

Моделирование средней и верхней атмосферы

Кулямин Д.В. и др.

ИВМ РАН, НИВЦ МГУ, ФГБУ ИПГ

Мотивация

Модели *климата* → Модели земной системы
(CMIP, IPCC)

Включение описания переноса и трансформации малых газовых примесей (углеродного, метанового, озонного и др. циклов) динамики растительности и биоты в почве и океане и т.п.

Включают как основной вычислительный блок:

Модели общей циркуляции атмосферы (ОЦА)

Современные тенденции развития:

- усовершенствование описания микрофизики (мелкомасштабная турбулентность, конвекция, облачность, радиация)
- рост вычислительной точности (увеличение разрешения, усовершенствование численных методов)
- рост требований к качеству воспроизведения явлений, смежных к приземной циркуляции и формированию климату (атмосферная химия и химия океана, средняя и верхняя атмосфера)
- реализация механизмов формирования ключевых физических процессов, ответственных за циркуляцию атмосферы

Моделирование
*ионосферы и
термосферы,
электромагнитных
явлений*

*(другой класс задач:
Космическая погода)*

Моделирование земной системы

Солнечное
излучение

Модель общей циркуляции
термосферы

(термогидродинамические приближения – уравнения
геофизической гидродинамики)

Модель
ионосферы

- Ионизация
- Магнитизм
- Фотохимия

D-слой ионосферы
(60-90 км)

Модель климата

Модель общей циркуляции атмосферы
(тропосфера-стратосфера-мезосфера, 0-90 км)

Гидродинамика и термические процессы

Трёхмерная постановка (сферическая система координат, приближение
гидростатики)

Поверхностные процессы

Модель океана

Моделирование общей циркуляции атмосферы

Высотная структура атмосферы (по вертикальному профилю температуры)

- тропосфера (~0-10 км)
- стратосфера (~10-50 км)

нейтральный газ

- мезосфера (~50-90 км)
- **термосфера** (~90-1000 км)
- экзосфера (>~2000 км)
- **ионосфера** (~70-1000 км)
- плазмосфера (~1.2-4RE)
- магнитосфера (~4-100RE)

нейтральные частицы

заряженные частицы

плазма

Солнечное излучение

Модели
ионосферы

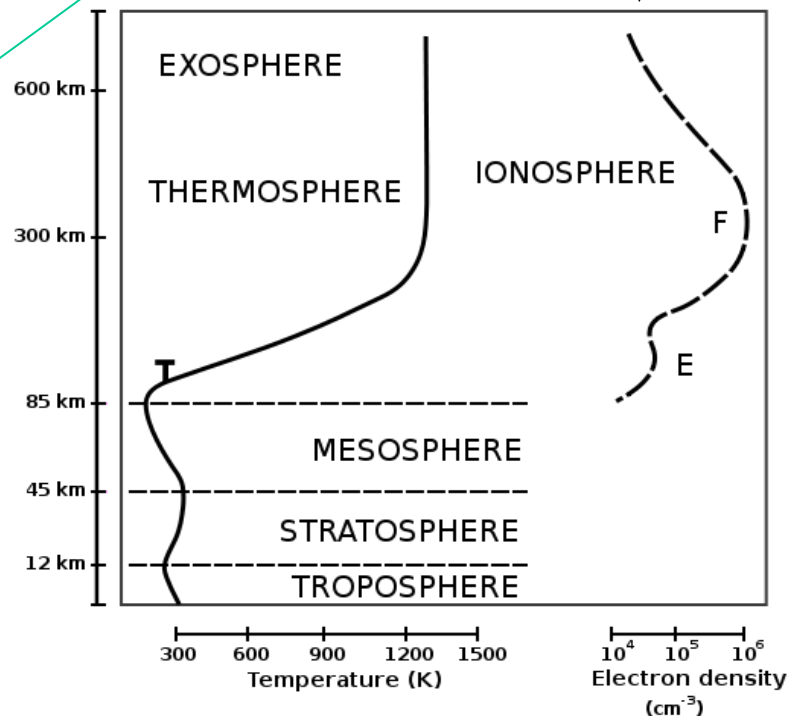
- Ионизация
- Фотохимия
- Динамика
- Магнетизм

Модель общей циркуляции термосферы

(термогидродинамические приближения – уравнения геофизической гидродинамики)

Модель общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН (тропосфера-стратосфера-мезосфера, 0-90 км)

Улучшенная версия используется как расчетный блок в климатической модели (атмосфера + океан)



Термосфера (90-500 км)

Ключевые физические процессы в нейтральной атмосфере

Радиация

Поглощение солнечного излучения (нагрев)

- экстремальное ультрафиолетовое излучение (EUV, $\lambda < 103$ нм) - выше 170 км
- ультрафиолетовое излучение (UV 130 нм $< \lambda < 175$ нм) - от 90 до 170 км

Тепловое излучение (выхолаживание нейтрального газа) - от 90 до 150 км (в основном CO_2)

Молекулярная диффузия + Теплопроводность

Взаимодействие с ионосферой (столкновения)

- Передача импульса
- Джоулев нагрев
- Аврора

Волны (термические приливы, гравитационные волны и др.)

Турбулентное перемешивание (нижние слои)

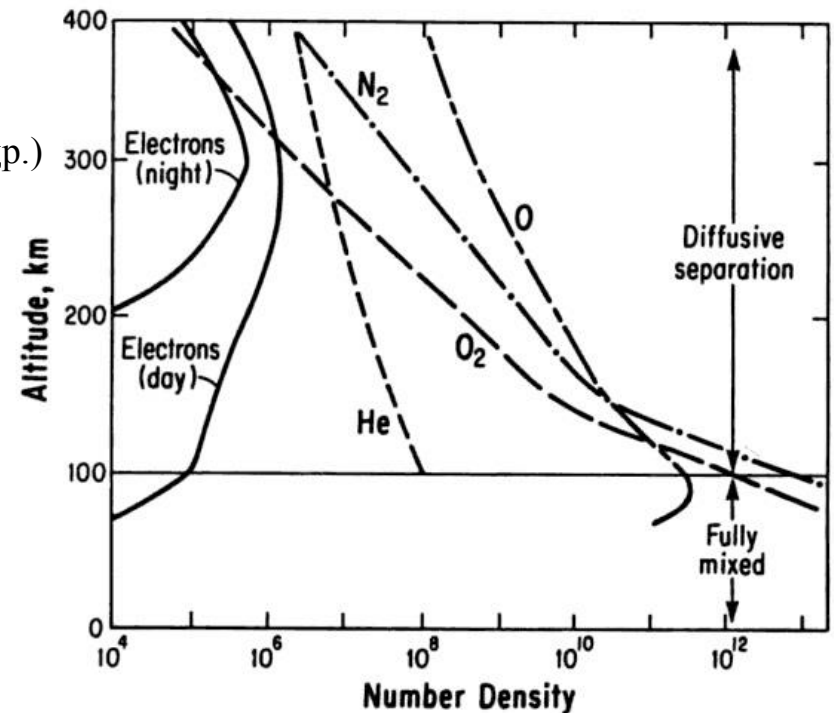
Изменения газового состава:

Химические преобразования (связь с радиацией)

- Фотодиссоциация
- Рекомбинация
- Преобразования

Вертикальное диффузионное расслоение

(разделение газа на составляющие, приближение сплошной однородной среды работает)



Моделирование термосферы

Постановка задачи

Цель – воспроизведение основных особенностей реалистичной крупномасштабной термодинамики верхней атмосферы (*первая версия модели*)

Основа – динамическое ядро модели атмосферы ИВМ РАН

Физическое описание циркуляции термосферы –
стандартные уравнения *геофизической гидродинамики*
учет ключевых физических процессов (характерных для этих высот)

Верхняя граница на уровне, где еще применимо приближение сплошной среды

Вертикальная координата – давление (нормированное на некоторую постоянную величину)

$$p_n = \frac{p}{p_0}$$

$$p_0 = 10^{-3} \text{ гПа, } \sim 95 \text{ км - нижняя граница}$$

$$p = 4 \cdot 10^{-10} \text{ гПа, } \sim 500 \text{ км - верхняя граница}$$

Моделирование термосферы

Система решаемых уравнений гидротермодинамики атмосферы

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dt} - \left(f + \frac{u}{a} \operatorname{tg} \varphi \right) v + \frac{1}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} \right) &= F_u, \\ \frac{dv}{dt} + \left(f + \frac{u}{a} \operatorname{tg} \varphi \right) u + \frac{1}{a} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} \right) &= F_v, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial p} &= -\frac{RT}{p}, \\ \frac{dT}{dt} - \dot{p} \frac{RT}{pc_p} &= F_T + \varepsilon, \\ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{\partial v \cos \varphi}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial \dot{p}}{\partial p} &= 0, \end{aligned} \right\}$$

- уравнения движения для горизонтальных компонент скорости

- приближение гидростатики

- уравнение притока тепла

- уравнение неразрывности (закон сохранения массы)

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \dot{p}_n \frac{\partial}{\partial p_n}, \quad \dot{p}_n = dp_n / dt$$

Краевые условия по вертикали

$$\begin{aligned} \tau &= 0, & \text{при } p &= 1, \\ \Phi' &= 0, & \text{при } p &= 1. \end{aligned}$$

Описание физических процессов в модели термосферы

Ион-нейтральное взаимодействие

Взаимодействие термосферы и ионосферы осуществляется непосредственно обменом импульсом и энергией между заряженными и нейтральными частицами при столкновениях (**ион-нейтральное сопротивление**)

Термосфера – среда проводимости

$$-en_i \left(\vec{E}_0 + [\vec{u}_i \times \vec{B}] \right) = \vec{F}_{in} = n_i m_i \nu_{in} (\vec{u} - \vec{u}_i)$$

Сила Лоренца

$$\vec{F}_{in} = [\vec{J} \times \vec{B}]$$

внешнее поле динамо-эффект

$$\vec{J} = \sigma \left(\vec{E}_0 + [\vec{u} \times \vec{B}] \right)$$

- \vec{u} ➤ трехмерный вектор скорости термосферы (нейтрального газа)
- \vec{u}_i ➤ дрейфовая скорость ионов в системе отсчета Земли

Магнитное поле Земли (дипольное приближение):

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} B \cos I \sin D \\ B \cos I \cos D \\ -B \sin I \end{pmatrix} \quad B(\varphi) = \frac{P_m}{(a+z)^3} \sqrt{(1+3\sin^2 \varphi)}$$

$$P_m = 7.8 \cdot 10^{15} \text{ Тл} \cdot \text{м}^3$$

Двумерный тензор сопротивления, записанный только для горизонтальных компонент

$$\vec{F}_{uv} = \frac{1}{\rho} \vec{F}_{ni} = -\vec{D}u$$

$$F_u'' = -\frac{RT}{p} (D_{xx}u + D_{xy}v),$$

$$F_v'' = -\frac{RT}{p} (D_{yy}v - D_{xy}u).$$

$$\vec{D} = \begin{pmatrix} \sigma_p B^2 & \sigma_H B^2 \sin I \\ -\sigma_H B^2 \sin I & \sigma_p B^2 \sin^2 I \end{pmatrix}$$

Джоулев нагрев (уравнение для температуры)
закон Джоуля — Ленца (в обобщенной форме)

$$Q_j = (\vec{J} \vec{E}) \quad F_T'' = \frac{1}{\rho c_p} (\vec{J} \vec{E})$$

$$F_T'' = \frac{RT}{c_p p} (D_{xx}u^2 + D_{yy}v^2)$$

Описание физических процессов в модели термосферы

Ион-нейтральное взаимодействие

Расчет проводимостей

электропроводность Педерсена

поперечная электропроводность Холла

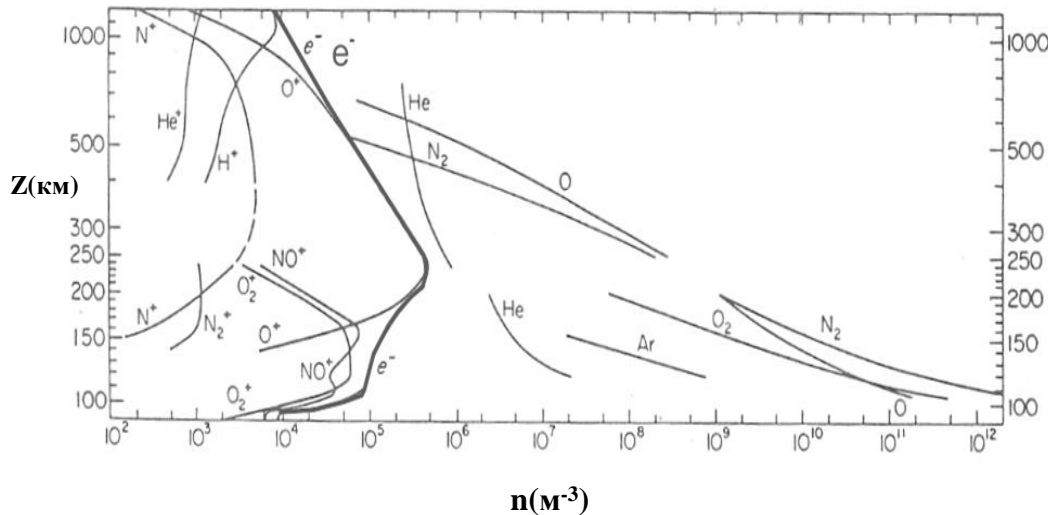
$$\sigma_P = \frac{n_i e}{B} \left[\frac{\nu_{ni} / \omega_i}{1 + (\nu_{ni} / \omega_i)^2} \right], \quad \sigma_H = \frac{n_i e}{B} \left[\frac{(\nu_{ni} / \omega_i)^2}{1 + (\nu_{ni} / \omega_i)^2} \right]$$

$$\nu_{ni} = 5 \cdot 10^{-16} (n_i + n_n) c^{-1}$$

$$\omega_i = \frac{eB}{M_i}$$

$$n_n = p / kT$$

$$M_i \approx 10^{-26} \text{ кг}$$



Вертикальные профили средних дневных концентраций ионизированных и нейтральных газовых составляющих для высот термосферы

Состояние ионосферы – задается

$$n_i = n_e(\lambda, \varphi, p, t)$$

(по эмпирической модели – вида IRI)

Эмпирические модели (MSIS, OGO-6)

- рассчитанный суточный ход
- средний постоянный профиль

Описание физических процессов в модели термосферы

Молекулярная диффузия и теплопроводность

$$\vec{F}' = \frac{1}{\rho} \nabla (\mu \nabla \vec{u})$$

$$F_T = \frac{1}{\rho} \nabla \frac{\chi}{c_p} \nabla T$$

Учитывается **вертикальная составляющая**

$$F_u' = g^2 \frac{\partial}{\partial p} \mu \rho \frac{\partial u}{\partial p}$$

$$F_v' = g^2 \frac{\partial}{\partial p} \mu \rho \frac{\partial v}{\partial p}$$

$$F_T' = \frac{g^2}{c_p} \left[\frac{\partial}{\partial p} \chi \rho \frac{\partial T}{\partial p} \right].$$

Приближенная оценка коэффициентов вертикальной молекулярной диффузии и теплопроводности

$$\mu = 4.5 \cdot 10^{-5} (T / 10^3)^{0.71} \text{ кг} / \text{м} \cdot \text{с},$$

$$\chi_{Mol} = 7 \cdot 10^{-2} (T / 10^3)^{0.69} \text{ Дж} / \text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К}$$

Турбулентное перемешивание (параметризация)

важно для высот < 130 км

$$\chi = \chi_{Mol} + \rho D(p)$$

В первой версии – задается параметрически
(только теплопроводность)

Описание физических процессов в модели термосферы

Радиационный баланс

в первом приближении:

в верхних слоях термосферы

$\bar{T}(p)$ **глобальный баланс** среднего нагрева, излучения и теплопроводности, определяющий **средний профиль** температуры

$$\frac{g^2}{c_p} \left[\frac{\partial}{\partial p} \chi \cdot \frac{p}{RT} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial p} \right] + \varepsilon_0 = 0$$

$$\bar{T}(p) = T_\infty - \frac{(T_\infty - T_b)}{p_b} p$$

$$\varepsilon_0 = \frac{(T_\infty - T_b)}{p_b} \cdot \frac{g^2 \chi}{RT_\infty}$$

$$T_\infty \sim 500 + 3.4 \cdot F_{10.7}$$

сингулярность на верхней границе



связь экзосферной температуры и уровня радиации

в нижних слоях термосферы

сложный баланс

$$F_T + (\varepsilon_{EUV} + \varepsilon_{UV}) - I = 0$$

Молекулярная и турбулентная
теплопроводность

Нагрев солнечным
излучением
(несколько полос и
линий в УФ и ЖУФ
диапазоне)

Длинноволновое
излучение
(выхолаживание)

$$\frac{g^2}{c_p} \left[\frac{\partial}{\partial p} (\chi_{Mol} + \rho D(p)) \rho \frac{\partial \bar{T}(p)}{\partial p} \right] + \varepsilon_0(p) - I = 0$$

Описание физических процессов в модели термосферы

Радиационный блок

Радиационный нагрев - коротковолновое солнечное излучение

Для расчета профиля нагрева нейтрального газа используются классическая параметризация (Strobel 1987):

$$\varepsilon(z) = \sum_i F_\lambda \cdot \sigma_{abs} \cdot \left(\frac{hc}{\lambda} \cdot eff^i\right) \cdot \exp(-\tau^i(z))$$

$$\tau^i(z) = \sum_i \sigma_{abs}^i \cdot Sum^i(z, \chi) = \sum_i \sigma_{abs}^i \cdot \int_z^{z_0} \frac{[n]_i}{\cos \chi} dz$$

λ – длина волны спектрального интервала поглощения

i – обозначает учитываемый вид молекул

F_λ – поток солнечной радиации на данной длине волны

σ_{abs} – полное сечение поперечное сечение поглощения

$[n]_i$ – концентрация поглощающей составляющей i

hc

λ

eff^i

$\tau^i(z)$

σ_{abs}^i

– энергия кванта монохроматического излучения

– параметр эффективности нагрева нейтрального газа

– оптическая толщина для данной линии

– сечение поглощения для данного поглотителя на данной

длине волны

учитывается нагрев

• за счет поглощения экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения (5-105 нм)

O, O_2, N_2

• фотодиссоциативного поглощения кислорода в ультрафиолетовых (УФ)

• полосах Шумана—Рунге (175-205 нм)

• в континууме Шумана—Рунге (125-175 нм)

• на линии Лаймана-альфа (121 нм)

• в континууме Герцберга (205-245 нм)

• для мезосферного озона учитывается поглощения

• в полосах Хартли (200-300 нм)

• континууме Герцберга (205-245 нм)

• отдельно учитывается нагрев, связанный с химическими преобразованиями

O, O_2

Поток солнечной радиации ЭУФ-излучения

- 37 спектральных интервалов

(параметризация EUVAC)

$F_{10.7} = 120$

$eff_{EUV} = 0.366 \leftrightarrow 0.5$

Описание физических процессов в модели термосферы

Радиационный блок

Длинноволновое выхолаживание: *инфракрасное излучение* CO_2, NO и др.
в условиях нарушения локального термодинамического равновесия (НЛТР)

учитывается (в данной версии)

- излучение на фундаментальной **инфракрасной** полосе 15 мкм CO_2

используются известная параметризация (Швед, Фомичев, Огибалов 1980-2000)

$$I(z) = C_1 \cdot [CO_2] \cdot (1 - L_z) \cdot \tilde{\epsilon}_z / \mu_z$$

- C_1 – эмпирическая константа μ_z – молекулярный вес
 $[CO_2]$ – концентрация углекислого газа в слое
 L_z – эмпирическая функция плотности атмосферы, температуры, концентраций составляющих
 $\tilde{\epsilon}_z$ – характеризует влияние нижних слоев атмосферы

Во всем **радиационном блоке**: при расчете **концентраций атмосферных составляющих**, а также **плотности** и **теплоемкости воздуха**, учитывается непостоянство газового состава с высотой вследствие **диффузионного расслоения**

Объемные доли газовых составляющих заданы

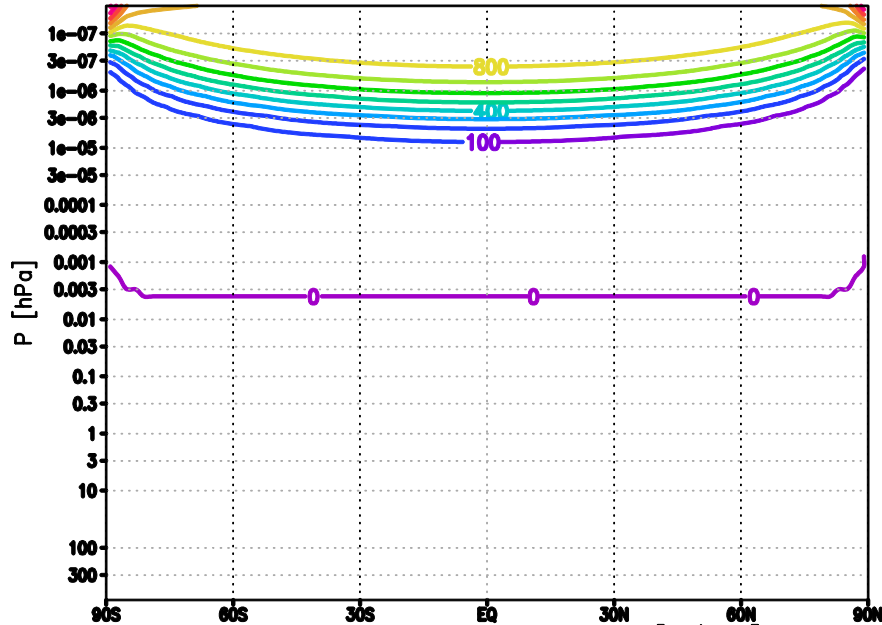
(в соответствии с эмпирической моделью MSIS)

Радиационный нагрев

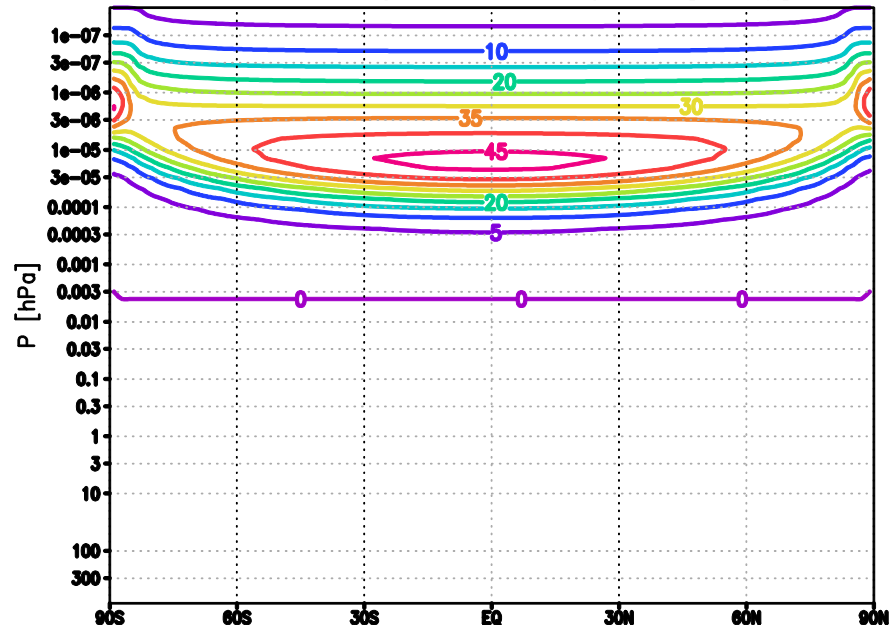
Среднезональный приток тепла [K/день], различные поглотители

Радиационная модель (от поверхности Земли) условия равновесия

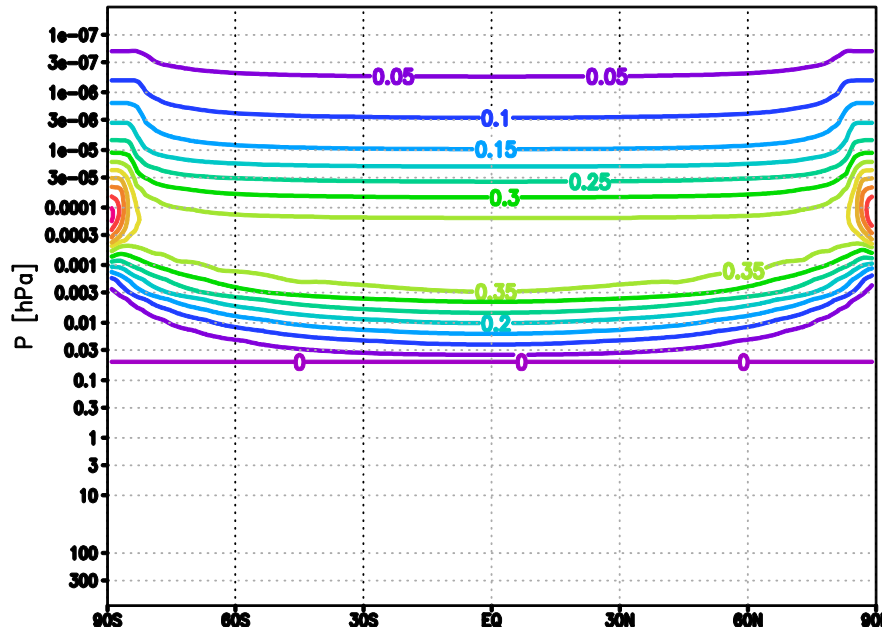
O2 N2 O EUV heating rate [K/day] MAR



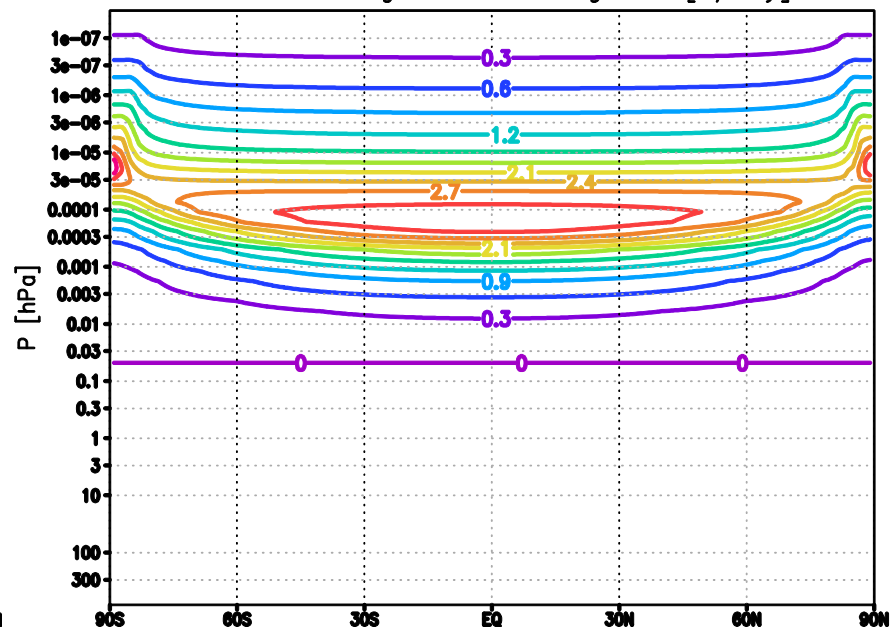
O2 Schumann Runge cont. heating rate [K/day] MAR



O2 Lyman alpha band heating rate [K/day] MAR



O2 Schumann Runge band heating rate [K/day] MAR

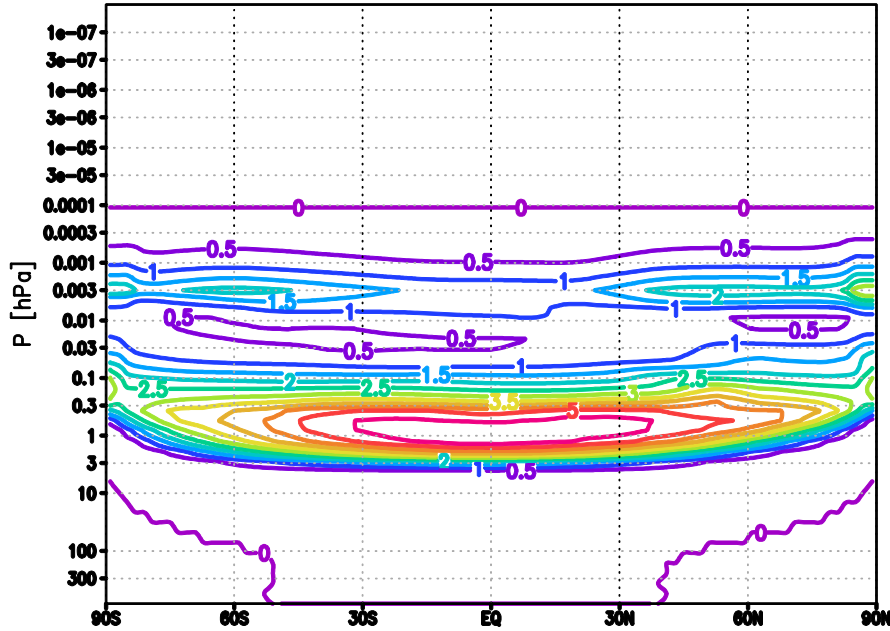


Радиационный нагрев и выхолаживание

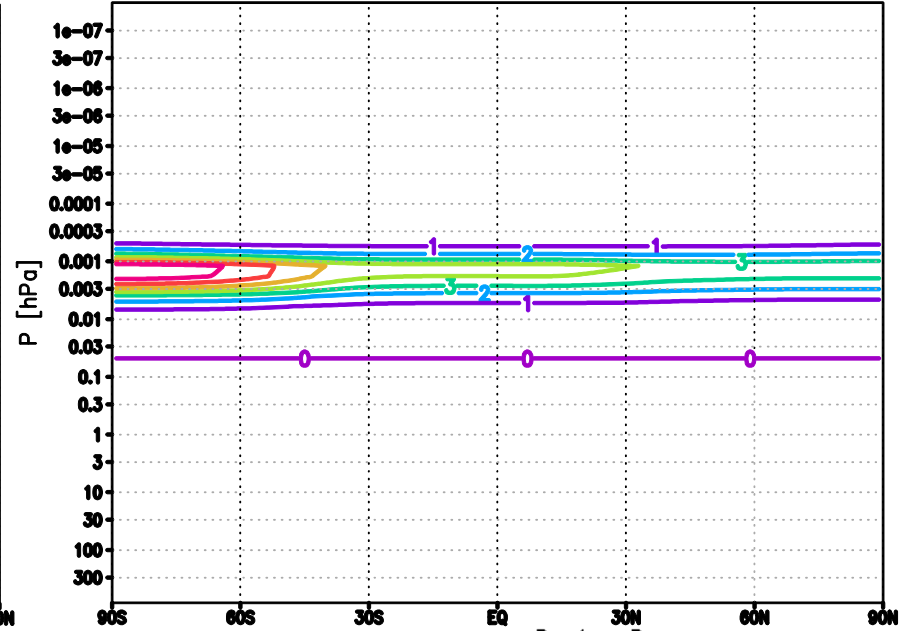
Среднезональный приток тепла [K/день], различные поглотители

Радиационная модель (от поверхности Земли) условия равенствия

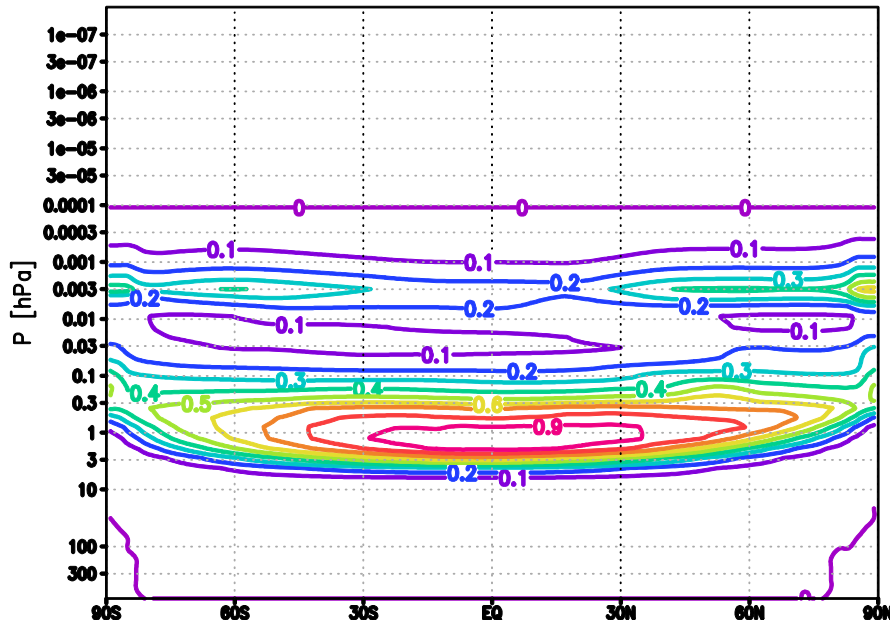
03 Hartley band heating rate [K/day] MAR



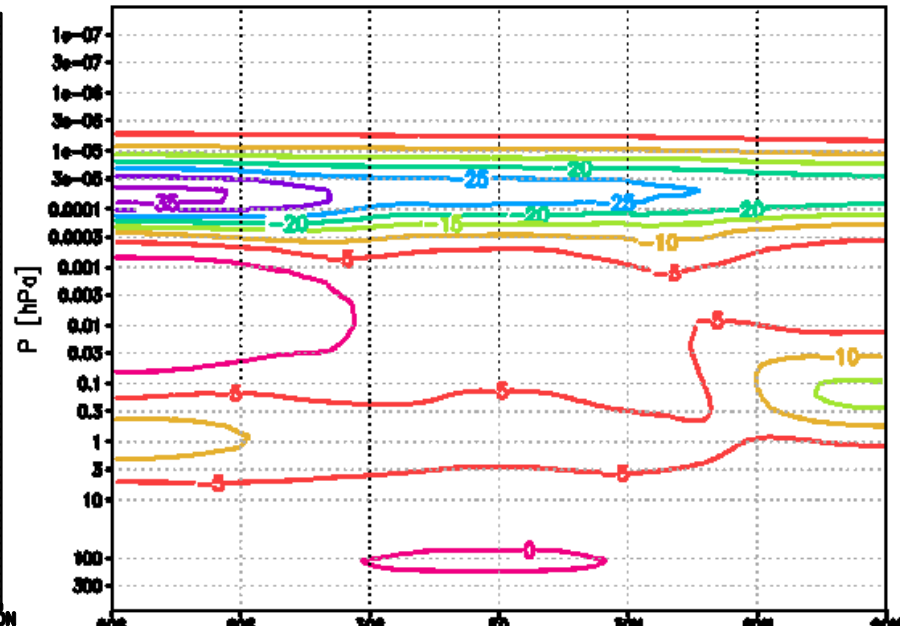
Chemical heating rate [K/day] MAR



02 03 Herzberg band heating rate [K/day] MAR



CO2 cooling rate [K/day] MAR



Описание физических процессов в модели термосферы

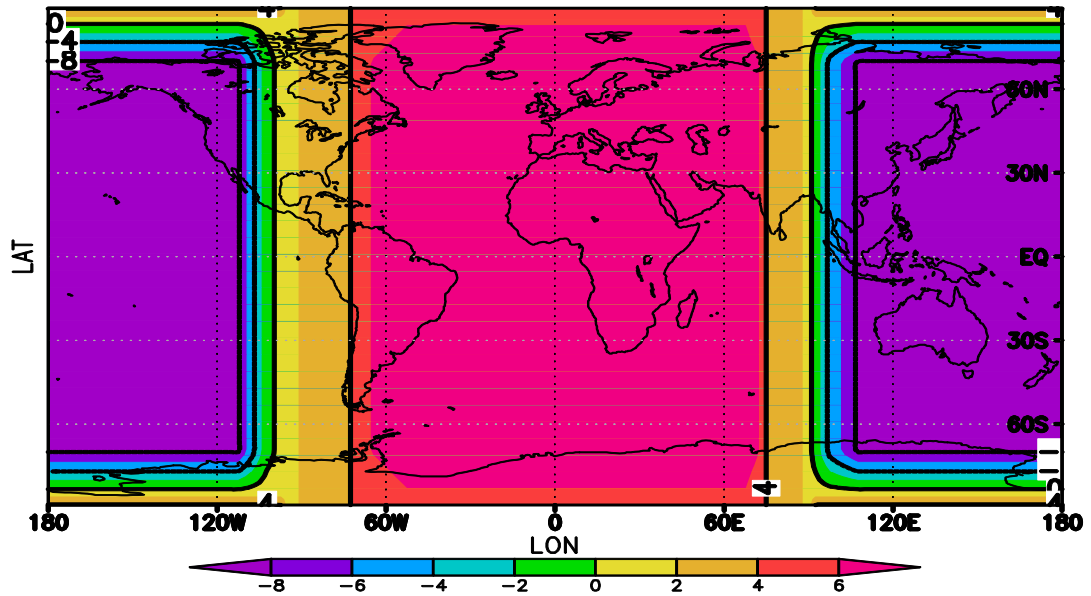
первая версия модели: *радиационные источники тепла* заданы

Задавались разные пространственные распределения *суточного* хода солнечных отклонений радиации для двух модельных уровней:

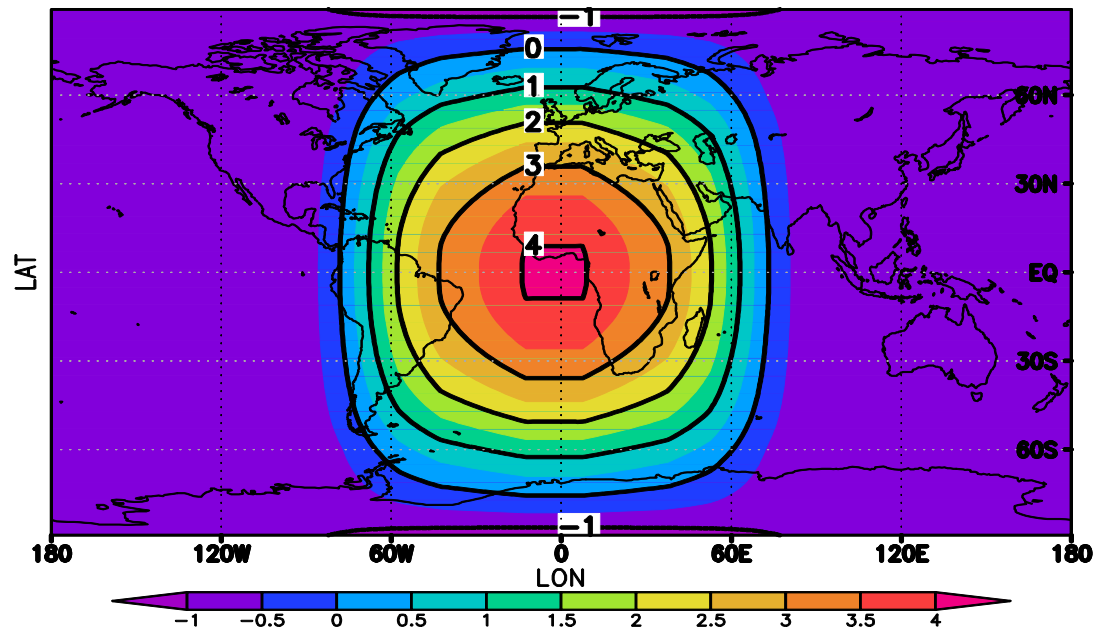
- Оптически широкая атмосфера (высота ~120 км)
- Оптически узкая атмосфера (~300 км)

Условия - весеннее равноденствие, низкая активность

По высоте - линейная интерполяция



$$\frac{\varepsilon'}{\text{Дж} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}}$$



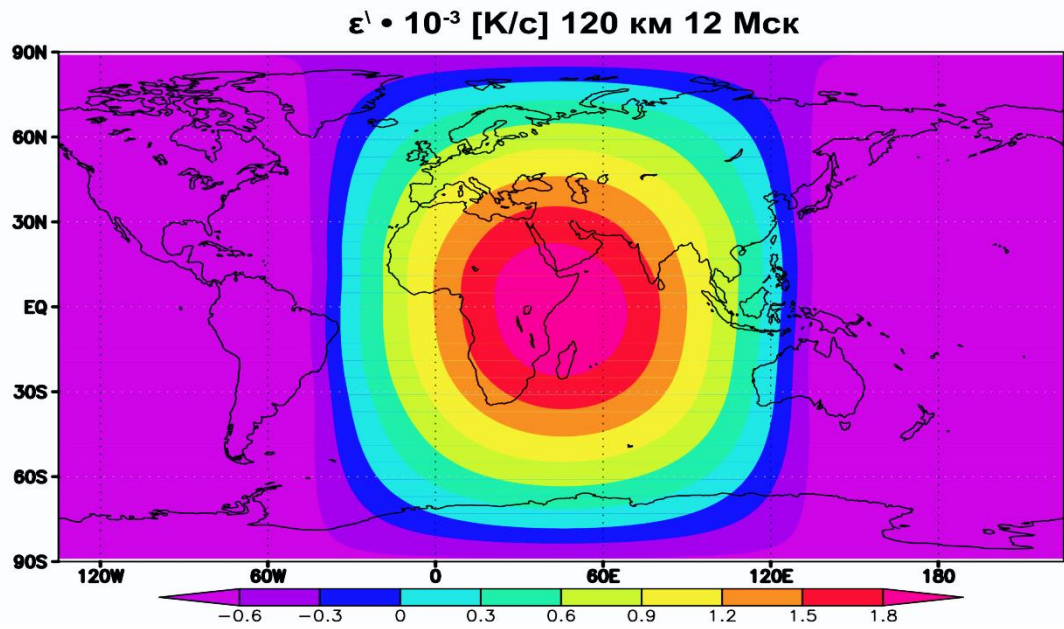
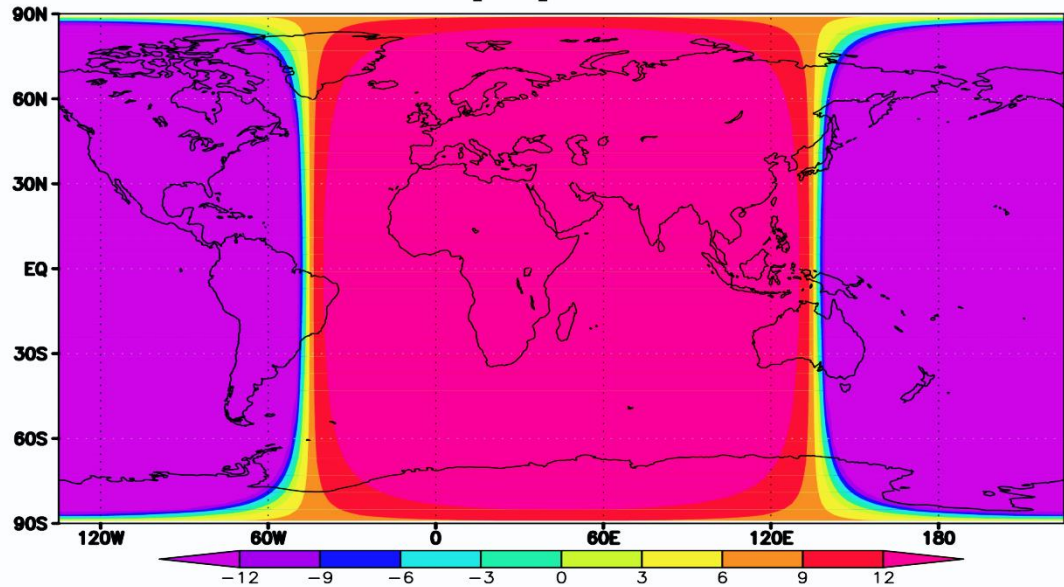
Описание физических процессов в модели термосферы

новая версия модели: **радиационные источники тепла** рассчитываются
 $\epsilon' \cdot 10^{-3} \text{ [K/c]} \text{ 300 км 12 Мск}$

Пространственные
распределения **аномалии**
скорости нагрева солнечной
отклонений радиации для
двух модельных уровней:

- **Оптически широкая атмосфера (высота ~120 км)**
- **Оптически узкая атмосфера (~300 км)**

*Условия - весеннее
равноденствие*

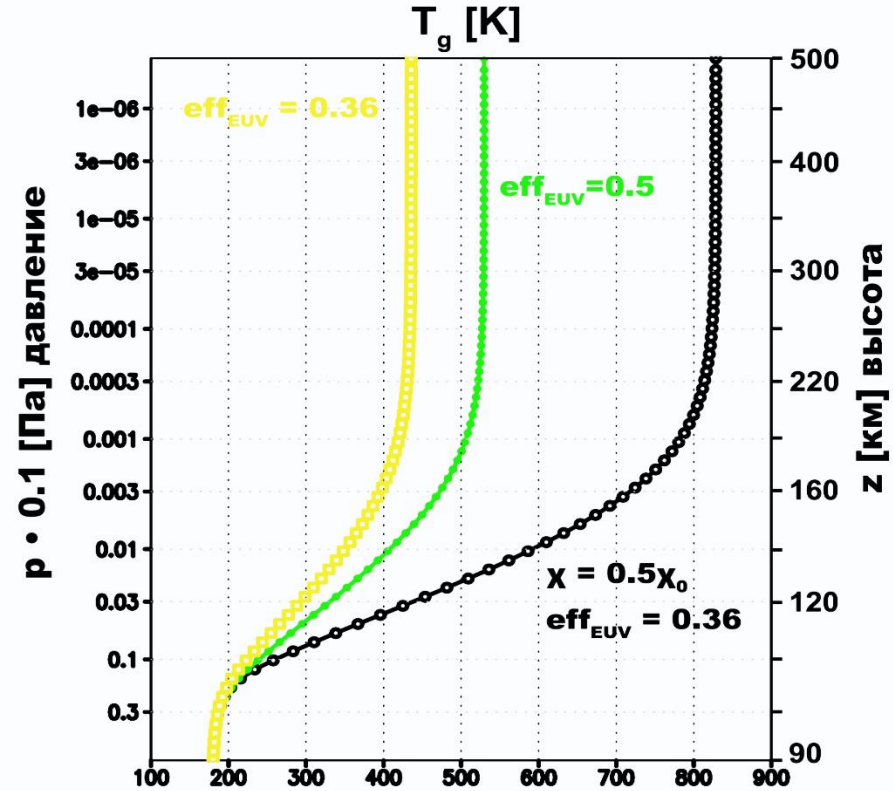
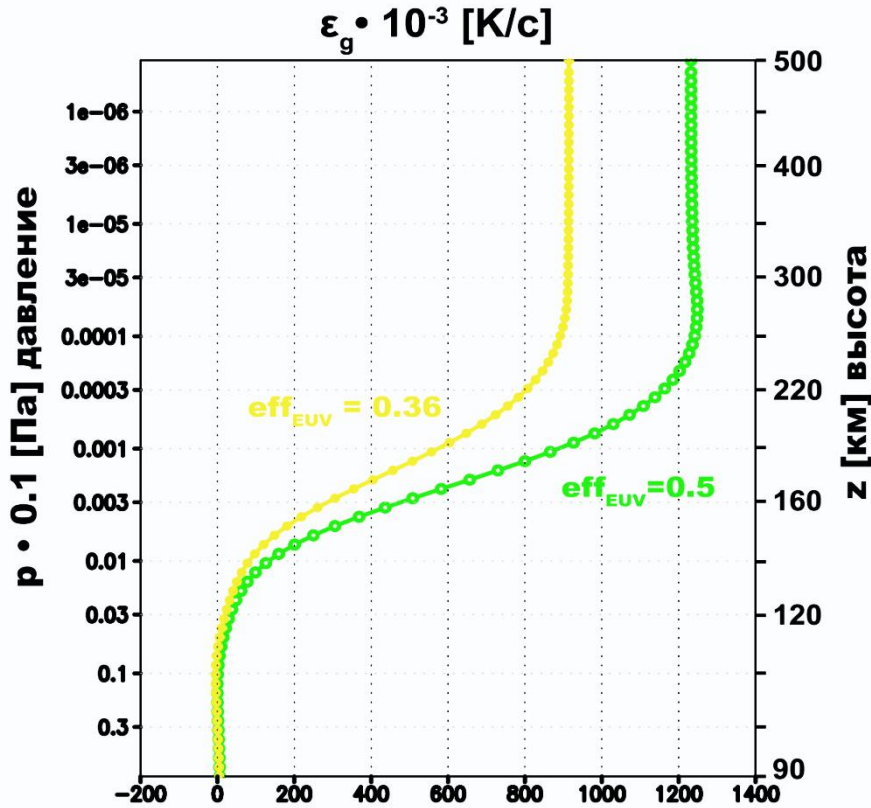


Результаты моделирования термосферы - радиация

$$\varepsilon_0(p)$$

Радиационный баланс

$$\bar{T}(p)$$



Глобальное состояние термосферы в основном определяется соотношением притока тепла за счет поглощения ЭУФ излучения и стока тепла за счет молекулярной диффузии (соответствует оценкам, представленным выше)

В нижних слоях: **Граничное условие для температуры на уровне мезосферы – определяющее, величина коэффициентов молекулярной и турбулентной теплопроводности не играет существенной роли**

Моделирование термосферы

Численная реализация

Регулярная сетка (с шагами 2° по широте и 2.5° по долготе)

80 вертикальных уровней

(Шаг между вертикальными уровнями задан примерно равномерным в логарифмической шкале)

$$\Delta z = \frac{RT}{g} \ln\left(\frac{p_n + \Delta p_n}{p_n}\right) \sim 4 - 10 \text{ км}$$

По пространству

- Сдвинутая сетка С Аракавы
- Фильтрация возле полюсов
- Подавление высокочастотных пространственных мод с помощью *горизонтальной диффузии* восьмого порядка

По времени

Для динамического блока - *полуявная схема расчет быстрых гравитационных волн*

Базовая явная схема - чехарда

Временной фильтр Асселина

Метод расщепления по физическим процессам

• Расчет радиации

- Нагрев (суточный ход - 1 раз в час)

• Расчет ион-нейтрального сопротивления – неявная схема (коэффициенты явно)

• Расчет молекулярной диффузии и теплопроводности – неявная схема (прогонки)

Термосфера

Данные эмпирических и глобальных моделей (модель TGCM NCAR)

Общая циркуляция (равноденствие)

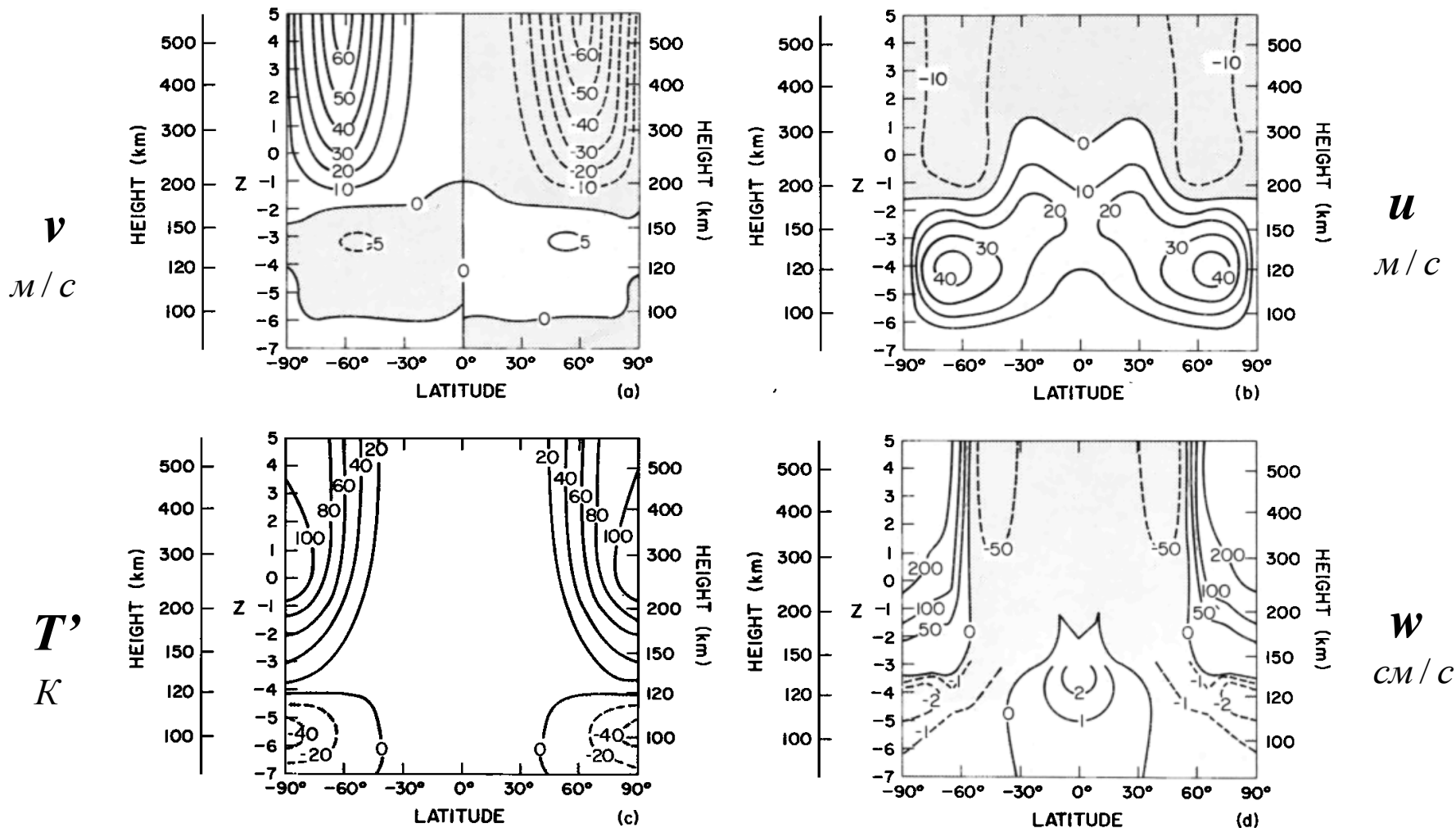
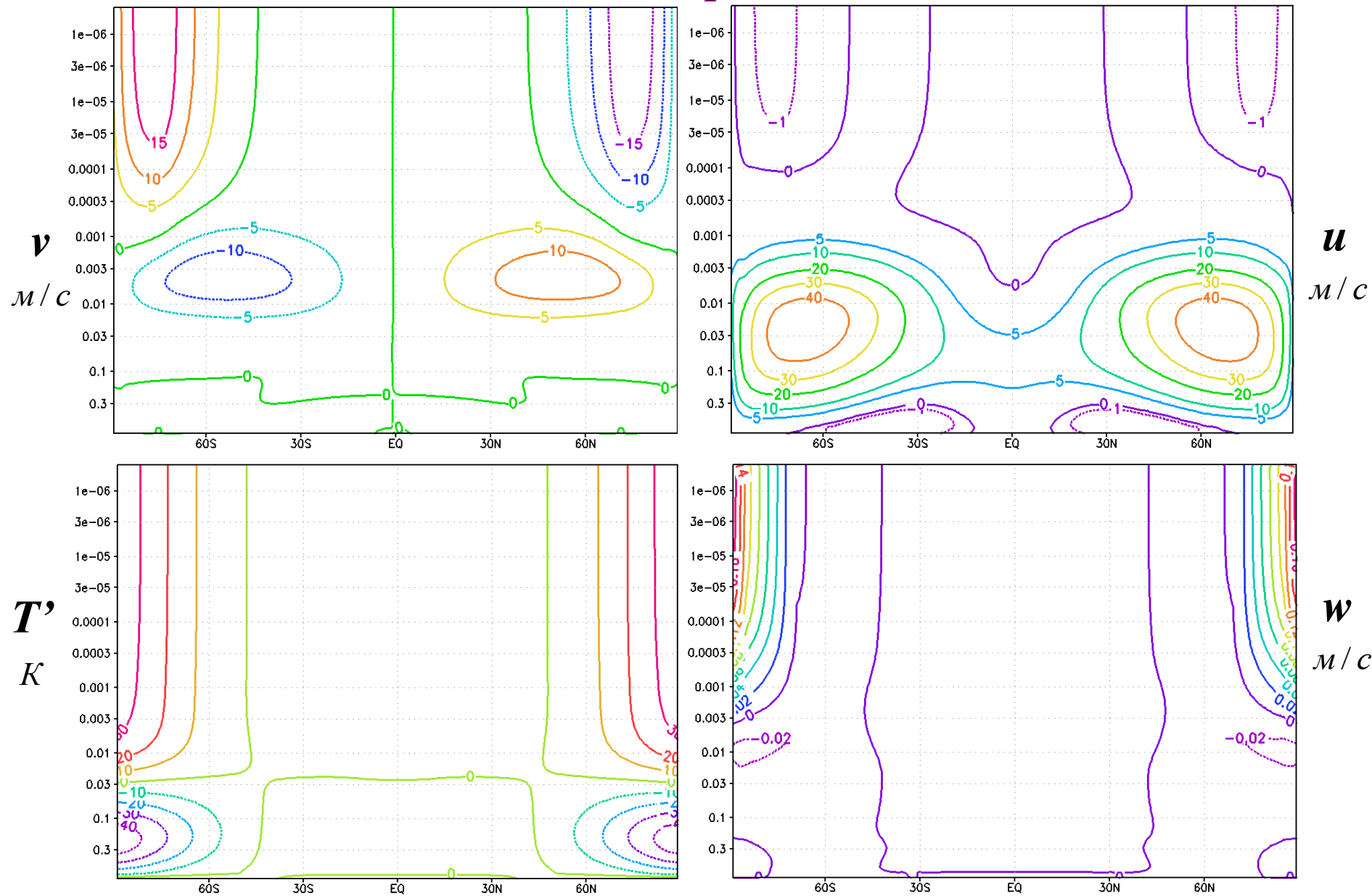


Fig. 2. Calculated contours of the perturbation zonal mean temperature and winds from the general circulation model of the thermosphere (TGCM) that is due to forcing by solar heating and high-latitude heating for the equinox during solar cycle maximum conditions: (a) mean meridional winds (m/s); (b) mean zonal winds (m/s); (c) perturbation temperature (K); and (d) vertical winds (cm/s).

Результаты моделирования термосферы - циркуляция

модель ИВМ РАН с заданной радиацией (в отклонениях)



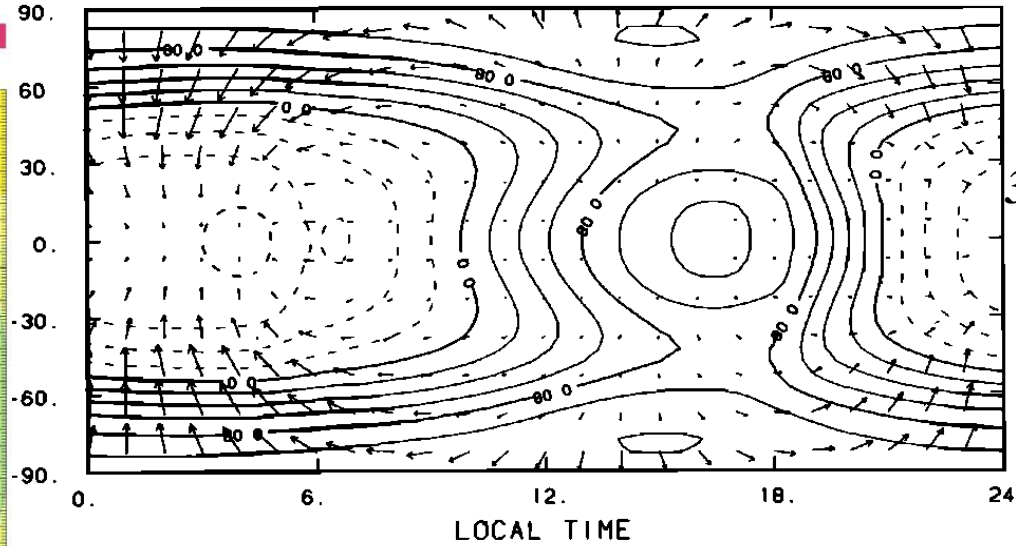
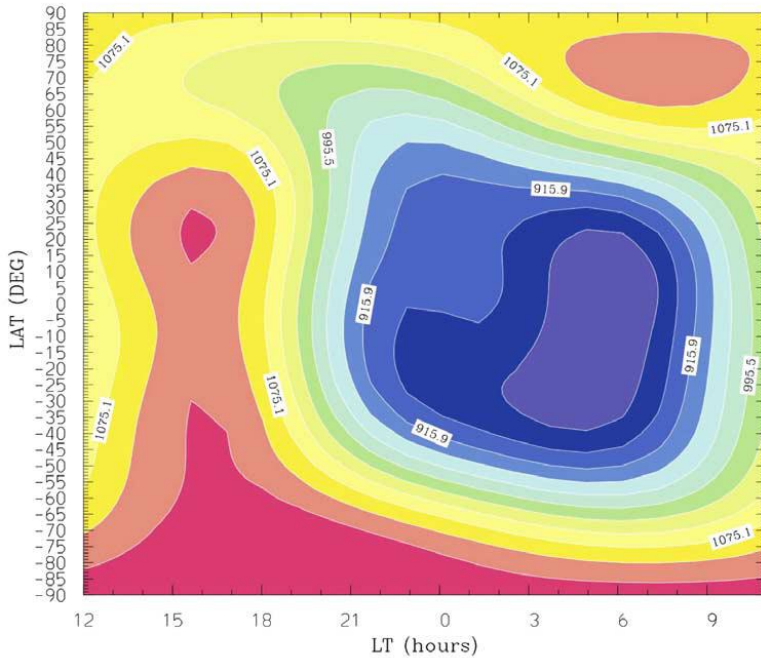
Термосфера

Данные эмпирических (MSIS) и глобальных моделей (TGCM NCAR)

Суточный ход (равноденствие)

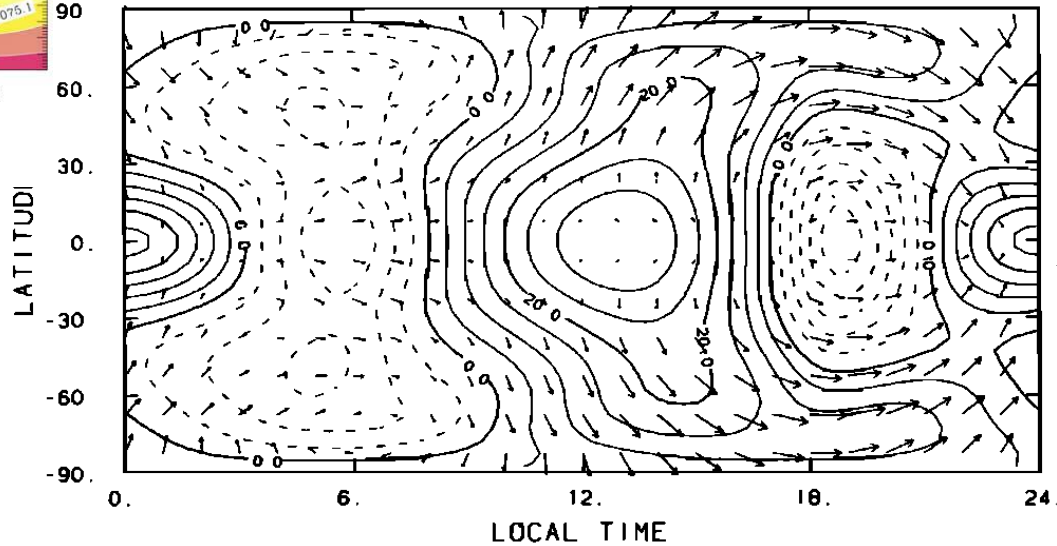
MSIS Temperature (K)

M125eq30z



300 км

Z = -40



120 км

300 км

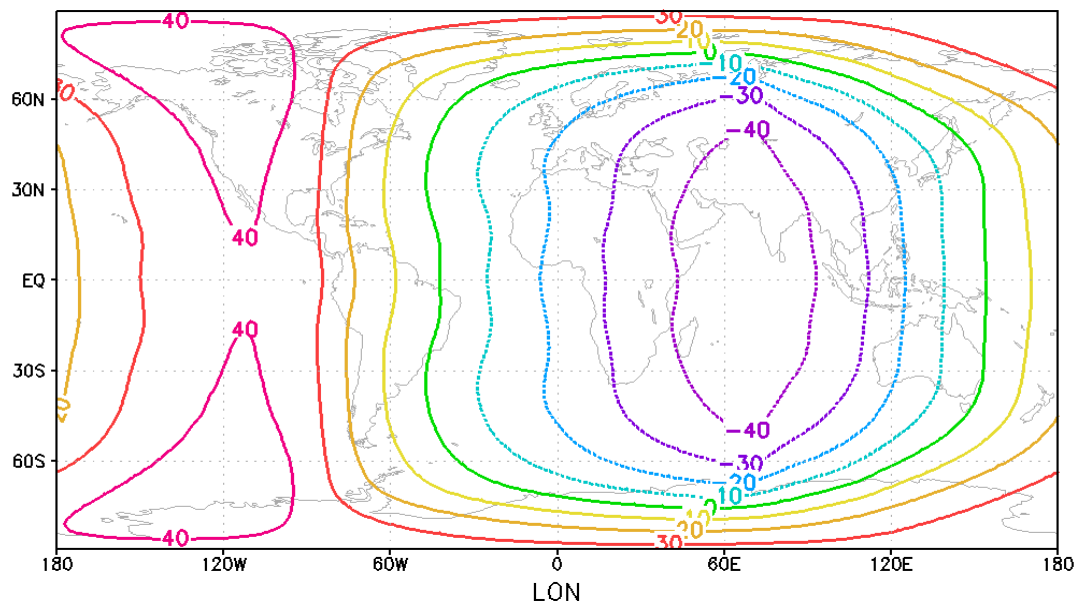
UT 12.0 Values at 300.0 km
MINIMUM 836.4, MAXIMUM 1154.7, CONTOUR INTERVAL 26.5

T, T' [K] u, v [м/с]

*термические
приливы*

Результаты моделирования **термосферы** - циркуляция модель ИВМ РАН с заданной радиацией (в отклонениях)

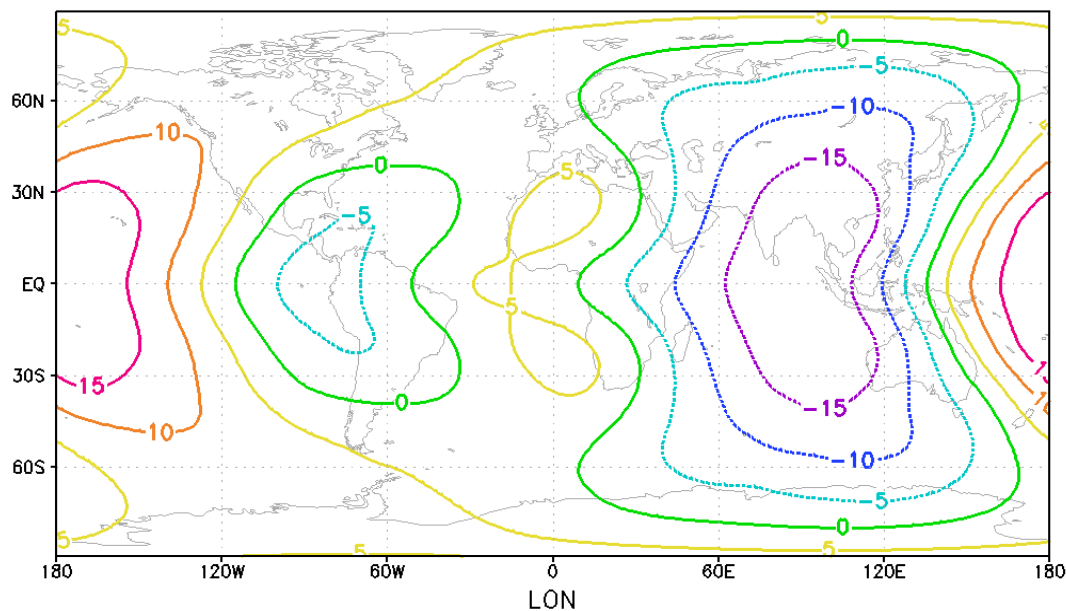
Суточный ход **300 км**
(равноденствие)



T' [K]

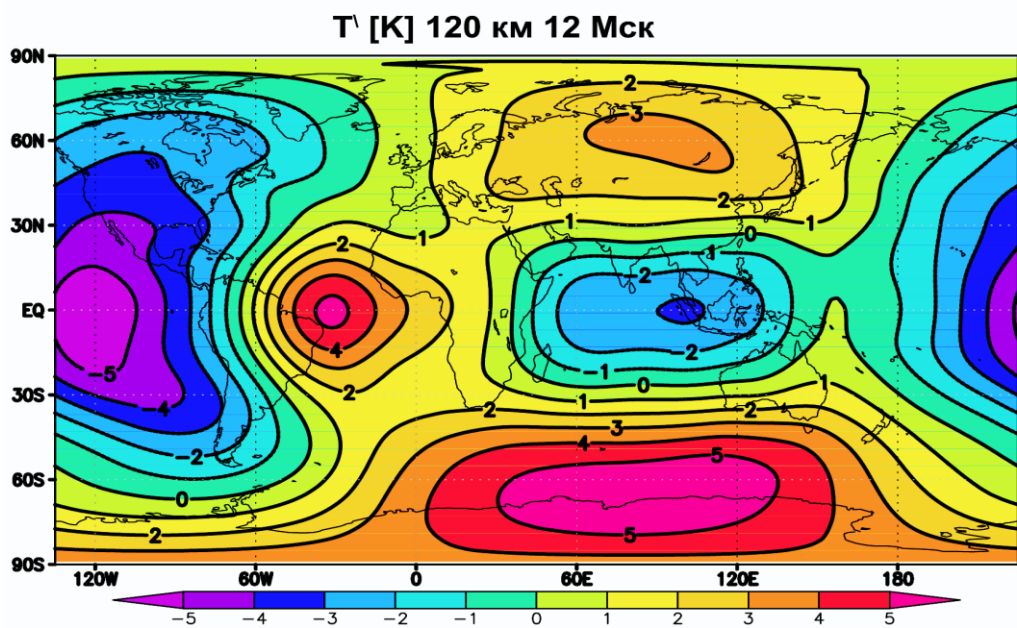
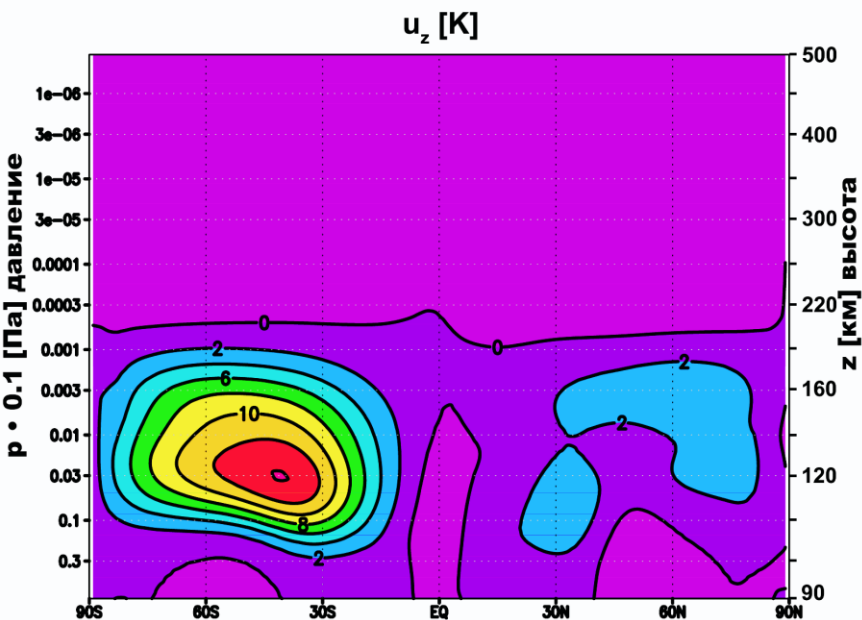
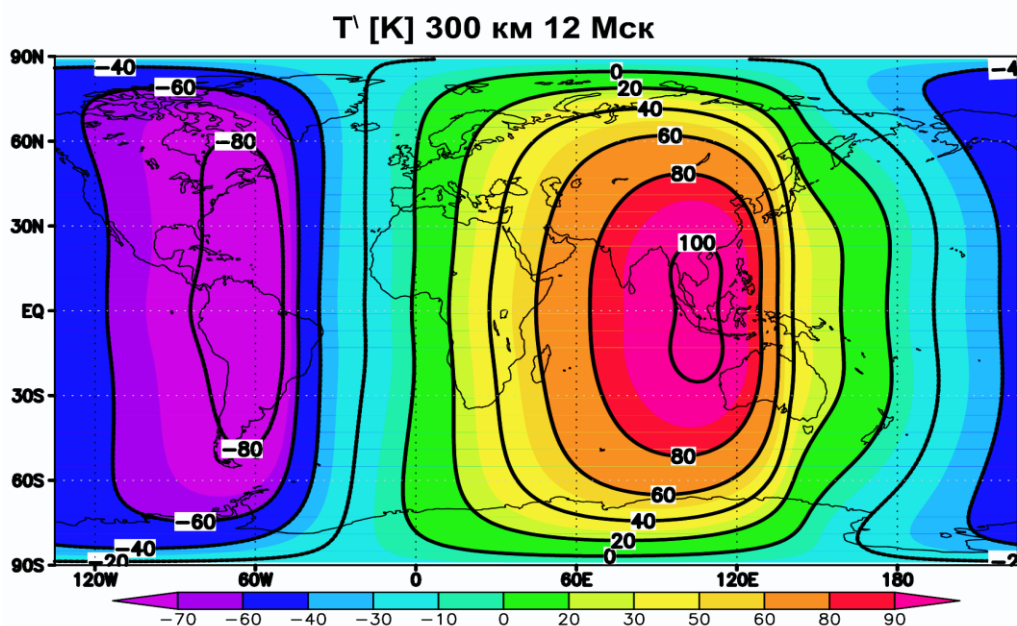
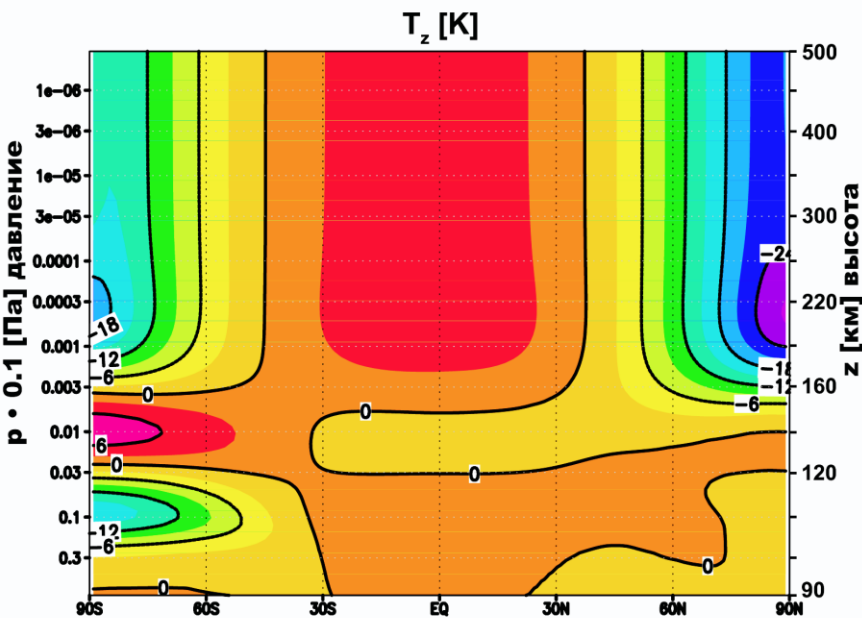
термические
приливы

120 км



Результаты моделирования термосферы - циркуляция

модель ИВМ РАН с радиационным блоком



Основные результаты

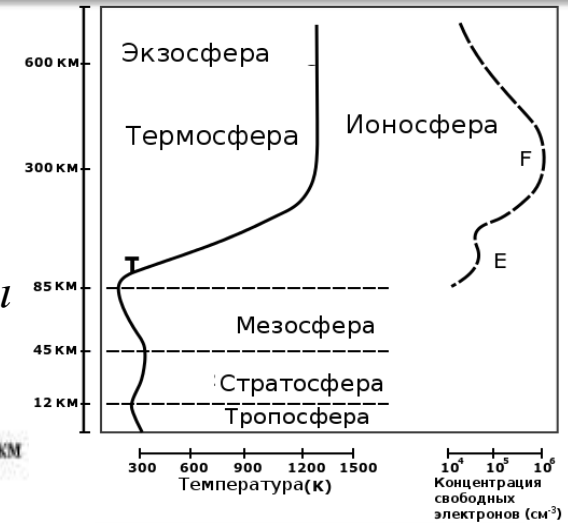
- Разработаны новая **глобальная трехмерная модель общей циркуляции термосферы Земли (90-500 км)** с высоким пространственным разрешением (2x2.5x80), в двух версиях: с заданной радиацией и включающая согласованный расчет радиационных процессов.
- Реализован вычислительный **радиационный блок** в новой версии модели. Проведен количественный анализ воспроизведения различных составляющих процесса переноса излучения: показана определяющая роль нагрева за счет поглощения ЭУФ-излучения в верхних слоях термосферы и баланс нагрева за счет поглощения УФ-излучения кислородом и выхолаживанием за счет инфракрасного излучения углекислого газа в нижних слоях термосферы. Полученные результаты моделирования основных особенностей радиационного баланса соответствуют общепринятым оценкам.
- Показано, что формирование глобального состояния термосферы для данной модели по существу определяется балансом радиационного нагрева и стока тепла за счет молекулярной диффузии, а также условиями на границе с мезосферой. Структура общей циркуляции определяется суточным ходом и балансом меридиональных термических градиентов, ион-нейтрального сопротивления, силы и сильного вертикального перемешивания.
- На основе первичной идентификации по эмпирическим данным показано, что модели с удовлетворительной точностью воспроизводят термический баланс и особенности общей циркуляции термосферы для рассматриваемых условий.

Моделирование атмосферы

- тропосфера (~0-10 км)
- стратосфера (~10-50 км)
- мезосфера (~50-90 км)
- D-слой ионосферы (~50-90 км)

нейтральный газ

заряженные частицы

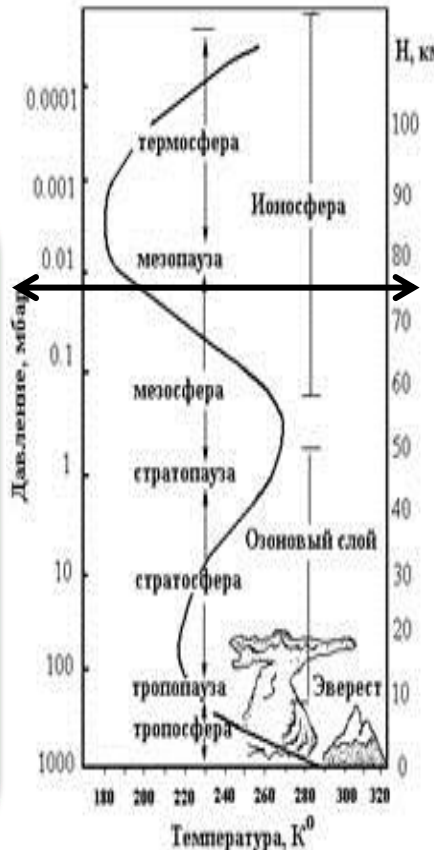


Модель общей циркуляции атмосферы (0-90 км)

Гидродинамика и термические процессы

Трехмерная постановка (сферическая система координат, приближение гидростатики)

используется как расчетный блок в климатической модели (атмосфера + океан)



Фотохимические модели D-слоя ионосферы

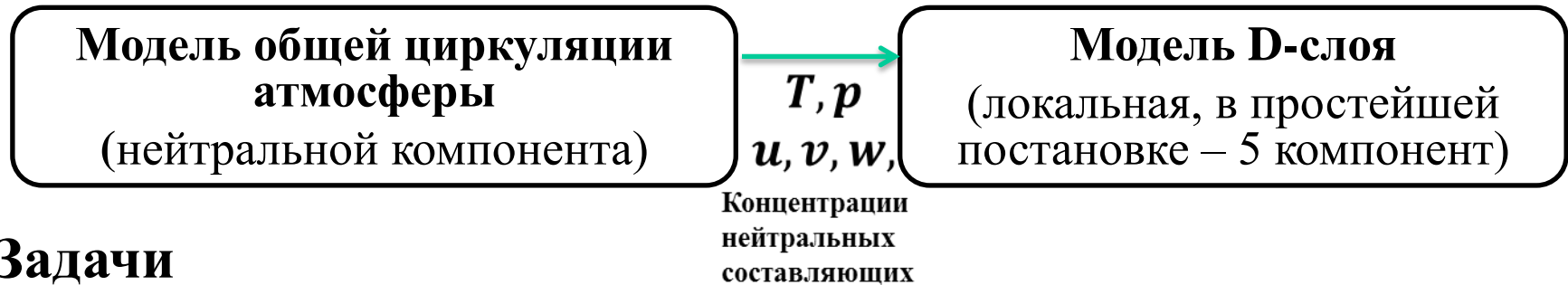
Ионизация

- положительные ионы
- отрицательные ионы
- электроны

Постановка задачи

Основная цель:

Создание *первой версии* совместной модели общей циркуляции тропосферы-стратосферы-мезосферы и D-слоя ионосферы (0-90 км)



Задачи

воспроизведение климата (среднего состояния и характеристик изменчивости)
исследование возможных механизмов формирования аномалий его характеристик

- Воспроизведение ключевых физических процессов, определяющих характеристики средней атмосферы (стратосферы и мезосферы) моделью ОЦА
- Исследование локальной фотохимической модели D слоя (математическая постановка задачи, численный метод)
- Оценки влияния термических и динамических характеристик атмосферы на D-слой

Модель общей циркуляции атмосферы (тропосфера-стратосфера-мезосфера, 0-90 км)

Система уравнений гидротермодинамики атмосферы

$$\frac{du}{dt} - \left(f + \frac{u}{a} \operatorname{tg} \psi \right) v + \frac{1}{a \cos \psi} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} + \frac{RT}{p} \frac{\partial p}{\partial \lambda} \right) = F_u,$$

Дифференциальная постановка

(вертикальная координата, связанная с давлением)

$$\frac{dv}{dt} + \left(f + \frac{u}{a} \operatorname{tg} \psi \right) u + \frac{1}{a} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \psi} + \frac{RT}{p} \frac{\partial p}{\partial \psi} \right) = F_v,$$

Полная производная по времени:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \eta} = - \frac{RT}{p} \frac{\partial p}{\partial \eta},$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \psi} \frac{\partial}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial}{\partial \psi} + \dot{\eta} \frac{\partial}{\partial \eta}$$

$$\frac{dT}{dt} - \frac{RT}{pc_p} \left(\frac{dp}{dt} \right) = F_T + \varepsilon,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial p}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{a \cos \psi} \left(\frac{\partial}{\partial \lambda} \left(u \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \psi} \left(v \frac{\partial p}{\partial \eta} \cos \psi \right) \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\dot{\eta} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) = 0$$

$$\Rightarrow \frac{\partial p_s}{\partial t} = - \frac{1}{a \cos \psi} \int_0^1 \left(\frac{\partial}{\partial \lambda} \left(u \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \psi} \left(v \frac{\partial p}{\partial \eta} \cos \psi \right) \right) d\eta.$$

Перенос влаги

$$\frac{dq}{dt} = F_q - (C - E)$$

Модель общей циркуляции атмосферы

Вертикальная координата (проблема выбора)

- **сигма координата** $\sigma = p / p_s$ p_s – давление на поверхности Земли

Позволяет избежать проблем с рельефом на нижней границе (дает хорошие результаты в области *тропосферы* - традиционно используется при моделировании нижних слоев атмосферы)

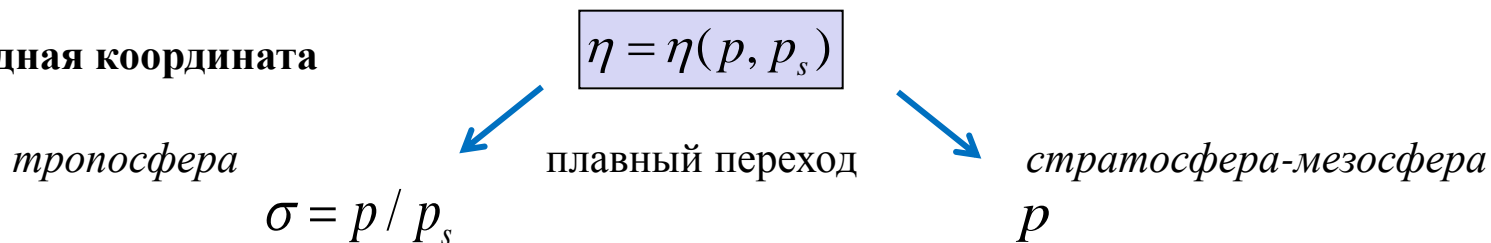
Вносит ошибки при расчете горизонтальных градиентов давления в верхних слоях (над областями с сильной орографией)

- **изобарическая координата** p

Не подходит для расчетов вблизи рельефной поверхности - проблема аппроксимации и постановки граничных условий

Хорошо подходит при расчетах динамики верхних слоев: *стратосферы*, *мезосферы* и *термосферы* (основной перенос происходит вдоль поверхностей постоянного давления)

Гибридная координата



Основные цели:

- Улучшение воспроизведения циркуляции в верхних слоях атмосферы
- Переход к построению модели атмосферы (0-500 км) (соединение с моделью термосферы)

Модель общей циркуляции атмосферы

Описание физических процессов

F_u, F_v - скорости изменения импульса за счет физических тенденций (напряжений Рейнольдса и др.)

F_T, F_q - описывают процессы мелкомасштабной диффузии тепла и влаги

Параметризация турбулентных процессов в пограничном слое и взаимодействия с поверхностью Земли

- процессы в почве и растительности

температура поверхности океана и морского льда задаются климатически, температура поверхности суши, количество снега, температура почвы и влажность рассчитываются прогностически

Параметризации воздействия мелкомасштабных гравитационных волн

- орографическое гравитационно-волновое сопротивление в тропосфере
- обрушение неорографических гравитационных волн (волновое сопротивление и турбулентная диффузия) в верхней атмосфере

ε – неадиабатический приток тепла

Радиационный блок

- поглотители: облачность, аэрозоли, $O_2, H_2O, CO_2, O_3, CH_4, N_2O$
- 10 линий длинноволнового излучения, 18 линий коротковолнового поглощения

C, E - описывают процессы конденсации и испарения влаги

Параметризации глубокой и мелкой конвекции

Моделирование средней атмосферы

тропосфера-стратосфера-мезосфера

Воспроизведение среднего состояния (рассматривается зимний сезон)

Воспроизведение ключевых физических процессов

(определяющих характеристики изменчивости)

- **Внезапные стратосферные потепления** (нарушения циркумполярного вихря [10-60 км])
- **Квазидвухлетние и полугодовые колебания** (тропики [13-90 км])
- **Осцилляции Маддена-Джулиана** (тропическая тропопауза [12-20 км], конвекция)
- **Термические приливы** (собственные моды, возбуждаемые солнечным ходом [70-150 км])

Основной динамический механизм:

распространение и взаимодействие со средним течением волн различных масштабов

- **Крупномасштабные волны** (планетарные волны, экваториальные волны Кельвина, инерционно-гравитационные волны) – внутренние волны
- **Короткие гравитационные волны** – параметризация

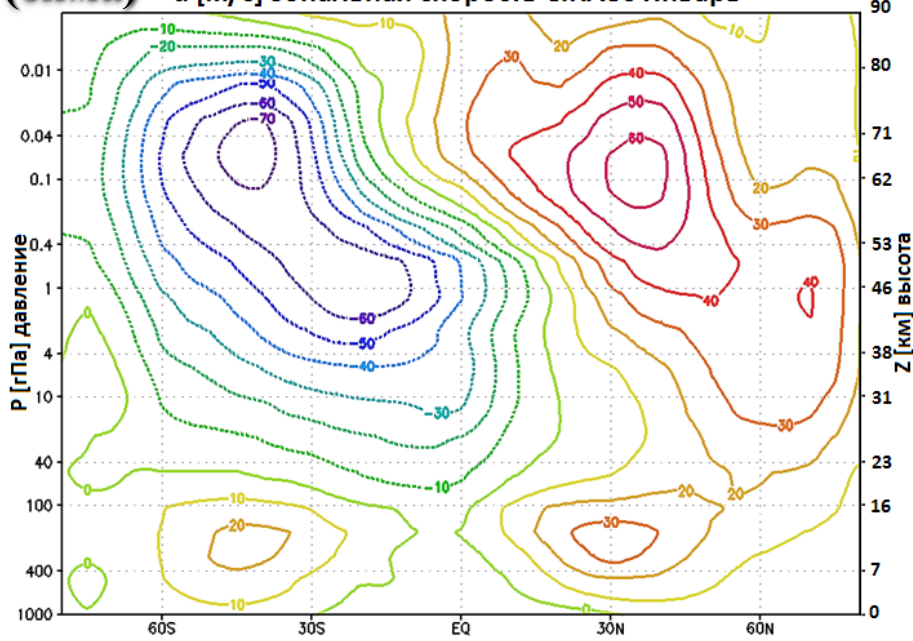
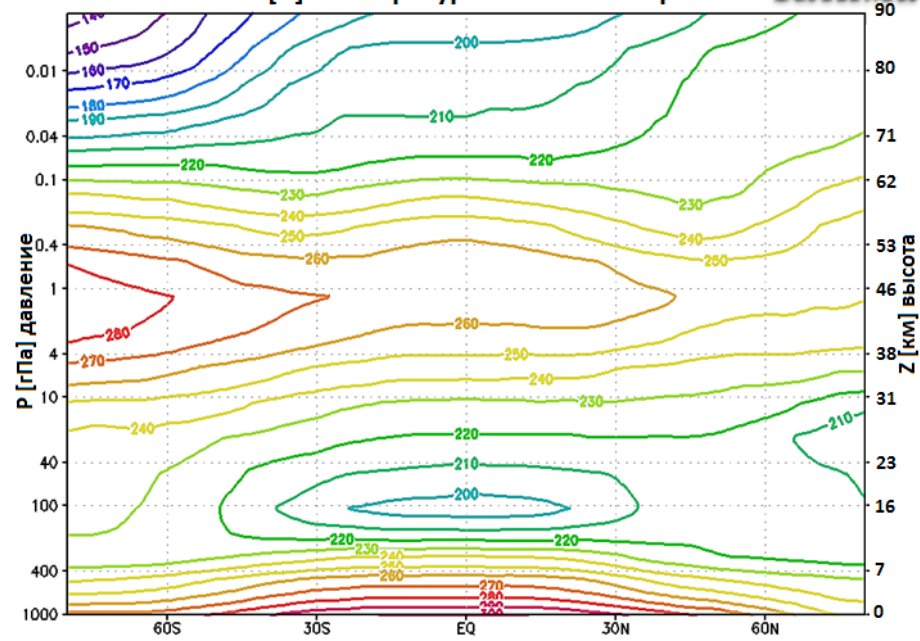
Большая часть представленных процессов реалистично воспроизводится моделью

**на основе различных исследований ранних версий в процессе развития моделей ОЦА*

T [K] температура CIRA 86 Январь

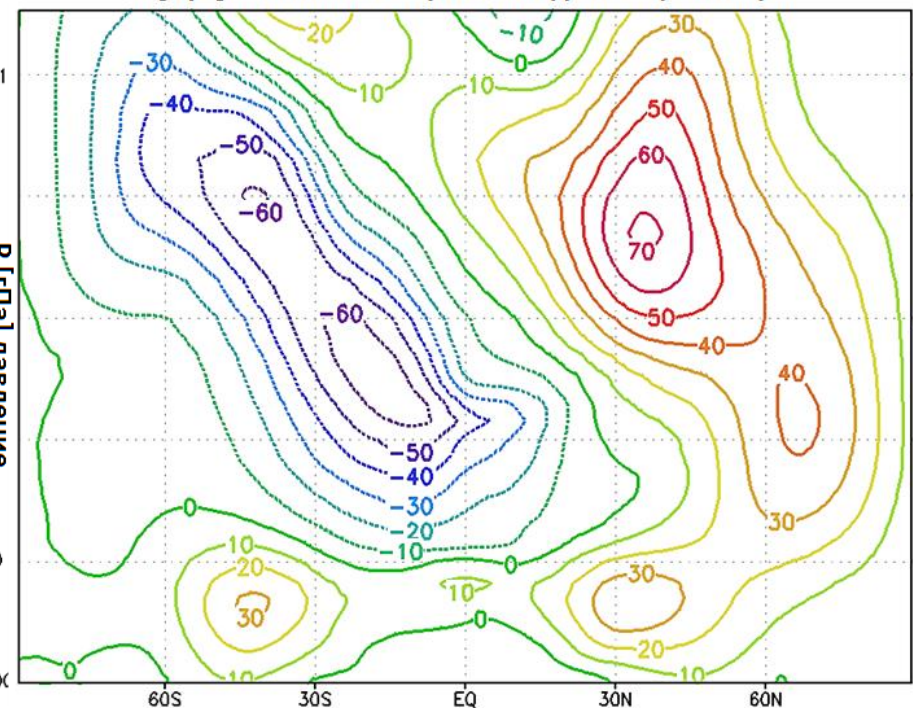
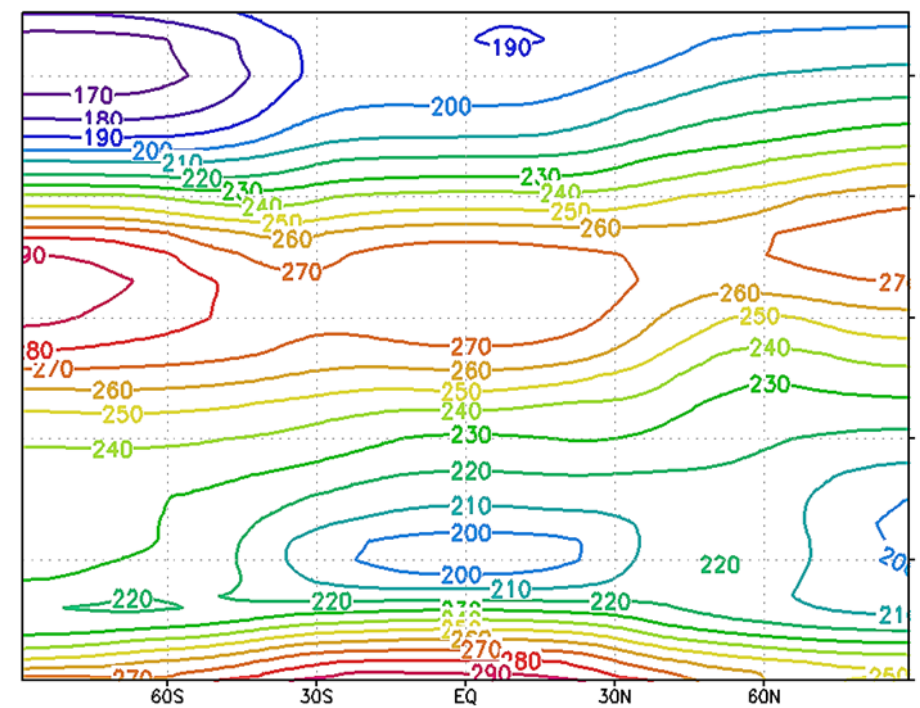
Климат (зима)

u [м/с] зональная скорость CIRA86 Январь



T [K] температура Модель ОЦА Январь

u [м/с] зональная скорость Модель ОЦА Январь

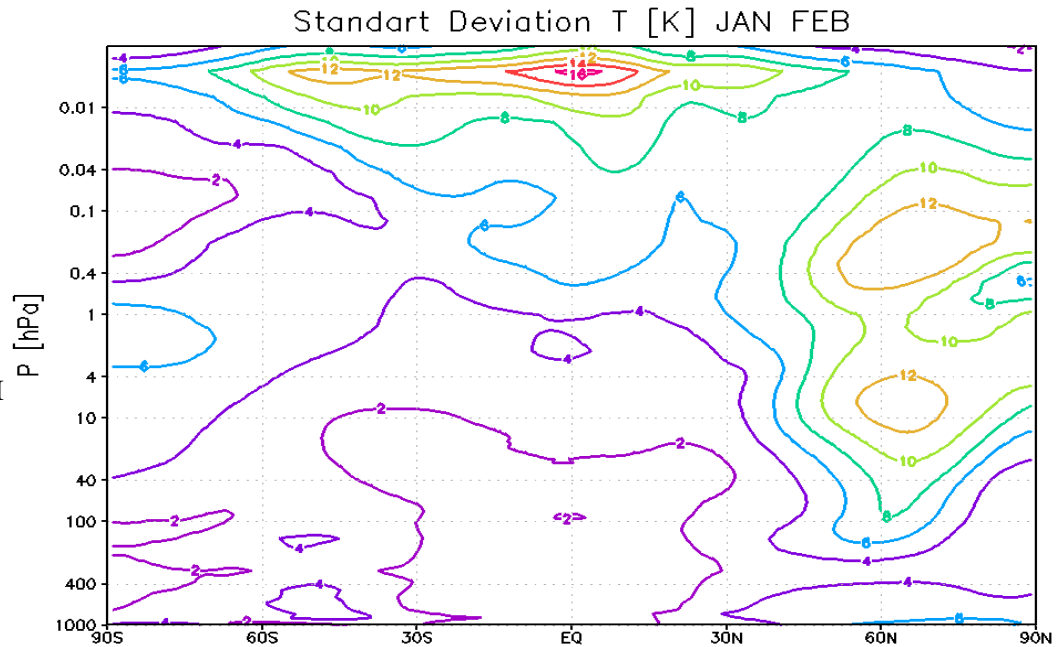


Результаты численных экспериментов по воспроизведению климата (зима)

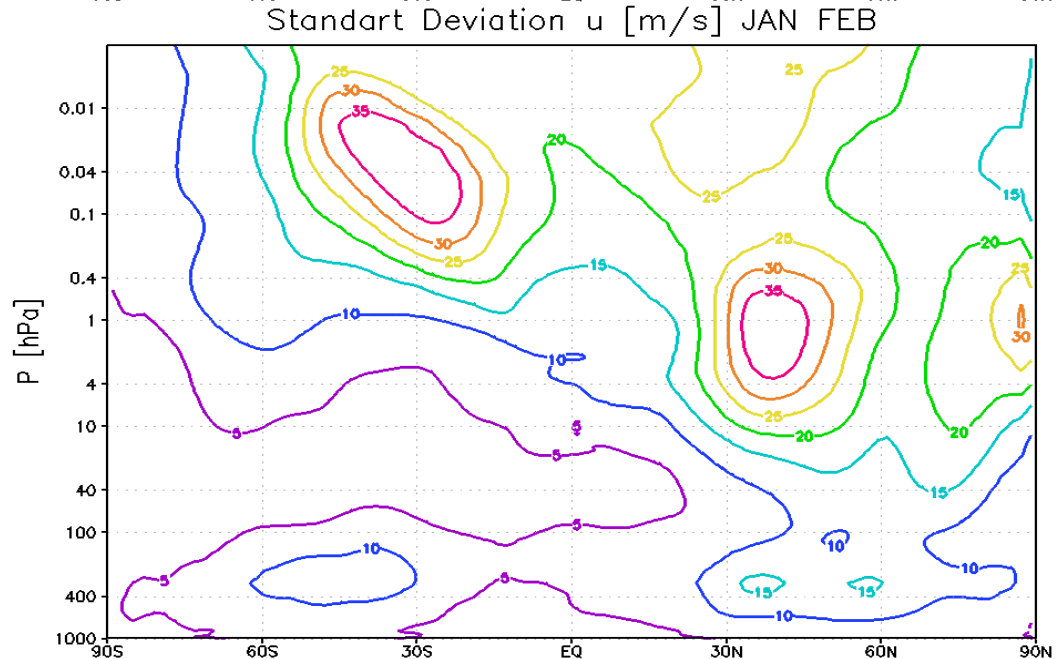
Внутресезонная изменчивость циркуляции

зонально осредненные профили
среднеквадратичного отклонения для
полей

- *температуры*



- *скорости зонального ветра*



Результаты численных экспериментов по моделированию квазидвухлетней и полугодовой цикличности

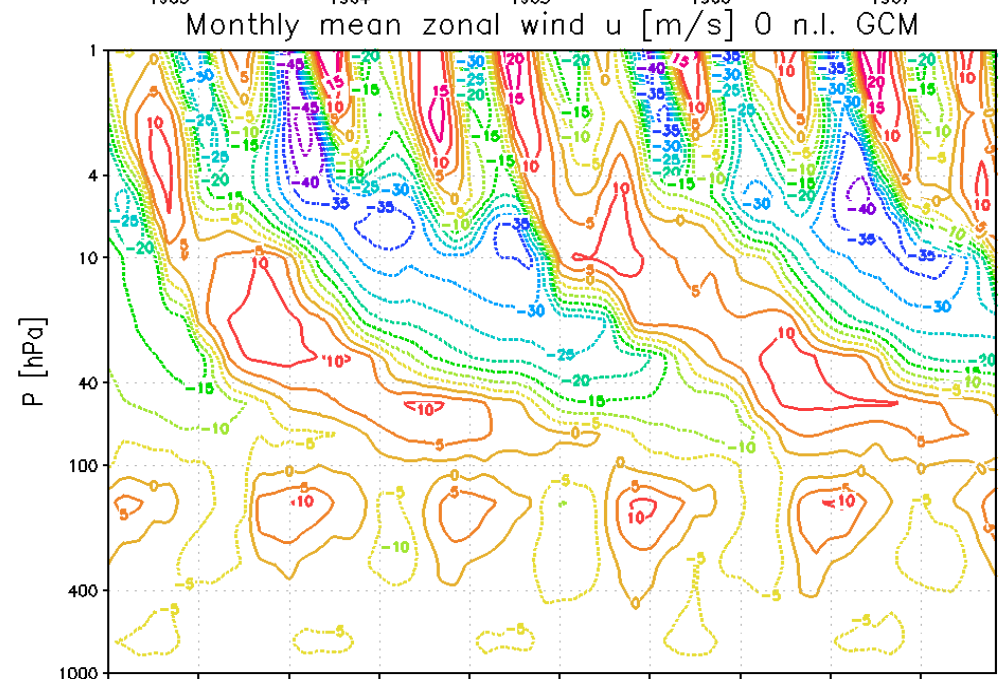
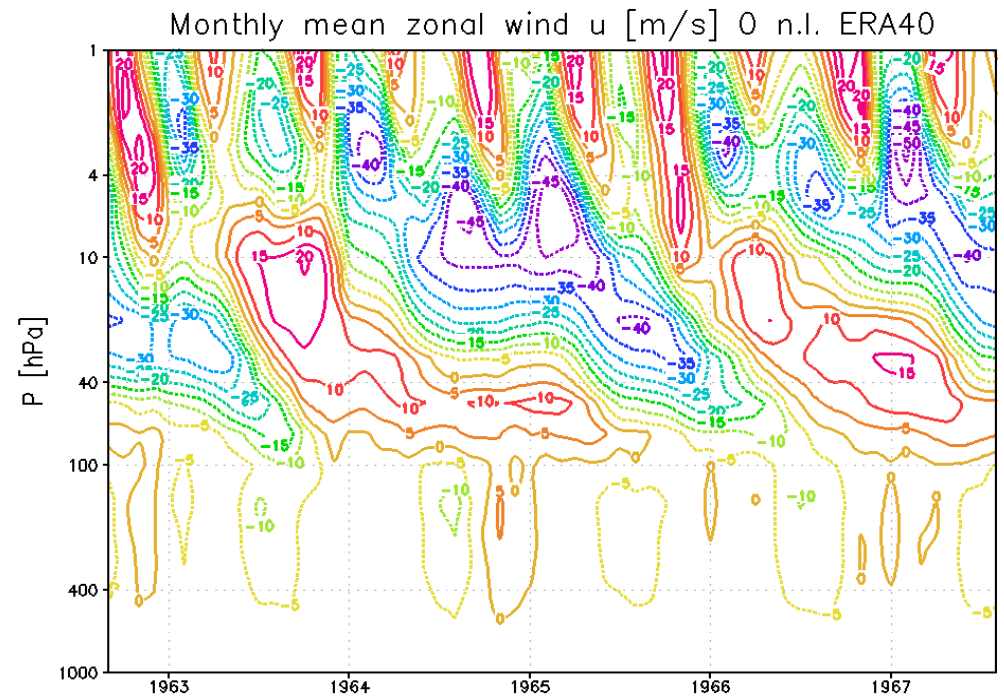
Среднемесячный зональный ветер

- экватор

- 5 лет

- данные реанализа наблюдений *ERA40*

- данные представленной версии модели атмосферы



Локальная фотохимическая модель D-слоя ионосферы

В общем случае - согласованный учет транспортных и химических процессов

Фотохимическая модель

Дифференциальная постановка (локальная в пространстве) – общий вид системы

$$\frac{\partial \vec{\varphi}}{\partial t} = R(\vec{\varphi}) \qquad R(\vec{\varphi}) = \vec{P} + Q(\vec{\varphi}) - L(\vec{\varphi})\vec{\varphi}$$

$\vec{\varphi} = (\varphi_i)$ - вектор концентраций составляющих (положительные и отрицательные ионы, электроны)

Общие особенности постановки фотохимических задач:

- неотрицательность компонент $\varphi_i \geq 0$
- закон сохранения суммарного заряда $\sum_i \varphi_i^+ - \sum_i \varphi_i^- = const$
- нет закона сохранения массы (согласованно не учитываются нейтральные составляющие)

Локальная фотохимическая модель D-слоя ионосферы

Следуя основной задаче:

**на первом этапе работы -
использование простейшей
версии модели**

5 компонентная модель

(предложена группой ИДГ РАН)

ИОНЫ NO^+ , O_2^- , C^+ , C^-

электроны

- ионизация оксида азота до образования (реакция P)
- цепочка преобразования водные кластеры (реакции R₁-R₈)
 $NO^+ \rightarrow NO^+(H_2O)$
- рекомбинация положительных ионов (E₁-E₂)
- прилипание электронов к молекулам кислорода в тройных соударениях (L₁)
- вторичные преобразования в группу отрицательных ионов (L₂-L₃)
- фотоотлипание электрона (L₄)
- ион-ионные рекомбинации (I₁)

Обозначение	Реакции	Константы скоростей	
R ₁	$NO^+ + N_2 + H_2O \rightarrow NO^+(H_2O) + N_2$	$1,8 \cdot 10^{-28} \cdot (300/T)^{4,7}$	cm^6c^{-1}
R ₂	$NO^+(H_2O)_n + N_2 + N_2 \rightarrow NO^+(H_2O)_n N_2 + N_2$	$2 \cdot 10^{-31} \cdot (300/T)^{4,4}, n=0-2$	cm^6c^{-1}
R ₃	$NO^+(H_2O)_n N_2 + CO_2 \rightarrow NO^+(H_2O)_n CO_2 + N_2$	$10^{-9}, n=0-2$	cm^3c^{-1}
R ₄	$NO^+(H_2O)_n N_2 + H_2O \rightarrow NO^+(H_2O)_{n+1} + N_2$	$10^{-9}, n=0-2$	cm^3c^{-1}
R ₅	$NO^+(H_2O)_n CO_2 + H_2O \rightarrow NO^+(H_2O)_{n+1} + CO_2$	$10^{-9}, n=0-2$	cm^3c^{-1}
R ₆	$NO^+(H_2O)_n + CO_2 + N_2 \rightarrow NO^+(H_2O)_n CO_2 + N_2$	$7 \cdot 10^{-30} (300/T)^3, n=0-2$	cm^6c^{-1}
R ₇	$NO^+ N_2 + N_2 \rightarrow NO^+ + N_2 + N_2$	$1,5 \cdot 10^6 T^{-5,4} \exp(-2450/T)$	cm^3c^{-1}
R ₈	$NO^+ CO_2 + N_2 \rightarrow NO^+ + CO_2 + N_2$	$3,1 \cdot 10^4 T^{-4} \exp(-4590/T)$	cm^3c^{-1}
E ₁	$NO^+ + e \rightarrow N + O$	$4 \cdot 10^{-7} \cdot (300/T)^{0,5}$	cm^3c^{-1}
E ₂	$NO^+(H_2O) + e \rightarrow NO + H_2O$	$2 \cdot 10^{-5}$	cm^3c^{-1}
L ₁	$e + O_2 + O_2 \rightarrow O_2^- + O_2$	$1,4 \cdot 10^{-29} (300/T) \exp(-600/T)$	cm^6c^{-1}
L ₂	$O_2^- + O_3 \rightarrow O_3^- + O_2$	$6 \cdot 10^{-10}$	cm^3c^{-1}
L ₃	$O_2^- + O_2 + O_2 \rightarrow O_4^- + O_2$	$4 \cdot 10^{-31}$	cm^3c^{-1}
I ₁	$X^- + Y^+ \rightarrow \text{нейтралы}$	10^{-7}	cm^3c^{-1}
L ₄	$O_2^- + hv \rightarrow e + O_2$	0,33	c^{-1}
D ₁	$O_2 + hv \rightarrow O(^3P) + O(^1D)$		
P	$NO + hv \rightarrow e + NO^+$		

Локальная фотохимическая модель D-слоя ионосферы

$$\varphi_1 = [NO^+], \varphi_2 = [C^+], \varphi_3 = n_e, \varphi_4 = [O_2^-], \varphi_5 = [C^-]$$

Система уравнений

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = P - B\varphi_1 - k_{13}\varphi_1\varphi_3 - k_c\varphi_1(\varphi_4 + \varphi_5),$$

$$\frac{d\varphi_2}{dt} = B\varphi_1 - k_{23}\varphi_2\varphi_3 - k_c\varphi_2(\varphi_4 + \varphi_5),$$

$$\frac{d\varphi_3}{dt} = P - k_{13}\varphi_1\varphi_3 - k_{23}\varphi_2\varphi_3 - k_3\varphi_3 + k_4\varphi_4,$$

$$\frac{d\varphi_4}{dt} = k_3\varphi_3 - (k_4 + k_5)\varphi_4 - k_c\varphi_4(\varphi_1 + \varphi_2),$$

$$\frac{d\varphi_5}{dt} = k_5\varphi_4 - k_c\varphi_5(\varphi_1 + \varphi_2)$$

Ионизация (линия Лайман-альфа (121.6 нм) - NO)

$$P(z) = I_{L\alpha} \cdot \sigma_{NO}^i \cdot [NO] \cdot \exp(-\tau(z))$$

$$\tau(z, \chi) = \sigma_{O_2} \cdot \text{Sum}O_2(z, \chi) = \sigma_{O_2} \cdot \int_z^{z_0} \frac{[O_2]}{\cos \chi} dz$$

Условие локального сохранения заряда

$$\Rightarrow \frac{d\varphi_3}{dt} = \frac{d\varphi_1}{dt} + \frac{d\varphi_2}{dt} - \frac{d\varphi_4}{dt} - \frac{d\varphi_5}{dt}$$

Параметры (константы реакции соответствуют таблице)

$$k_{13} = E_1, k_{23} = E_2, k_3 = L_1[O_2]^2, k_4 = L_4, k_5 = L_2[O_3] + L_3[O_2]^2, k_c = I_1$$

Условие квазиравновесия «виртуальных» ионов

$$B = R_1[H_2O][N_2] + \frac{R_2[N_2]^2 \cdot R_4[H_2O]}{L_N} + \frac{R_5[H_2O]}{L_C} \left(R_6[CO_2][N_2] + \frac{R_2[N_2]^2 \cdot R_3[CO_2]}{L_N} \right)$$

$$L_N = R_7[N_2] + R_3[CO_2] + R_4[H_2O]$$

$$L_C = R_8[N_2] + R_5[H_2O]$$

Параметры нейтральных составляющих (задаются)

$$n = p / kT,$$

$$[N_2] = 0.78 \cdot n,$$

$$[O_2] = 0.21 \cdot n,$$

$$[CO_2] = 0.39 \cdot 10^{-5} \cdot n,$$

$$[O_3] = 0.3 \cdot 10^{-5} \cdot n,$$

$$[NO] = 10^{-7} \cdot n,$$

$$[H_2O] = 0.8 \cdot 10^{-5} \cdot n$$

Локальная фотохимическая модель D-слоя ионосферы

Свойства дифференциальной постановки

Задача Коши (нужны начальные условия)

Доказан ряд утверждений:

- Система сохраняет неотрицательность компонент в любой момент времени в случае неотрицательности их в начальный момент.

- Система диссипативна в смысле $\sum_i \frac{\partial R(\varphi_i)}{\partial \varphi_i} < 0$

- Система имеет поглощающее множество в норме $\|\varphi\| = \sum_i \varphi_i$

Следовательно система имеет **глобальный аттрактор** на знакоопределенном фазовом полупространстве $\varphi_i \geq 0$

Конкретные свойства сходимости к аттрактору исследованы численно

- *многошаговый метод*, основанный на формулах численного дифференцирования с выбором размера шага в зависимости от требуемой точности (применяется при исследовании жестких систем)

Глобальный аттрактор системы (в широком интервале параметров) - стационарная точка для всех начальных значений с единым суммарным зарядом является

положение стационарной точки непрерывно меняется (в зависимость от заряда) $\sum_i \varphi_i^+ - \sum_i \varphi_i^- = const$

Для ионосферы- условие локальной квазинейтральности: $\sum_i \varphi_i^+ - \sum_i \varphi_i^- = 0$

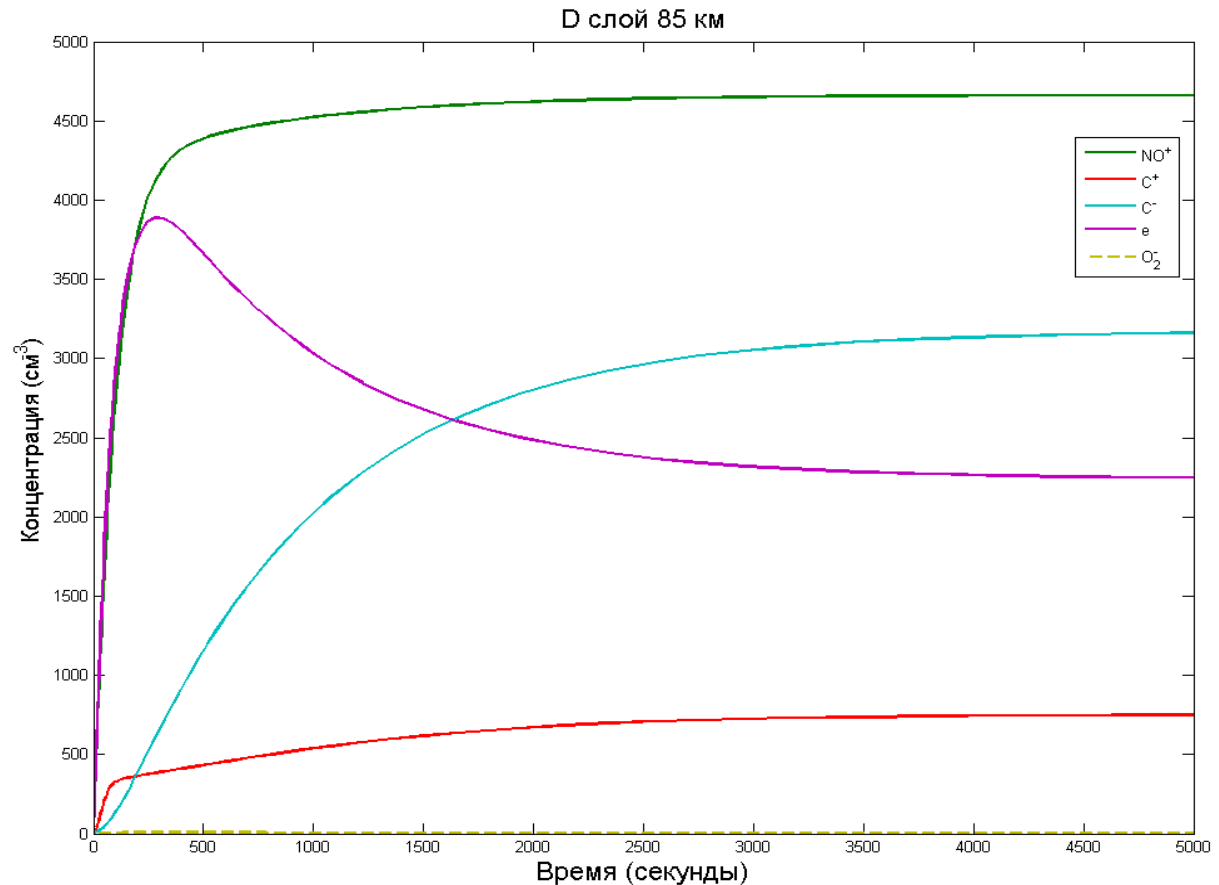
Локальная фотохимическая модель D-слоя ионосферы

Численные эксперименты

Характерные условия для двух высот D слоя ионосферы
(фиксированные во времени параметры системы)

50 км – быстрая сходимость электронов и иона оксида азота (около секунд),
медленная для кластеров – *долгоживущие составляющие*

85 км – примерно равные времена сходимости (около получаса)



- экспериментально установлена непрерывная зависимость решений системы от параметров
- бифуркации не наблюдались

Локальная фотохимическая модель D-слоя ионосферы

Полунеявная численная схема

Решение сложной нелокальной системы в модели атмосферы –

- **требуются эффективные численные схемы** (сетка содержит порядка миллиона узлов)
- **большие шаги по времени** (для используемой версии – 2 минуты)

Выполнение свойств дифференциальной постановки (з.с.з., неотрицательность)

Построена полунеявная схема с сохранением начального заряда

$$\frac{\varphi_1^{n+1} - \varphi_1^n}{\Delta t} = P - B\varphi_1^{n+1} - k_{13}\varphi_1^n\varphi_3^{n+1} - k_c\varphi_1^n(\varphi_4^n + \varphi_5^n),$$

$$\frac{\varphi_2^{n+1} - \varphi_2^n}{\Delta t} = B\varphi_1^{n+1} - k_{23}\varphi_2^n\varphi_3^{n+1} - k_c\varphi_2^n(\varphi_4^n + \varphi_5^n),$$

$$\frac{\varphi_3^{n+1} - \varphi_3^n}{\Delta t} = P - k_{13}\varphi_1^n\varphi_3^{n+1} - k_{23}\varphi_2^n\varphi_3^{n+1} - k_3\varphi_3^{n+1} + k_4\varphi_4^{n+1},$$

$$\frac{\varphi_4^{n+1} - \varphi_4^n}{\Delta t} = k_3\varphi_3^{n+1} - (k_4 + k_5)\varphi_4^{n+1} - k_c\varphi_4^n(\varphi_1^n + \varphi_2^n),$$

$$\frac{\varphi_5^{n+1} - \varphi_5^n}{\Delta t} = k_5\varphi_4^{n+1} - k_c\varphi_5^n(\varphi_1^n + \varphi_2^n).$$

Идея построения схемы:

выделение процессов с быстрыми характерными временами сходимости
- неявная схема

компоненты с медленной сходимостью
- Явная схема

$$(I - \Delta t M) \bar{\varphi}^{n+1} = \Delta t \bar{a} + \bar{\varphi}^n$$

$$M = \begin{pmatrix} -B & 0 & -k_{13}\varphi_1 & 0 & 0 \\ B & 0 & -k_{23}\varphi_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_{13}\varphi_1 - k_{23}\varphi_2 - k_3 & k_4 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 & -k_4 - k_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_5 & 0 \end{pmatrix} \quad \bar{a} = \begin{pmatrix} P - k_c\varphi_1(\varphi_4 + \varphi_5) \\ -k_c\varphi_2(\varphi_4 + \varphi_5) \\ P \\ -k_c\varphi_4(\varphi_1 + \varphi_2) \\ -k_c\varphi_5(\varphi_1 + \varphi_2) \end{pmatrix}$$

Моделирование D-слоя ионосферы в рамках совместной модели общей циркуляции атмосферы

Уравнение переноса в общем случае – для каждой компоненты

$$\frac{d\varphi_i}{dt} + \nabla \cdot (\bar{u}_i \varphi_i) = R + \nabla \cdot (d\nabla \varphi_i)$$

$$\varphi_i \ll n = p / kT$$

Динамика ионосферы – **перенос и диффузия пассивной примеси** (аналогично влаге)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial p}{\partial \eta} \varphi_i \right) + \frac{1}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\varphi_i u \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\varphi_i v \cos \psi \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\varphi_i \dot{\eta} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) = \frac{\partial p}{\partial \eta} [R + F_\varphi], \quad i = 1, 5$$

Метод расщепления *по физическим процессам*

на каждом шаге по времени

- Решение локальной фотохимической модели как отдельного вычислительного блока в каждой точке модельной сетки (с помощью построенной схемы)
- Расчет процессов переноса и диффузии

Численные эксперименты по совместному моделированию атмосферы и D слоя ионосферы

Воспроизведение среднего состояния (январь)

Исследование относительной роли характеристик атмосферы в формировании D-слоя ионосферы

- Термодинамическое состояние (T, p - плотность), влажность
- Динамика – непосредственный перенос и турбулентная диффузия

Численные эксперименты:

суточный ход солнца (январь)

режим «постоянного полудня» ($\cos\chi=1$)

- заданные параметры влажности, без динамики (используется только температура и давление)
- рассчитываемая влага (без динамики)
- расчет динамики

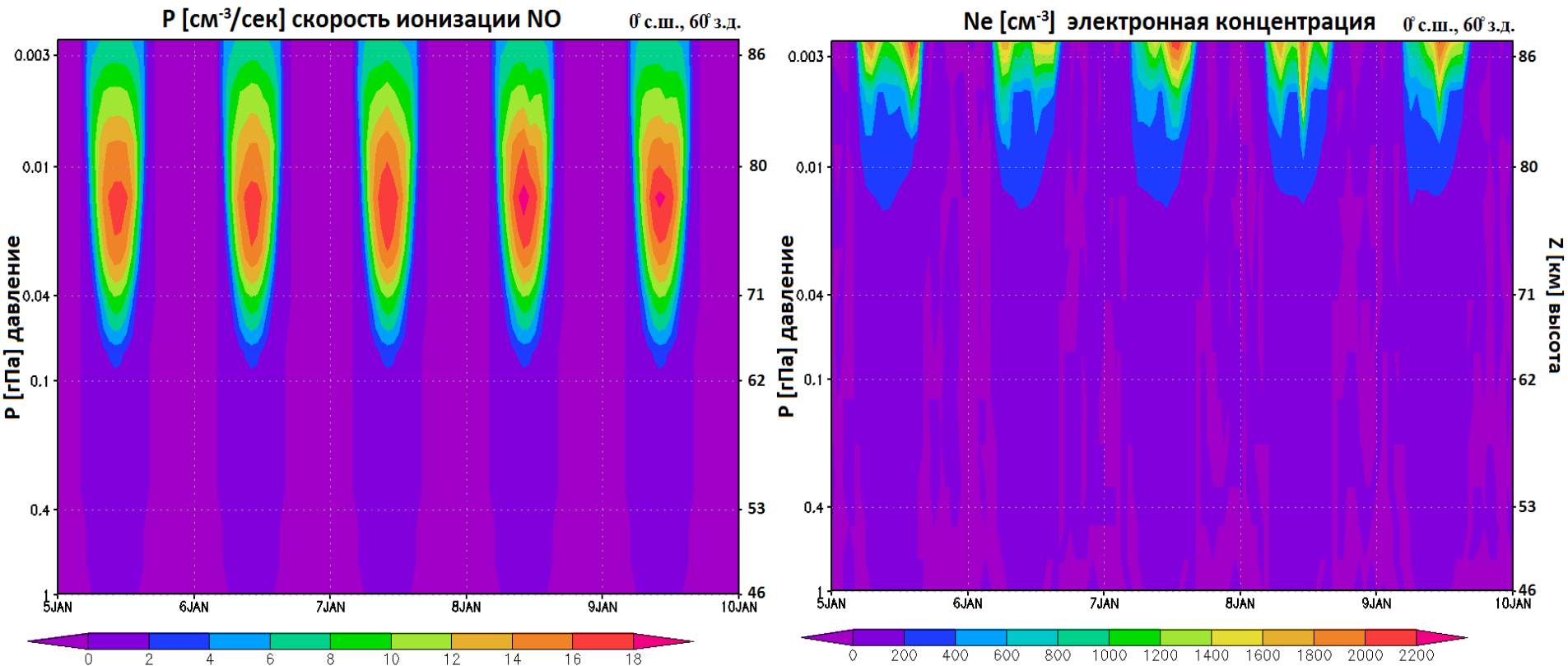
Результаты численных экспериментов по данным совместной модели общей циркуляции атмосферы и D слоя ионосферы

Временной ход вертикальных профилей

скорости ионизации и концентраций ионосферных составляющих

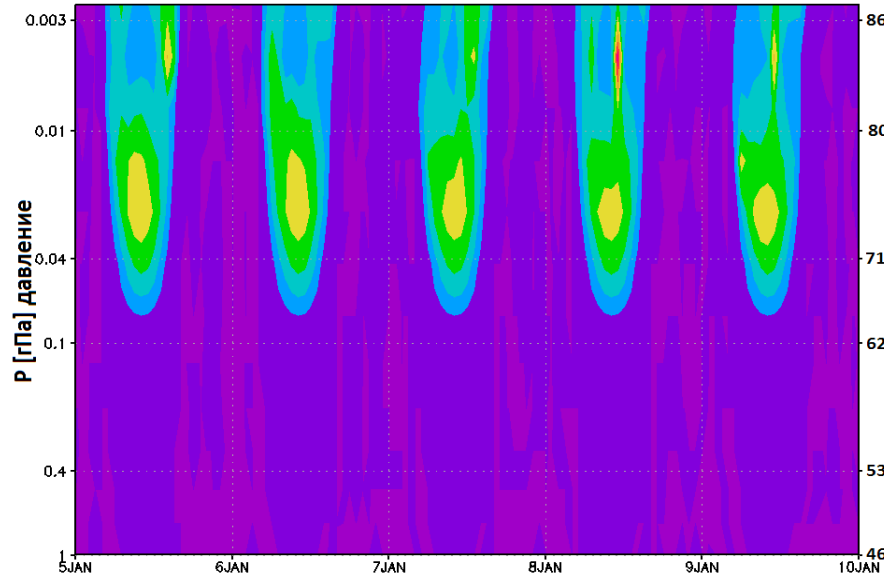
в точке с координатами 0° с.ш., 60° з.д.

5 дней, январь

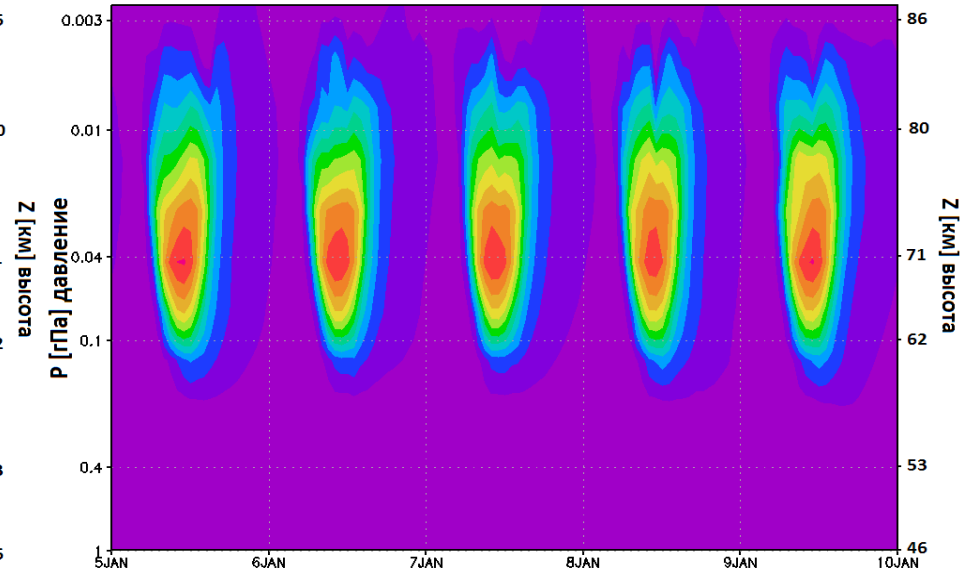


Результаты численных экспериментов (вертикальные профили временного хода составляющих)

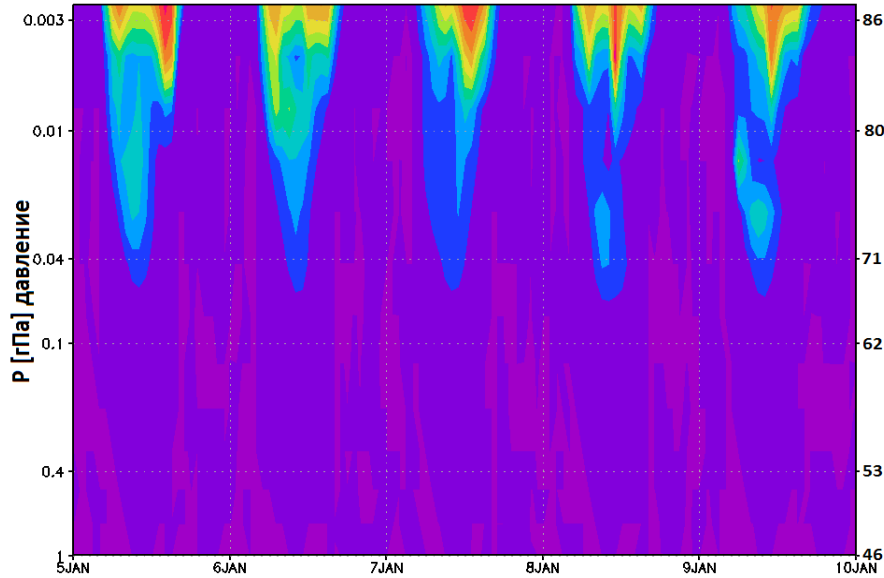
O_2^- [см⁻³] ион молекулярного кислорода θ с.ш., 60° з.д.



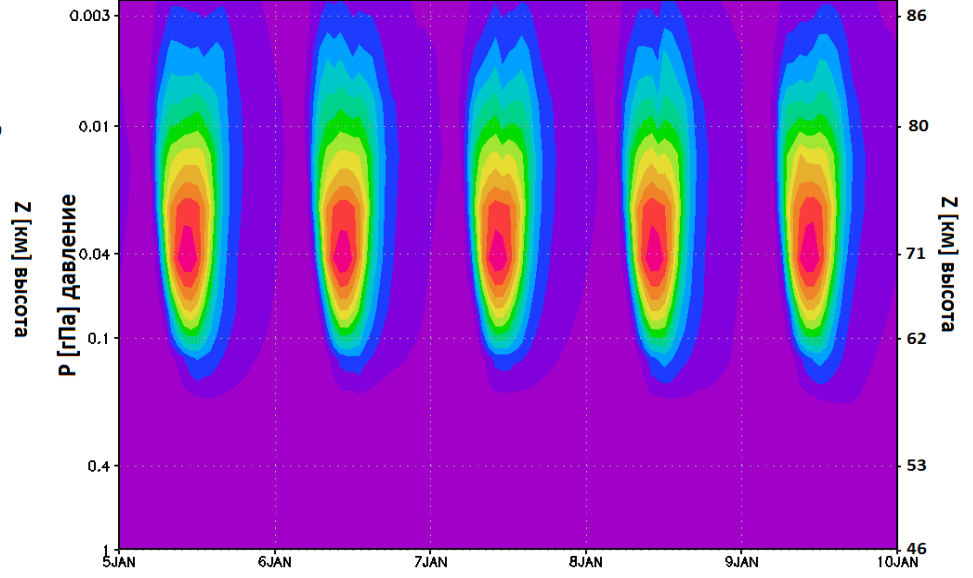
C^+ [см⁻³] положительные кластерные ионы θ с.ш., 60° з.д.



NO^+ [см⁻³] ион оксида азота θ с.ш., 60° з.д.



C^- [см⁻³] отрицательные кластерные ионы θ с.ш., 60° з.д.



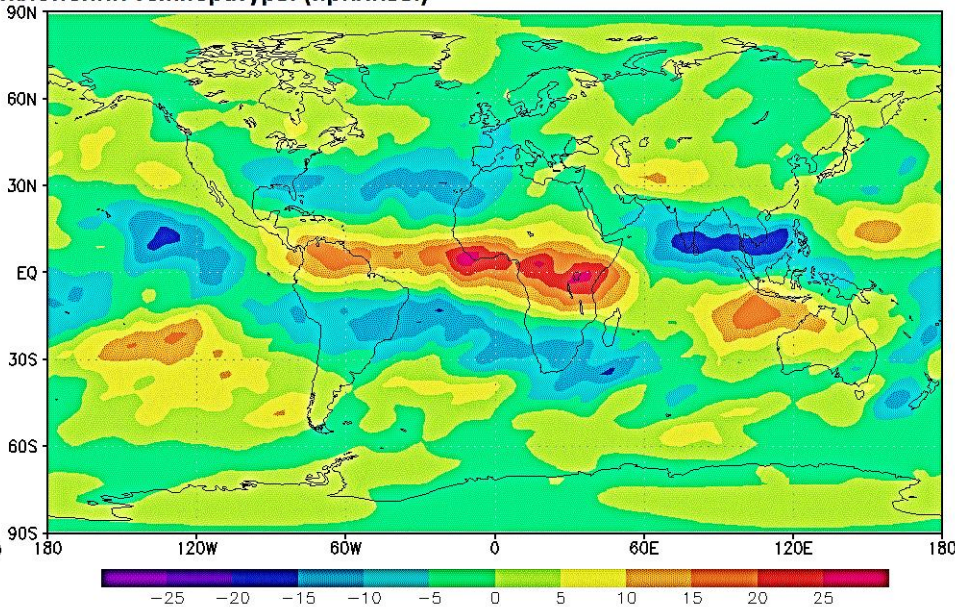
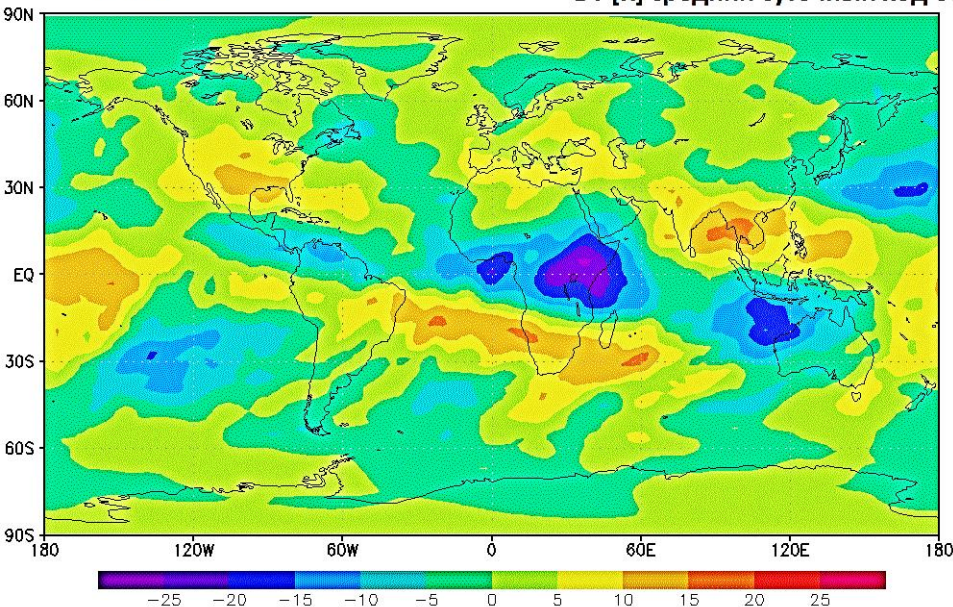
Результаты численных экспериментов

долготно-широтные распределения суточного хода DT и Ne, P = 0.01 гПа, Z ~ 85 км

12 ч UT

DT [K] средний суточный ход отклонений температуры (приливы)

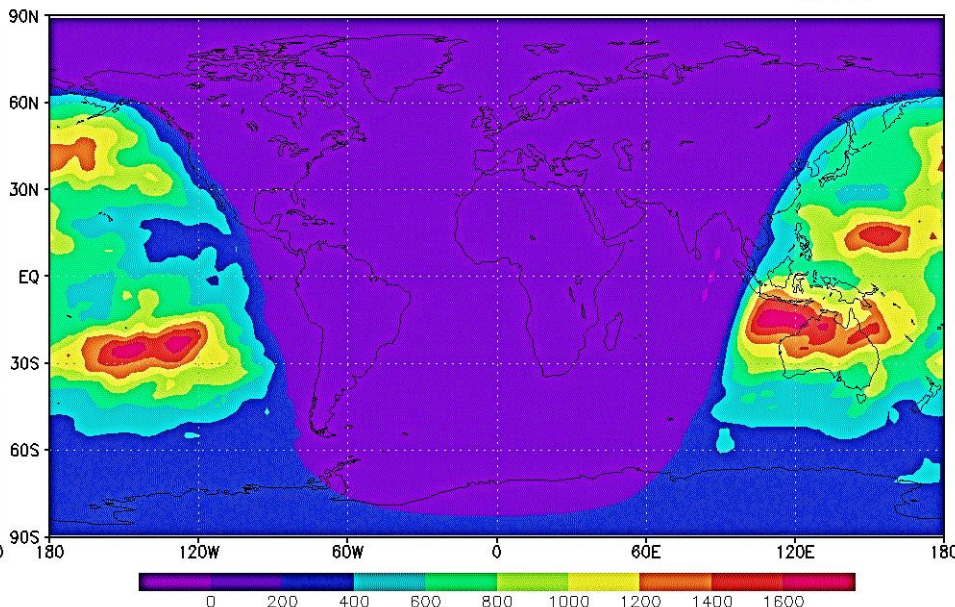
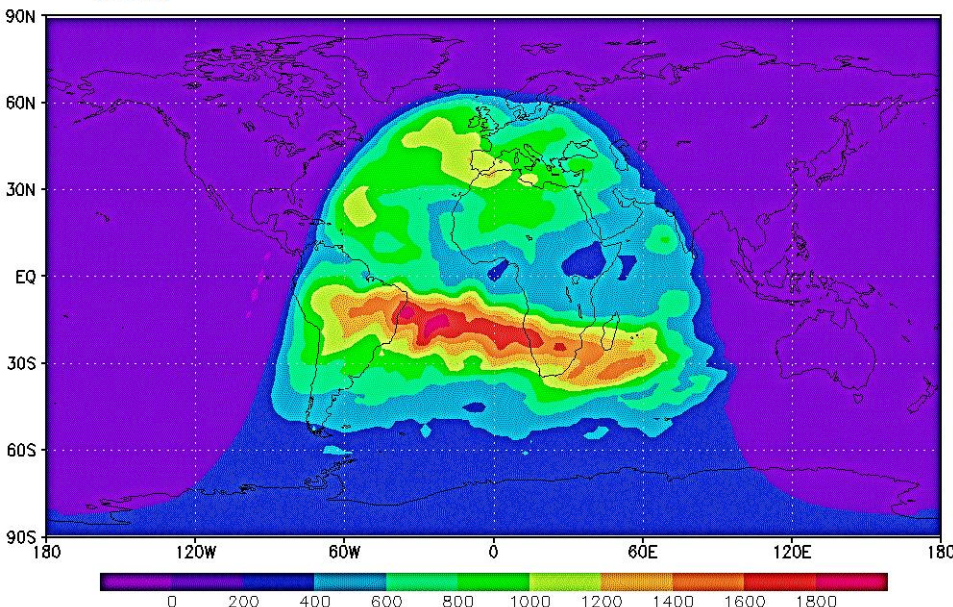
24 ч UT



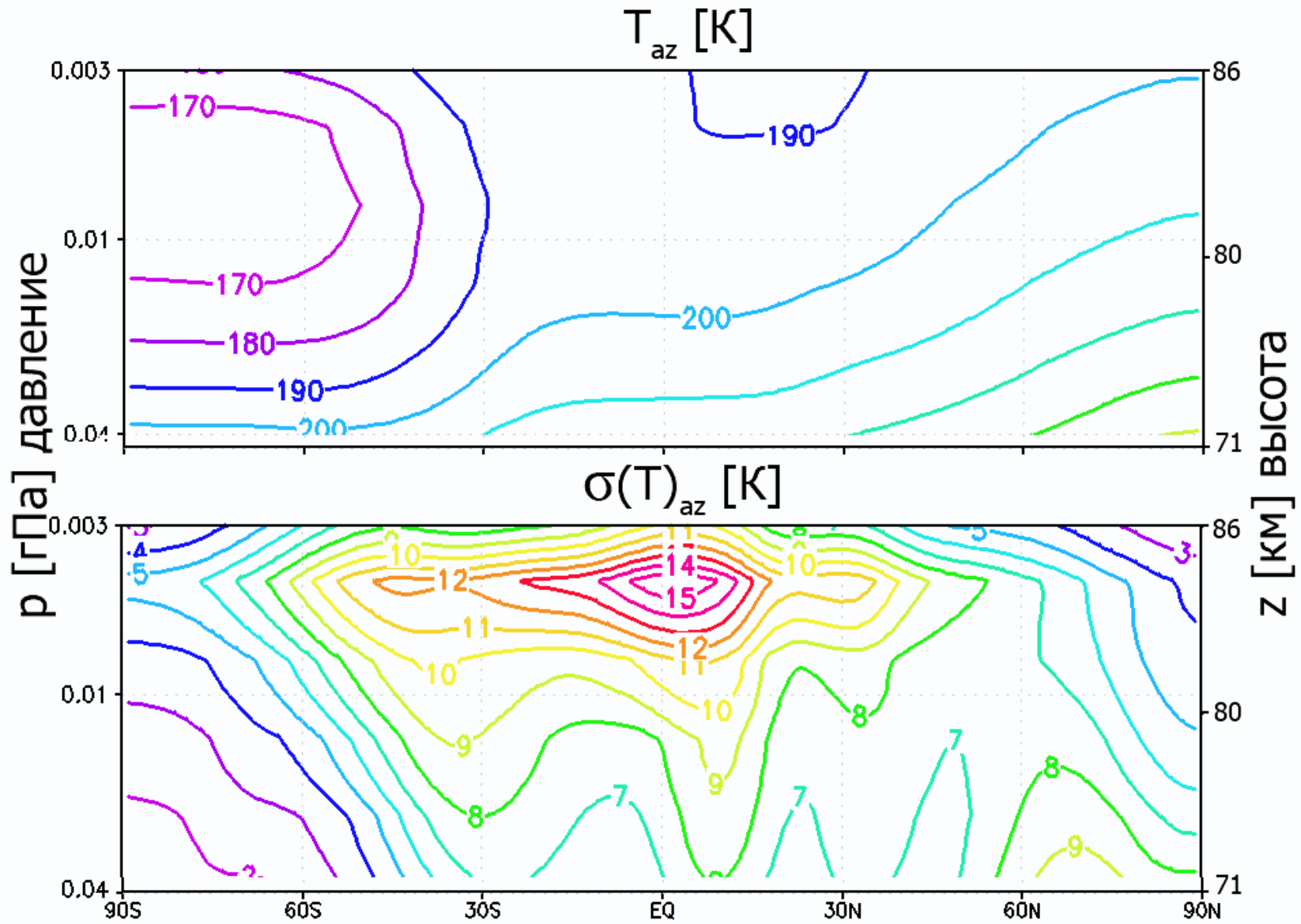
12 ч UT

Ne [cm⁻³] средний суточный ход электронной концентрации

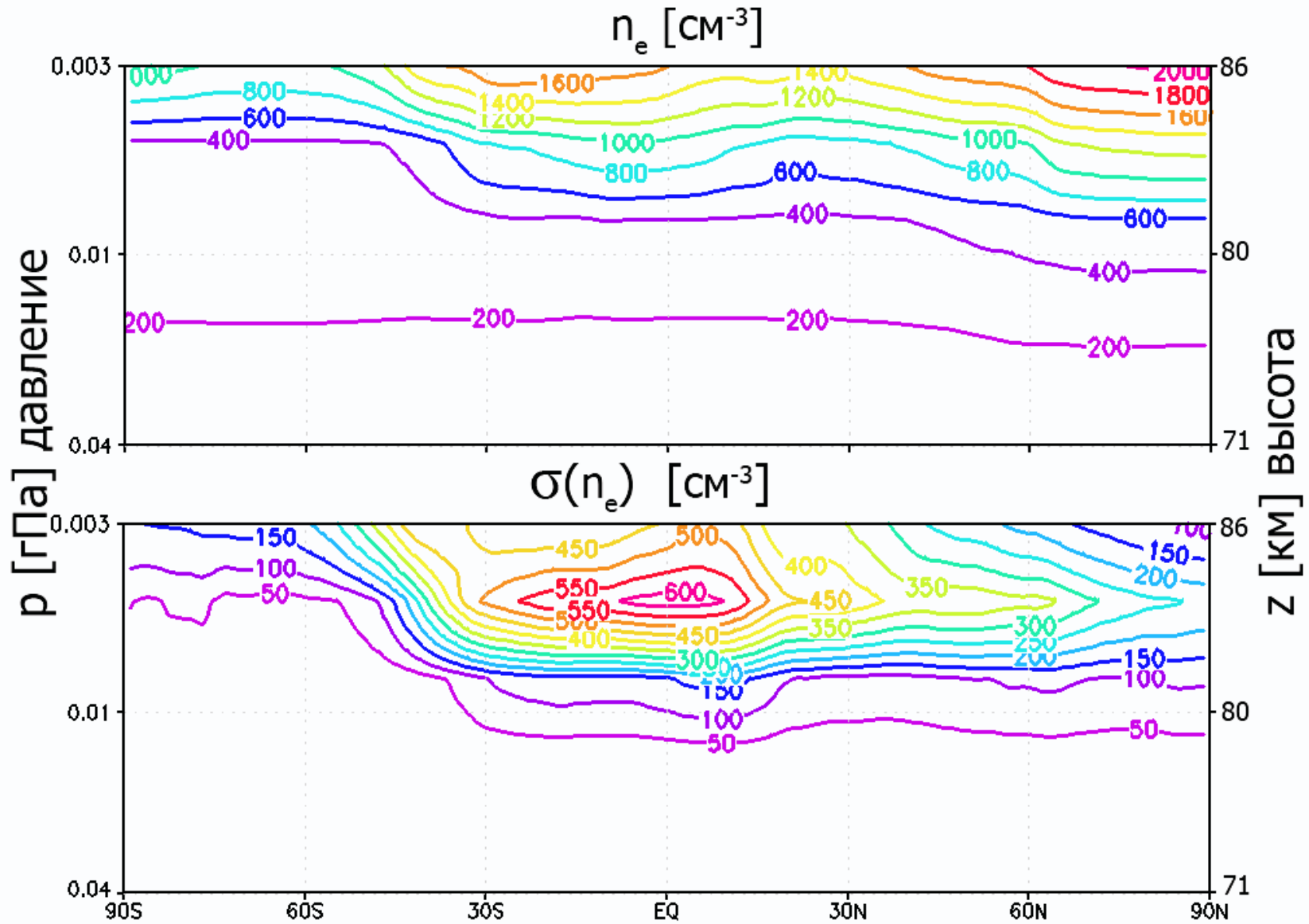
24 ч UT



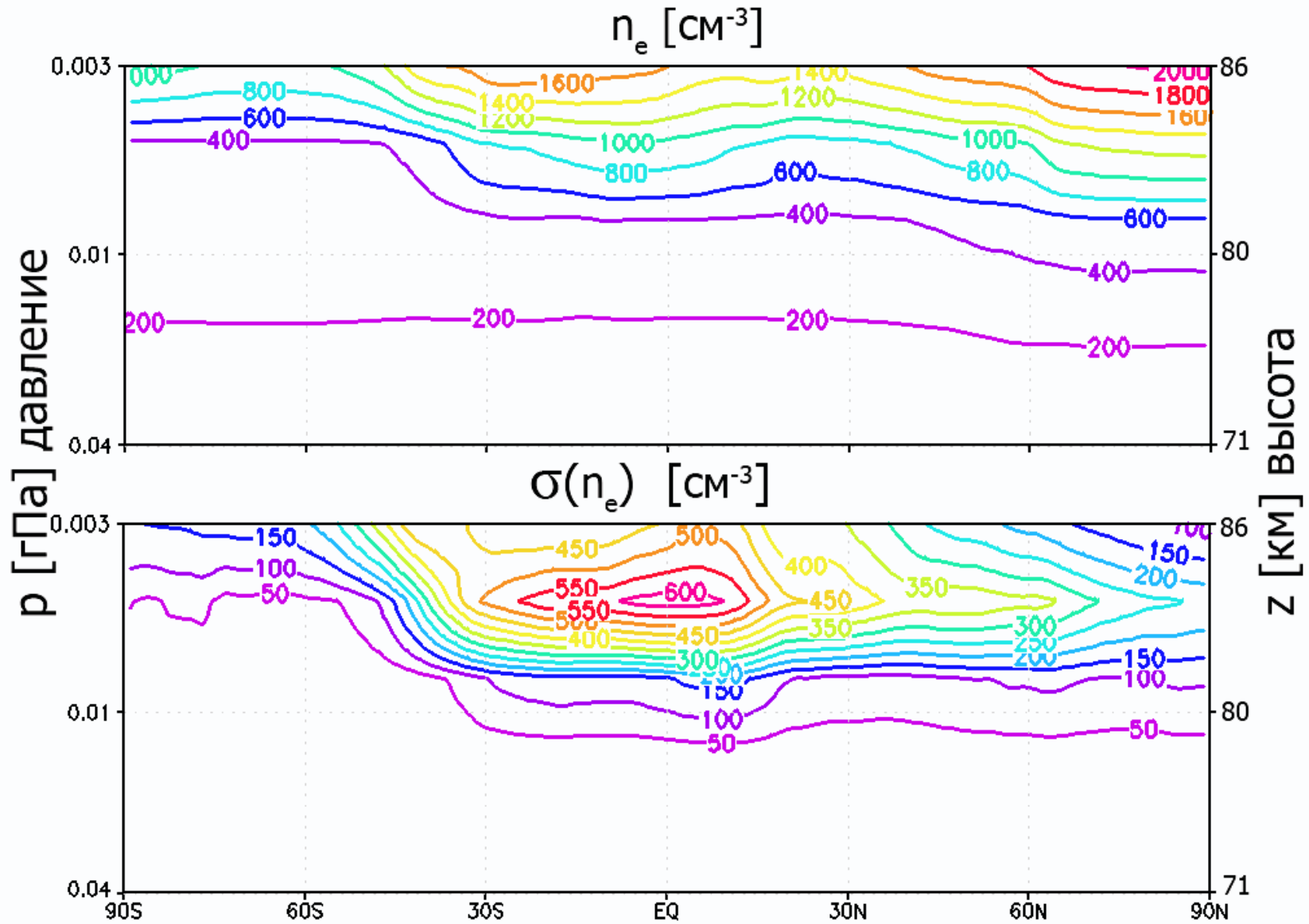
Результаты численных экспериментов (постоянный полдень) влияние температуры



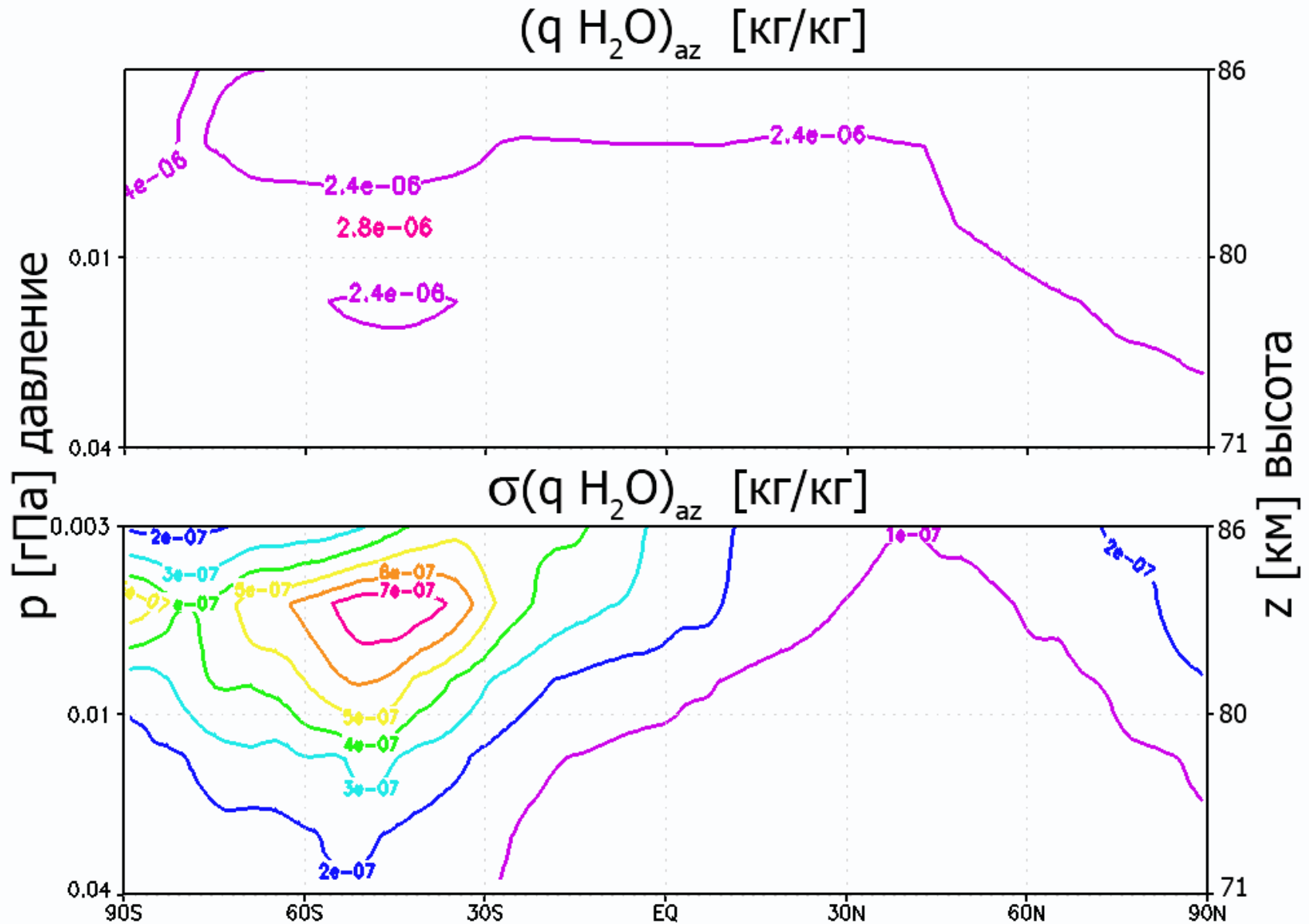
Результаты численных экспериментов (постоянный полдень) влияние температуры



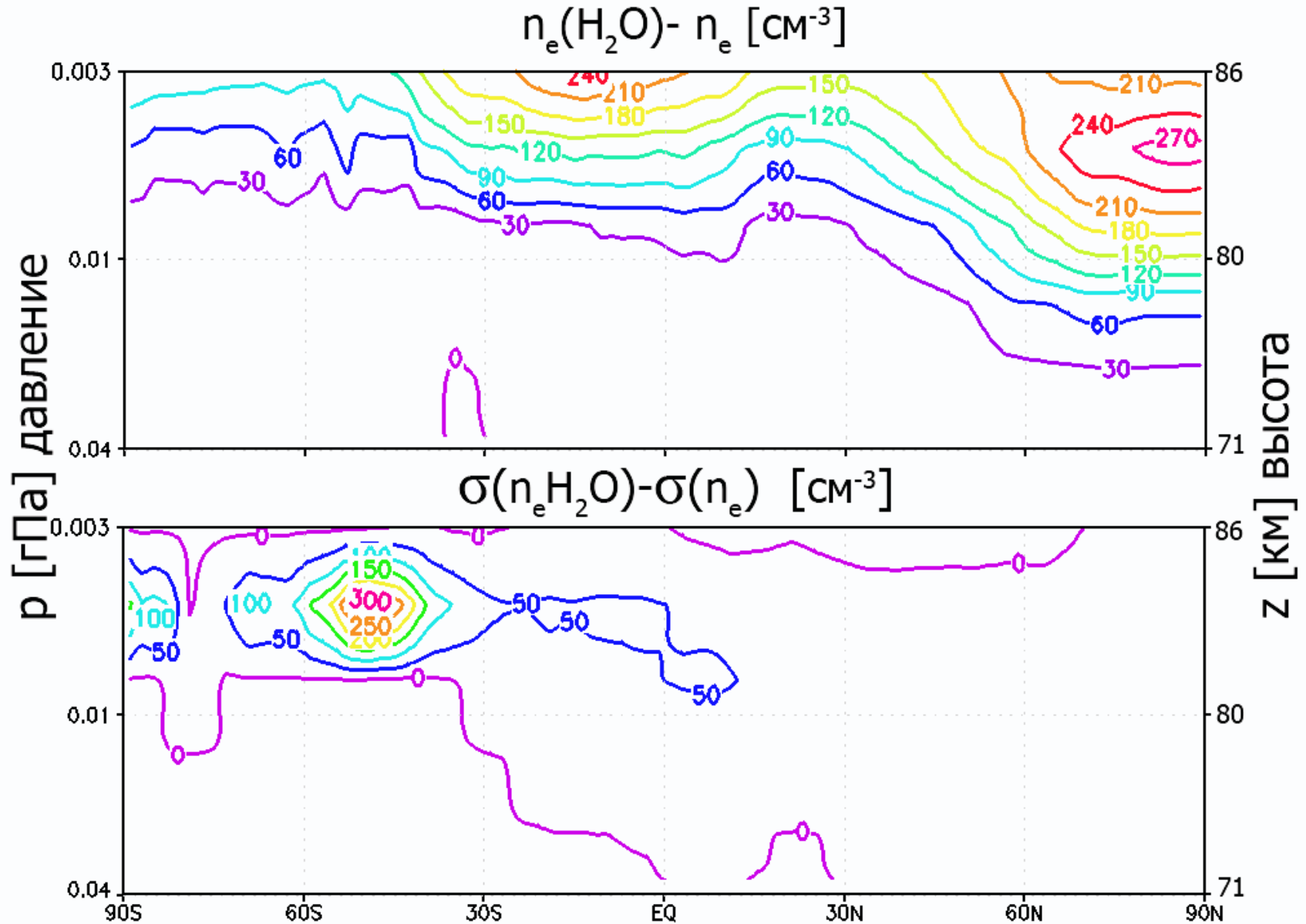
Результаты численных экспериментов (постоянный полдень) влияние температуры



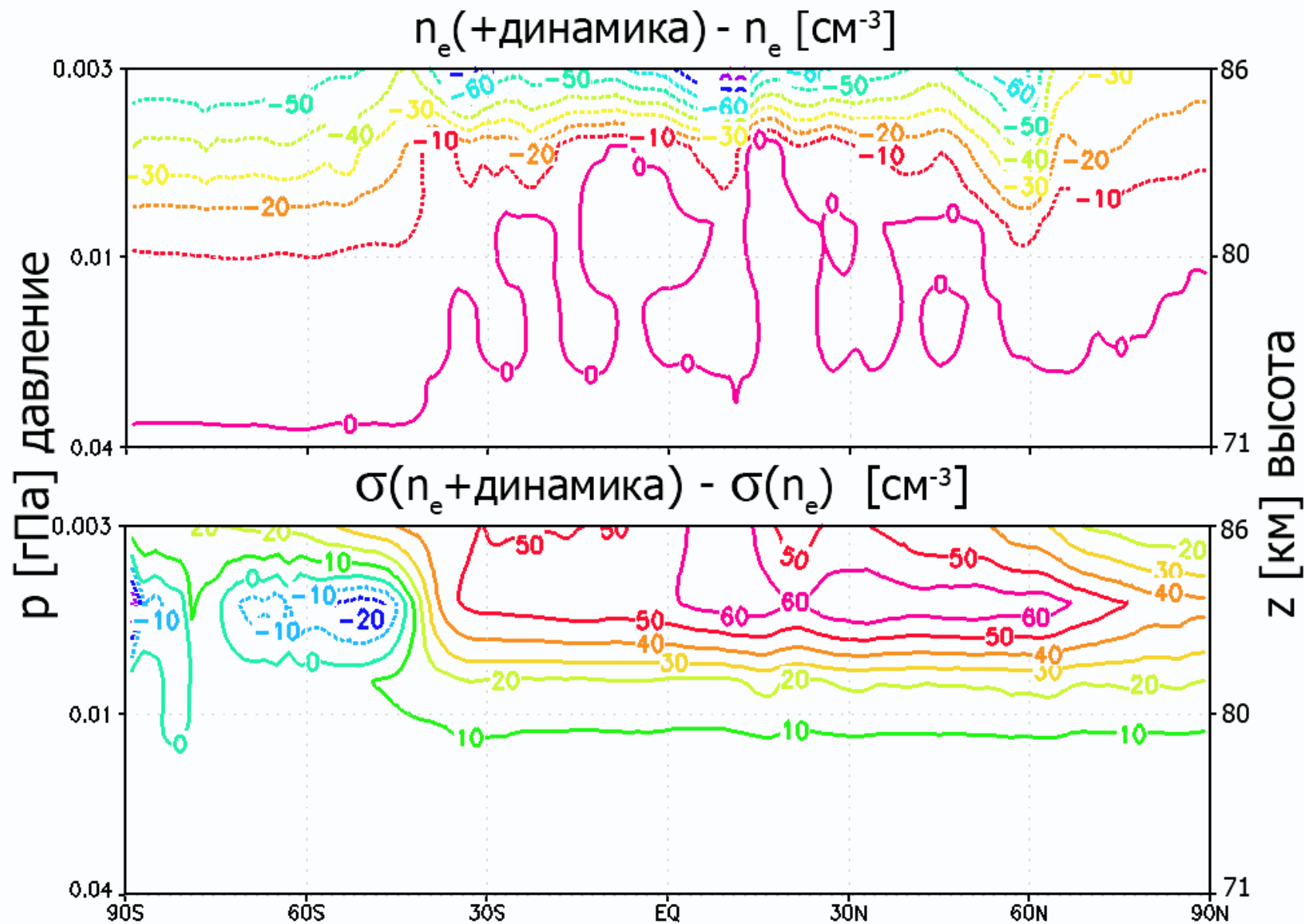
Результаты численных экспериментов (постоянный полдень)
влияние влаги



Результаты численных экспериментов (постоянный полдень)
влияние влаги



Результаты численных экспериментов (постоянный полдень) влияние динамики



Наблюдения **D** слоя ионосферы

- **Ракетные измерения (*in situ*)**

Надежные, но дорогие, редкие: локальные *вертикальные профили*
- *эмпирические модели*

- **Радиозондирование**

- *Радары некогерентного рассеяния (D слой на нижней границе чувствительности)*
- *Частичные отражение, нагревные эксперименты и т.п.*

- **Оценка ослабления сигналов**

Интегральные непрерывные измерения (риометры 27-30 МГц), но чувствительны в основном к аномалиям D слоя (*авроральные возмущения в полярной области, солнечные вспышки*)

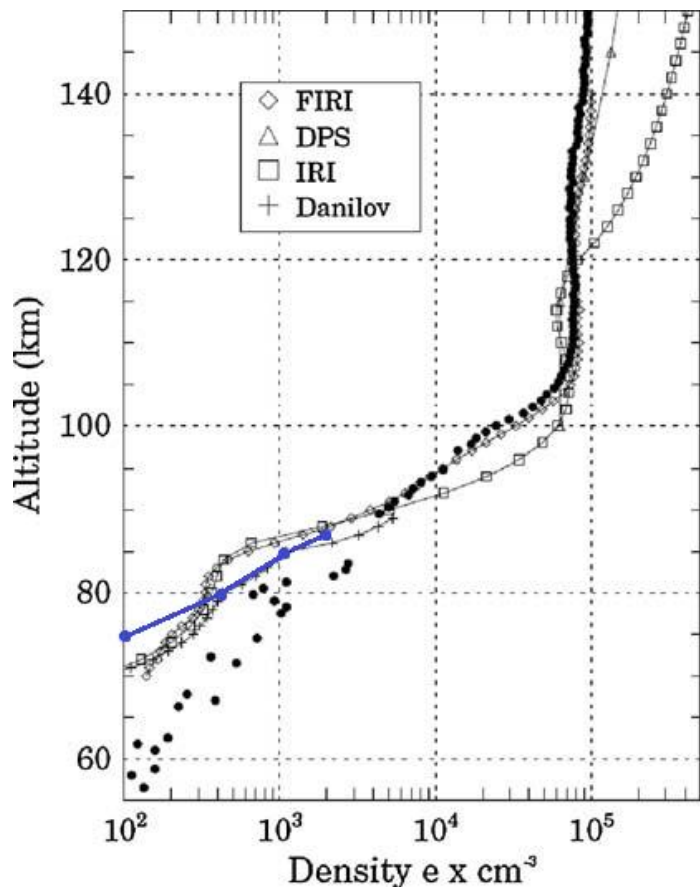
- **Измерение СДВ-ДВ сигнала**

Интегральные непрерывные наблюдения, но зависят не только от D слоя – дополнительная задача распространения (суммы) волн в волноводе Земля-ионосфера

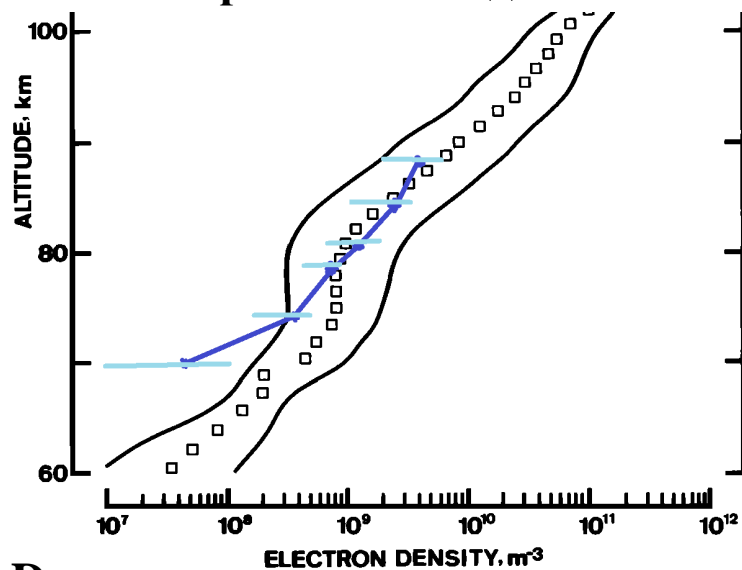
Наблюдения D слоя ионосферы

Локальный вертикальный профиль

(экватор, сравнение эмпирических моделей и данных радара НКР)

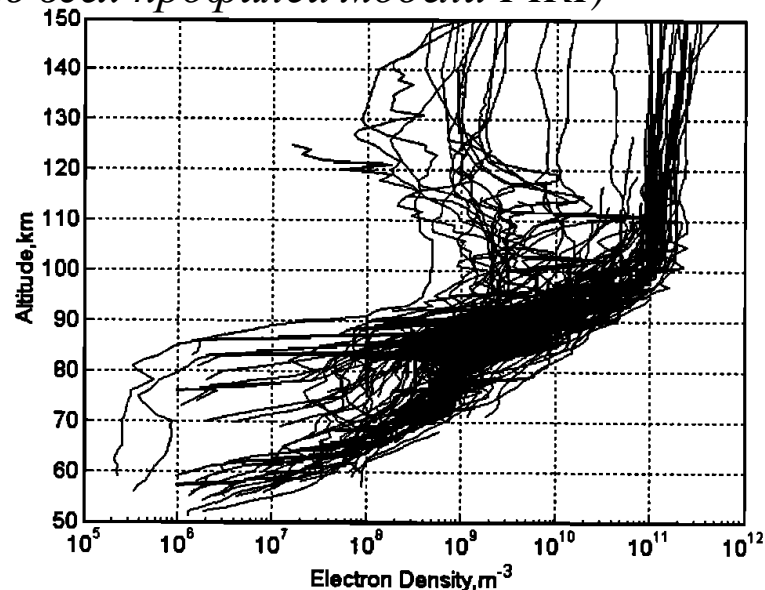


Средний профиль по эмпирической модели D слоя
(для условий Солнца в зените)



Изменчивость D слоя

(совокупность всех профилей модели FIRI)



Распространение радиоволн в ионосфере

$$n_R^2 = (\mu_R - i\kappa_R)^2 = 1 - \frac{X}{1+Z^2} - \frac{iXZ}{1+Z^2},$$

$$X = \frac{\omega_0^2}{\omega_R^2}, \quad Z = \frac{v_{en}}{\omega_R}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_e}}$$

Основные задачи

- **Отражение**

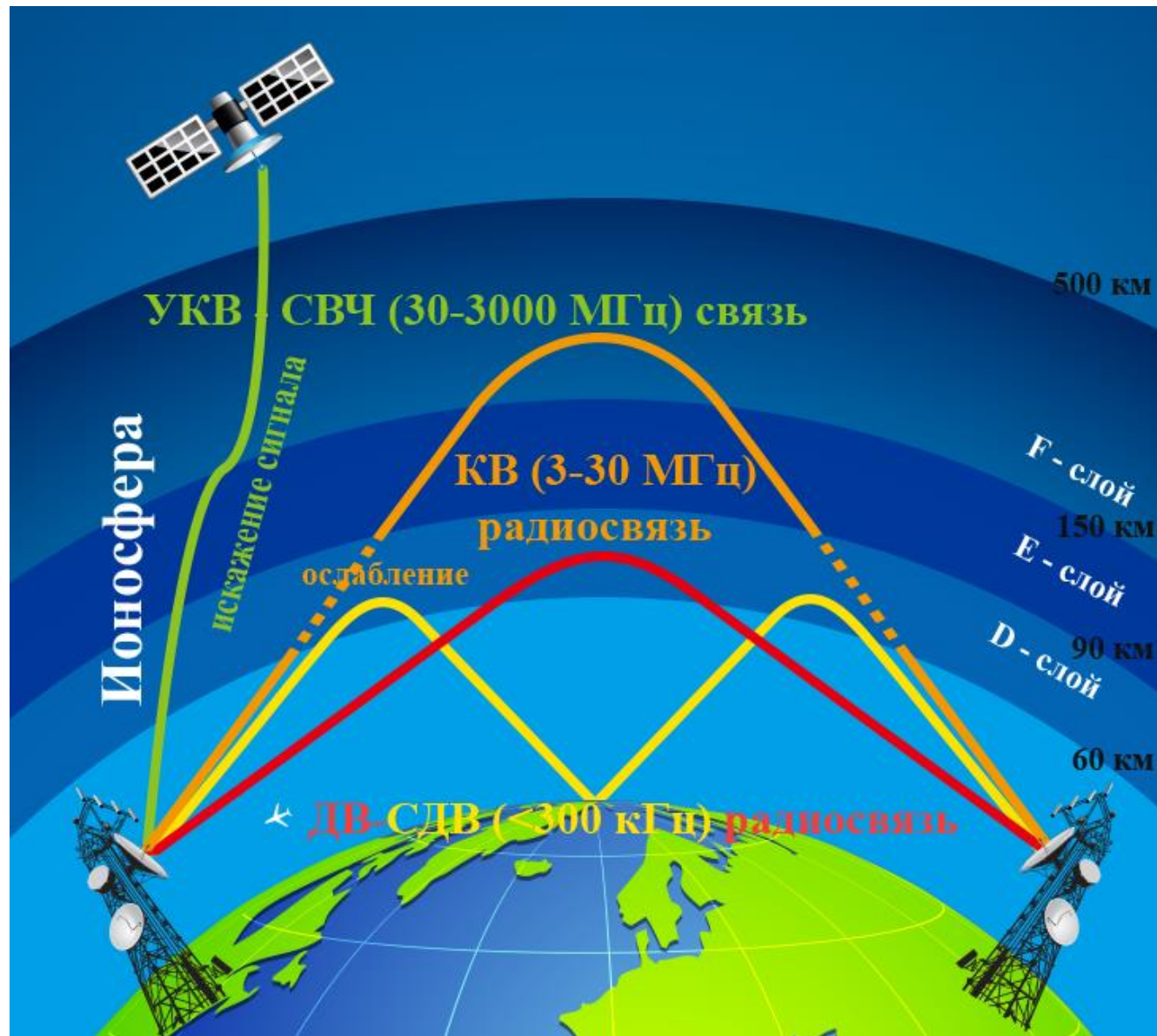
$$f_{critical} = \frac{\omega_0}{2\pi}, \quad f_R = \frac{f_{critical}}{\cos \theta}$$

- **Фазовые и амплитудные задержки, искажение сигнала**

(спутники, GPS, TEC)

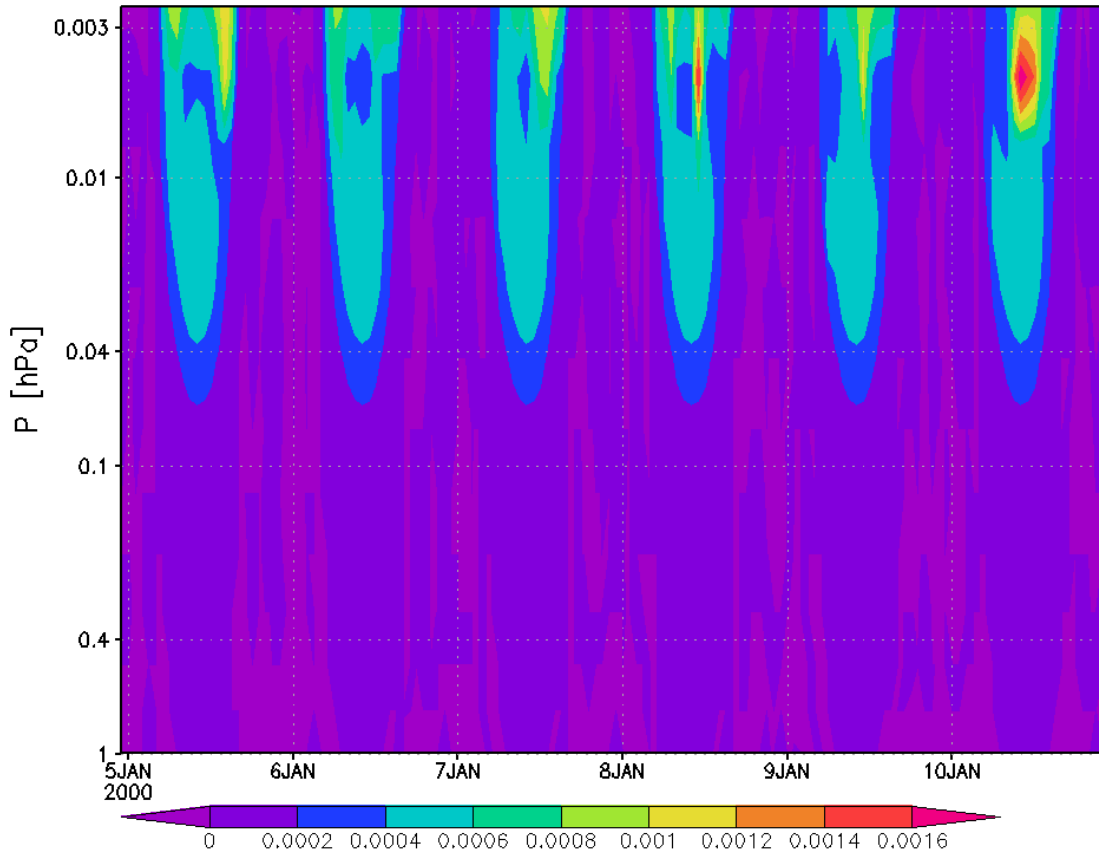
- **Ослабление сигнала (поглощение)**

$$K(z) = \int_0^z \frac{\kappa(z')}{\cos \theta} dz'$$



Распространение радиоволн в ионосфере (ослабление в D слое)

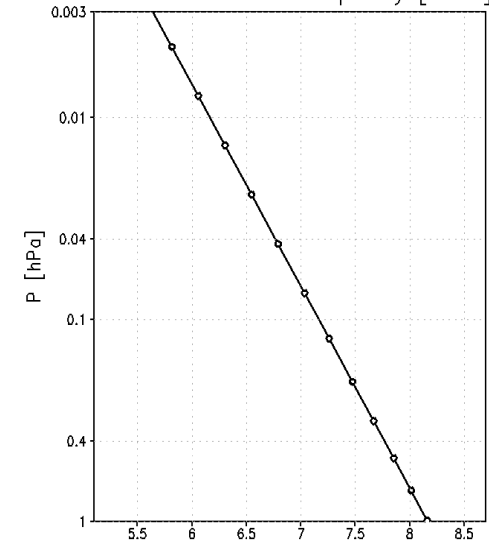
Incremental absorption [dB/km] 0 N lat, 60 W lon



$$\begin{aligned} \kappa &= \frac{e^2}{2\varepsilon_0 m_e c} \cdot \frac{n_e \nu_{en}}{\omega_R^2 + \nu_{en}^2} = \\ &= 4.6 \cdot 10^4 \cdot \frac{n_e \nu_{en}}{\omega_R^2 + \nu_{en}^2} \quad \text{дБ/км} \end{aligned}$$

$$\nu_{en} \approx 2 \cdot 10^{-11} \cdot n \cdot T_e \left(1 + \frac{2}{(T_e)^{0.5}} \right) \text{ c}^{-1}$$

Electron-neutral collision frequency [s⁻¹] Log10



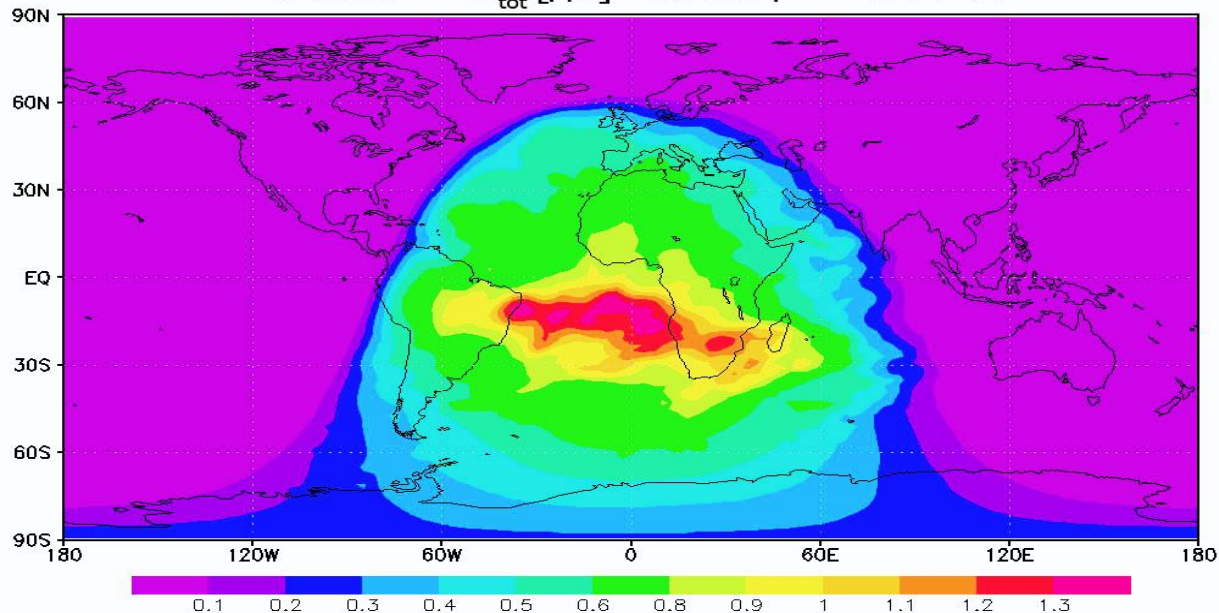
**Результаты численных экспериментов
вертикальный профиль временного хода
коэффициента нарастающего поглощения
КВ сигнала 30 МГц (риометры)**

Распространение радиоволн в ионосфере (ослабление в D слое)

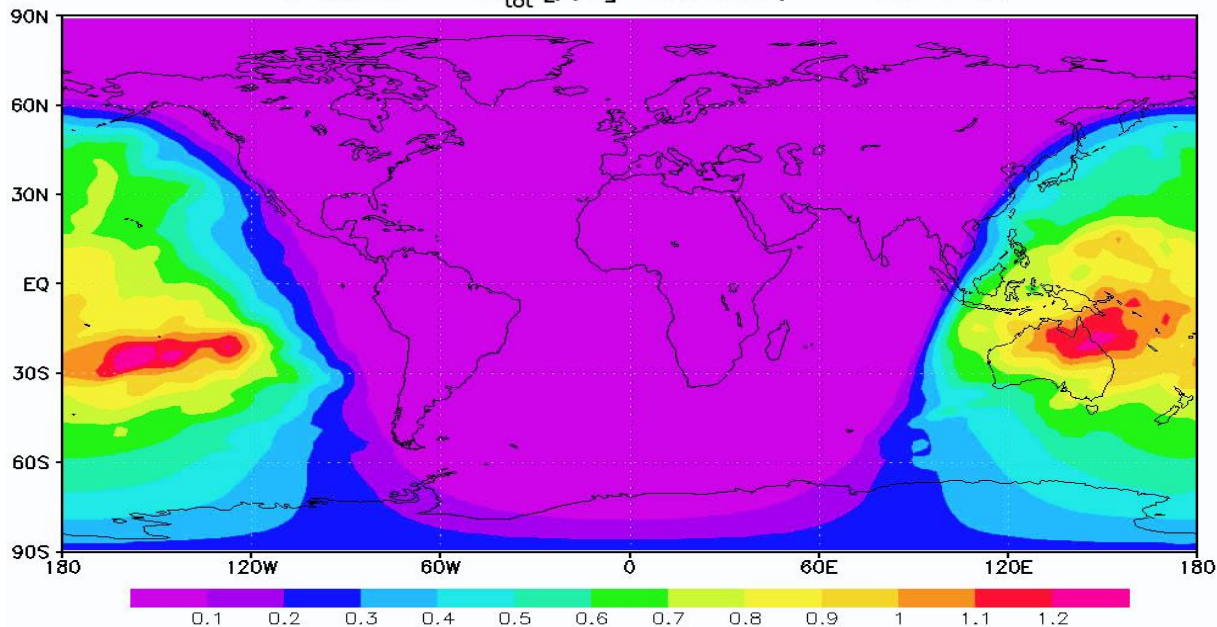
Результаты
численных
экспериментов

Глобальные карты
среднесуточного
полного
поглощения
вертикального КВ
сигнала 30 МГц

D слой K_{tot} [дБ] 30 МГц 12 ч UT



D слой K_{tot} [дБ] 30 МГц 24 ч UT



Основные результаты

- Разработана новая совместная модель тропосферы-стратосферы-мезосферы и D-слоя ионосферы (для высот 0-90 км) в гибридной системе координат. Кратко описано вычислительное ядро модели и блоки параметризаций процессов подсеточных масштабов.
- Для модели нейтральной составляющей атмосферы на основе сравнения с данными наблюдений показано хорошее воспроизведение основных физических процессов, определяющих общую циркуляцию средней атмосферы.
- Представлено подробное описание локальной фотохимической модели D-слоя ионосферы в простой 5-компонентной постановке. Исследованы свойства дифференциальной постановки, доказано существование глобального аттрактора на положительном фазовом полупространстве. Экспериментально показаны сходимость решения к стационарной точке, определяющейся суммарным зарядом, а также непрерывная зависимость решения от параметров системы при их разумных значениях. Построена эффективная полунявная численная схема решения системы, обладающая законом сохранения заряда.

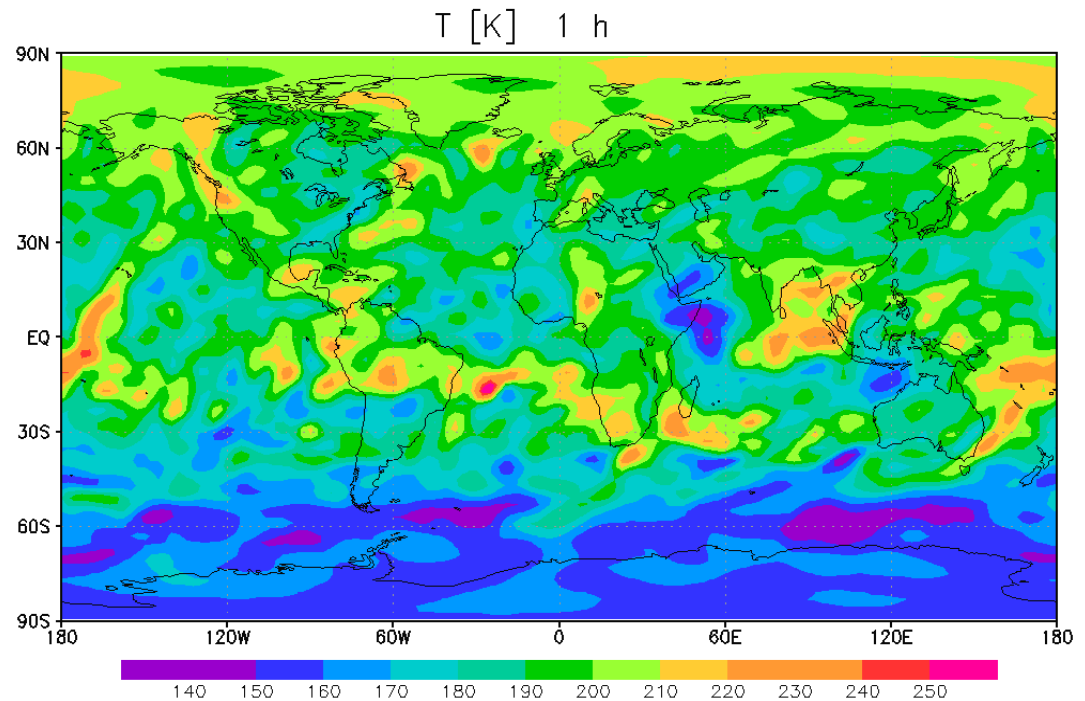
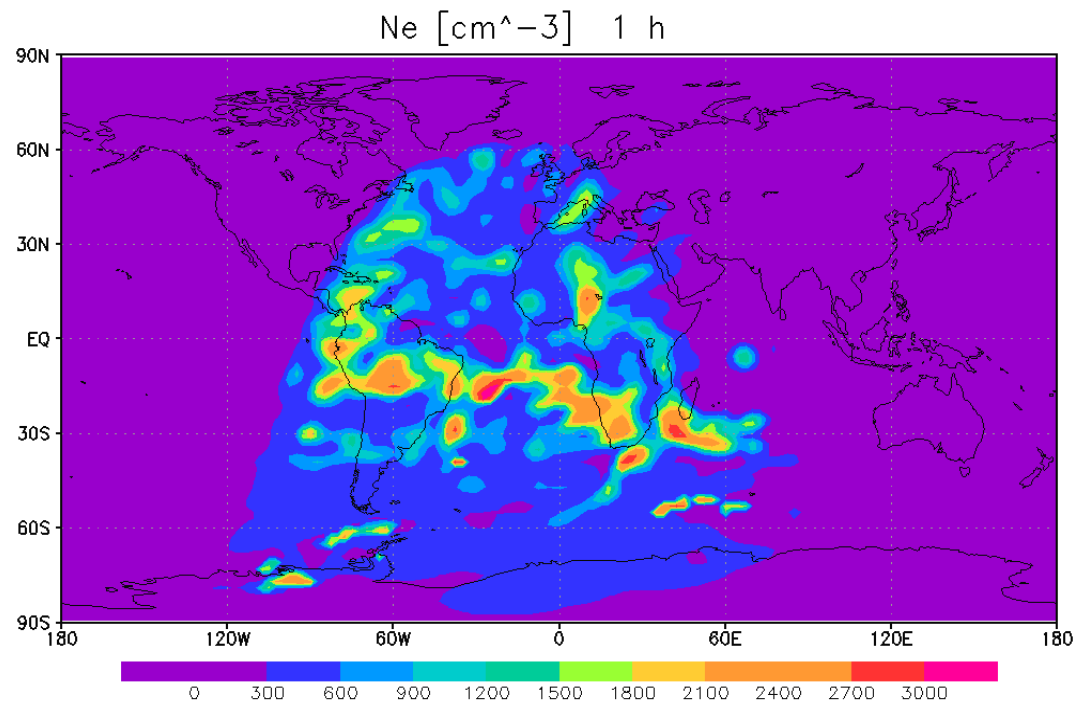
Основные результаты

- Проведен анализ воспроизведения среднего состояния D слоя ионосферы в совместной модели общей циркуляции атмосферы, получены количественные оценки относительной роли характеристик нейтральной атмосферы в формировании глобального распределения электронной концентрации.
- Показано, что среднее состояние и изменчивость D слоя ионосферы для данной модели по существу определяется полем температуры, вариации рассчитываемого поля влаги малы и играют существенную роль в отдельных областях. Процессы переноса и диффузии не играют существенной роли в формировании состояния D слоя ионосферы (как в дневное, так и в ночное время).
- Проведена идентификация модели по данным локальных измерений и эмпирических моделей вертикальных профилей электронной концентрации, а также на основе расчетов глобального поглощения радиоволн КВ диапазона в сравнении с данными измерений. Показано, что разработанная модель вполне удовлетворительно воспроизводит климатические характеристики D-слоя ионосферы.

Результаты численных экспериментов по совместному моделированию атмосферы и D слоя ионосферы

Прямое влияние поля температуры

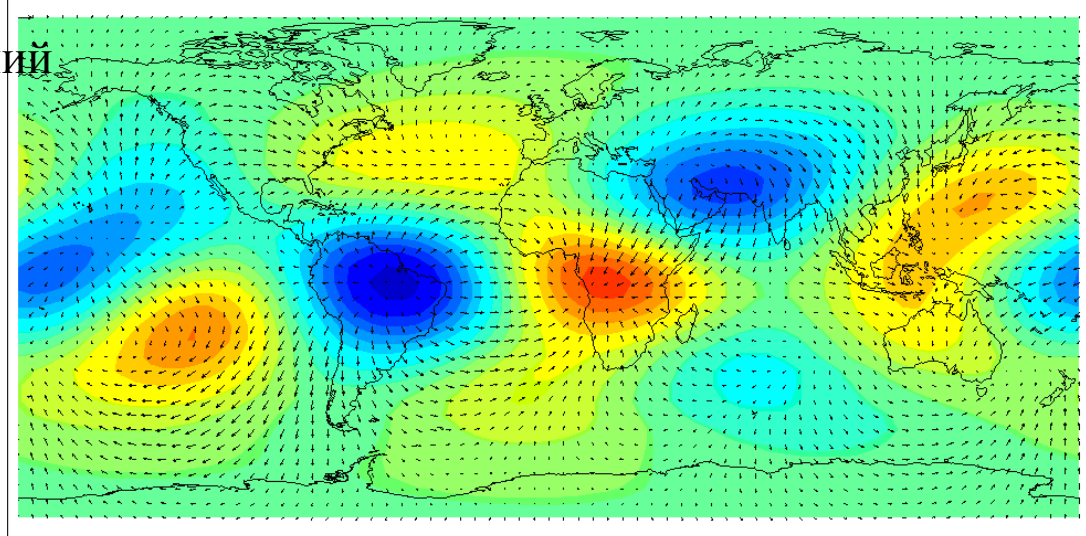
ежечасные мгновенные данные (на уровне 0.01 гПа)



Термические приливы

UT = 0 h

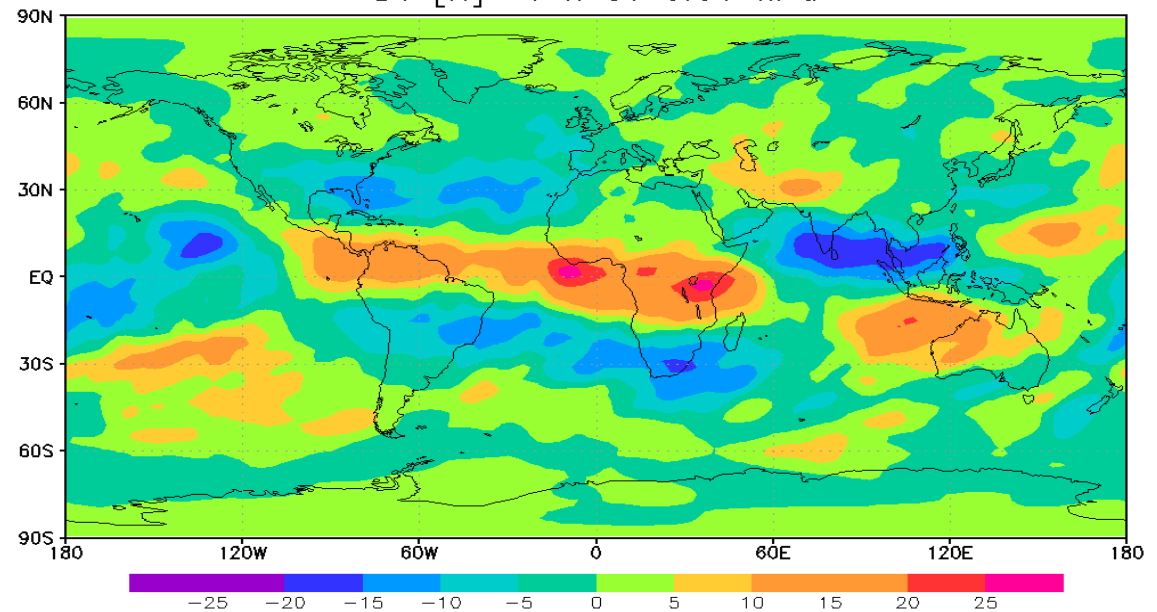
100 km



средний суточный ход отклонений
температуры

Данные наблюдений TIMED
SABER
100 км

Temperature [K]
-30 0 30
DT [K] 1 h UT 0.01 hPa
→
53 m/s



Данные моделирования
(на уровне 0.01 гПа)