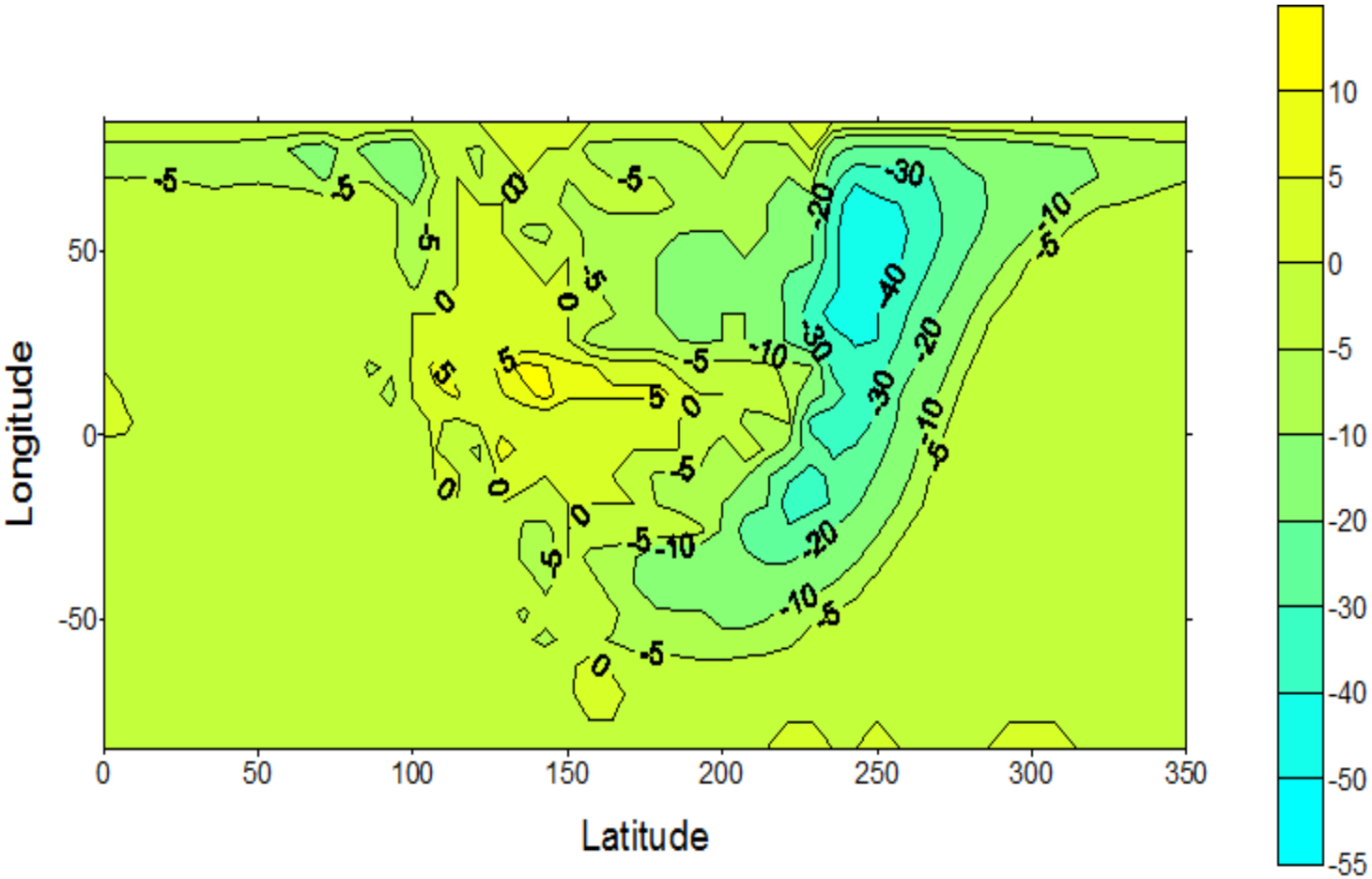
O3 changes (%) 2008-2003
(model simulations)



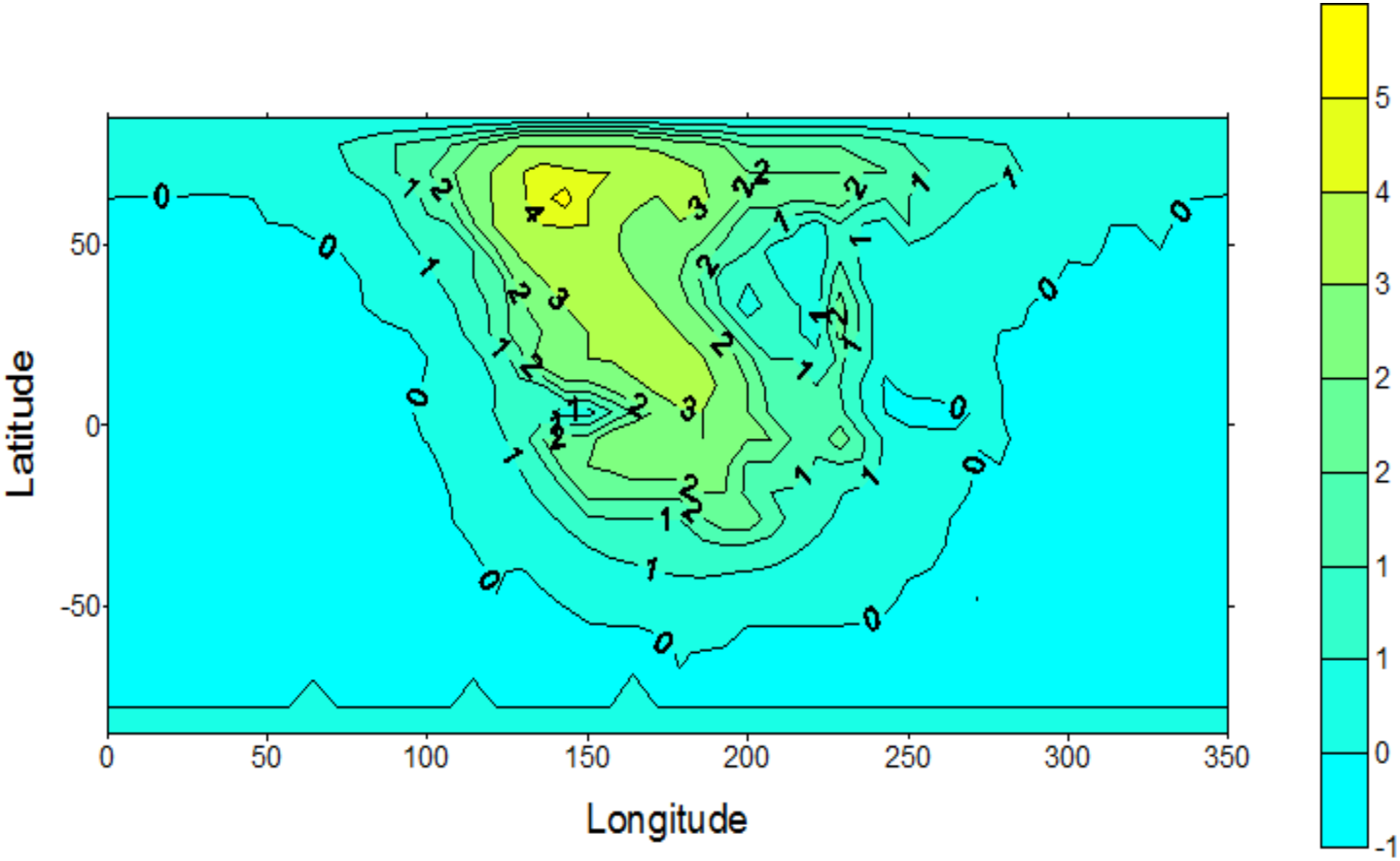
Changes in electron density (%) at 76 km
2008-2003



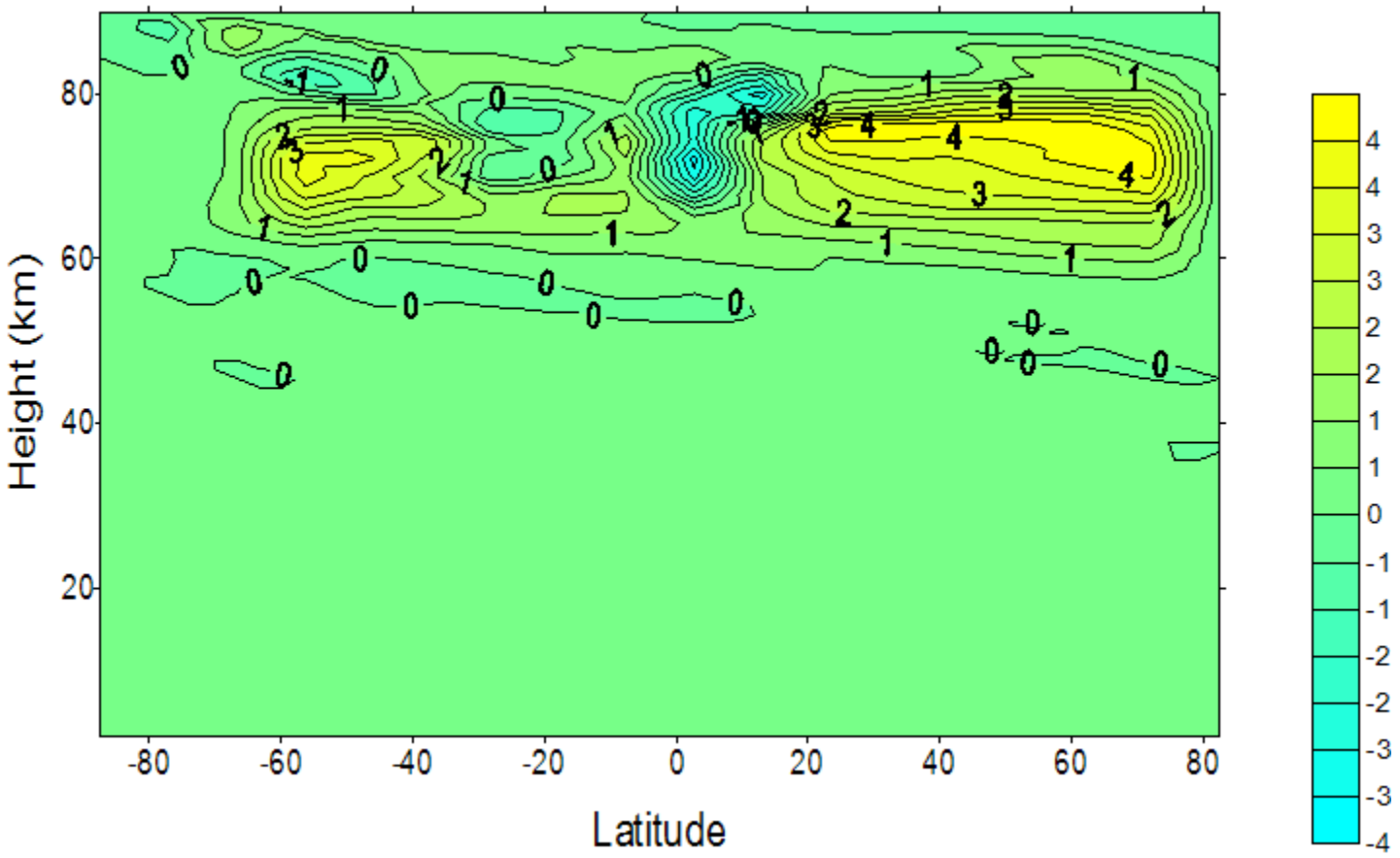
Changes in electron density (%) at 80 km
2008-2003



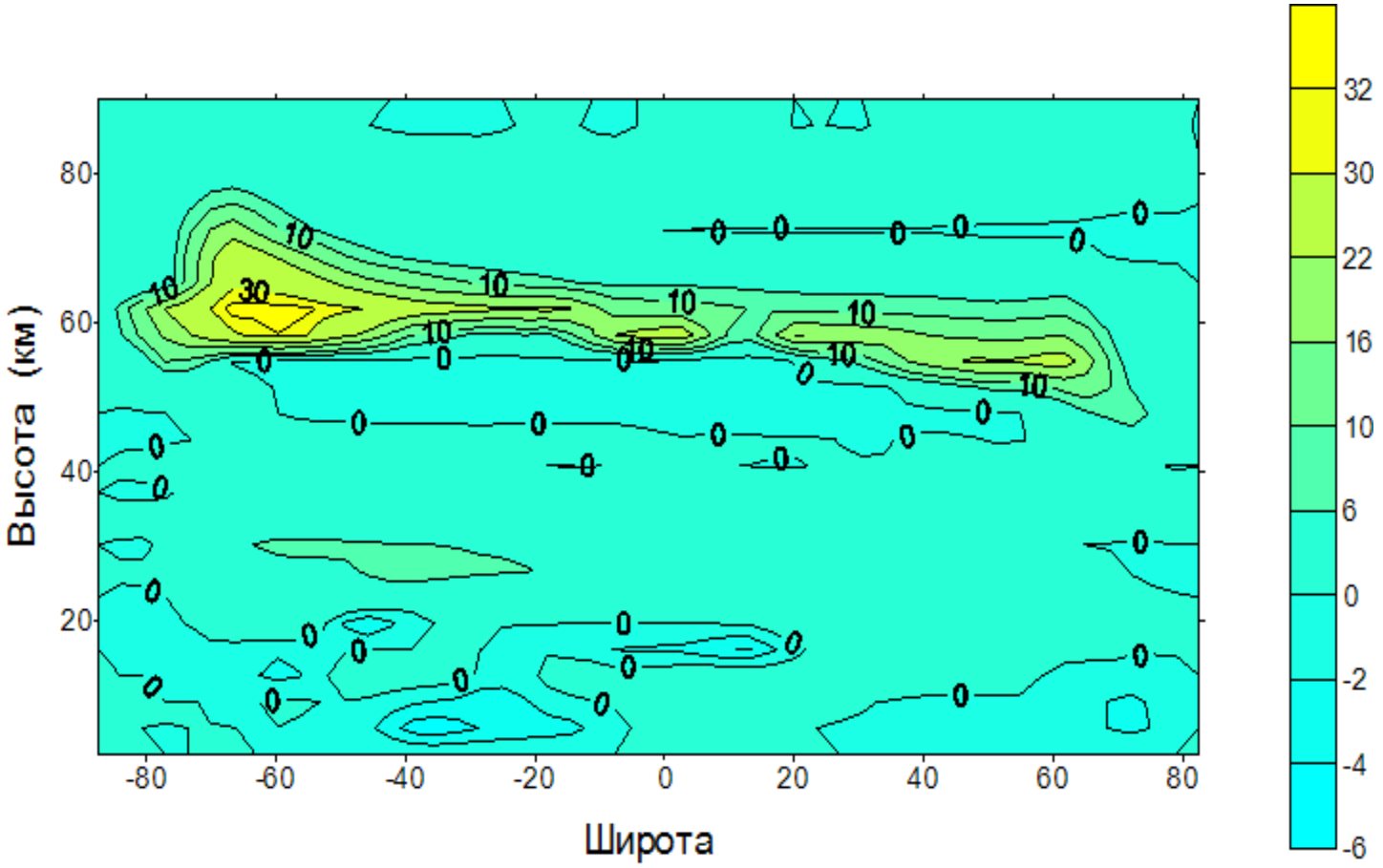
Changes in O^+_2 (%) at 80 km
2008-2003



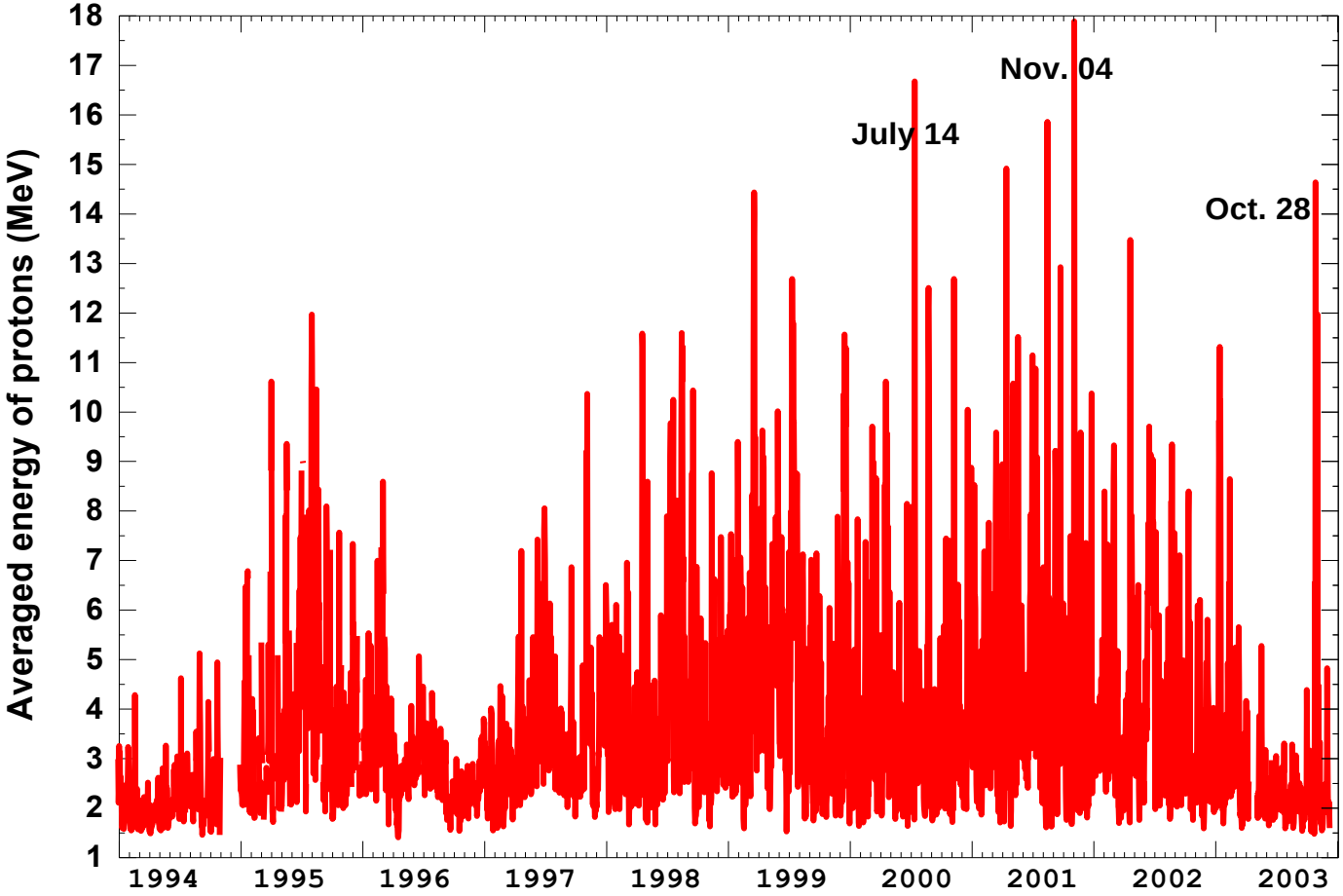
NO+ changes (%)


Height (km)
80
60
40
20
-80
-60
-40
-20
0
20
40
60
80
Latitude
4
4
3
3
2
2
1
1
0
-1
-1
-2
-2
-3
-3
-4

Изменение электронной концентрации (%) в цикле активности Солнца (2009-2003)

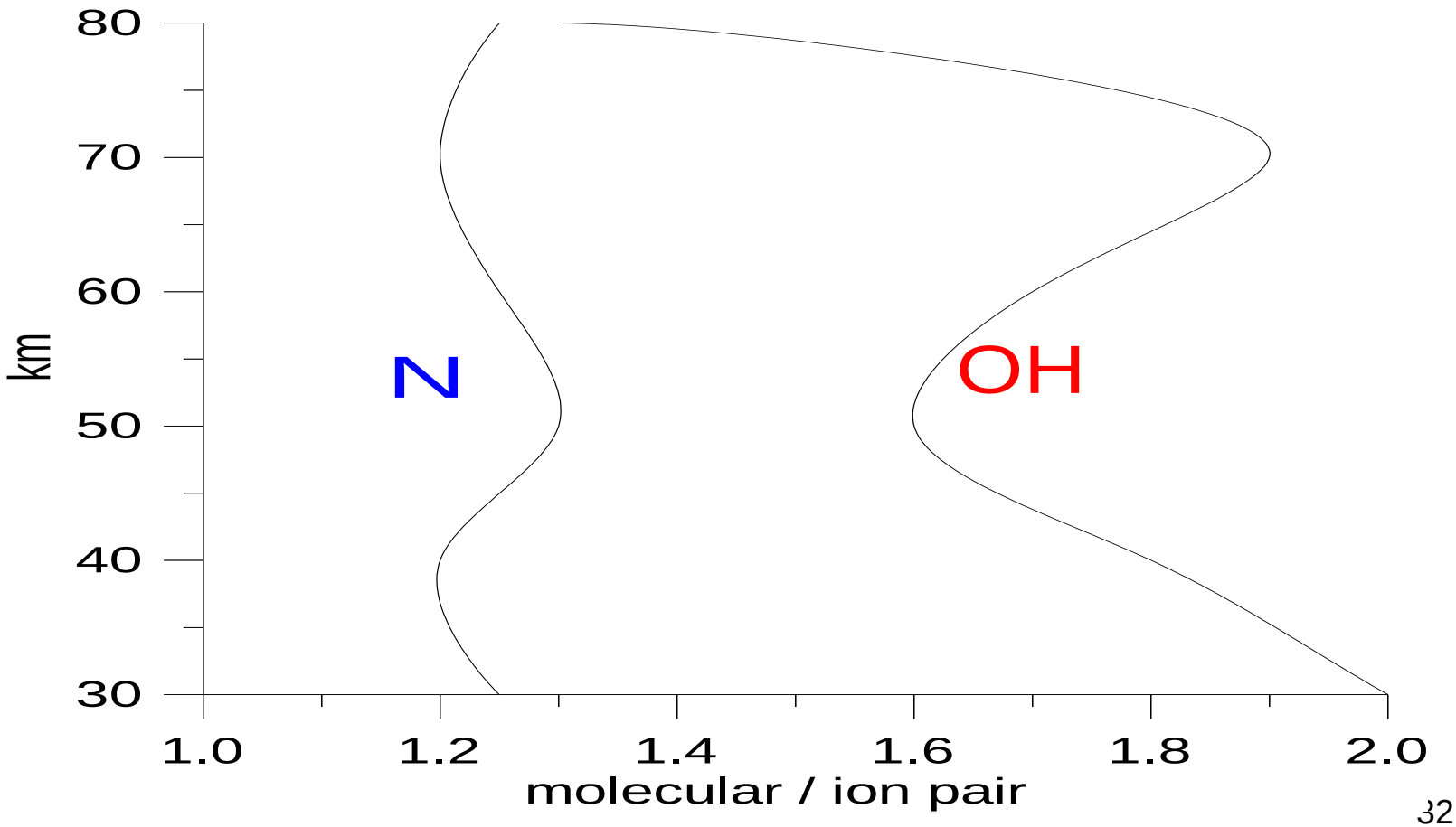


Среднесуточные значения средней энергии солнечных протонов (**1-100 МэВ**) в период **1994-2003 г.г.** по данным спутников серии **GOES**



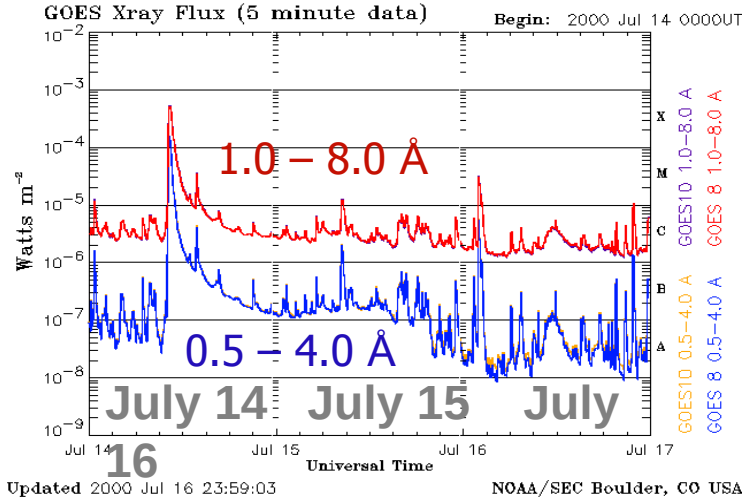
Эффективность образования атомов азота и радикала OH космическими лучами в атмосфере Земли

(Jackman et al., 1976; Solomon and Crutzen, 1981)

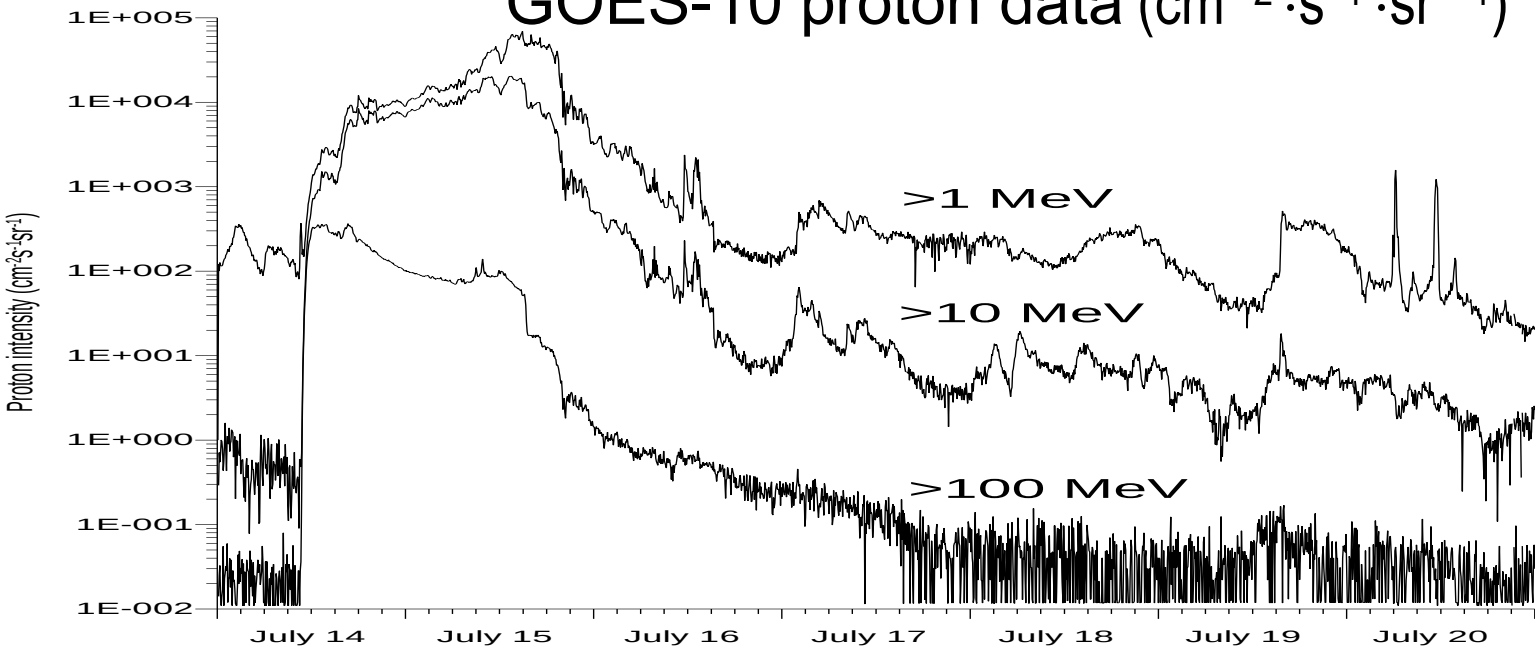


Solar intensities

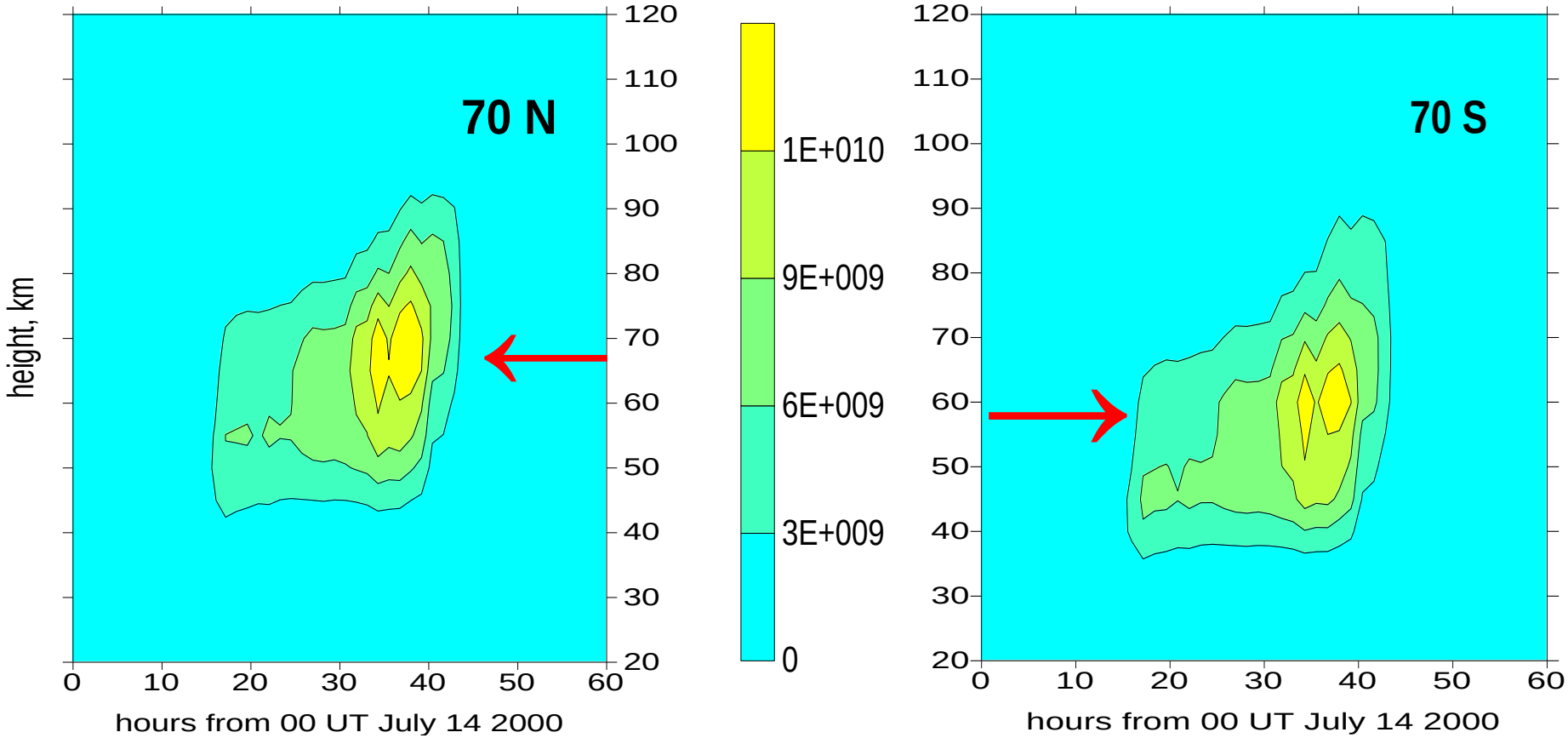
GOES-8 X-ray data (Wm^{-2})



GOES-10 proton data ($cm^{-2} \cdot s^{-1} \cdot sr^{-1}$)

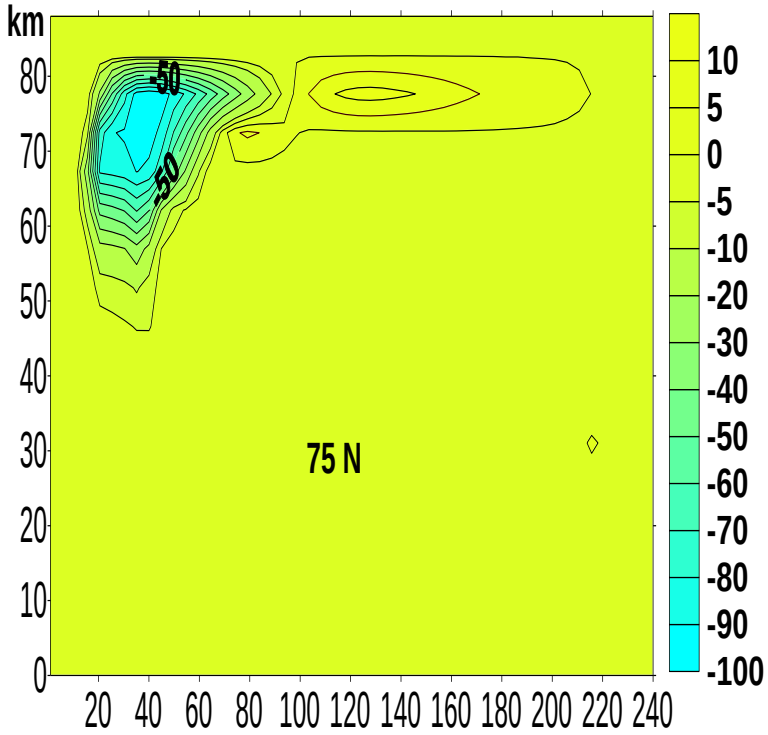


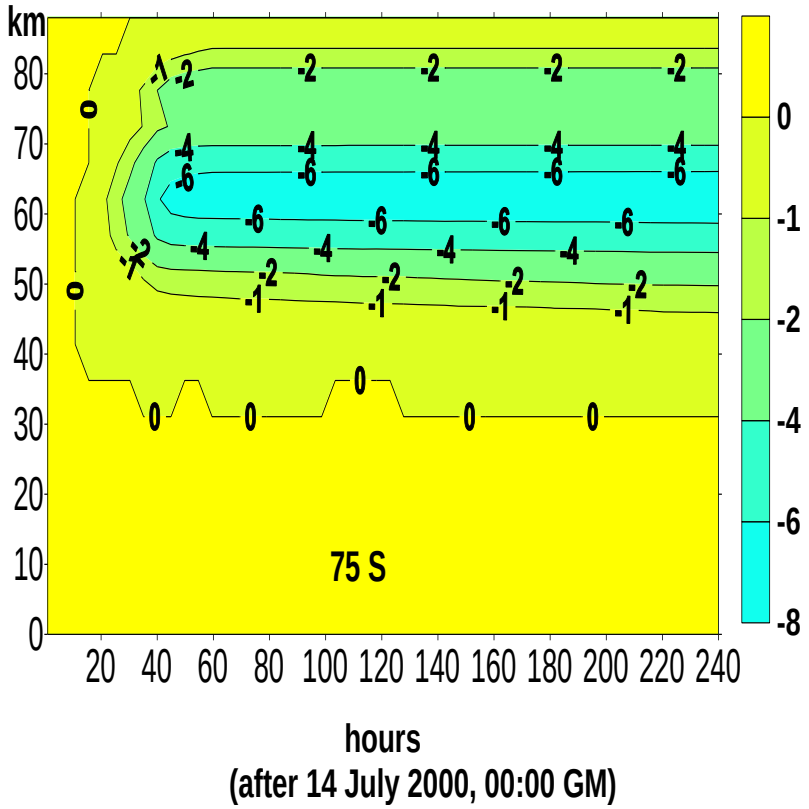
Ionization rates during July 2000 SPE



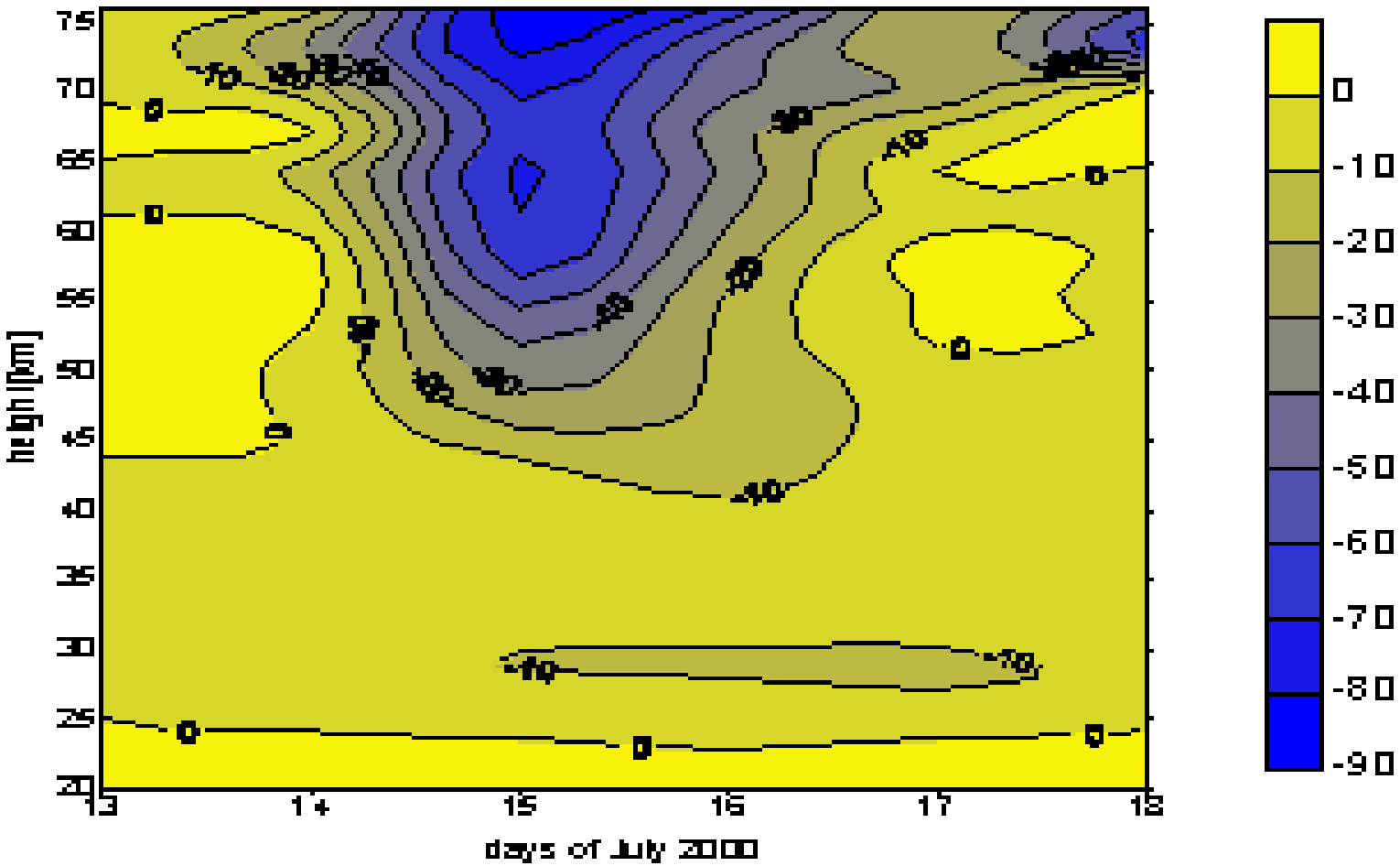
Height of maximum ionization by protons lies lower in the dark South

Изменения в содержании озона (%) в период СПС 14 июля 2000 г. на 75^0 с.ш. и ю.ш. (трехмерное моделирование)





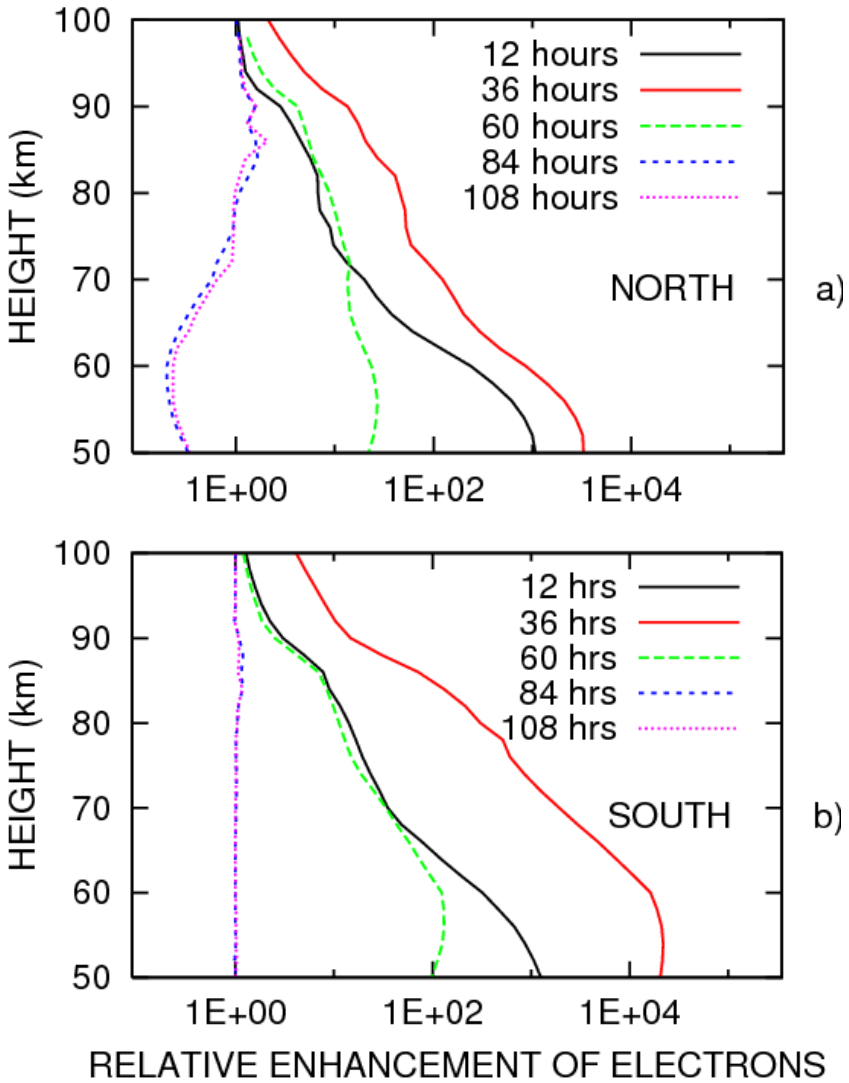
Изменение содержания озона (%) после СПС 14 июля 2000 г. на 68°N по данным спутника UARS (HALOE).



Относительное изменение электронной концентрации нав высоких широтах в период протонной вспышки 14 июля 2000

Фотохимическое моделирование

Ondraskova, Krivolutsky, 2003)



Disturbed to undisturbed electron density ratio

- is greater in the South polar cap 12 hrs (July 14), 36 hrs (July 15)
- in the South the disturbance vanished 84 hrs after 00 UT July 14

Чувствительность поглощения радиоволн к возмущению электронной концентрации в период СПС

Коэффициент преломления ЭМВ в ионизированной среде (формула Эплтона)

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - 0,5Y_T(1 - X - iZ) \pm [0,25Y_T^4(1 - X - iZ)^2 + Y_L^2]^{1/2}},$$

$$X = \frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_e \omega^2}, \quad Y_L = \frac{eB_L}{m_e \omega}, \quad Y_T = \frac{eB_T}{m_e \omega},$$

$$Z = \frac{\nu_C}{\omega},$$

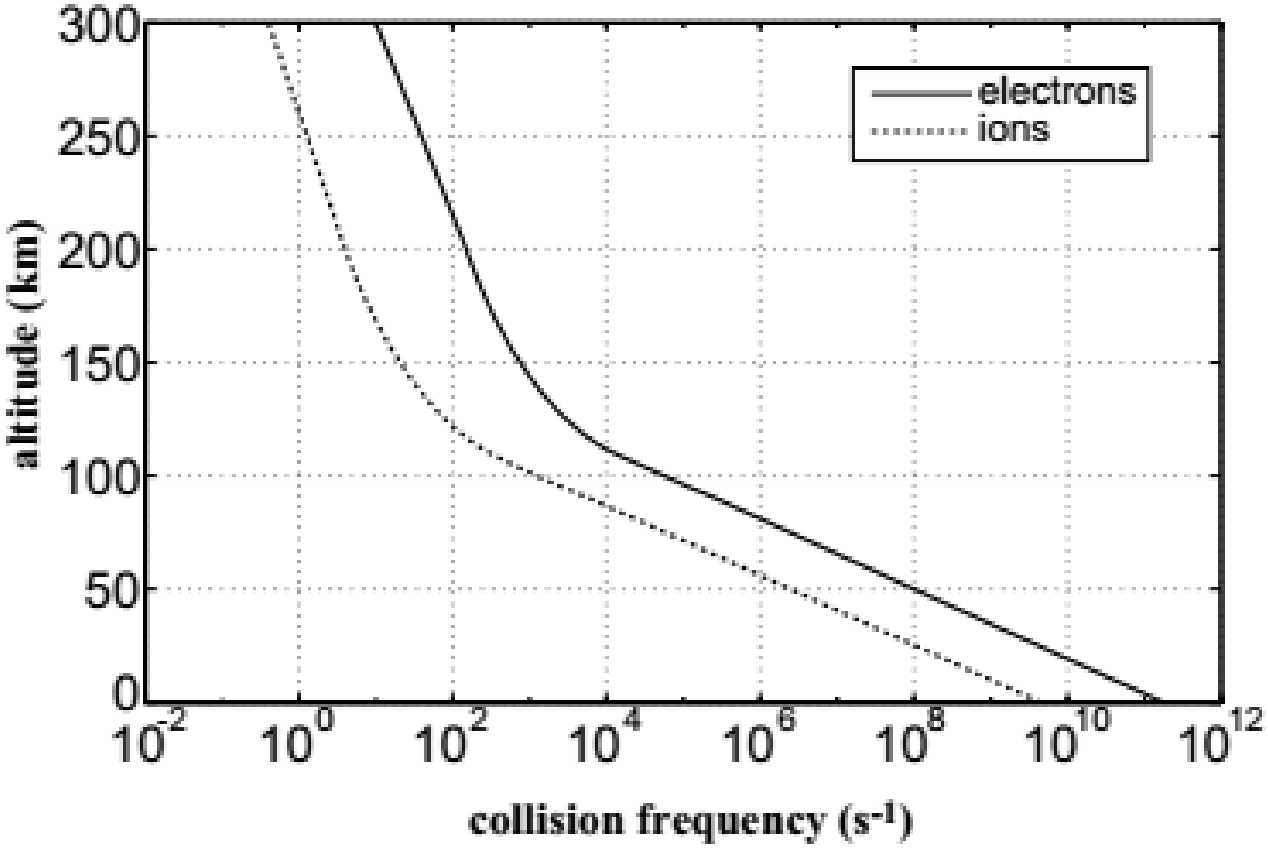
Где ω – частота ЭМВ; e, m_e – заряд и масса электрона; Y_L , Y_T - описывают влияние продольной (B_L) и поперечной (B_T) компонент магнитного поля Земли, Z – безразмерный параметр, учитывающий влияние соударений электронов с нейтралами ν_C.

Уравнение Эплтона для высокочастотных ЭМВ (f > 30 МГц, пренебрегаем влиянием магнитного поля)

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ} = 1 - \frac{X}{1 + Z^2} - \frac{iXZ}{1 + Z^2},$$

$$K = \frac{\nu_C n_e e^2}{2\varepsilon_0 m_e c(\omega^2 + \nu_C{}^2)},$$

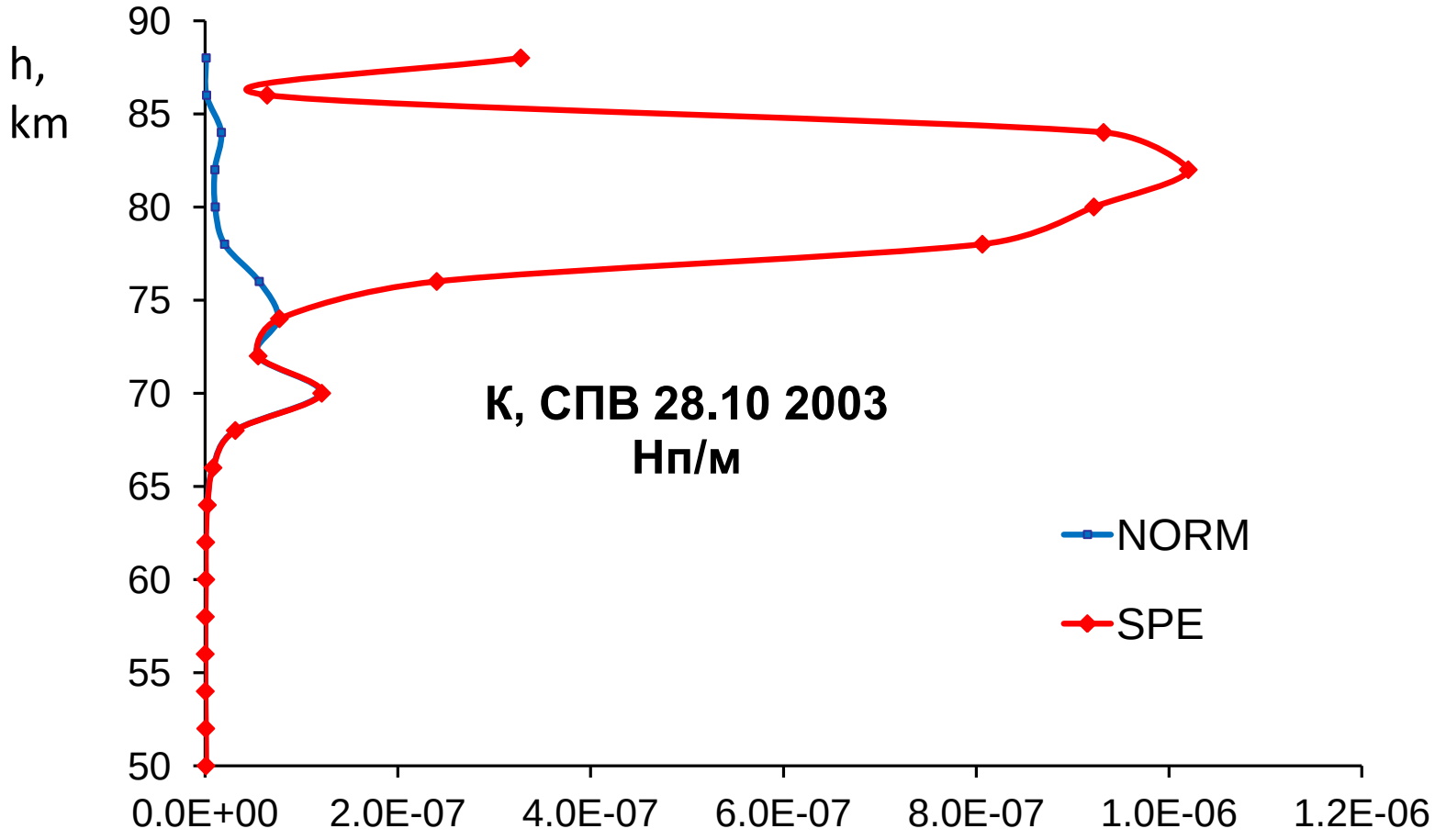
где K - коэффициент поглощения (е.и. - Непер/м).



Частота соударений электронов и ионов по [Steven A. Cummer,2000]

- Steven A. Cummer, Umran S. Inan. **Ionospheric *E* region remote sensing with ELF radio atmospherics.** Published in *Radio Science, 35*, 1437, November–December 2000.

Изменения К, Нп/м, в период Солнечной Протонной Вспышки (на примере СПВ 28.10.2003)



Публикации с описанием численных моделей

- **[1]** Криволуцкий А.А., Черепанова Л.А., Репнев А.И., Вьюшкова Т.Ю., Трехмерная численная глобальная фотохимическая модель CHARM-I. Учет процессов в области D ионосферы. Геомагнетизм и аэрономия, том 55, № 4, с. 483-503, 2015.
- **[2]** Криволуцкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Черепанова Л.А., Куколева А.А., Репнев А.И., Банин М.В. Трехмерная глобальная фотохимическая модель CHARM. Учет вклада солнечной активности. Геомагнетизм и аэрономия, том 55, № 1, с. 64-93, 2015.
- **[3]** Криволуцкий А.А., Репнев А. И. Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. М.: ГЕОС, 384 с., 2009.

- **СПАСИБО!**