

Конференция «Прогноз – 2026), ИЗМИРАН

**ГЛОБАЛЬНАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ
CHARM-DE ДЛЯ ВЫСОТ 0-130 КМ**

А.А. Криволуцкий, М.В. Банин, Т.Ю. Вьюшкова, Л.А. Черепанова

Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета
г. Долгопрудный М.О.

krivolutsky@mail.ru, baninmax@yandex.ru

АБСТРАКТ

Модель **CHARM-DE (CHEMICAL ATMOSPHERIC RESEARCH MODEL WITH D AND E REGIONS)** является развитием первой в России трехмерной глобальной фотохимической модели нейтрального состава (озон и другие составляющие) **CHARM /1/**.

В новой версии модели верхняя граница поднята до высоты 130 км (было 90 км) и добавлены ионные составляющие. Таким образом теперь кроме глобальных процессов в озоносфере Земли можно исследовать процессы в D и E области ионосферы.

Представлены первые результаты. Описание модели представлено для публикации в журнал Геомагнетизм и аэрномия /2/.

1. А.А. Криволуцкий, Т.Ю. Вьюшкова, М.В.Банин.Трехмерная глобальная фотохимическая модель. **CHARM**. М.: ГЕОС, 2021.

2. А.А. Криволуцкий, М.В. Банин, Л.А. Черепанова, Т.Ю. Вьюшкова. Глобальная численная модель **CHARM**. Учет процессов в области D и E ионосферы. Геомагнетизм и аэрномия (представлено).

Структура доклада

1. Трехмерная глобальные фотохимические модели ЦАО озоносферы и нижней ионосферы (CHARM-DE)
2. Модель общей циркуляции (ARM)
3. Результаты расчетов
4. Выводы и перспективы

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

Уравнения модели :

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

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**

Модель **CHARM-DE**

- Численная фотохимическая глобальная нестационарная модель **CHARM-DE** (Chemical Atmospheric Research Model with D and E regions).
- Модель описывает взаимодействие **127** нейтральных и заряженных химических составляющих, участвующих в **250** фотохимических реакциях. Модель охватывает диапазон высот от поверхности Земли до **высоты 130 км** попадают области **D** и **E** ионосферы.
- Разрешение по пространству: **10 град. X 5 град. X 1 км**
- Шаг по времени – **10 минут**

Нейтральные составляющие

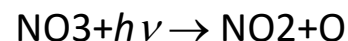
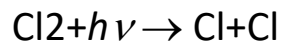
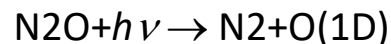
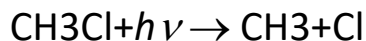
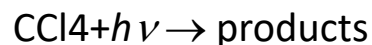
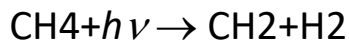
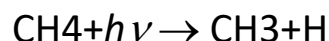
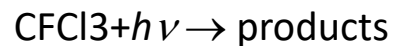
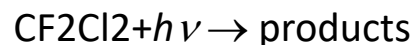
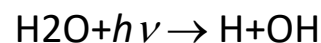
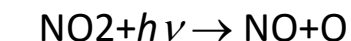
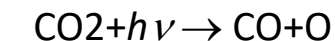
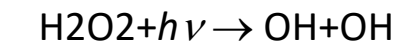
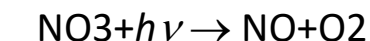
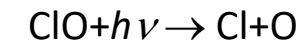
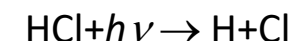
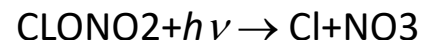
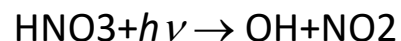
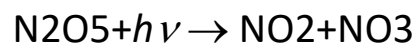
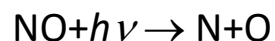
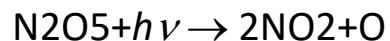
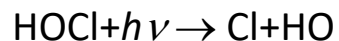
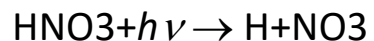
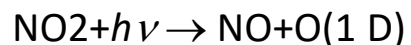
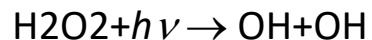
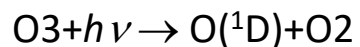
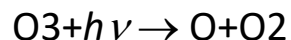
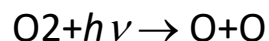
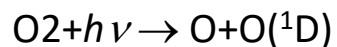
- “Химические семейства”
- $\text{Ox} = \text{O}_3 + \text{O}(^3\text{P}) + \text{O}(^1\text{D})$;
- $\text{NOy} = \text{N} + \text{NO} + \text{NO}_2 + \text{NO}_3 + 2\text{N}_2\text{O}_5 + \text{HNO}_3 + \text{HO}_2\text{NO}_2 + \text{ClNO}_3 + \text{N}(^2\text{D})$;
- $\text{Cl}_y = \text{Cl} + \text{ClO} + \text{OCIO} + \text{ClOO} + \text{HOCl} + \text{HCl}$;
- $\text{HOx} = \text{H} + \text{OH} + \text{HO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}_2$;

Другие составляющие

- $\text{CH}_3, \text{CH}_2\text{O}, \text{CH}_3\text{O}_2, \text{CH}_3\text{O}_2\text{H}, \text{CH}_3\text{O}, \text{CHO}, \text{CO}$.
- $\text{O}_2(^1\Delta_g)$
- Газы-источники
- $\text{CH}_4, \text{CO}_2, \text{N}_2\text{O}, \text{CF}_2\text{Cl}_2, \text{CFCl}_3, \text{H}_2, \text{Cl}_4, \text{Cl}_2, \text{CH}_3\text{Cl}, \text{CH}_2\text{Cl}$,
- $\text{O}_2, \text{N}_2, \text{H}_2\text{O}$.

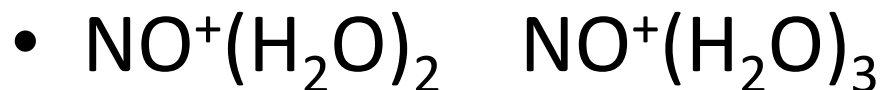
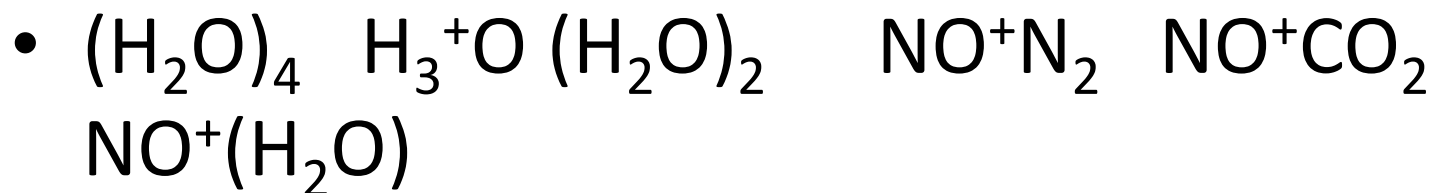
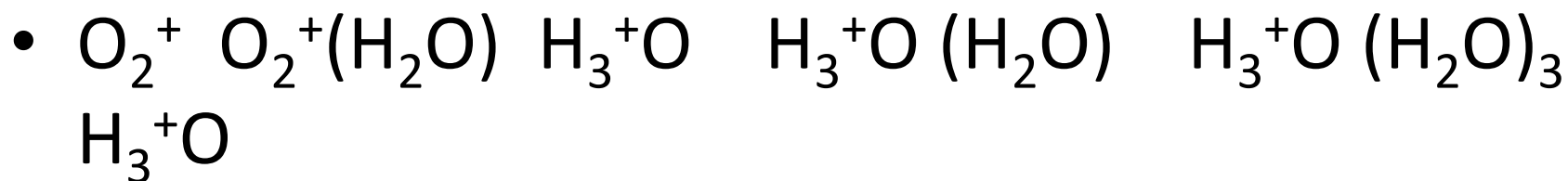


Реакции фотодиссоциации



Электроны и ионы

- ***Положительные ионы***



- ***Электроны и отрицательные ионы***



Ионизирующие факторы

- **1-10 nm** (X-Rays)
- **102,7-111,8 nm** $O_2(^1\Delta_g)$
- $q(z)=n(O_2(^1\Delta_g))\{0,549\cdot 10^{-9}\exp(-2,406\cdot 10^{-20}$
- $N(O_2)+2,614\cdot 10^{-9}\exp(-8,508\cdot 10^{-20}N(O_2))\}$
- **121,6 nm** (L_α) NO
- **CRs** (Heaps, 1978)

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

•

Модель общей циркуляции

(**ARM – Atmospheric Research Model**, Криволуцкий и др., 2015)

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);

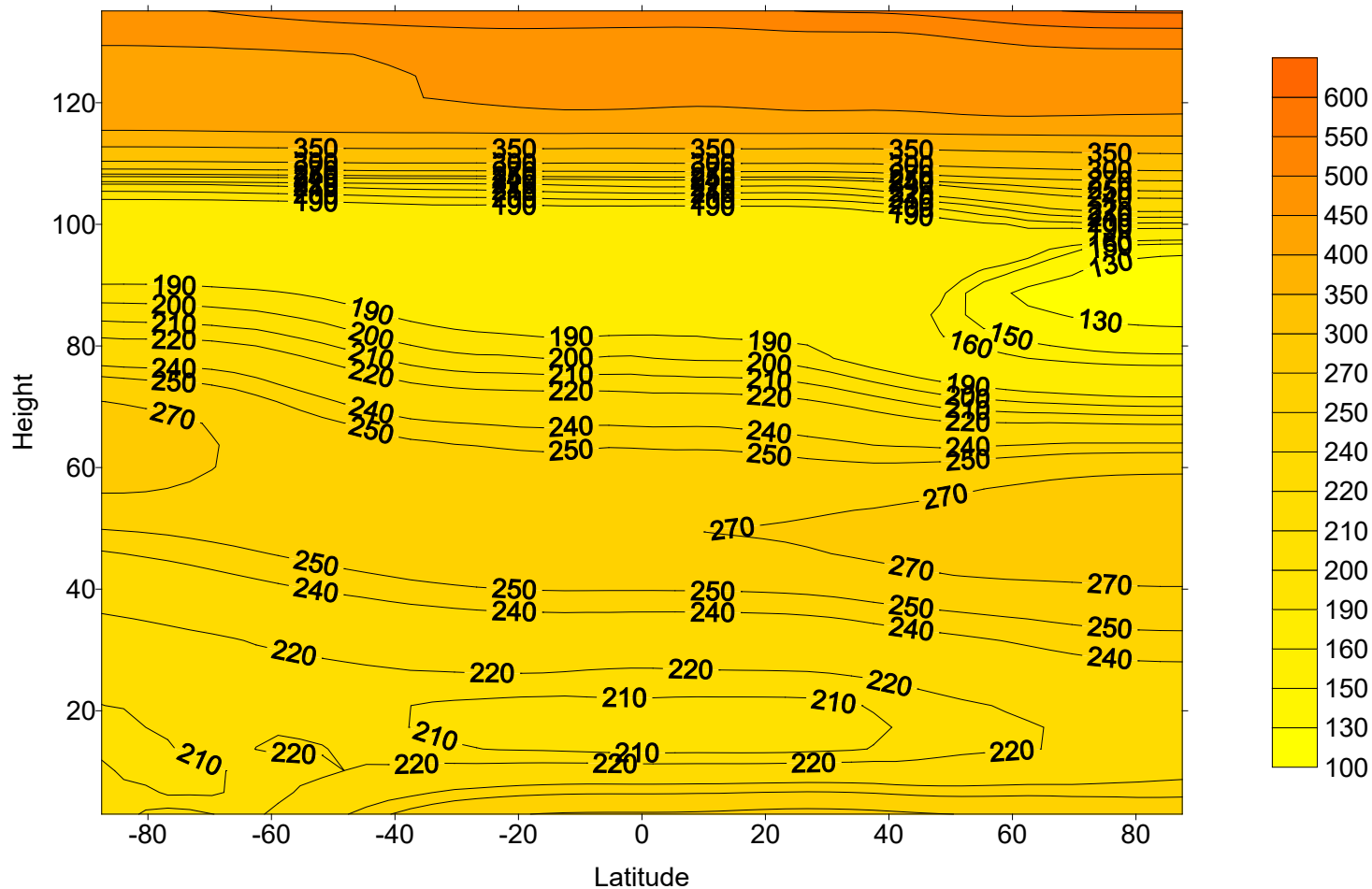
ИК выхолаж.- CO₂, O₃, H₂O, NO

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

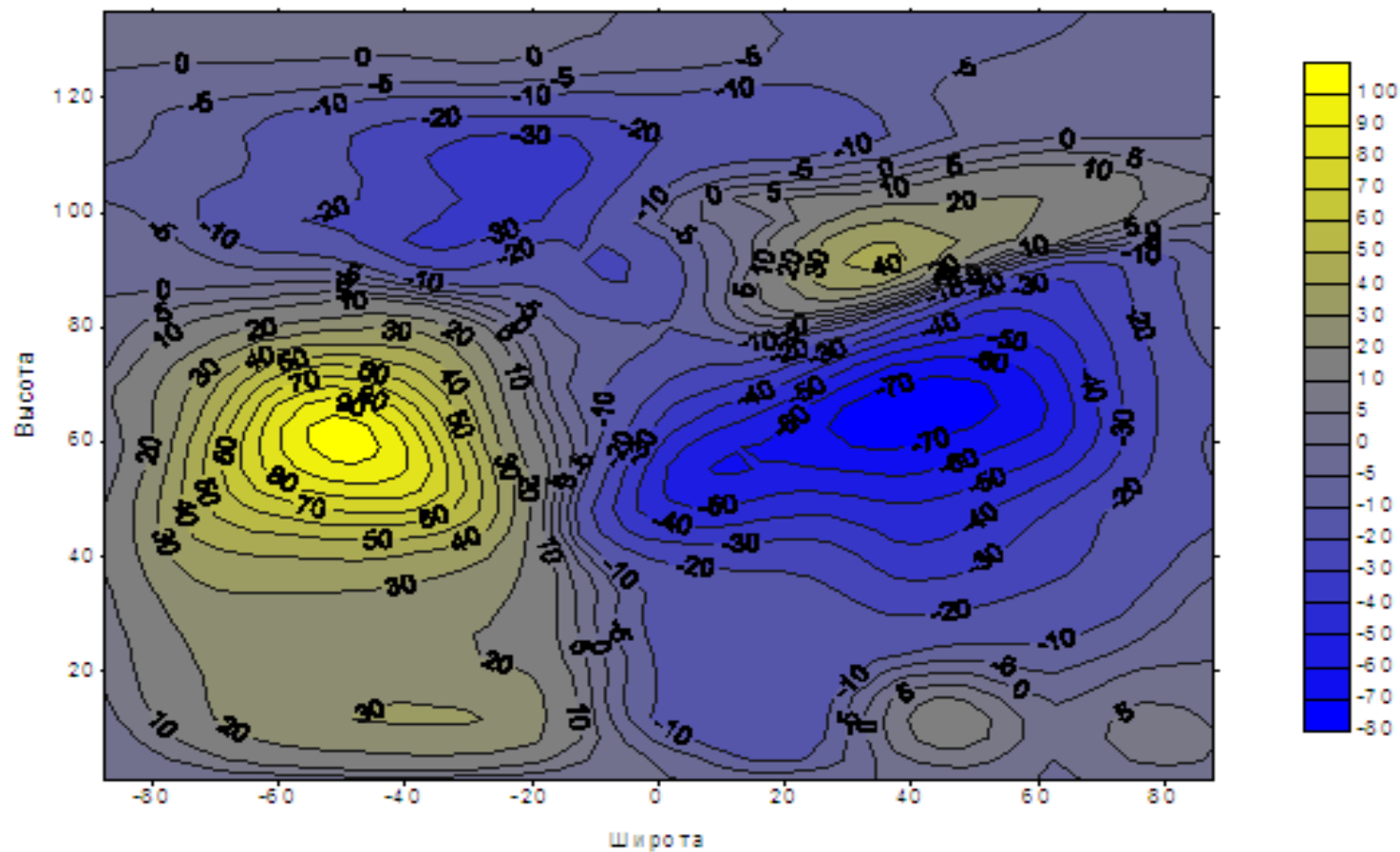
Воздействие ВГВ (Lindzen, 1981) – источники на нижней. гр.

Планетарные волны (источники на нижней границе)

Глобальное поле температуры для июля (расчет по модели ARM)

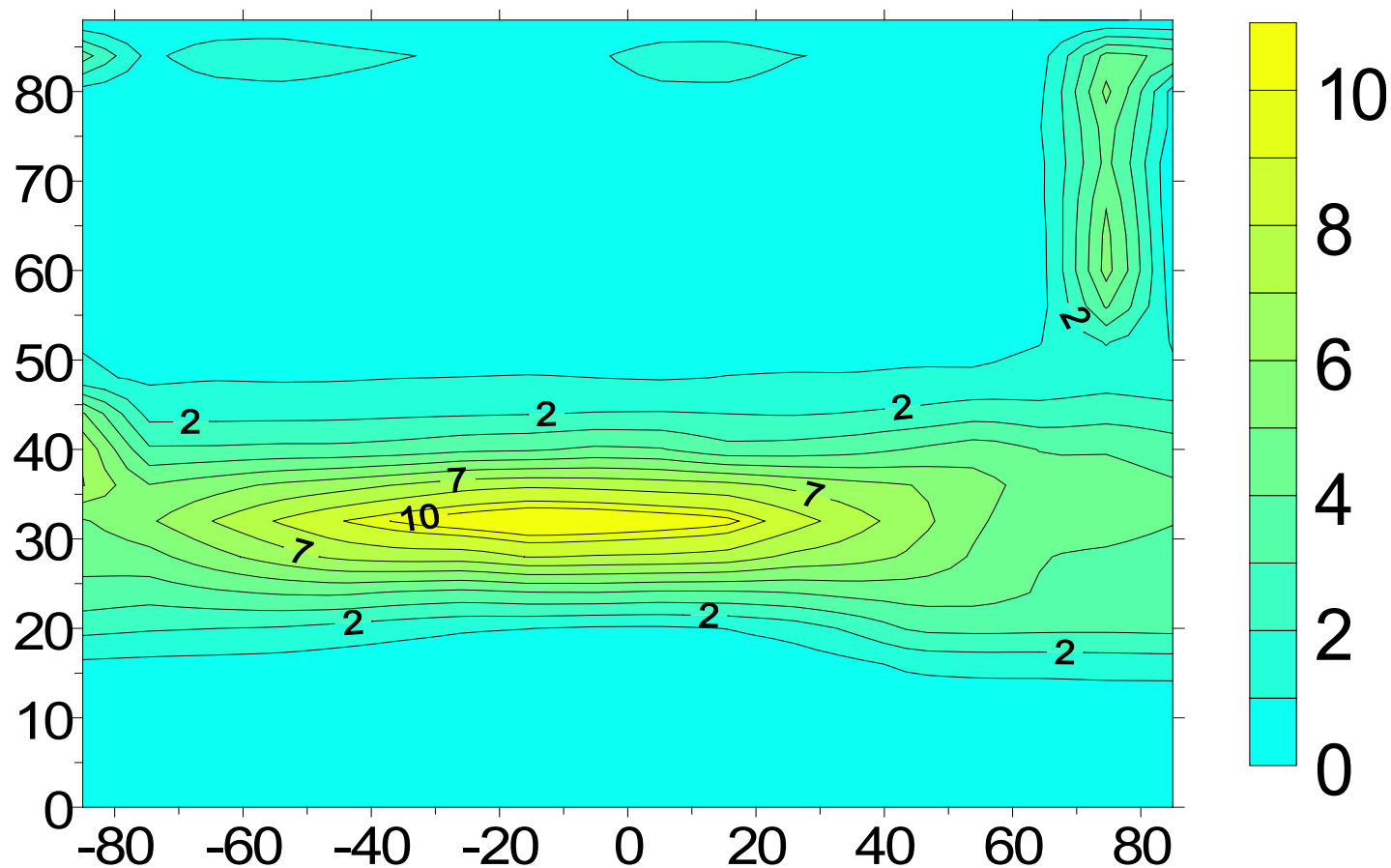


Глобальное распределение скорости зонального ветра (м/с) для июля



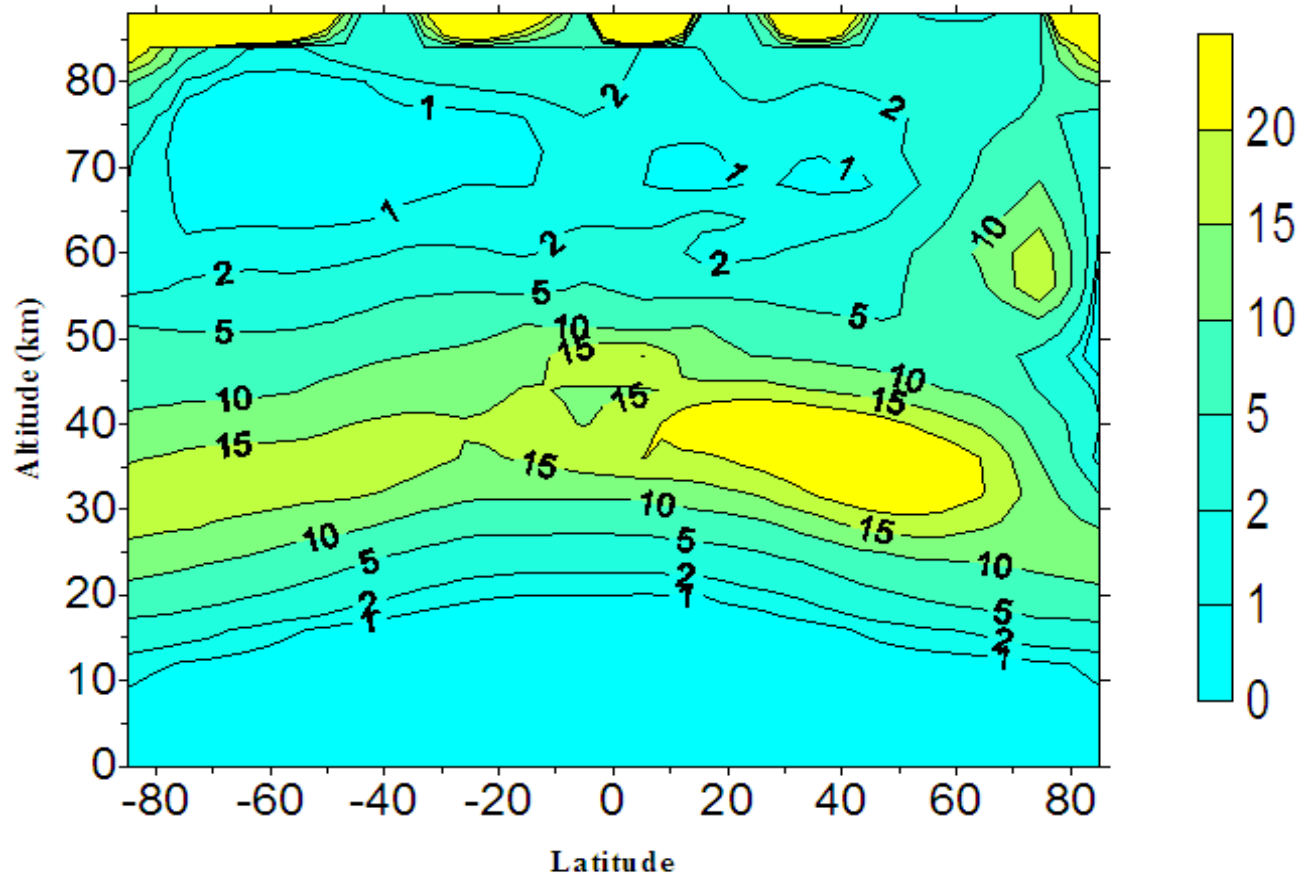
РЕЗУЛЬТАТЫ

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



Пространственное распределение $\text{NO}_y(\text{ppbv})$

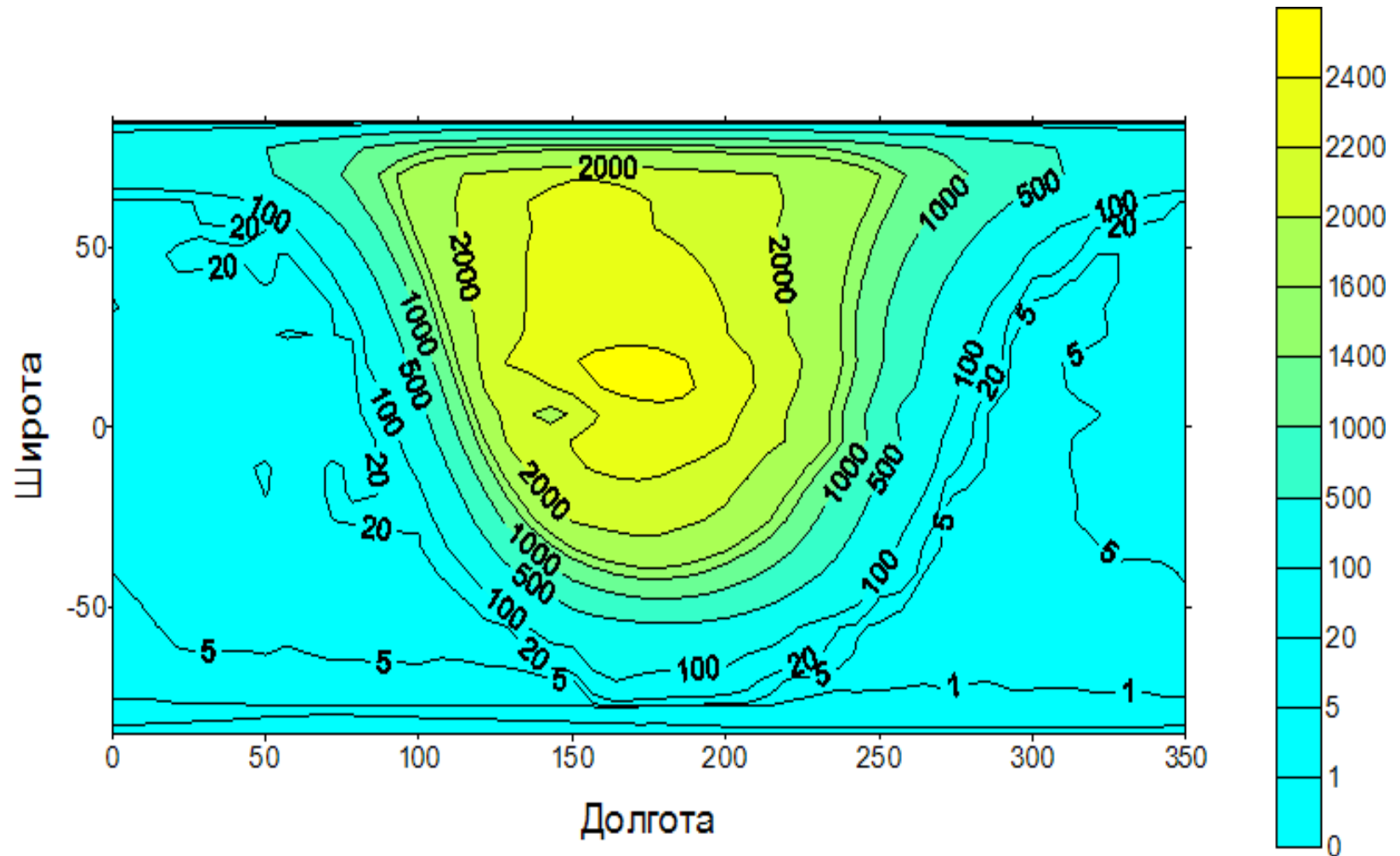
CHARM-DE



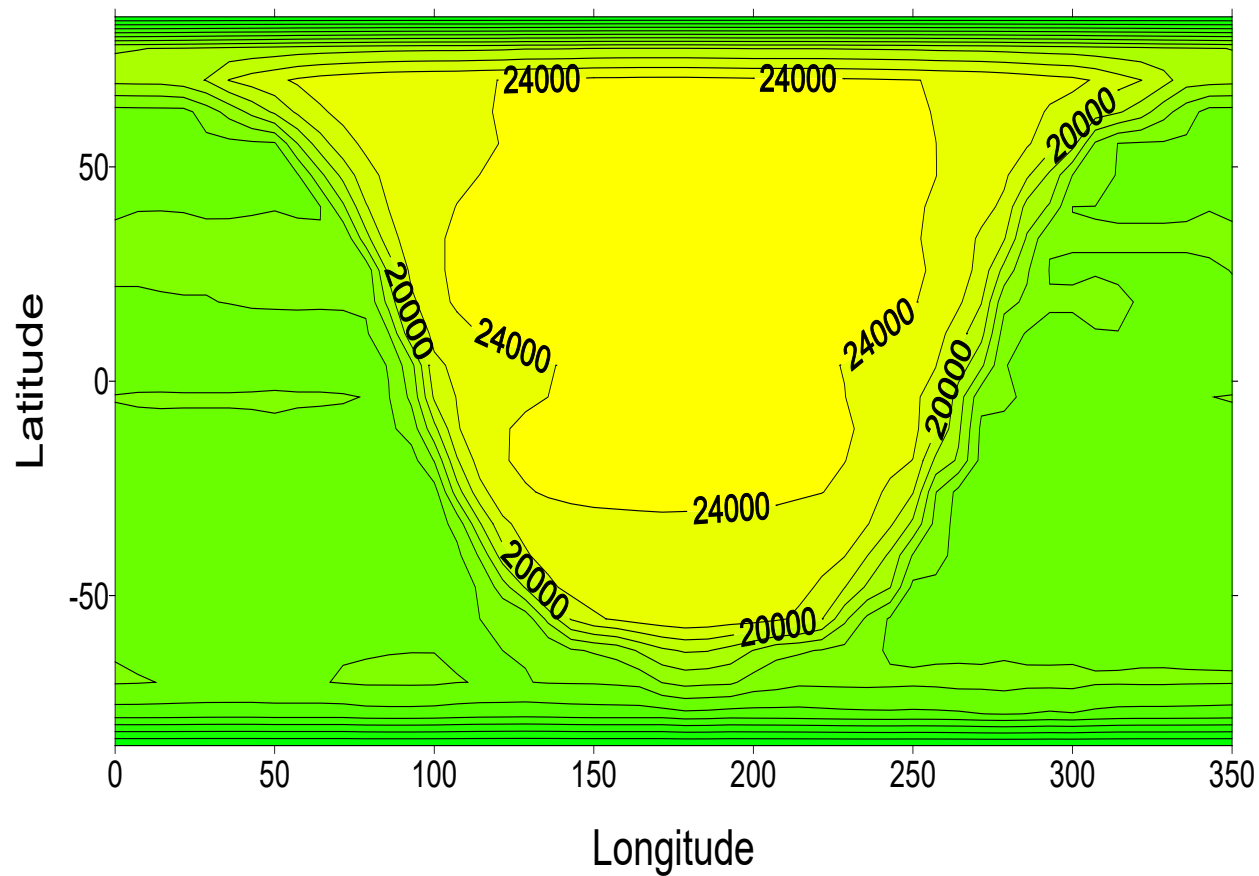
Концентрация электронов на высоте

80 км(number/cm**3) модель

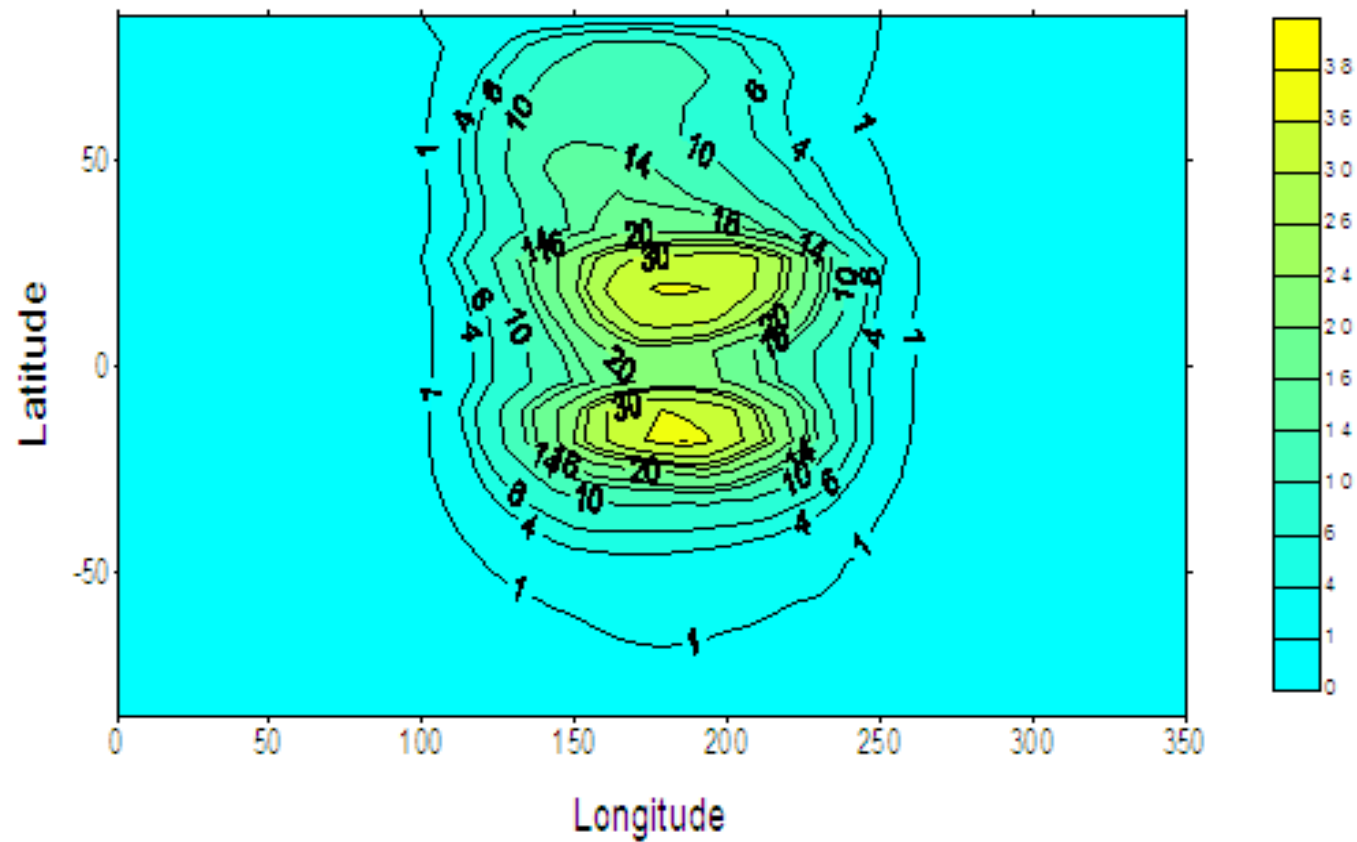
1-е июля (00:00 UT)



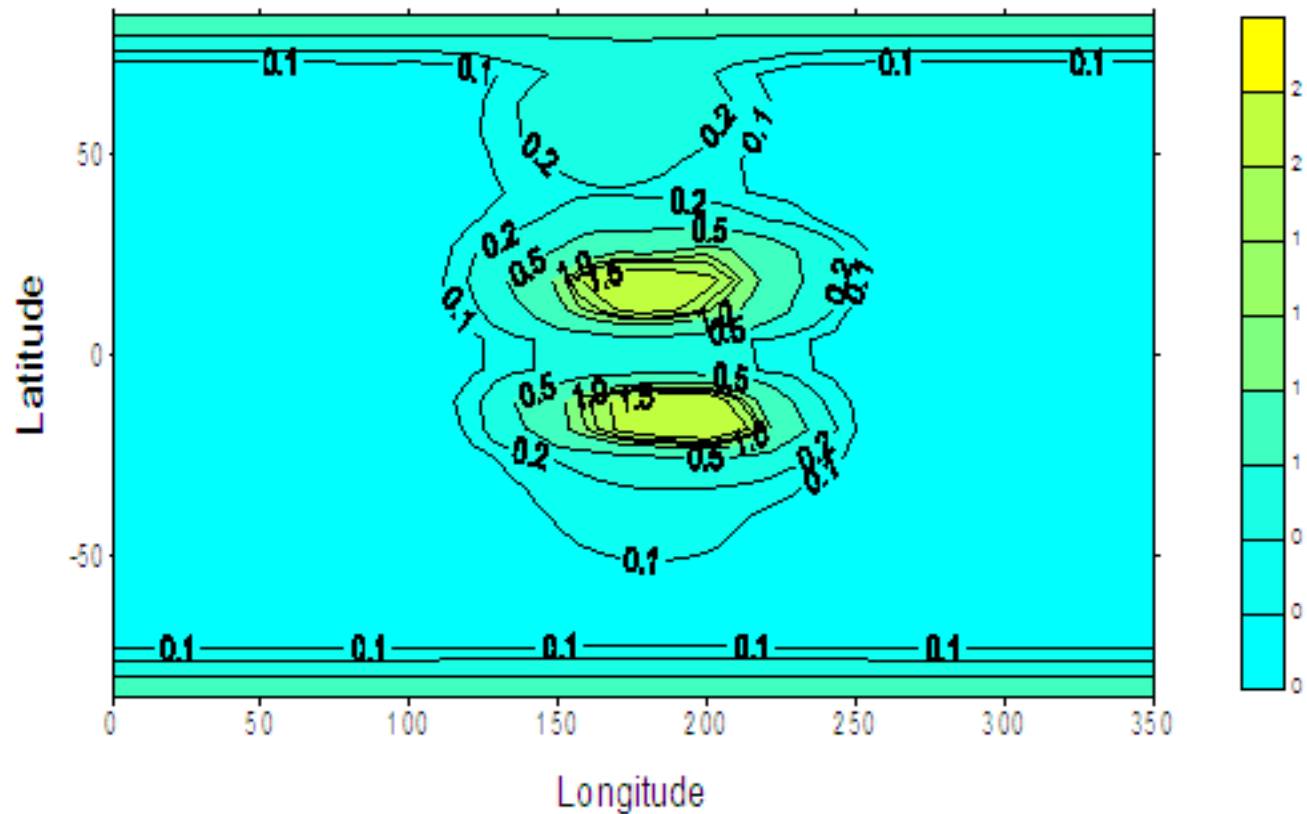
**Глобальное распределение электронной
концентрации (см^3)
на высоте 120 км (июль, модель)**



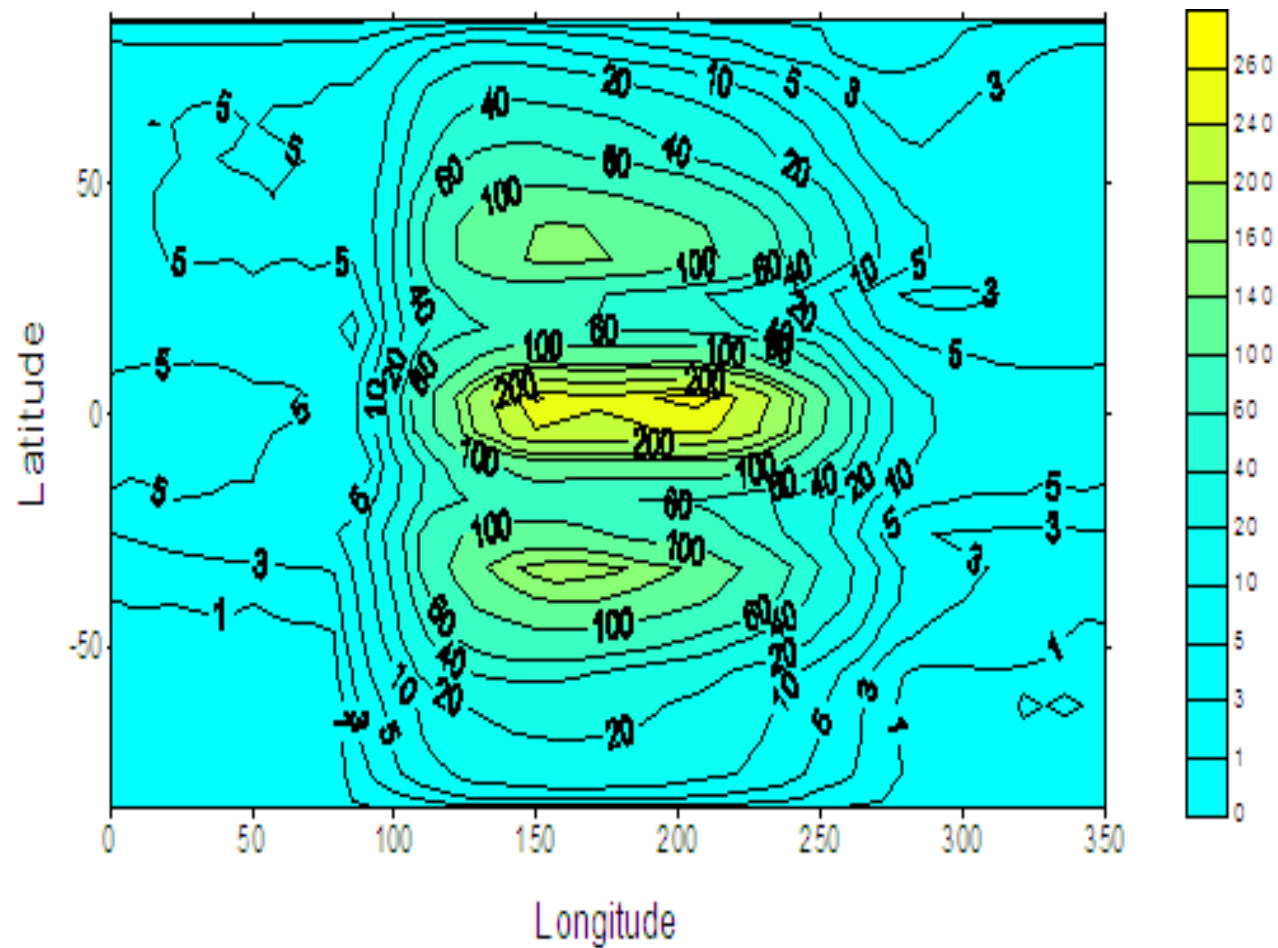
NO⁺ (number/cm**3) at **80 km**
1st March (00:00 UT)



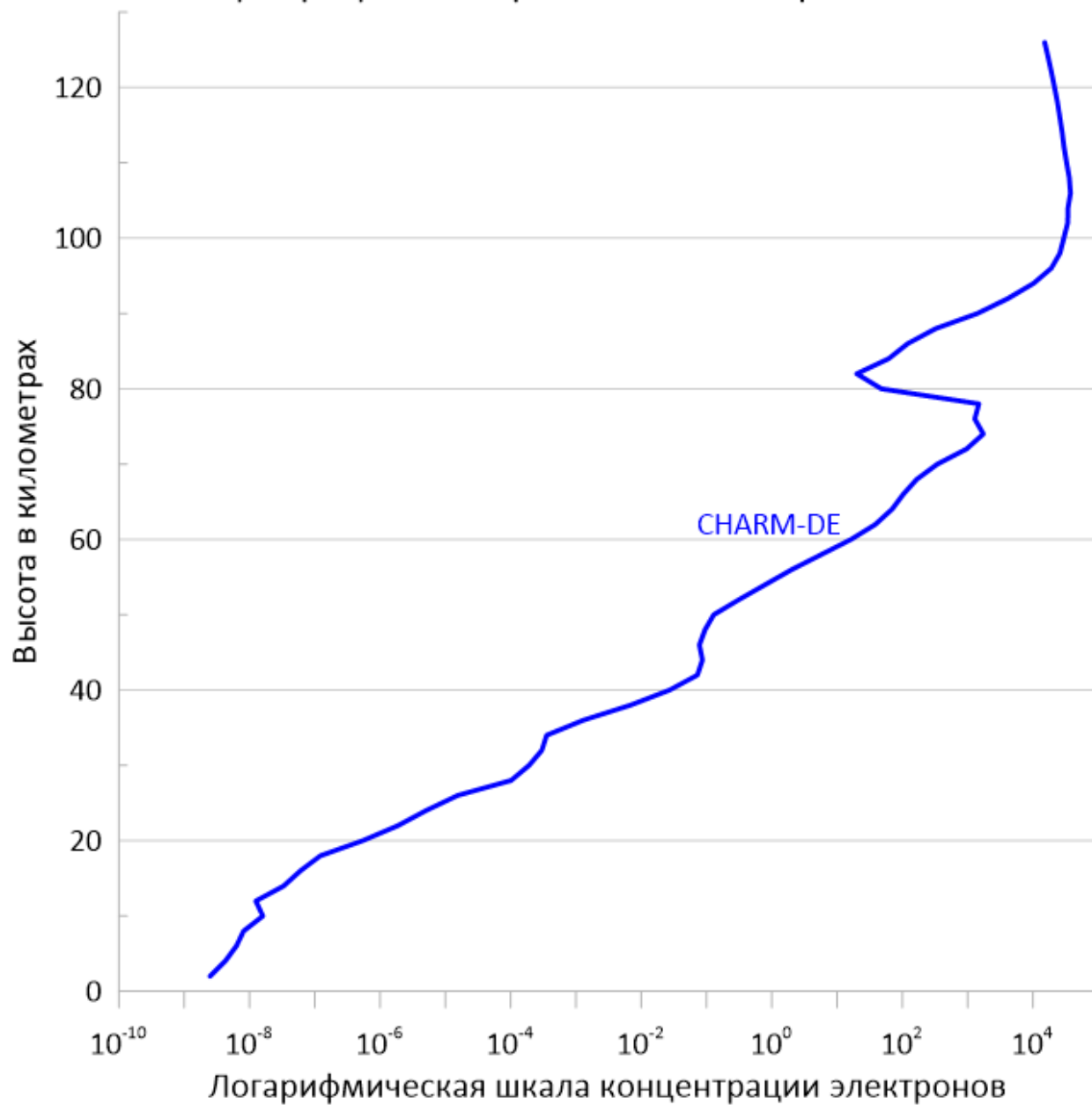
NO⁺ (number/cm**3) at **70 km**
1st March (00:00 UT)



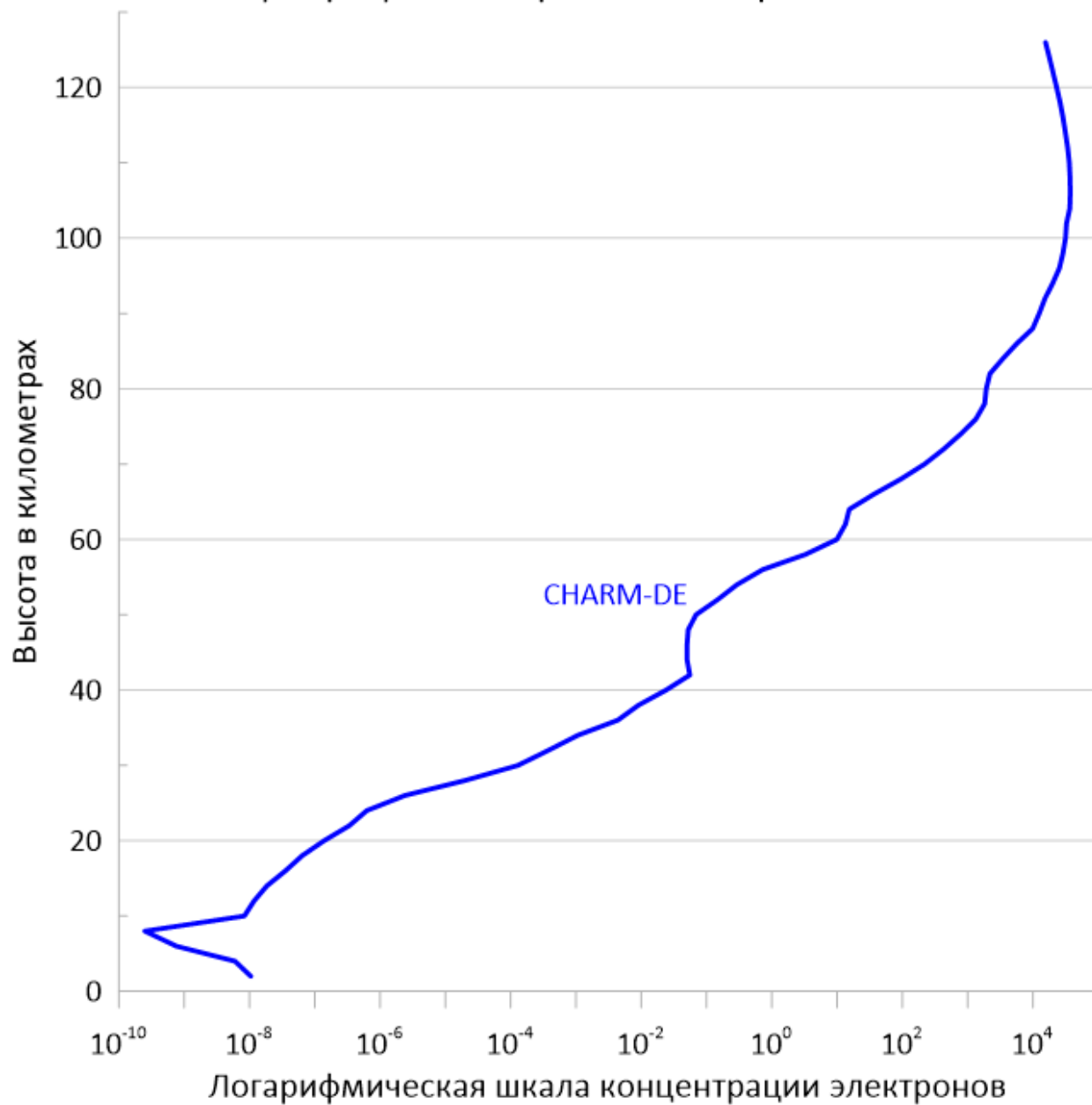
O_2^-
(number/cm³) at 80 km
1st March (00:00 UT)



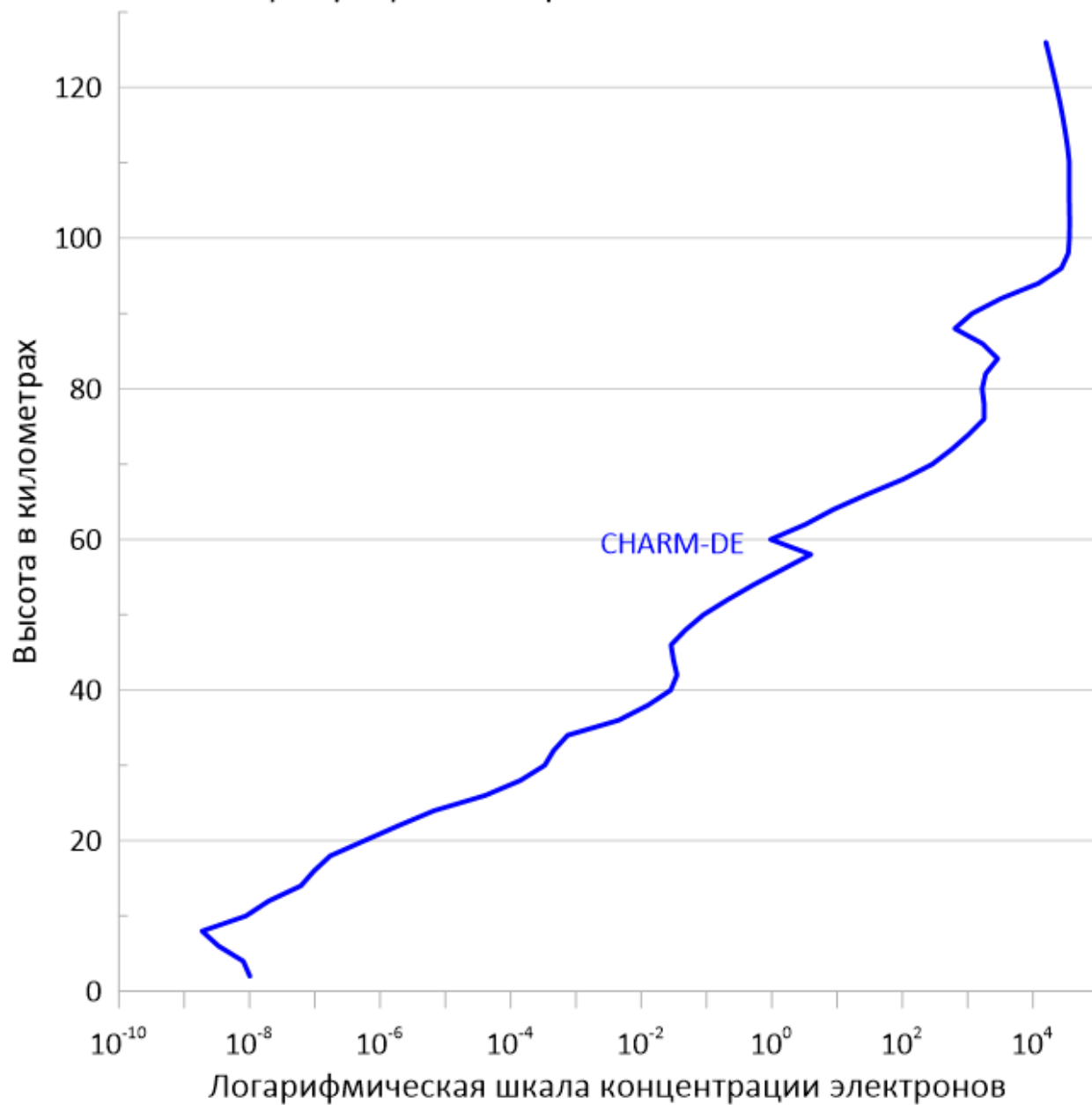
Концентрация Электронов 23 Сентября 1991г



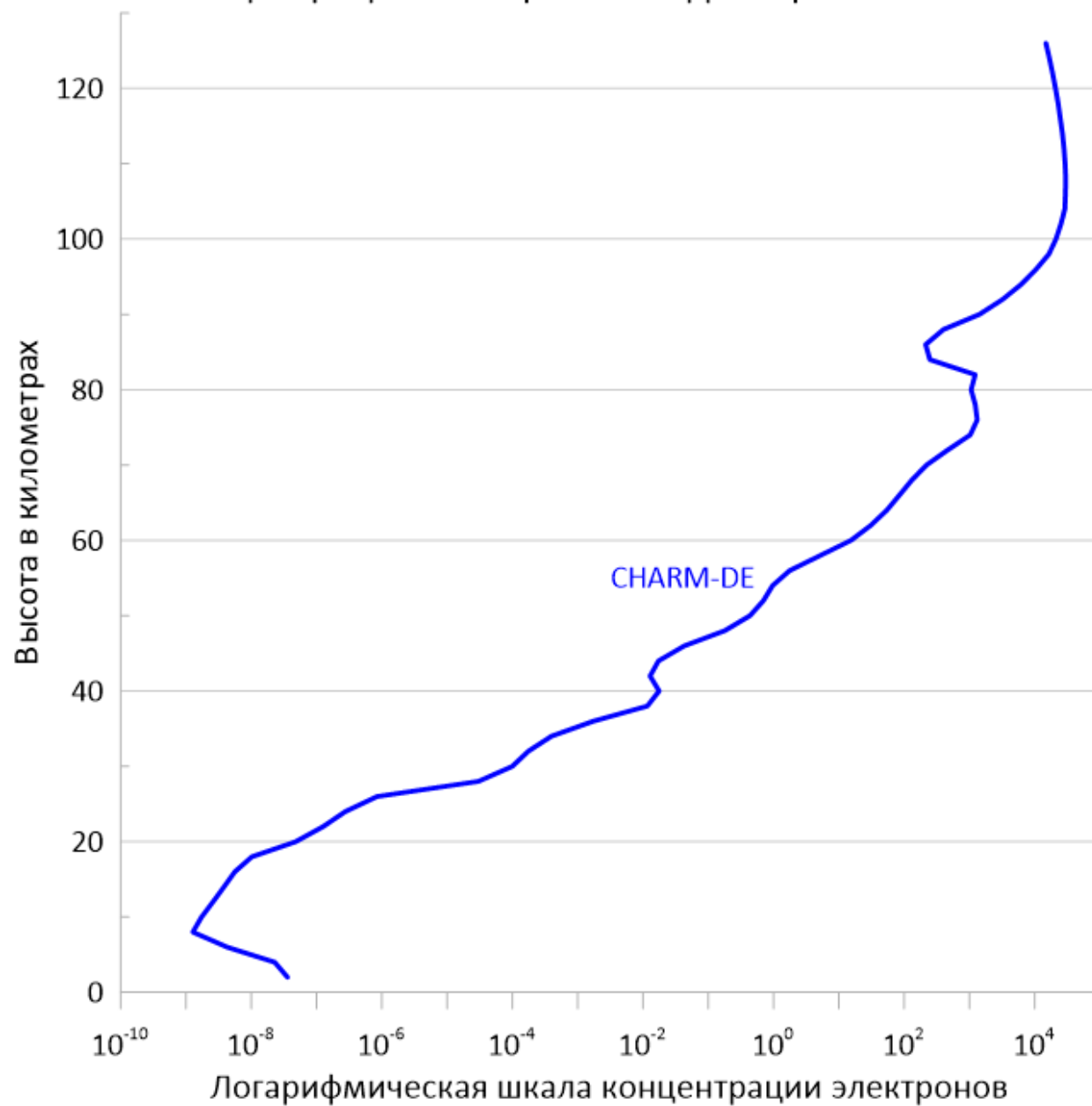
Концентрация Электронов 20 Марта 1991г



Концентрация Электронов 21 Июня 1991г

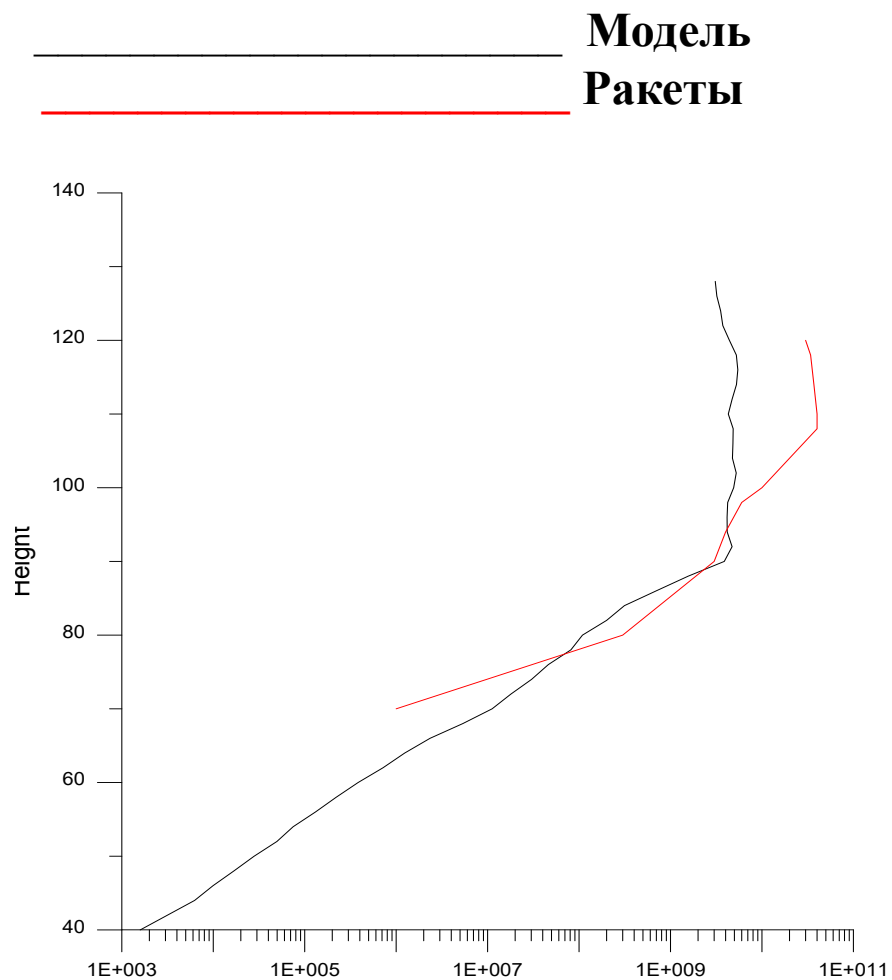


Концентрация Электронов 22 декабря 1991г

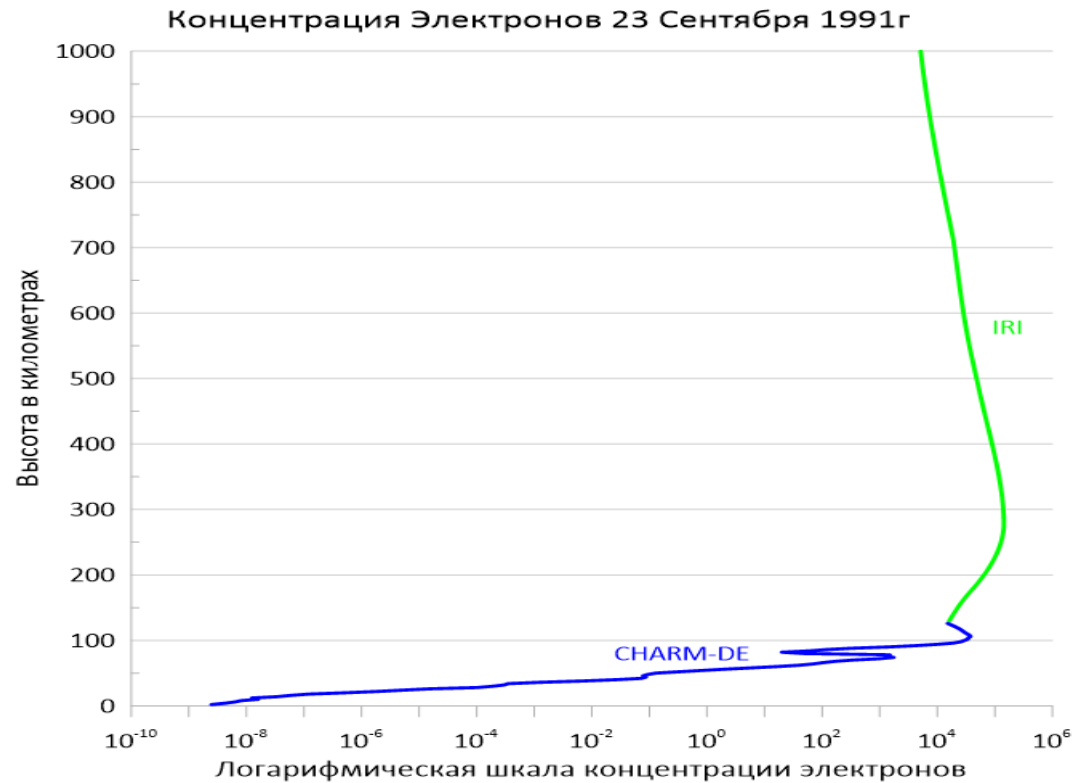


Результаты

Электронная концентрация (средние широты, полдень)



Пример профиля электронной концентрации, полученного по модели CHARM-DE и эмпирической модели ионосферы IRI



Перспективы использования модели CHARM-DE

1. Модели могут быть использованы в дальнейшем в качестве основы отечественной системы **мониторинга состояния озоносферы и нижней ионосферы (области D и E) на высотах 10-130 км.**
2. Для реализации этой задачи **необходимы потоки солнечной ультрафиолетовой и корпускулярной радиации.** Сейчас используются зарубежные данные, но чтобы система стала полностью отечественной (и автономной) нужны спутниковые измерения солнечной радиации.
3. Другое возможное приложения – **решение задач, связанных с распространением радиоволн (низких частот).** Здесь возникает новый класс задач – расчет траекторий радиоволн при заданных (по модельным расчетам) трехмерной, меняющейся во времени, картины распределения электронной концентрации.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ