

Численное моделирование общей циркуляции планетных атмосфер

*Родин А.В.^{1,2}, Мингалев И.В.³ Евдокимова Н.А.^{1,2},
Бурлаков А.В.^{1,2} Федорова А.А.²*

¹МФТИ, Долгопрудный, Моск. обл., Россия;

²ИКИ РАН, Москва, Россия

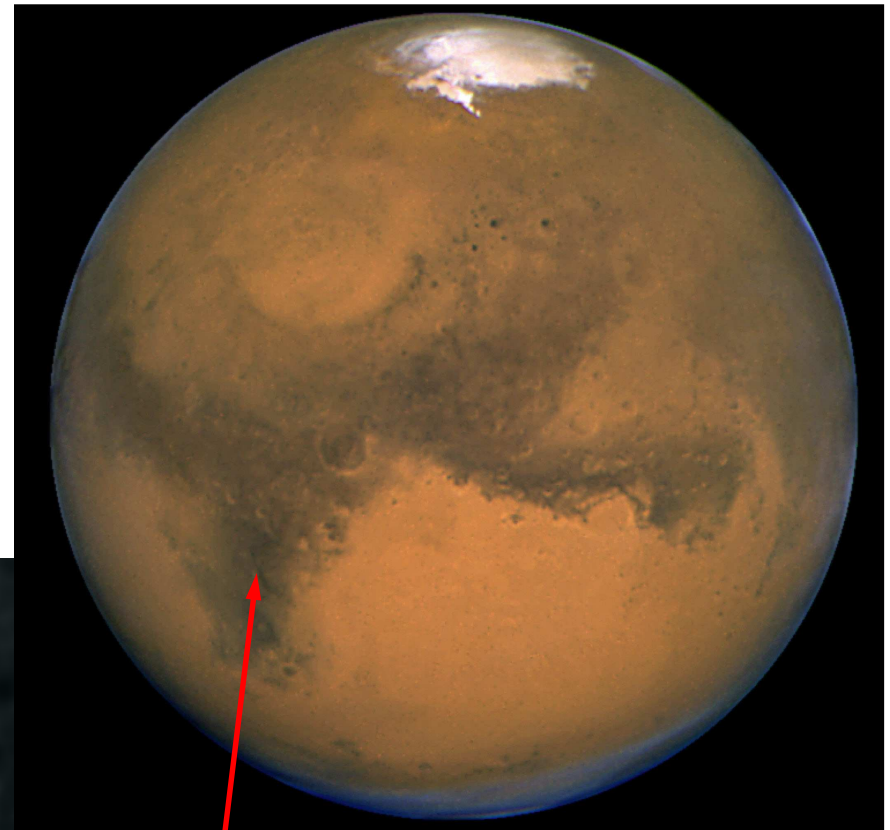
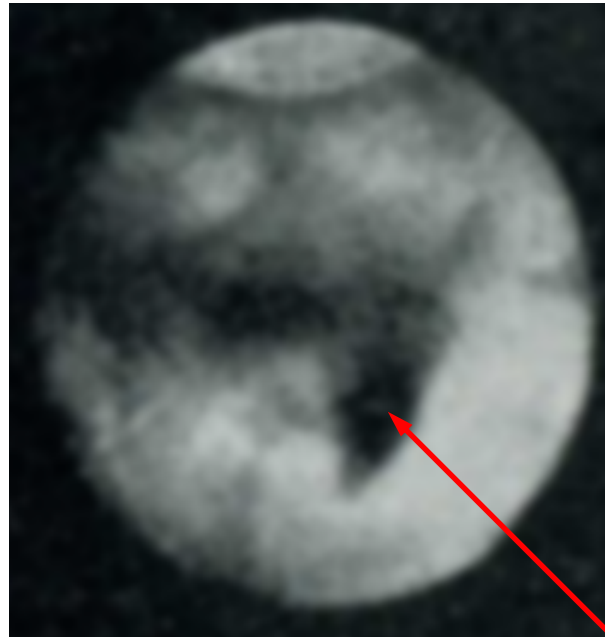
³Полярный геофизический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия

Марс

Атмосфера:
 $P_s \sim 6-10$ мбар

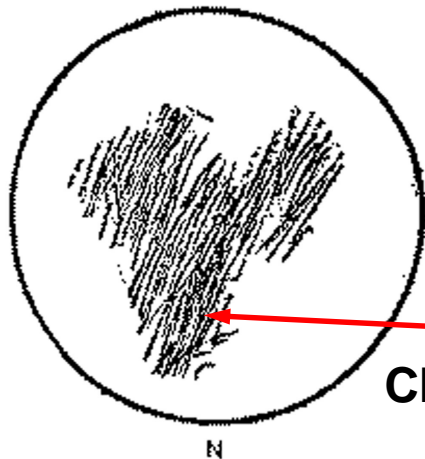
$\epsilon = 0.09$
 $A = 560 \text{ Вт/м}^2$

CO ₂	95,3%
N ₂	2,6%
Ar	1,6%
O ₂	0,13%
CO	700 ppm
H ₂ O	100 ppm
Ne	2,5 ppm
Kr	0,3 ppm
Xe	80 ppb
O ₃	30 ppb
CH ₄	20 ppb



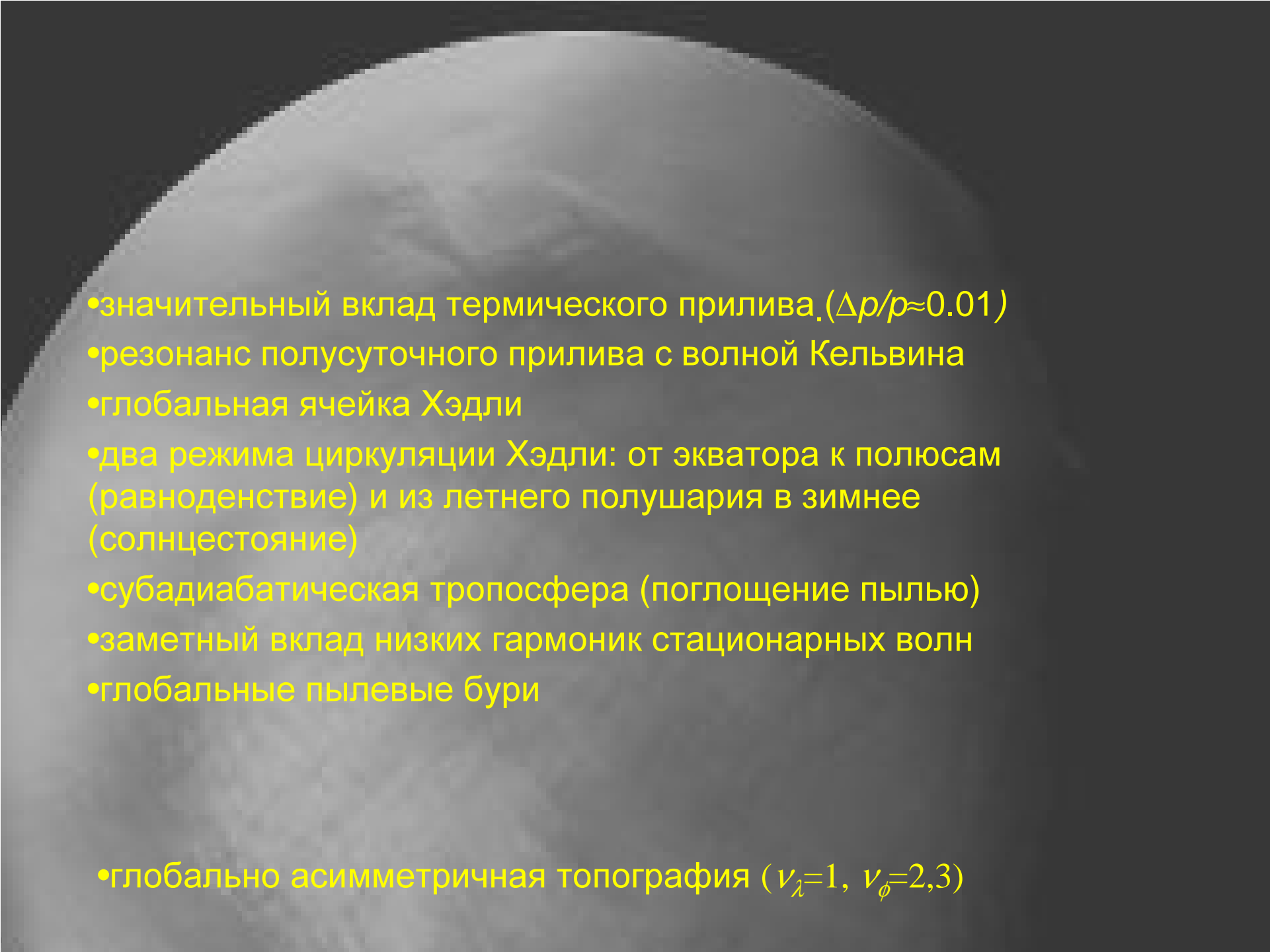
Hubble Space Telescope, 2003

Tom Jefferies, 1939



Christian Huygens, 1659

Большой Сырт (Syrtis Major)

- 
- значительный вклад термического прилива ($\Delta p/p \approx 0.01$)
 - резонанс полусуточного прилива с волной Кельвина
 - глобальная ячейка Хэдли
 - два режима циркуляции Хэдли: от экватора к полюсам (равноденствие) и из летнего полушария в зимнее (солнцестояние)
 - субадиабатическая тропосфера (поглощение пылью)
 - заметный вклад низких гармоник стационарных волн
 - глобальные пылевые бури

 - глобально асимметричная топография ($\nu_\lambda=1, \nu_\phi=2,3$)



Наиболее близкая по климатическим параметрам к Земле планета

Планета, возможно, испытавшая катастрофическое изменение климата и сохранившая следы климата прошлой эпохи

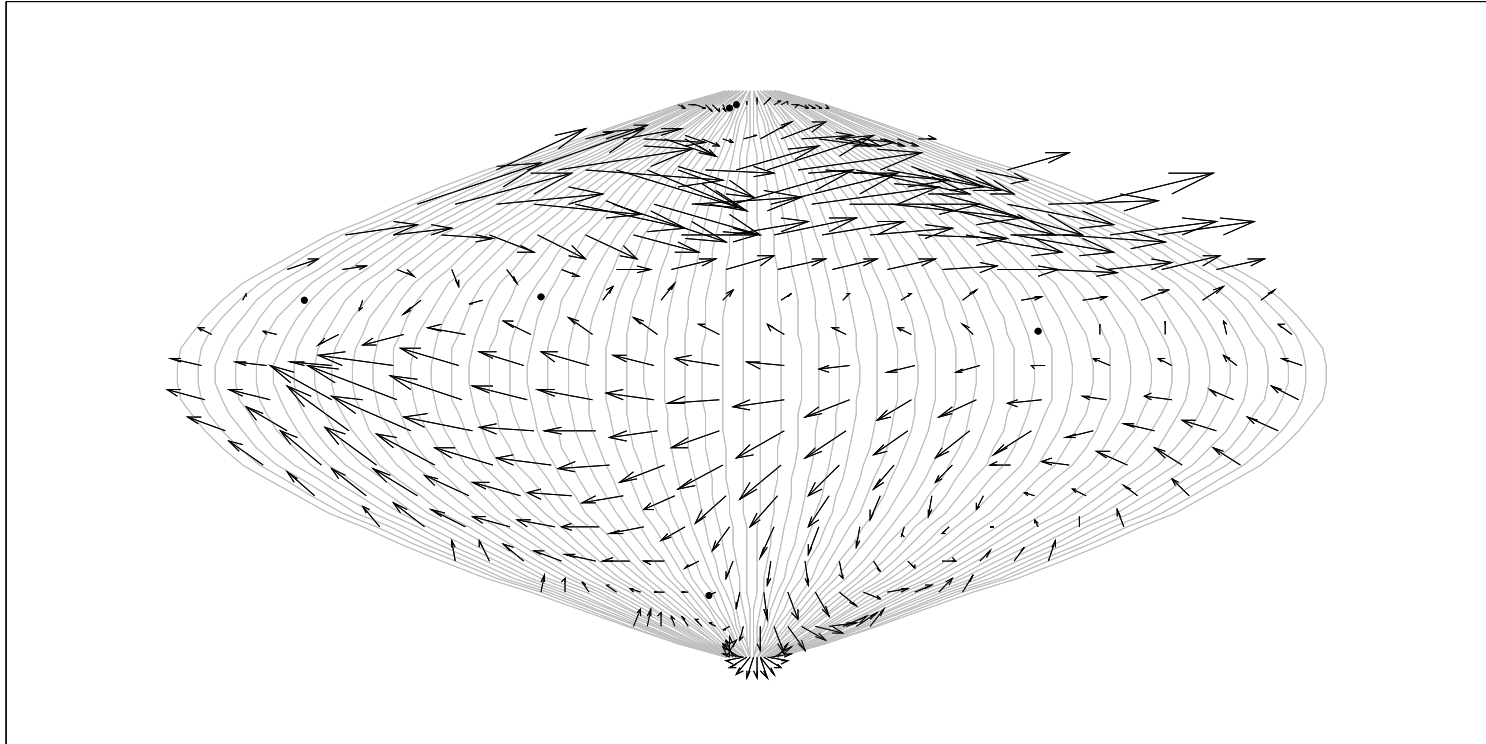
Планета, которая может быть носителем палеобиосферы

Единственная среди земной группы планета с конденсируемой значительной частью атмосферы

Модель общей циркуляции атмосферы Марса

$L_s = 270^\circ$ - перигелий

$z=5$ км



- **Динамическое ядро FMS (GFDL)**
- **Гидростатическое приближение**
- **Самосогласованный радиационный блок**
- **Полная микрофизика облаков H_2O**
- **$1^\circ \times 1.5^\circ$, $k_z=28$, $\tau = 1.5$ мин**

Программная реализация кода FMS

- *Fortran-95*
- *MPI*
- *Ввод-вывод в NetCDF*
- *Распараллеливание по широтам, минимальный домен – 3 узла по широте*
- *Высокий уровень модульности*
- *Различный динамический шаг для различных процессов*
- *Широкое применение технологий OpenSource*

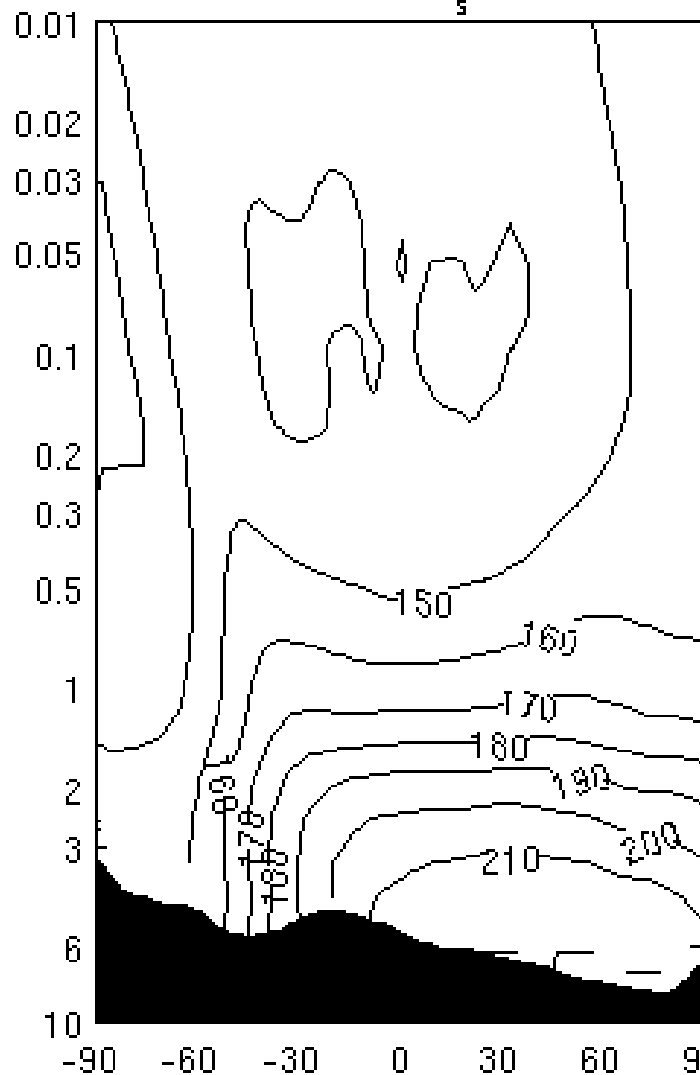
<http://fms.gfdl.noaa.gov>

Программно-аппаратная среда

- *Окружение FRE – FMS Runtime Environment*
- *Описание объекта в XML*
- *Автоматизированная генерация скриптов для компиляции и запуска модели*
- *Возможность ручного редактирования скриптов*
- *Контроль версий SVN или Subversion*
- *Высокая степень переносимости*
- *Реализация на малоразмерном решении Kraftway*

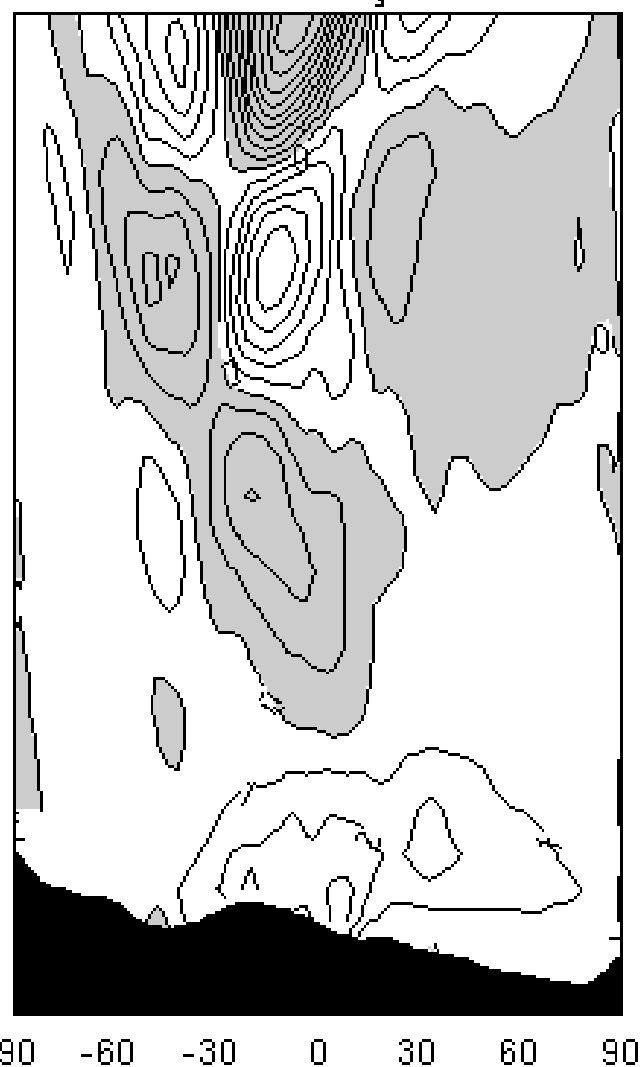
Зонально-средняя
температура 16:00 LT

MGCM $L_5 = 83^\circ$

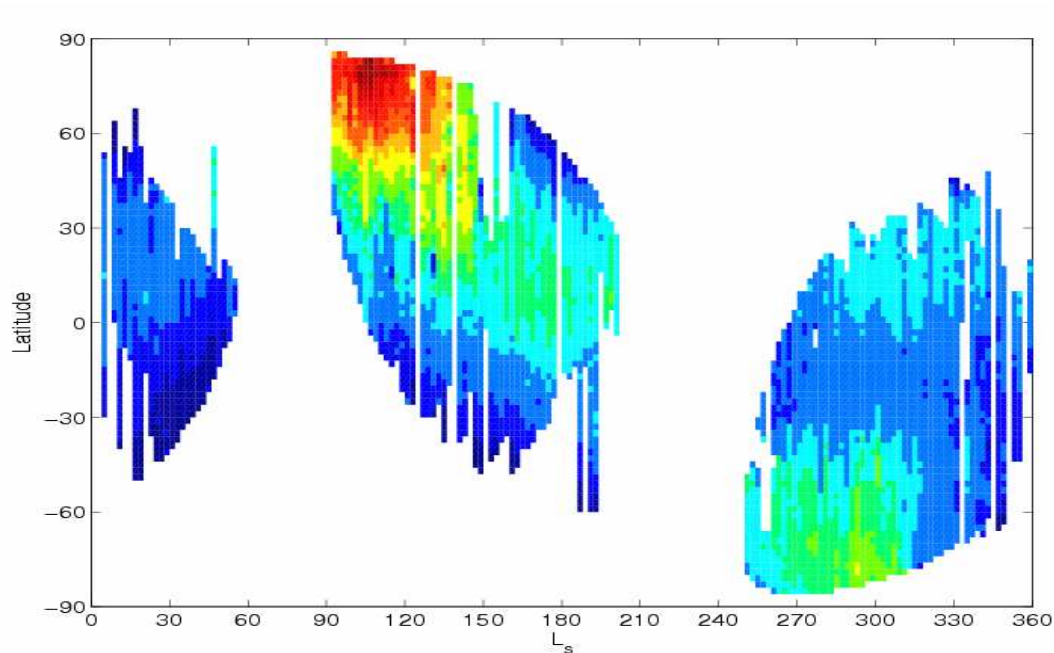


Суточный прилив

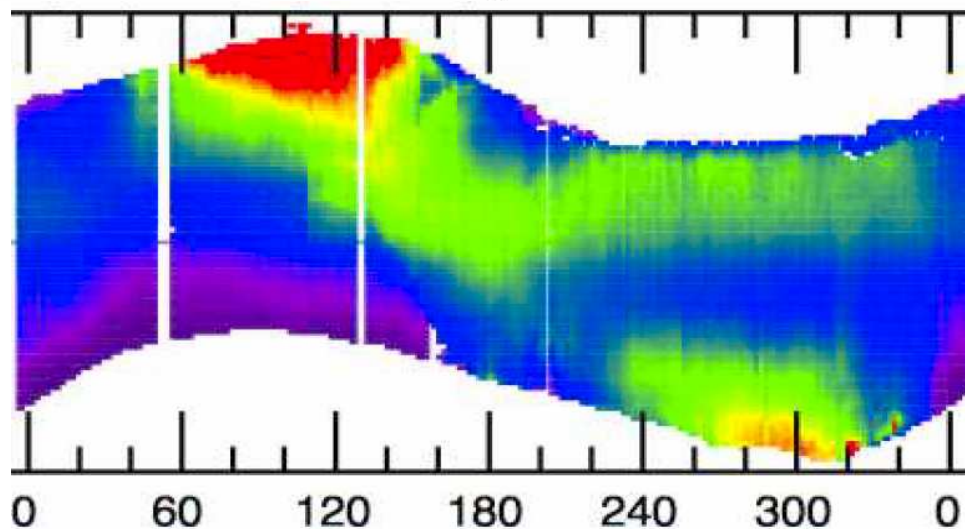
MGCM $L_5 = 83^\circ$



Сезонный гидрологический цикл Марса: наблюдения



SPICAM MY27

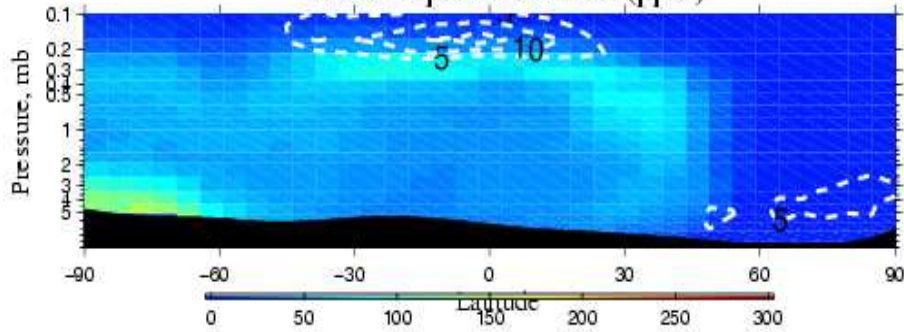


TES MY26

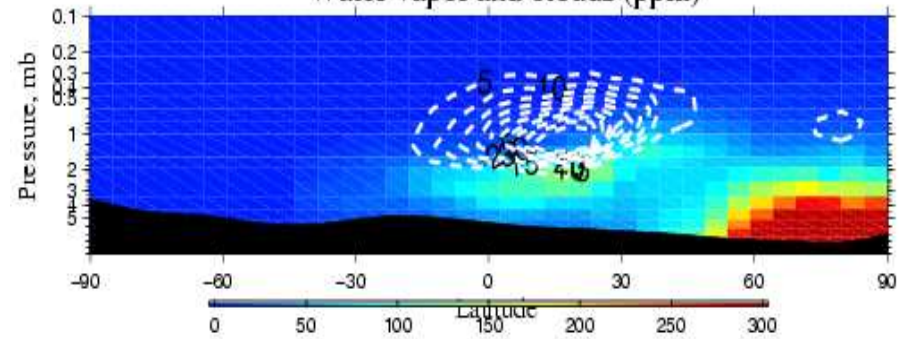
Scale 0 to 50 pr. μm

Асимметрия афелий-перигелий в гидрологическом цикле Марса

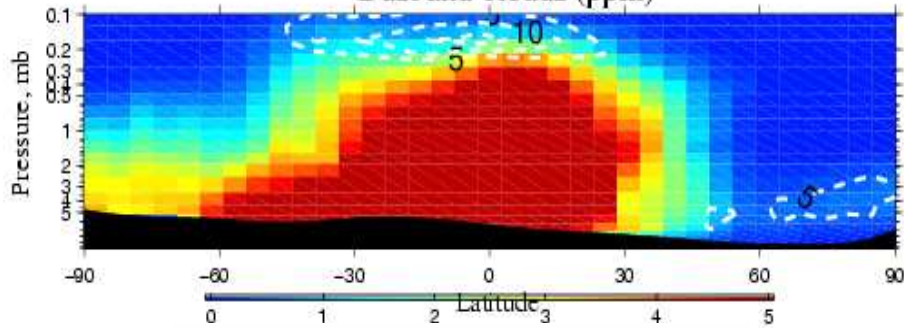
Zonal average model fields at $L_s = 270^\circ$
Water vapor and clouds (ppm)



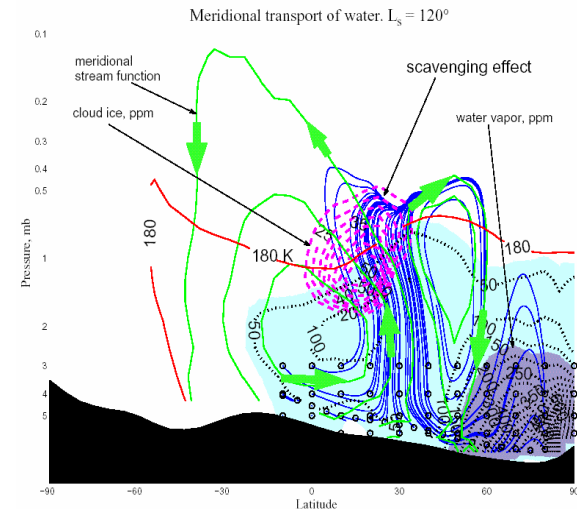
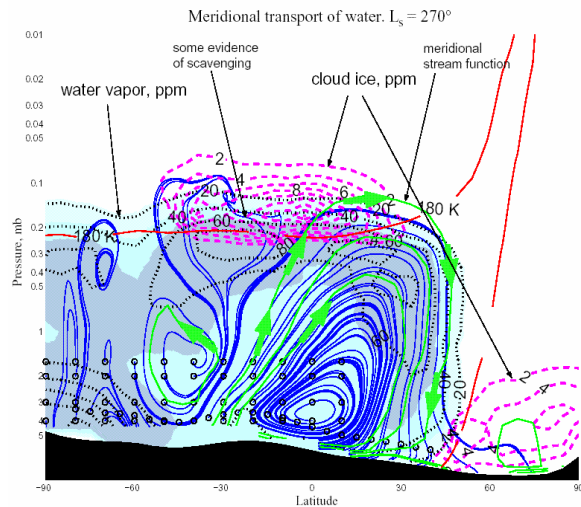
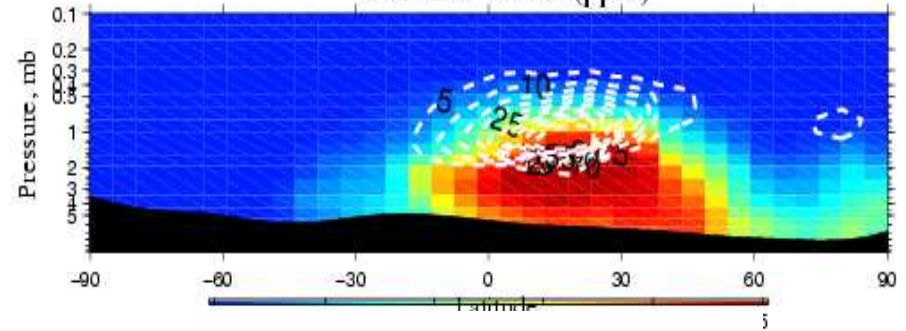
Zonal average model fields at $L_s = 120^\circ$
Water vapor and clouds (ppm)



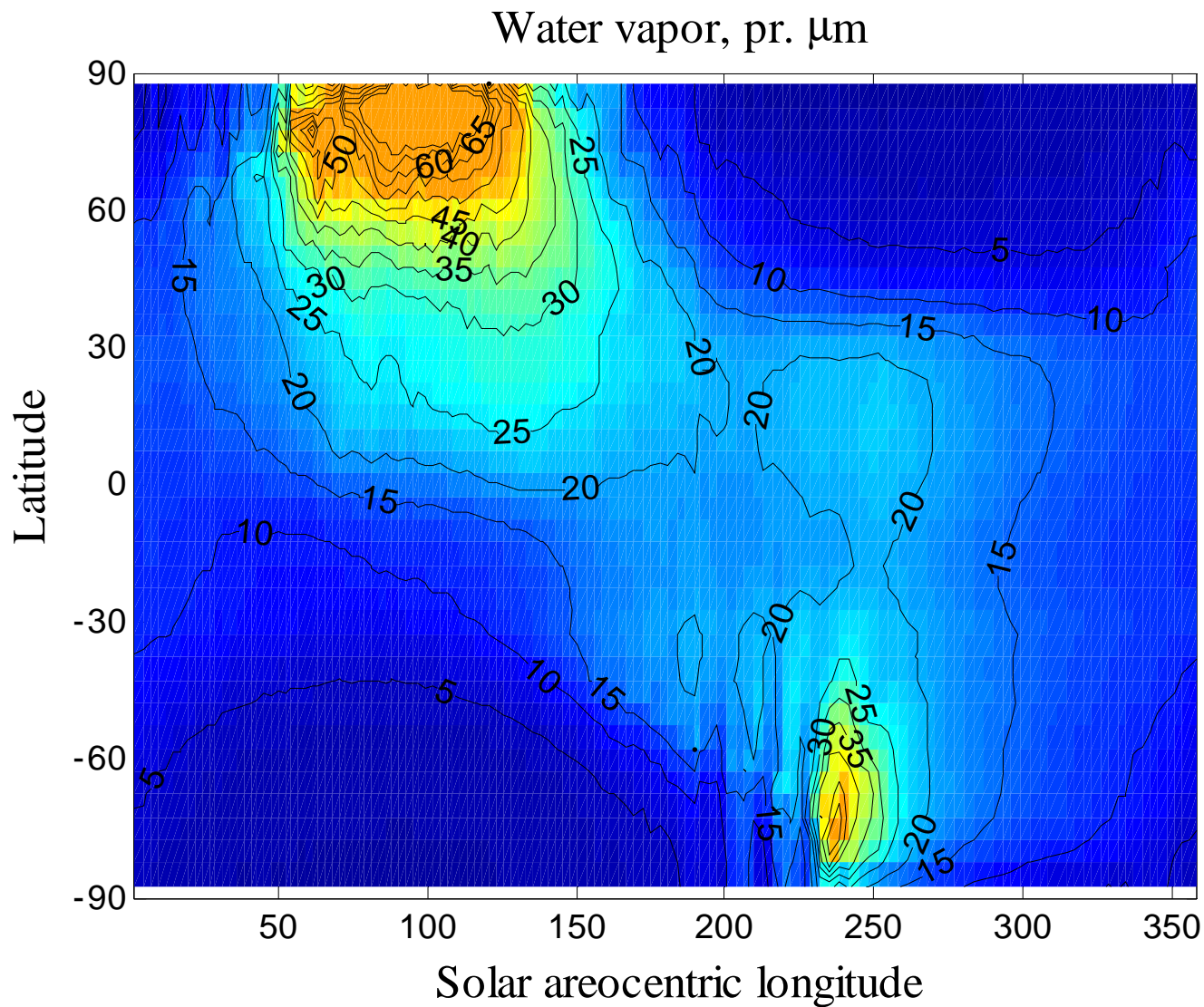
Dust and clouds (ppm)

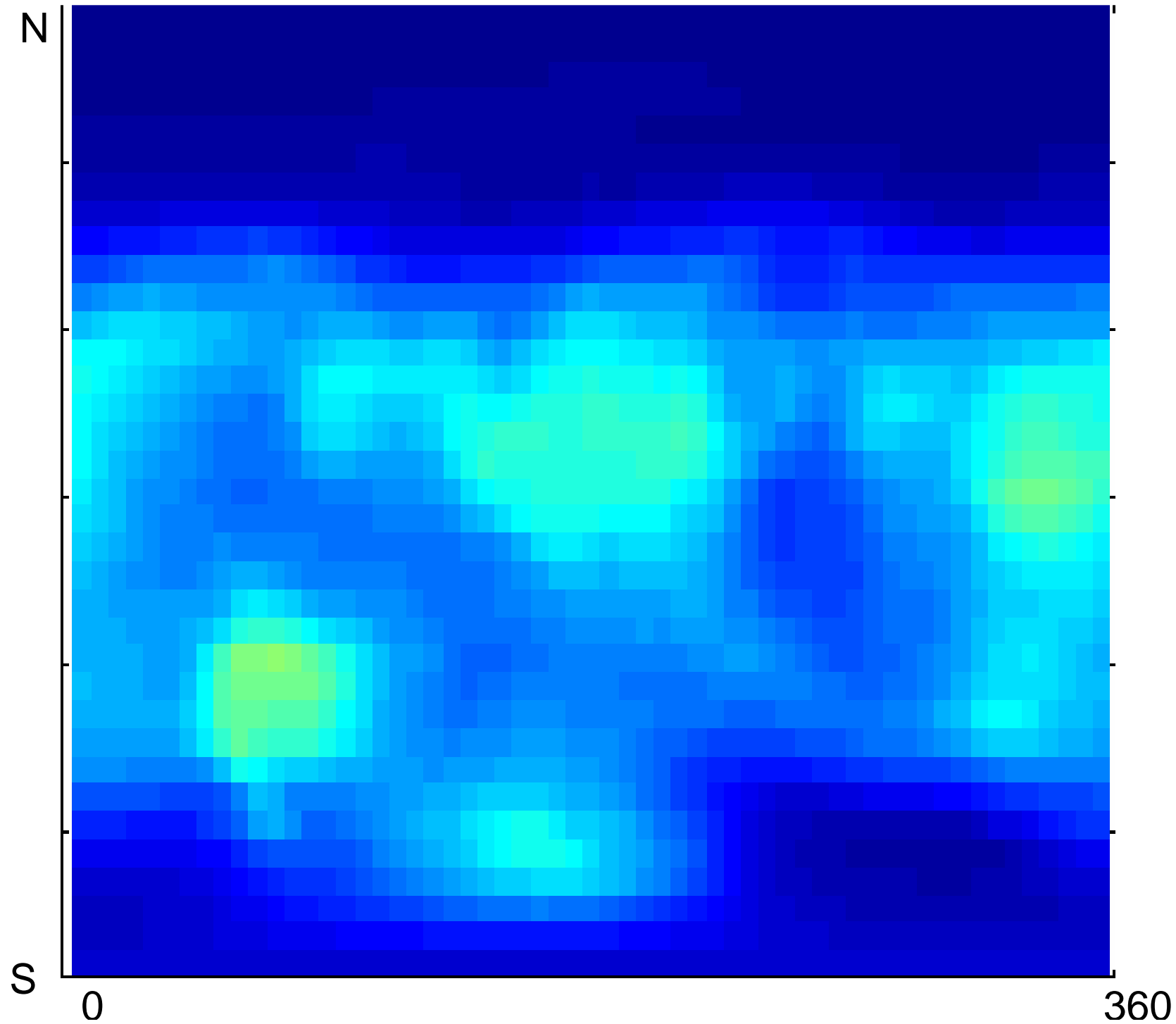


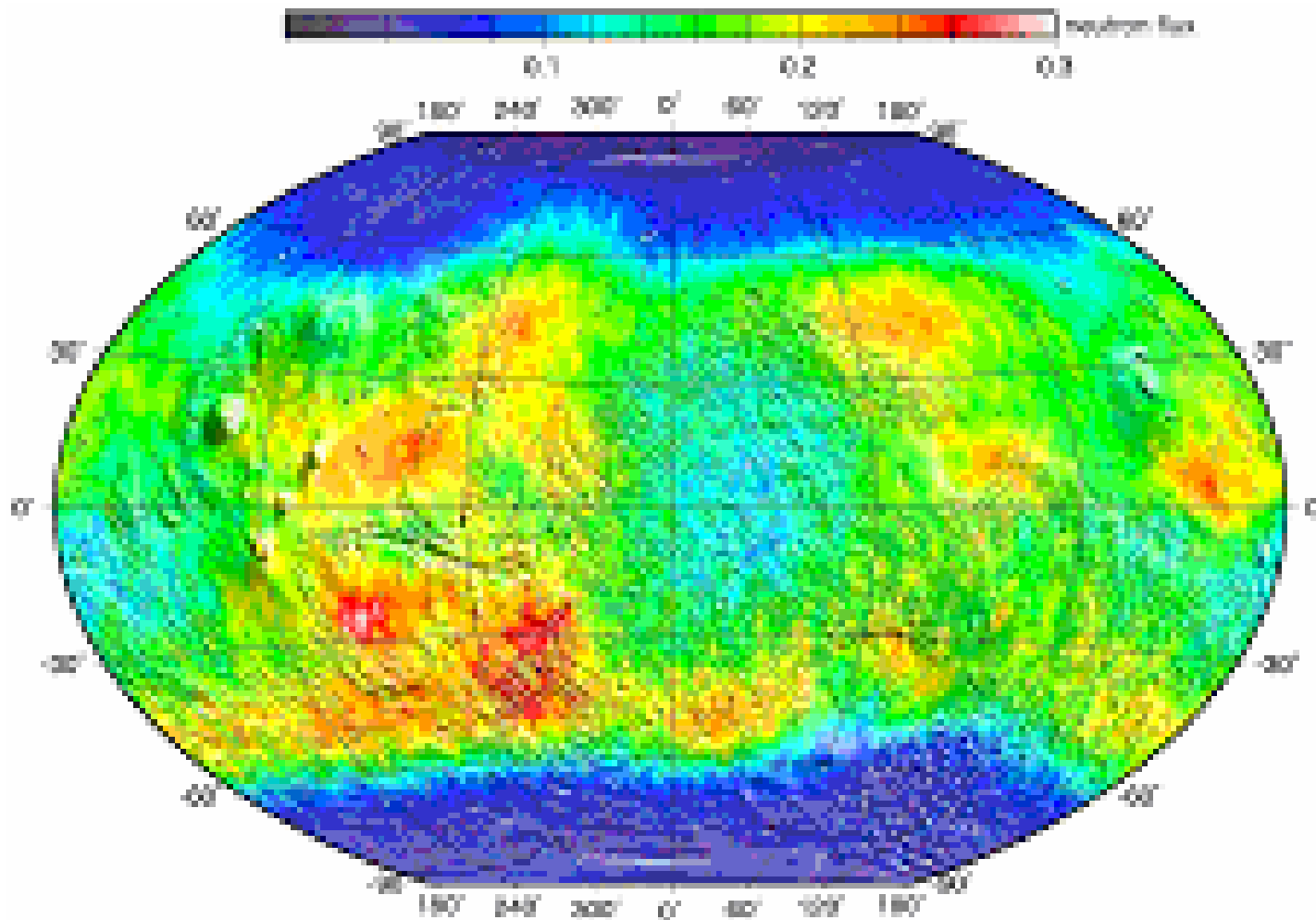
Dust and clouds (ppm)



Сезонный гидрологический цикл Марса: результаты моделирования





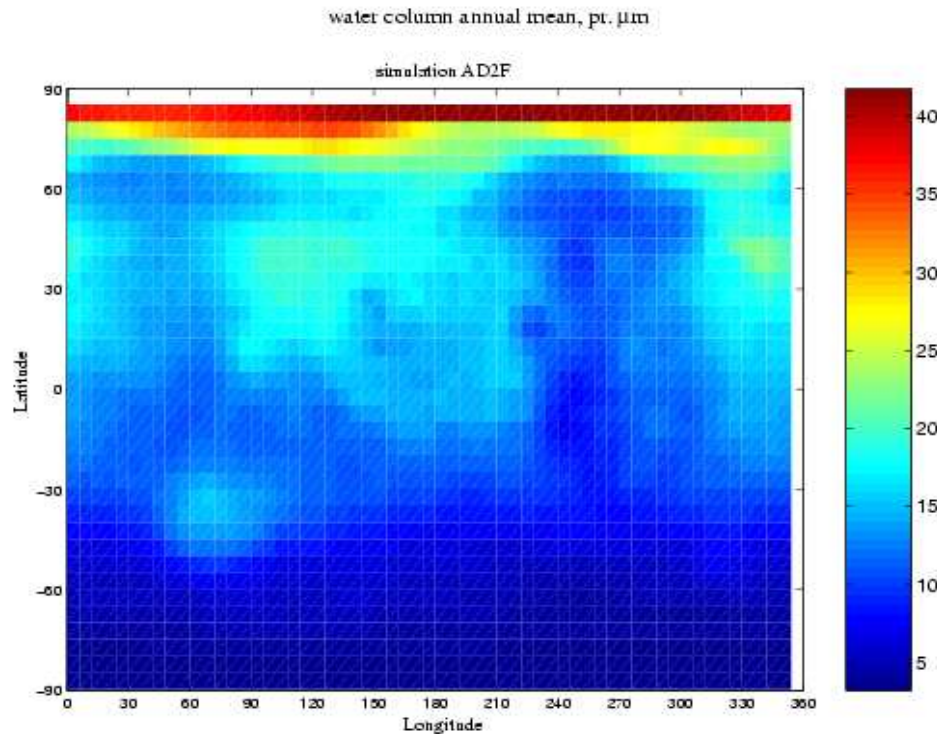


Антиподальные максимумы содержания подповерхностной воды

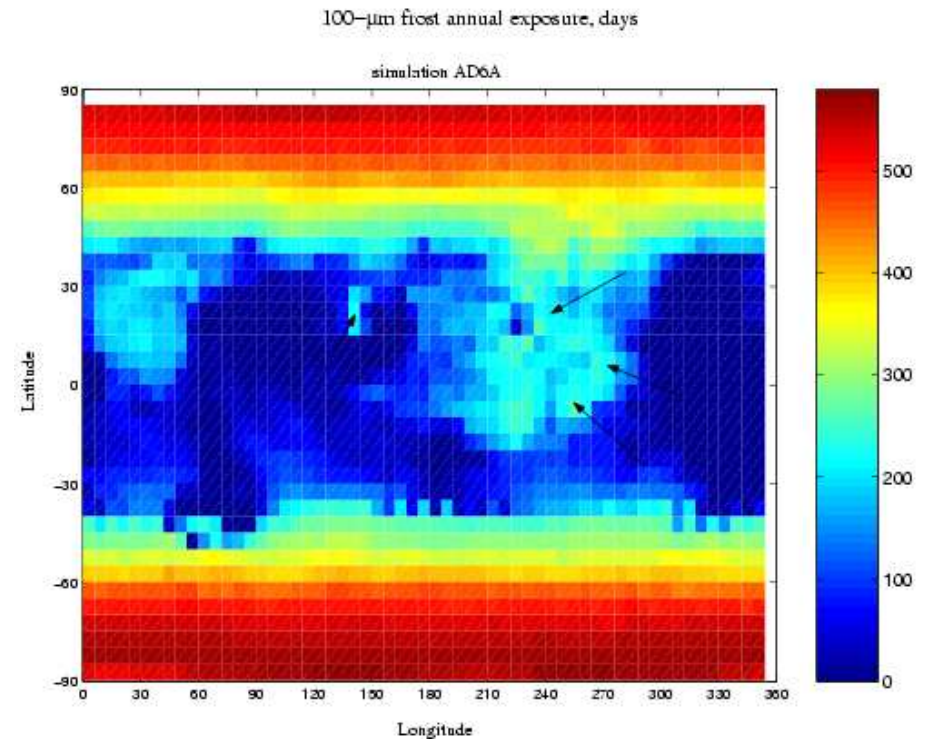
(Mitrofanov et al., 2002)

Среднегодовые распределения воды взаимодействие атмосферы с поверхностью

Содержание паров воды
в столбе, мкм



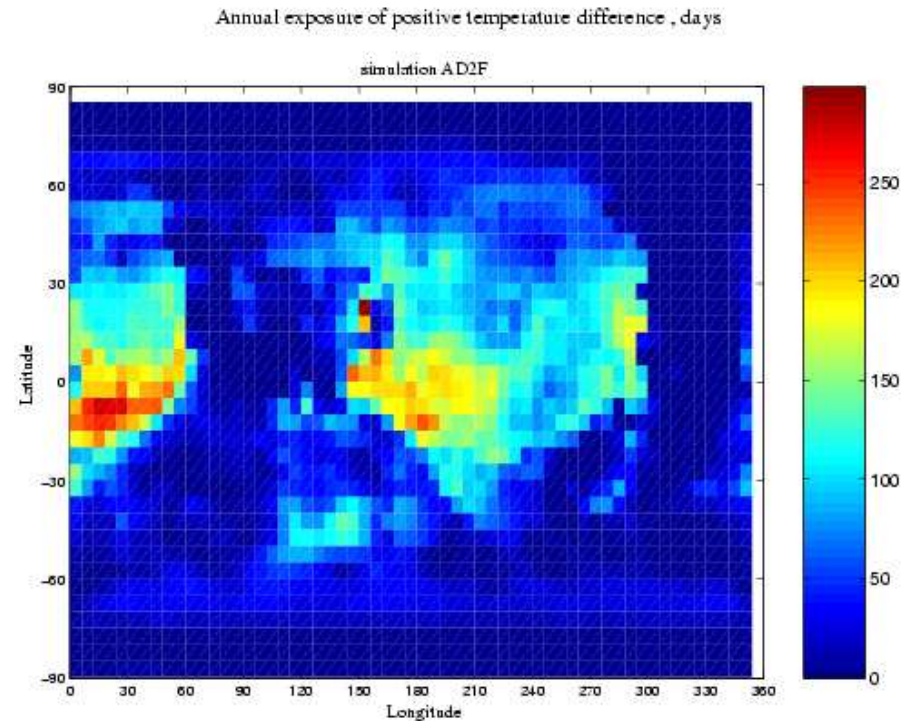
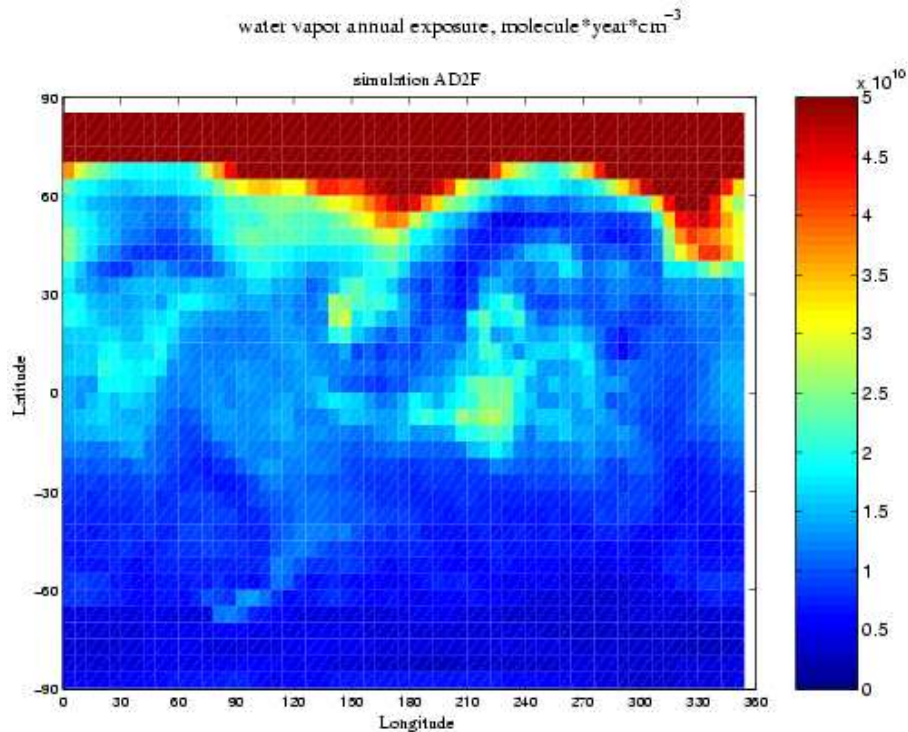
Экспозиция (в сутках) слоя
снега толщиной > 100 мкм



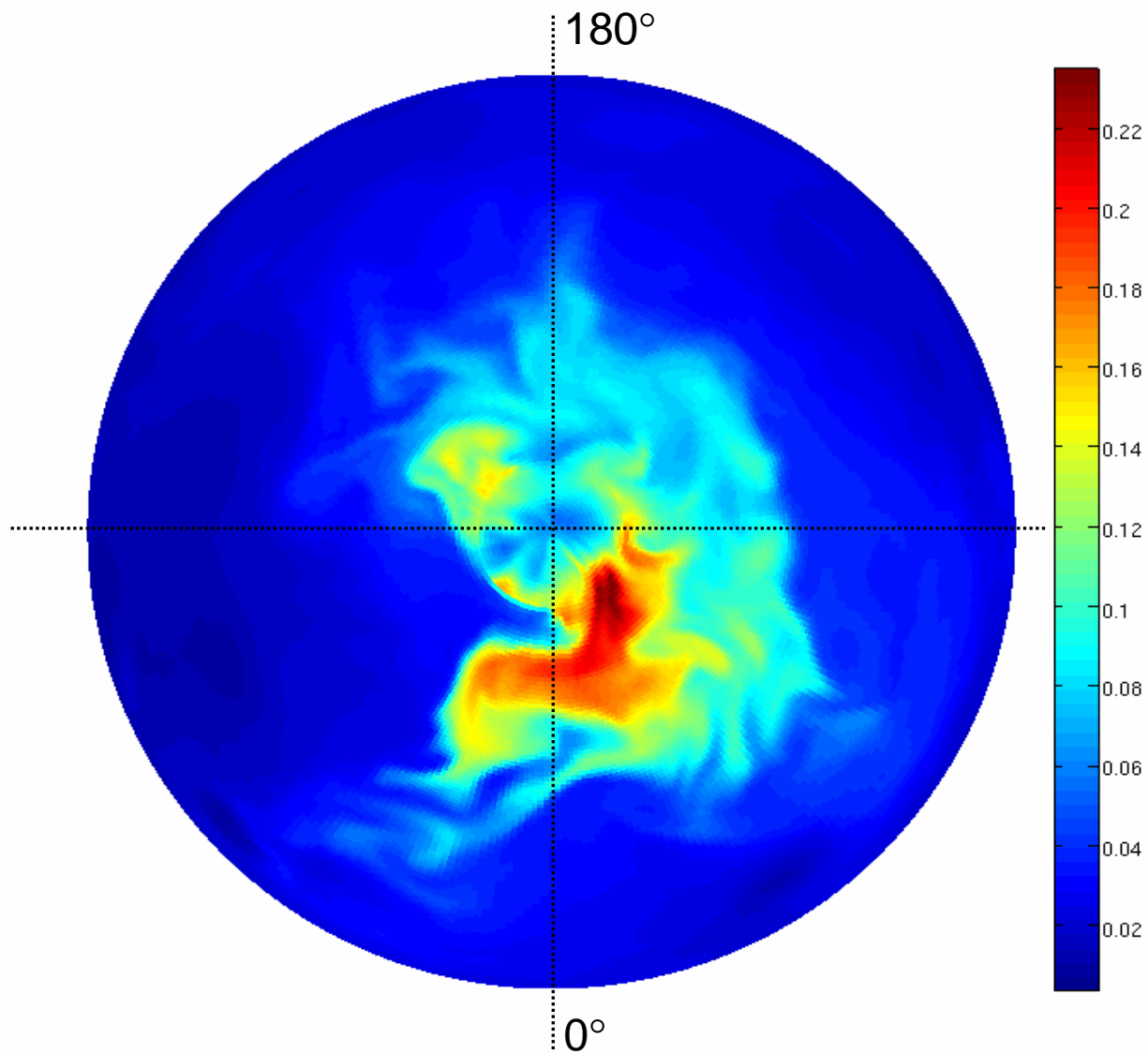
Среднегодовые поля (продолжение)

Среднегодовая концентрация
водяного пара в нижнем
модельном слое
при условии $T > 220$ К

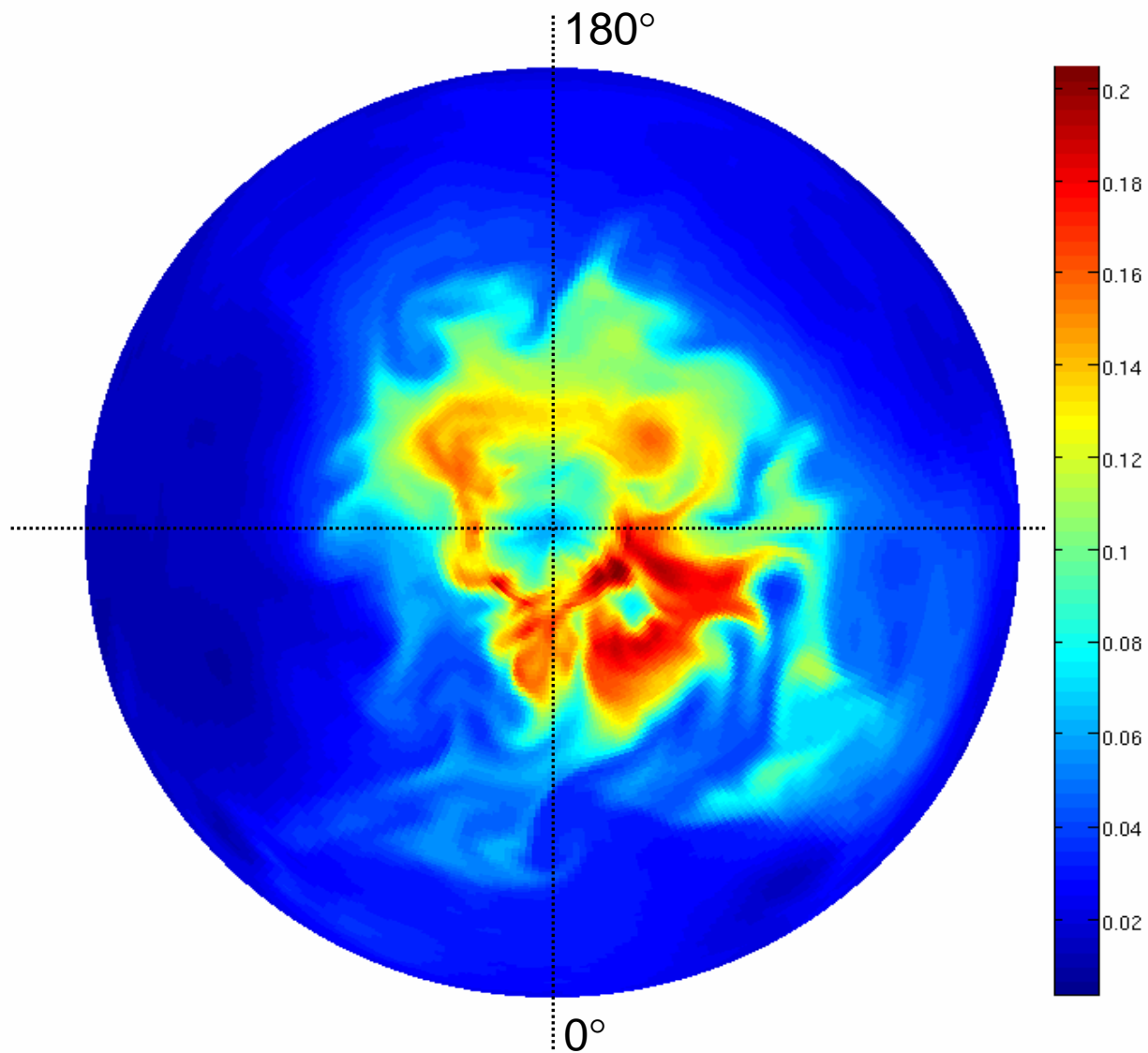
Время, в течение которого
выполняется условия $\Delta T > 30$ К
и $T > 200$ К



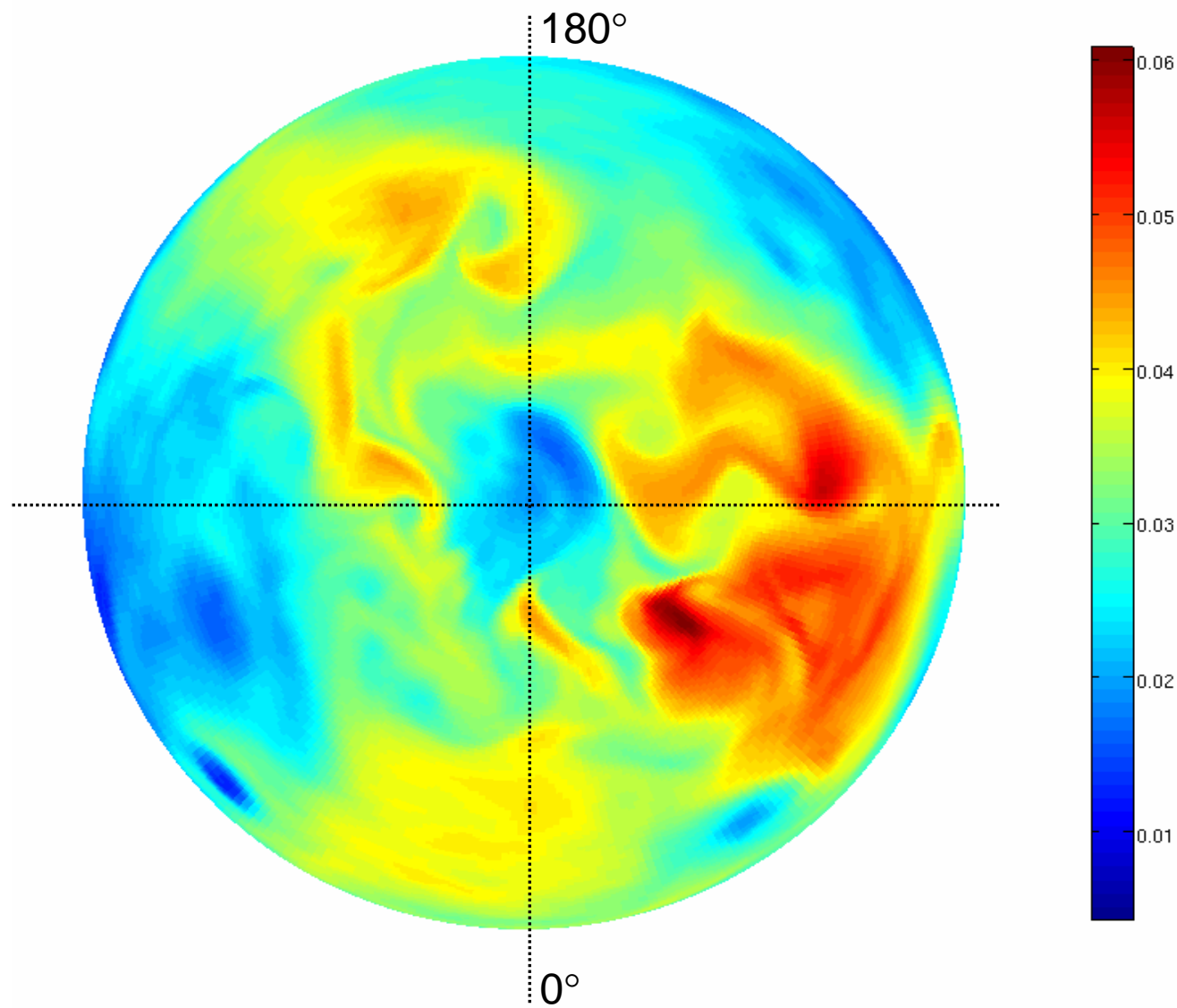
Содержание водяного пара в столбе атмосферы: $L_s = 92^\circ$, Северное полушарие [кг/м²]



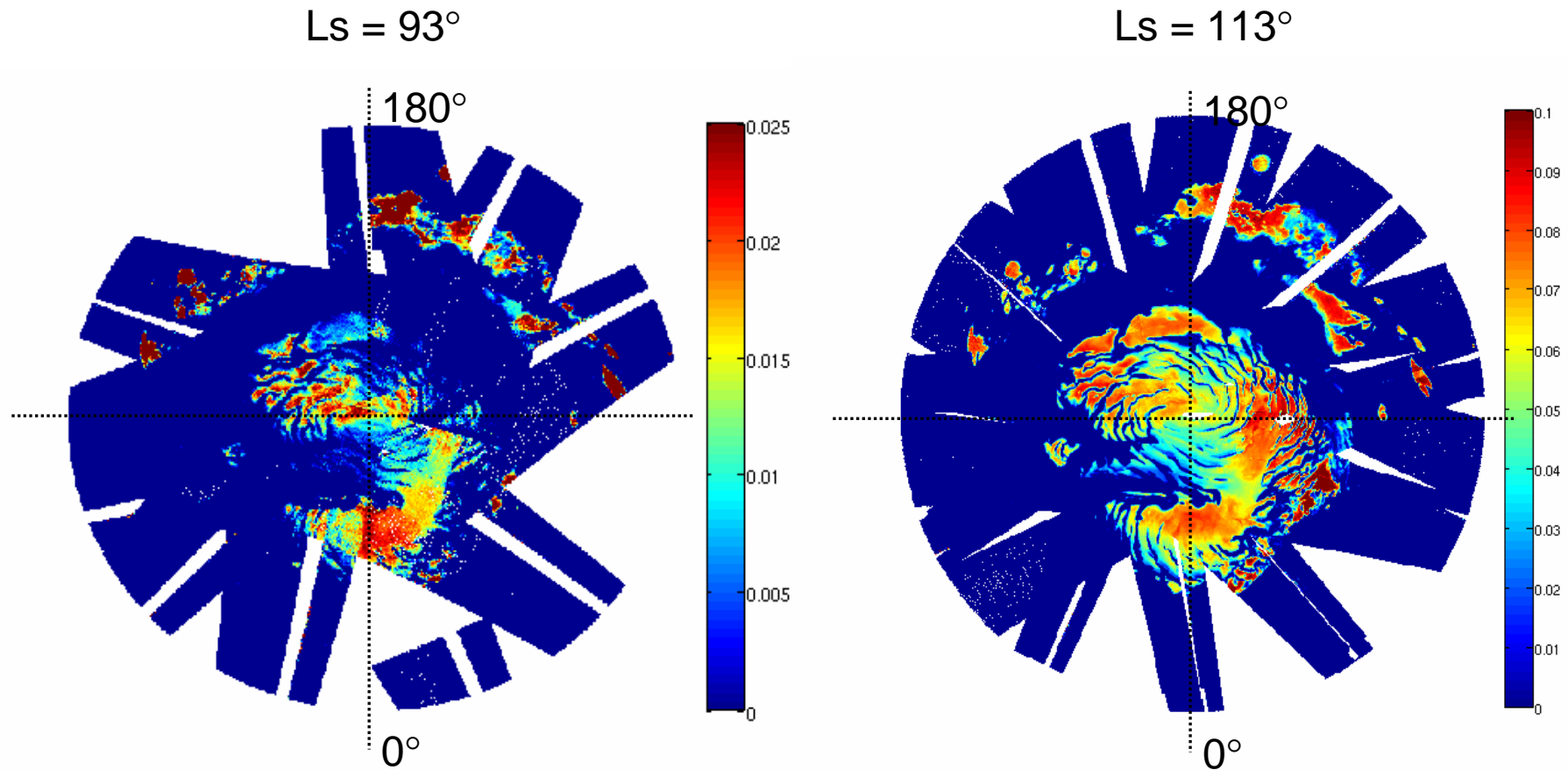
Содержание водяного пара в столбе атмосферы:
 $L_s = 113^\circ$, Северное полушарие [кг/м²]



Содержание водяного пара в столбе атмосферы: $L_s = 143^\circ$, Северное полушарие [кг/м²]



Следы стационарных атмосферных волн в микроструктуре Северной полярной шапки



Индекс 1.2 мкм по данным гиперспектрометра MEX/OMEGA
Евдокимова и др., 2009

Волновой транспорт воды в афелии: анализ линий тока

В поле (U, V, W) выделяются стационарная и приливные компоненты

Стационарная компонента раскладывается по зональным гармоникам,

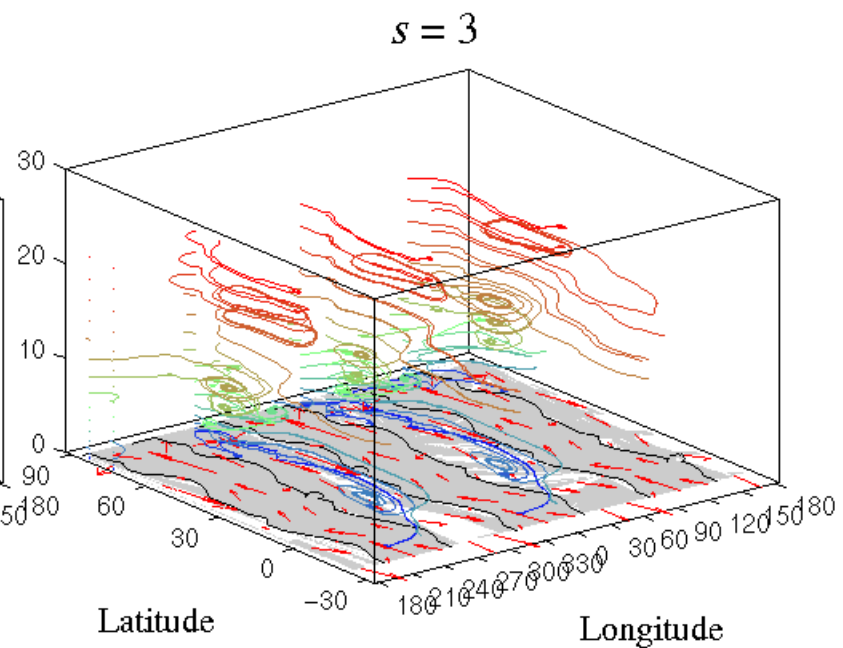
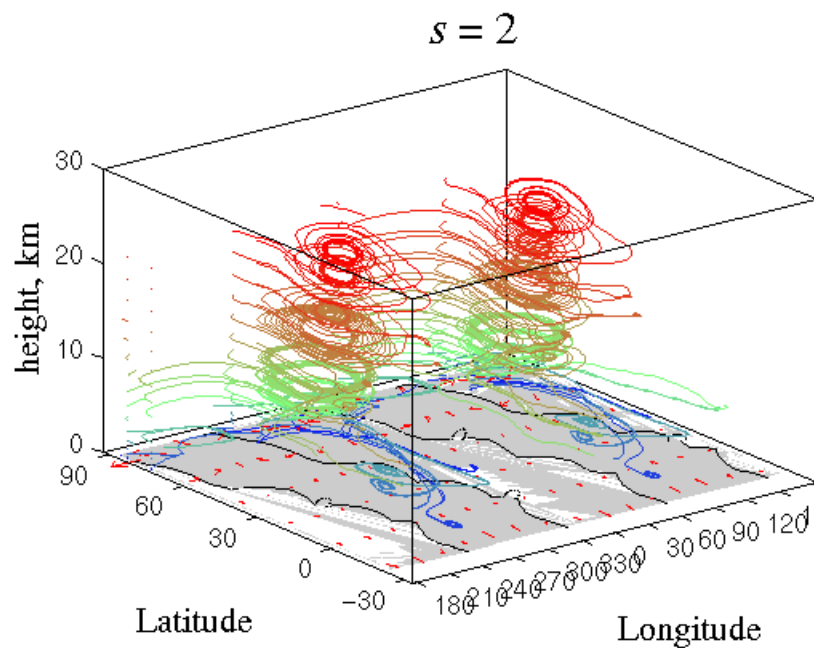
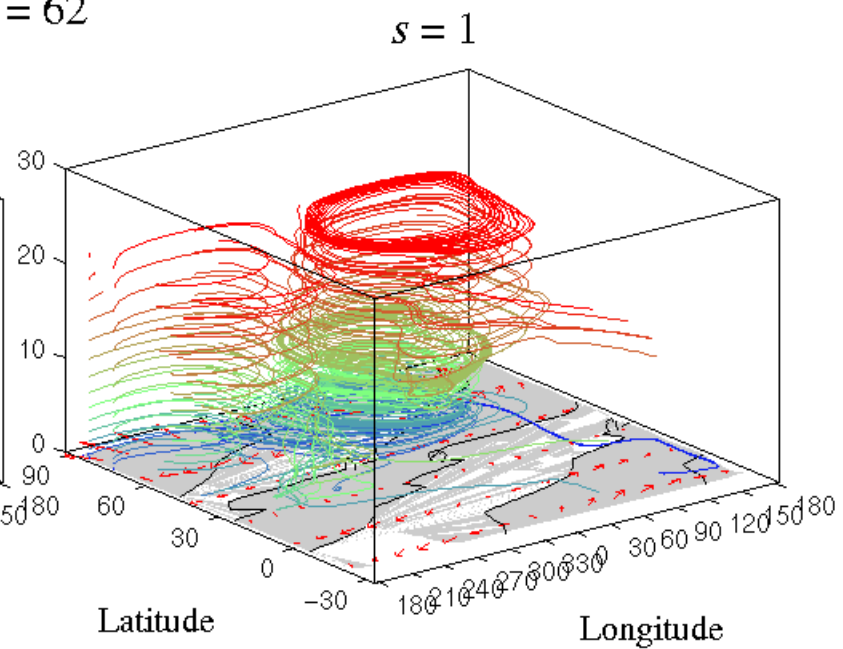
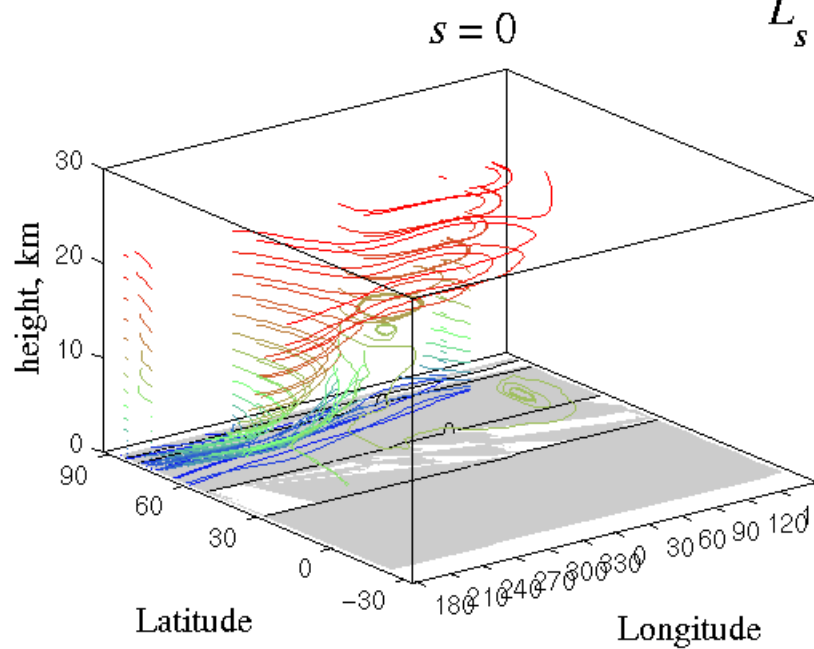
$$\mathbf{v}_k = (U_k, V_k, W_k), k = 0..3$$

Поток воды, обусловленный каждой гармоникой равен

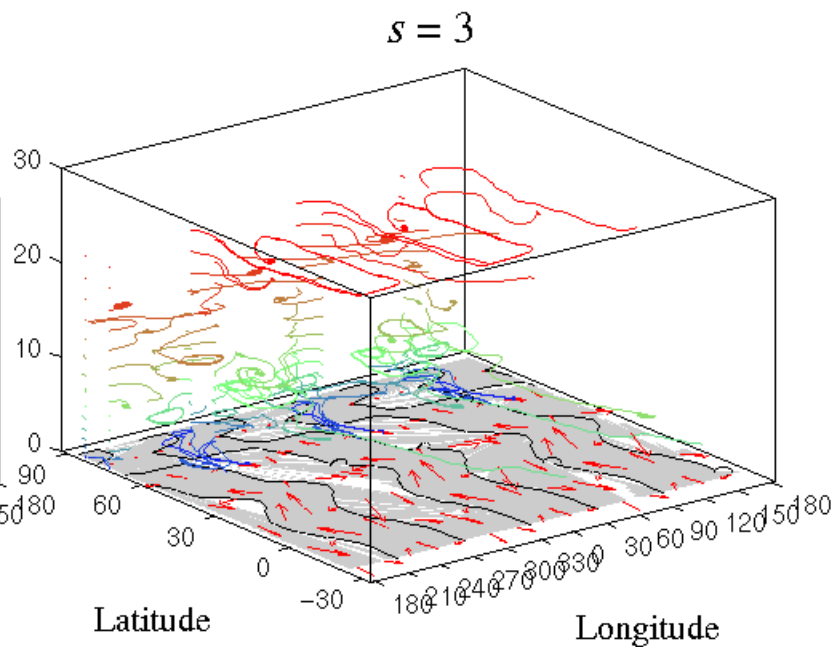
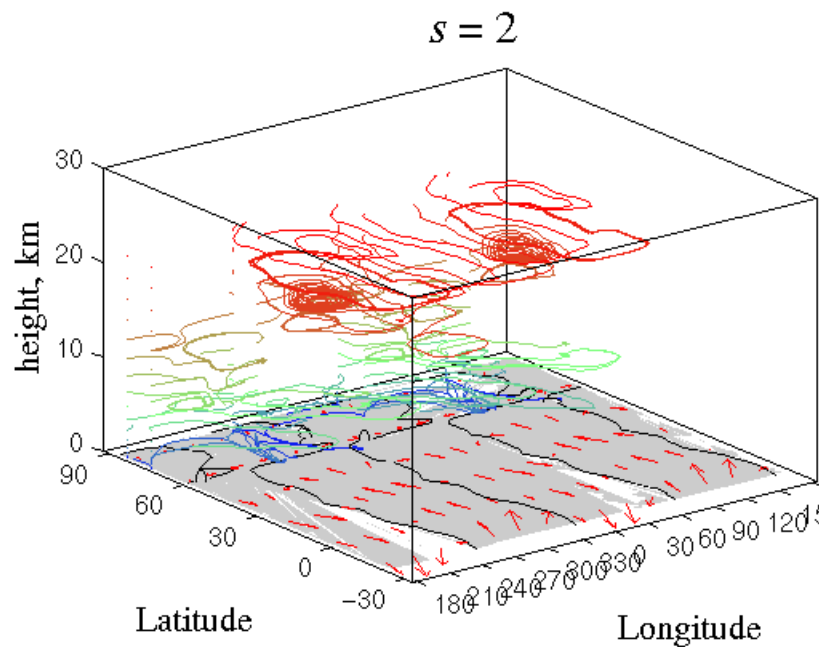
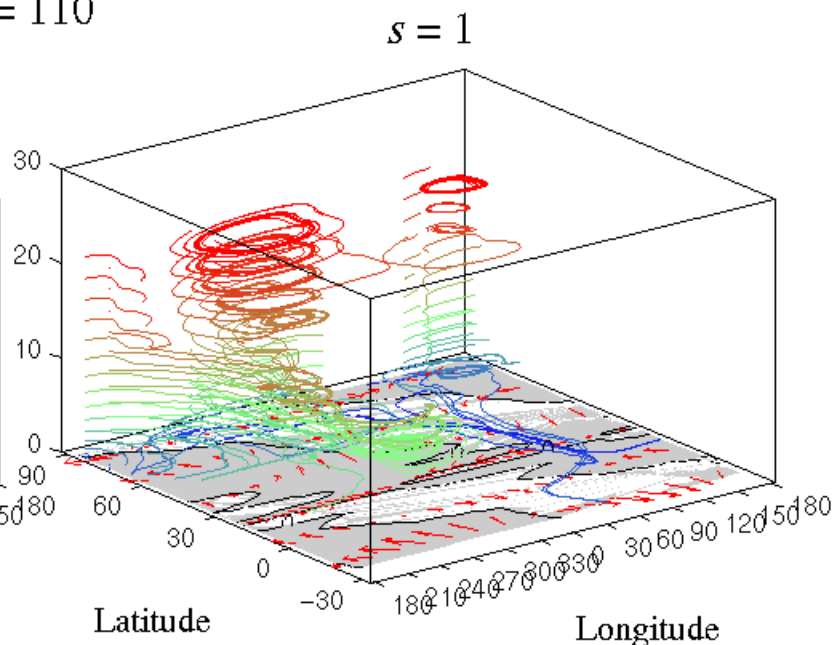
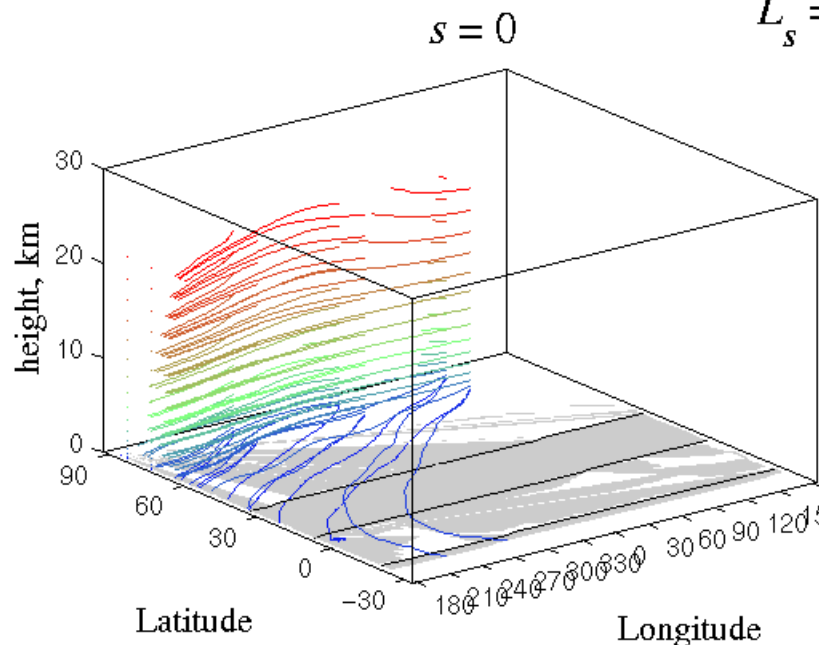
$$\mathbf{F}_k = (r_{vapor} + r_{cloud}) \square \mathbf{v}_k$$

Линии тока обозначают траектории частиц в атмосфере
в предположении об отсутствии источников.

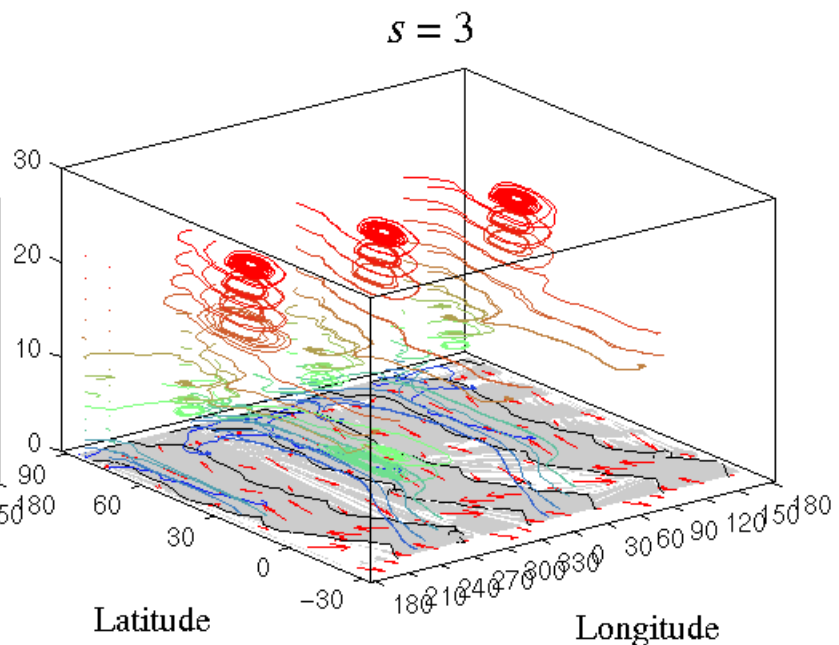
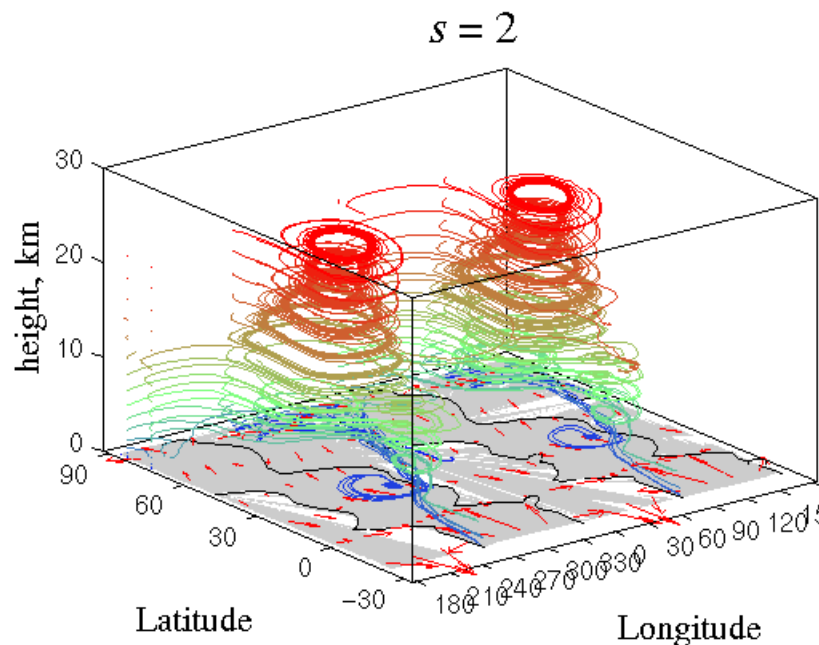
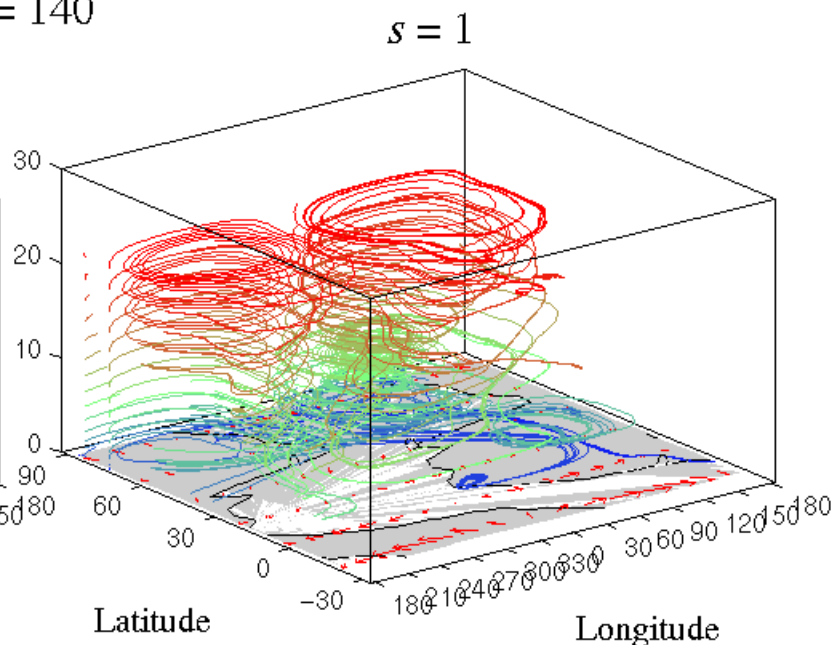
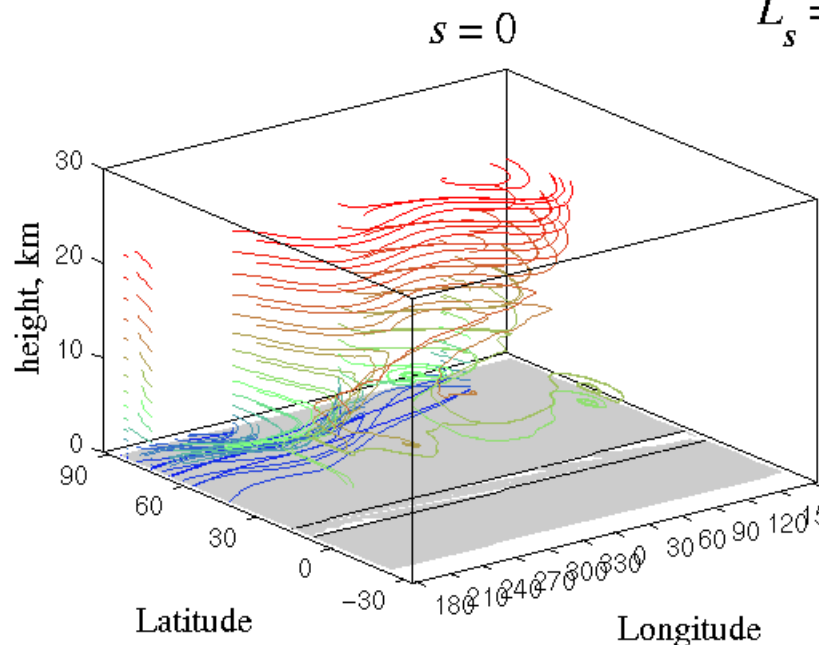
$$L_s = 62^\circ$$



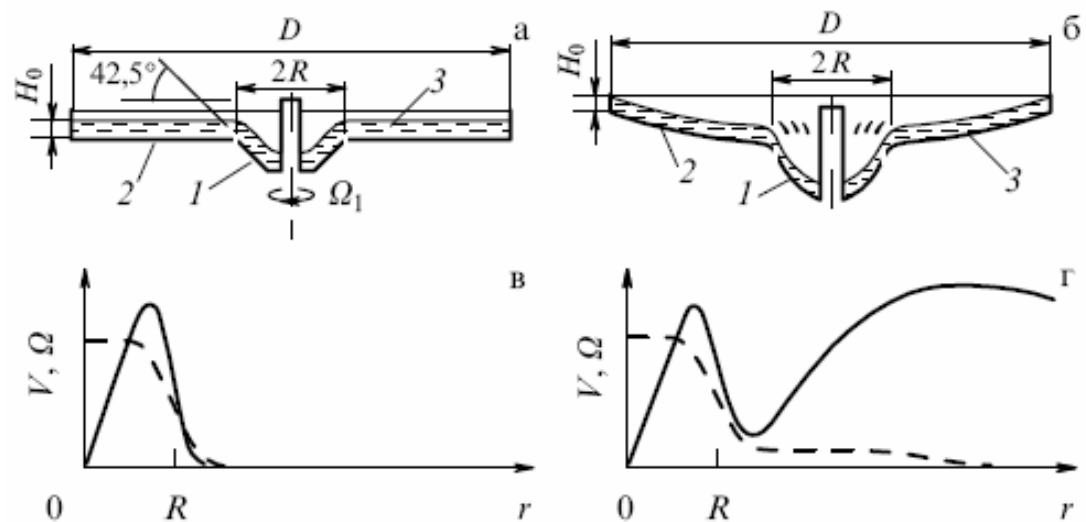
$$L_s = 110^\circ$$



$$L_s = 140^\circ$$



Инерционная неустойчивость в полярном вихре: лабораторный аналог



Е.Н.Снежкин и др. Установка «Спираль» (ИАЭ им. И.В.Курчатова)

Планы на будущее: моделирование

- Гибридная сеточно-моментная схема для расчета микрофизики аэрозоля
- Зарядка, коагуляция, фотохимия
- Взаимодействие атмосфера-реголит
- Сетки, исключаяющие особенности на полюсах (треугольные, кубическая сфера)
- Переход на негидростатическое динамическое ядро

Негидростатическая модель общей циркуляции атмосферы Титана

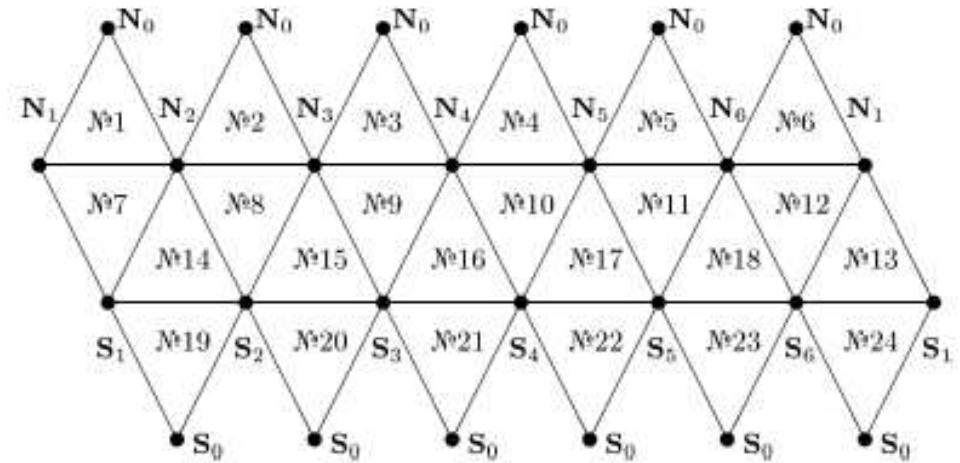
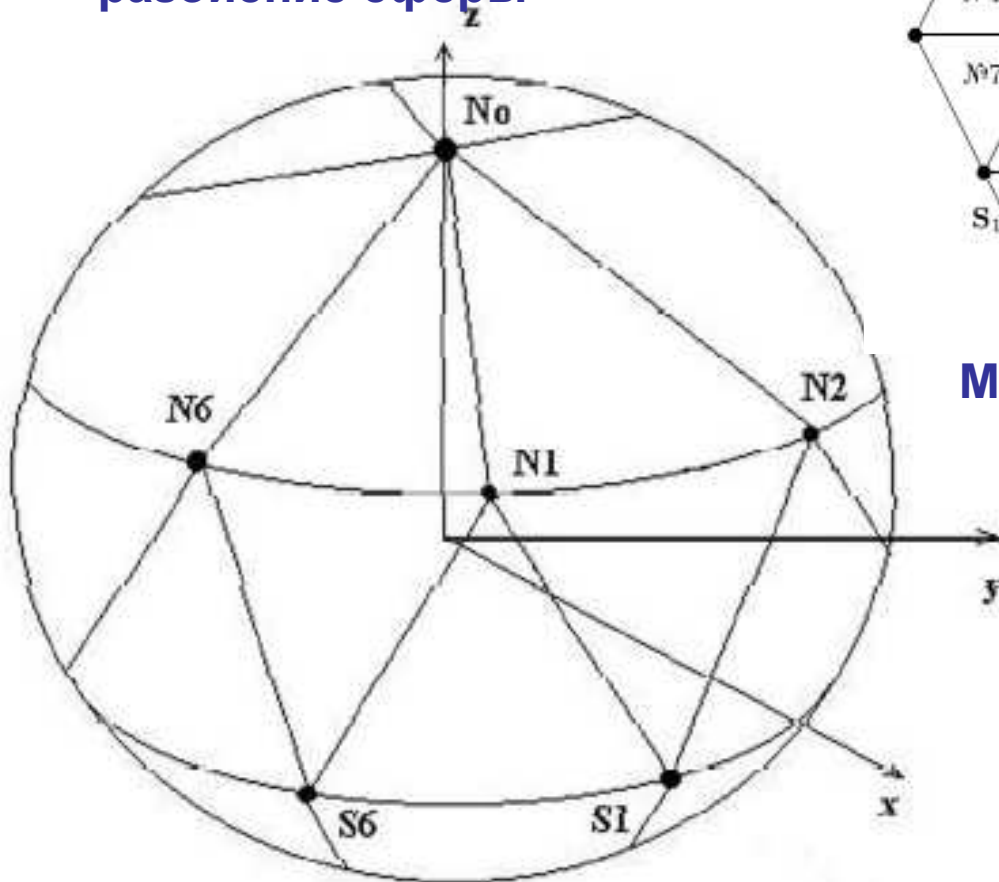
- Полная система уравнений газовой динамики
- Треугольная сетка – нет особенностей на полюсах
- Диапазон высот 0-525 км
- Вертикальное разрешение 0.5 км
- Полу-Лагранжева гибридная схема
(Эйлеровы производные в горизонтальном направлении и Лагранжевы в вертикальном)
- Распараллеливание по высоте

Симметричная треугольная сетка

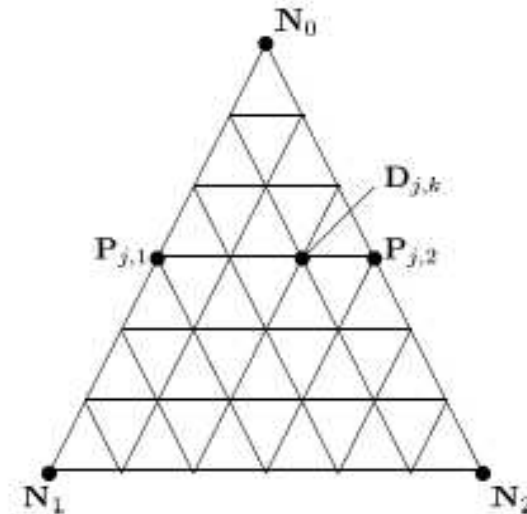
– позволяет избежать сингулярностей на полюсах

Проекция сферы на сетку

Крупномасштабное разбиение сферы



Мелкое разбиение треугольников

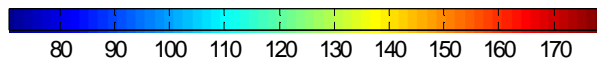
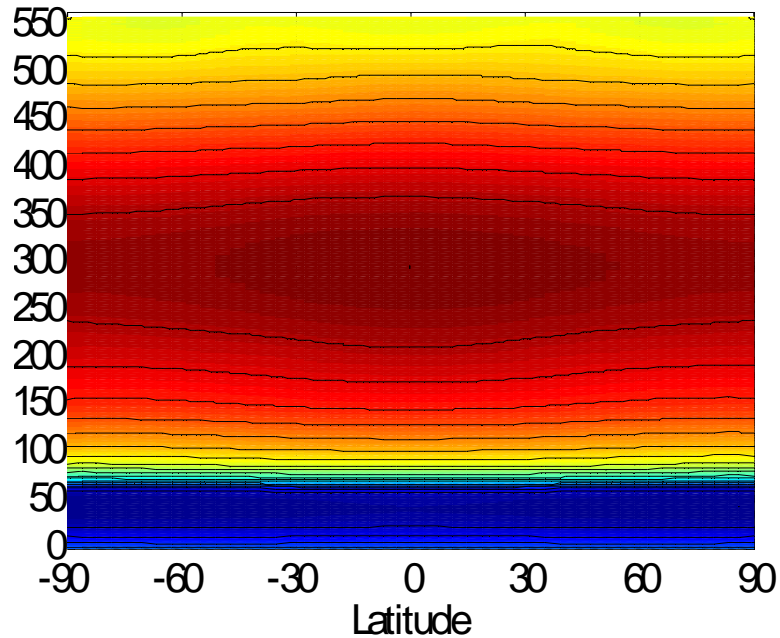


Физические блоки:

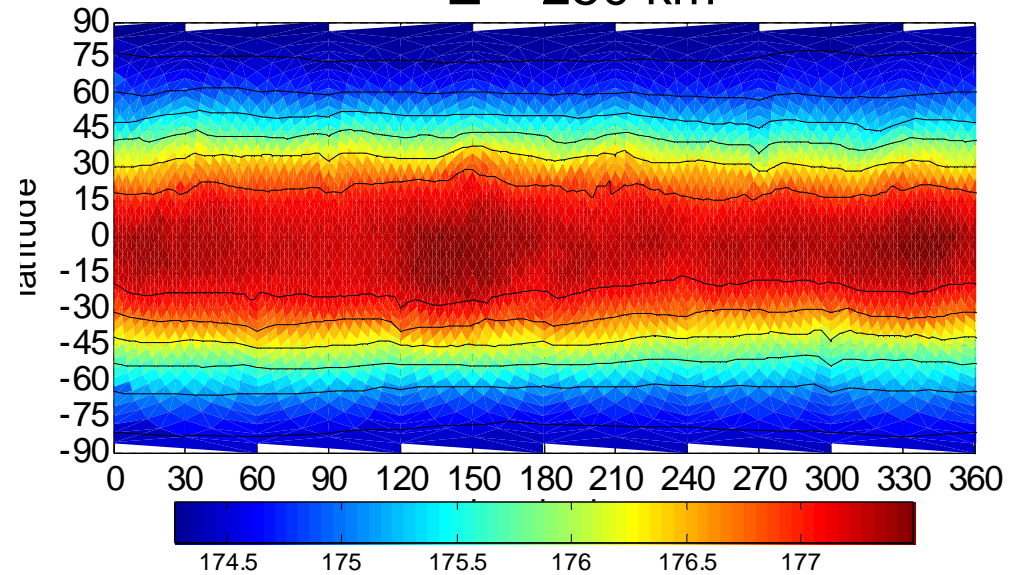
- Релаксация к заданному температурному профилю
- Либо полноценный радиационный блок (трудности со спектроскопией метана)
- Микрофизика органического аэрозоля

Термическая структура в τ -приближении

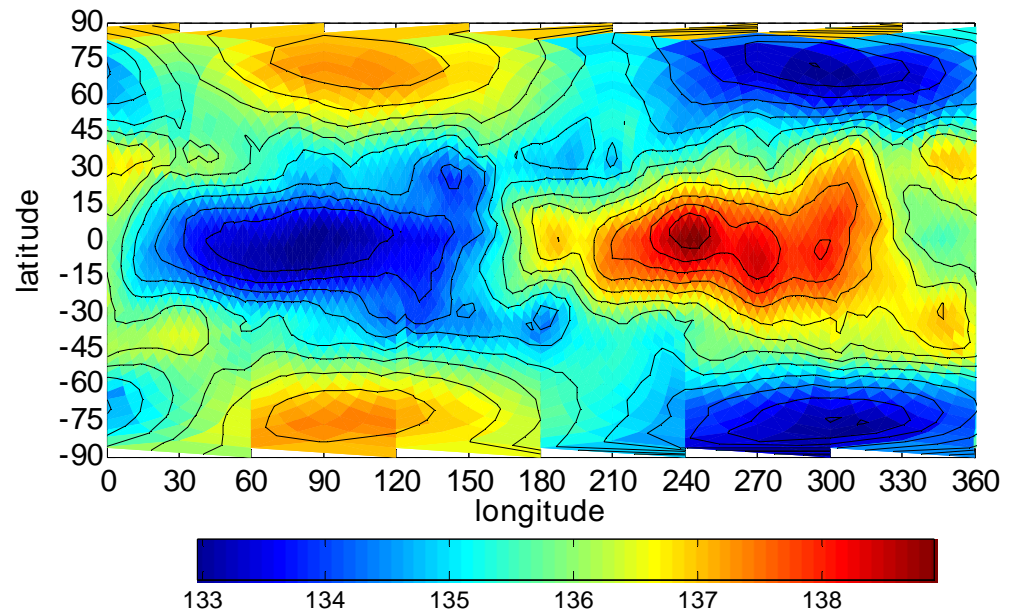
$$\phi = 0^\circ$$



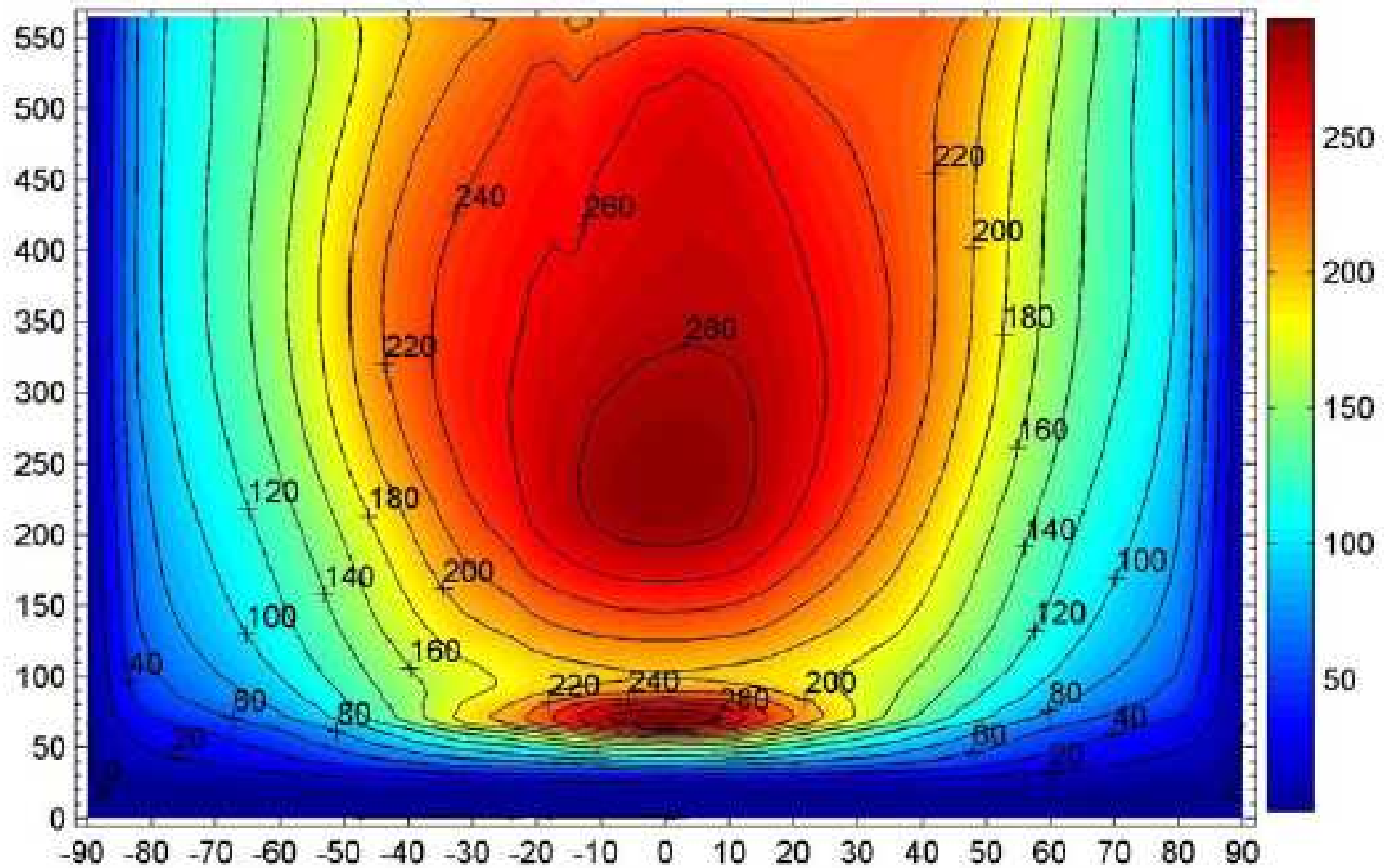
Z = 250 km



Z = 550 km



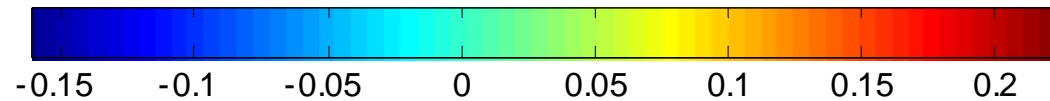
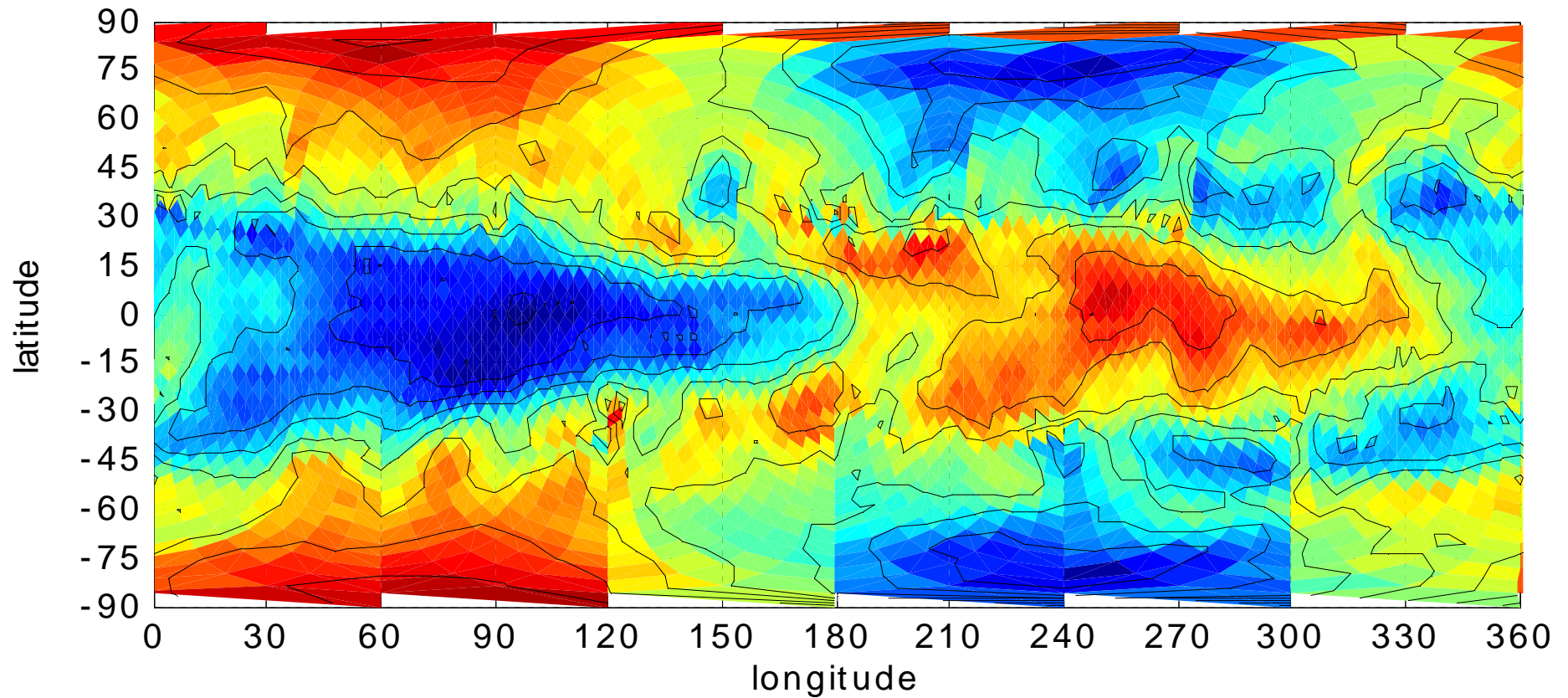
Zonal superrotation: stronger forcing



Mingalev et al., 2008

Vertical velocity : signature of thermal tide

$z=550$ km



A background micrograph showing numerous spherical titanium aerosol particles of varying sizes. A scale bar in the top left corner indicates 0.2 μm.

0.2 μm

Микрофизика аэрозоля Титана

- Сложная органика (*Atreya et al.*, *Dimitrov and Bar-Nun*)
- Известны лабораторные аналоги (*Khare et al.*, *Ramirez et al.*, *Szopa et al.*)
- Фрактальные агрегаты:

$$D \sim 2.0$$

размер мономера = **0.05 μm**

↗ **0.3 μm** выше тропопаузы
↘ размер кластера

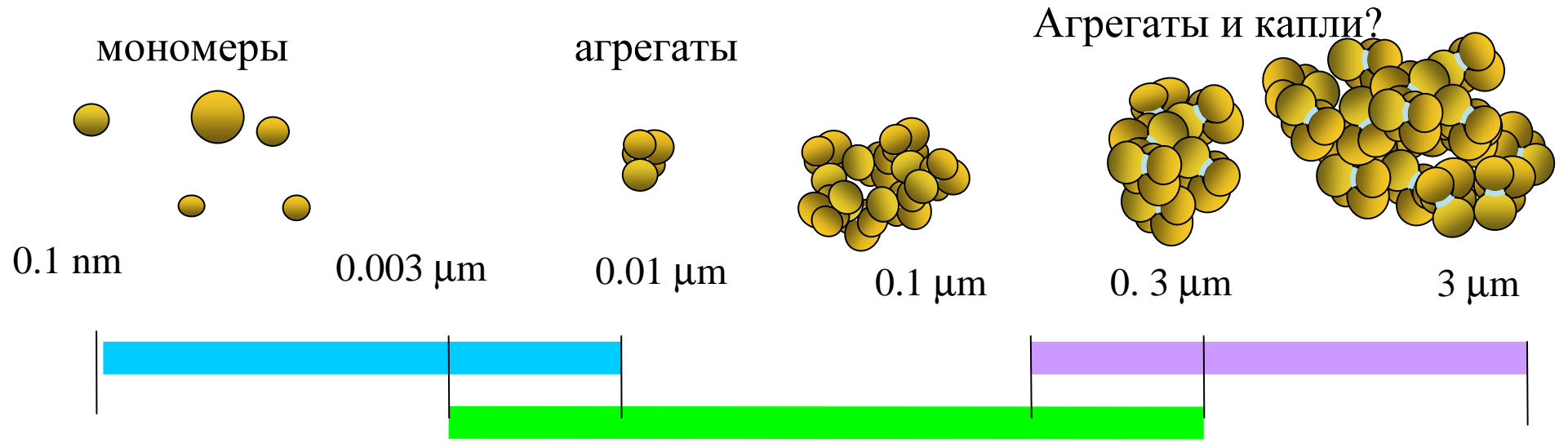
2-10 μm ниже тропопаузы

Элементарные процессы

- Фотохимический источник
- Столкновительная зарядка и фотоэффект
- Коагуляция
- Перенос, перемешивание и осаждение

Броуновское ядро с кулоновским фактором

$$K(x, y) = \frac{\pi q_e^2 n_e^2 (x + y)^2 x y V_T}{kT \left[e^{\frac{n_e^2 x y}{kT (x + y)}} - 1 \right]}$$



Совмещение моделей зарядки и коагуляции:

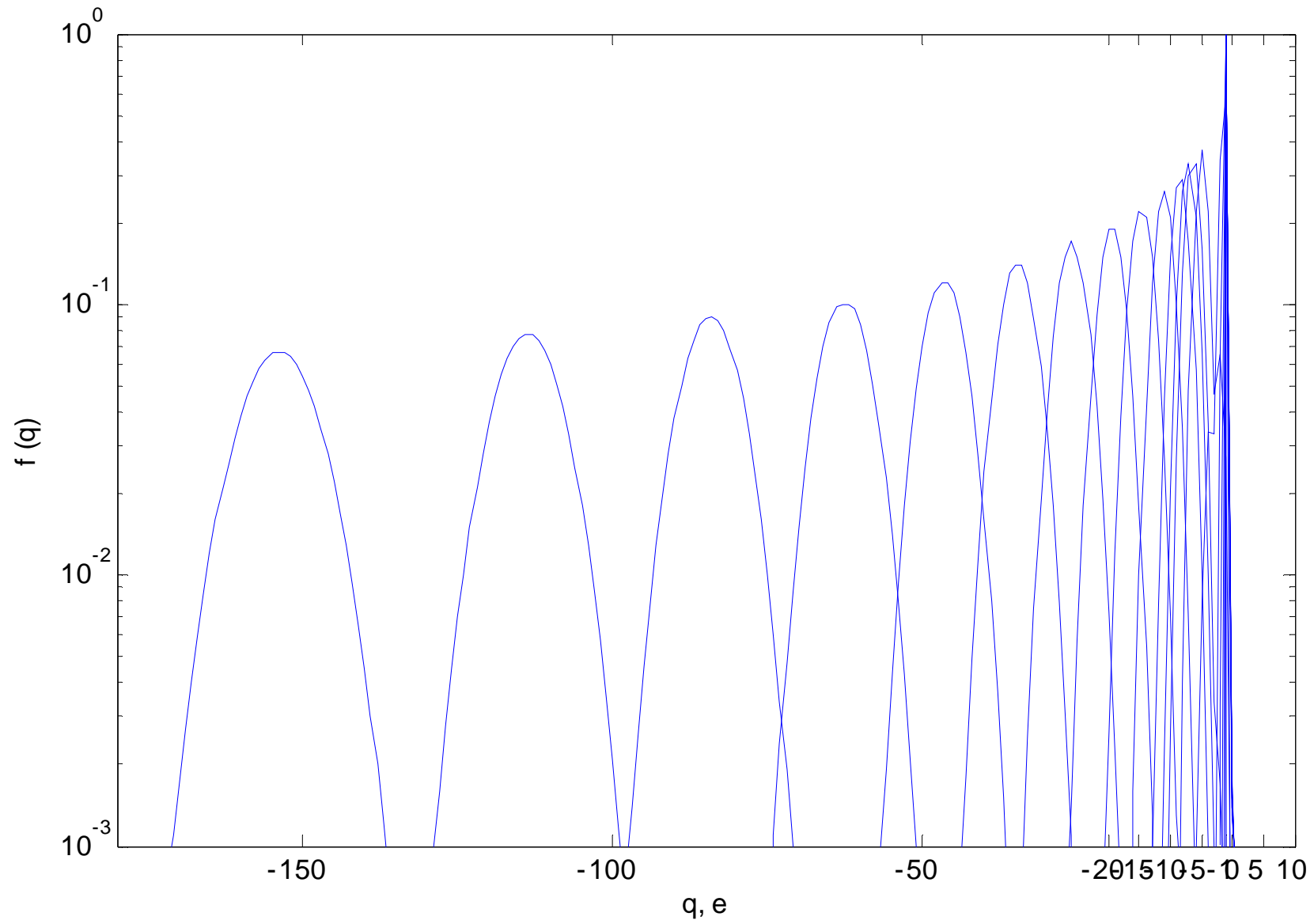
- Аккреция свободных электронов из атмосферы
- Фотоэмиссия
- Детальный баланс заряда
- Интерполяция диффузионного и свободно-молекулярного пределов
- Эффективное ядро для ансамбля частиц:

$$K_{eff}(r, r') = \frac{\iint K(r, r', q, q') f(r, q) f(r', q') dr dr'}{\int f(r, q) dq \int f(r', q) dq}$$

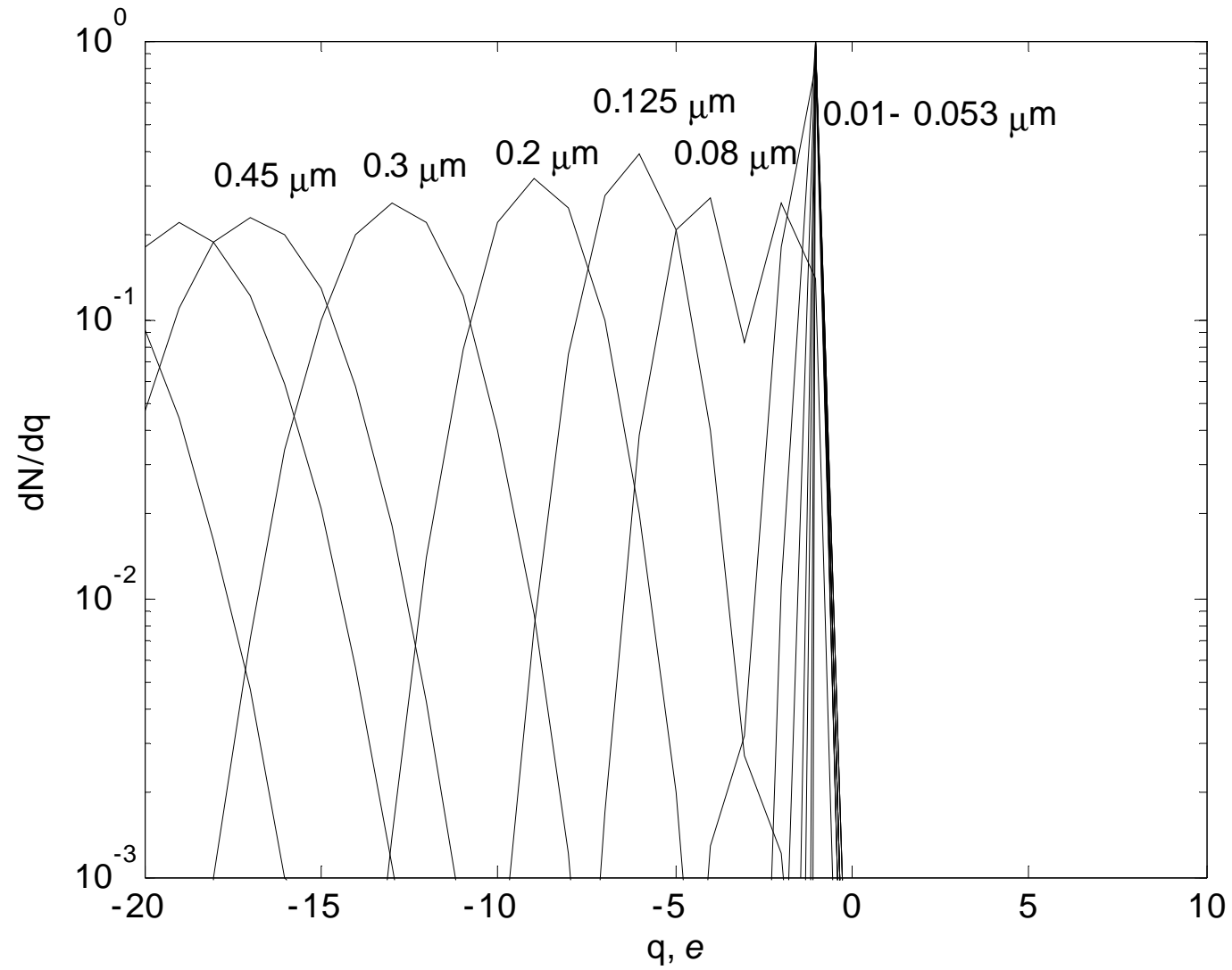
Полунеявная схема для уравнения Смолуховского

$$m_i u_i^{t+1} = \frac{m_i u_i^t + \tau \sum_{j=1}^i \sum_{l=1}^{M_{i,j}} f_{m(l),n(l)} K_{n(l),j} u_{n(l)}^{t+1} u_j^t}{1 + \tau \sum_{l=1}^{L_{i,j}} (1 - f_{m(l),n(l)}) K_{m(l),n(l)} u_{m(l)}^t},$$

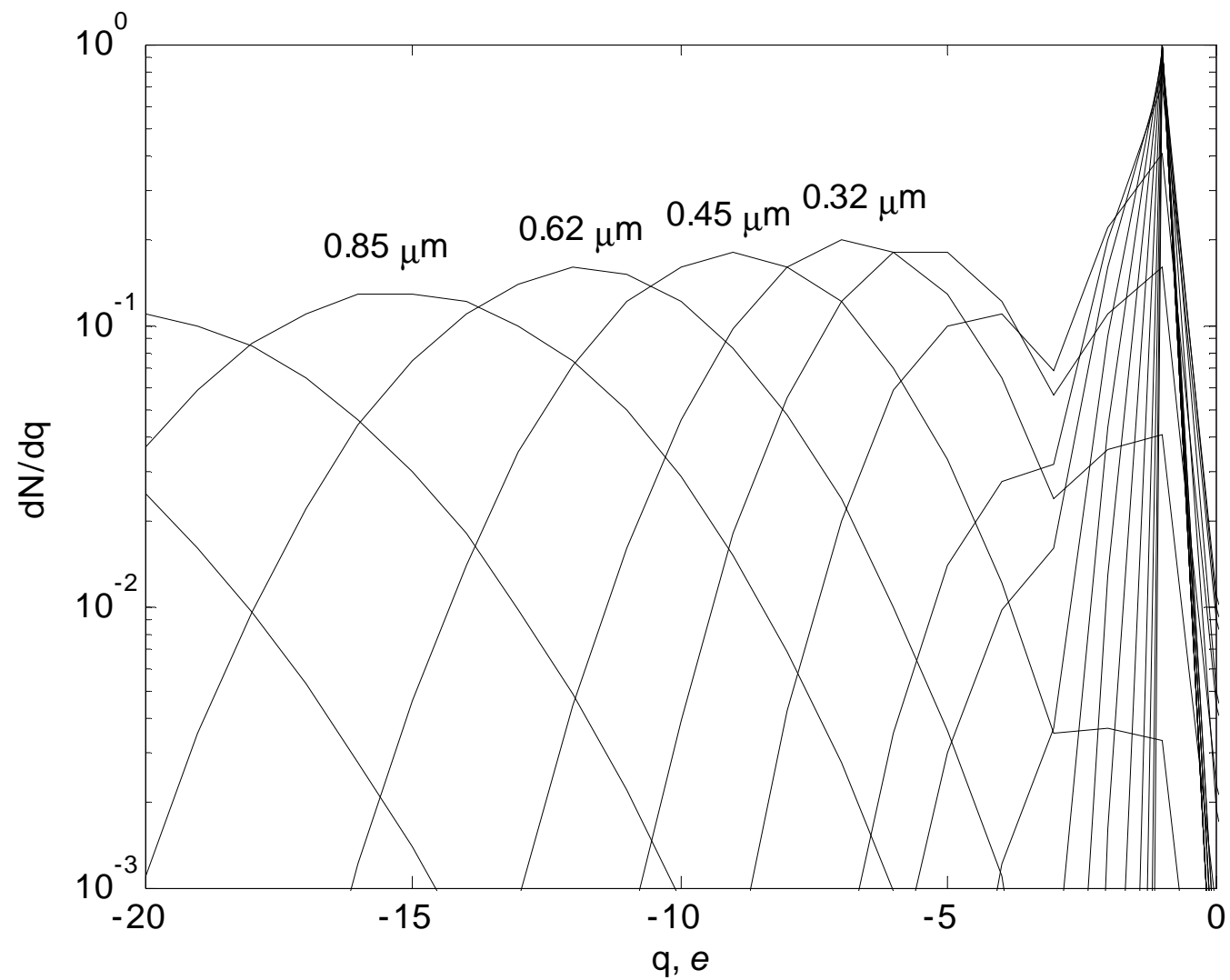
Распределение зарядов на ночной стороне



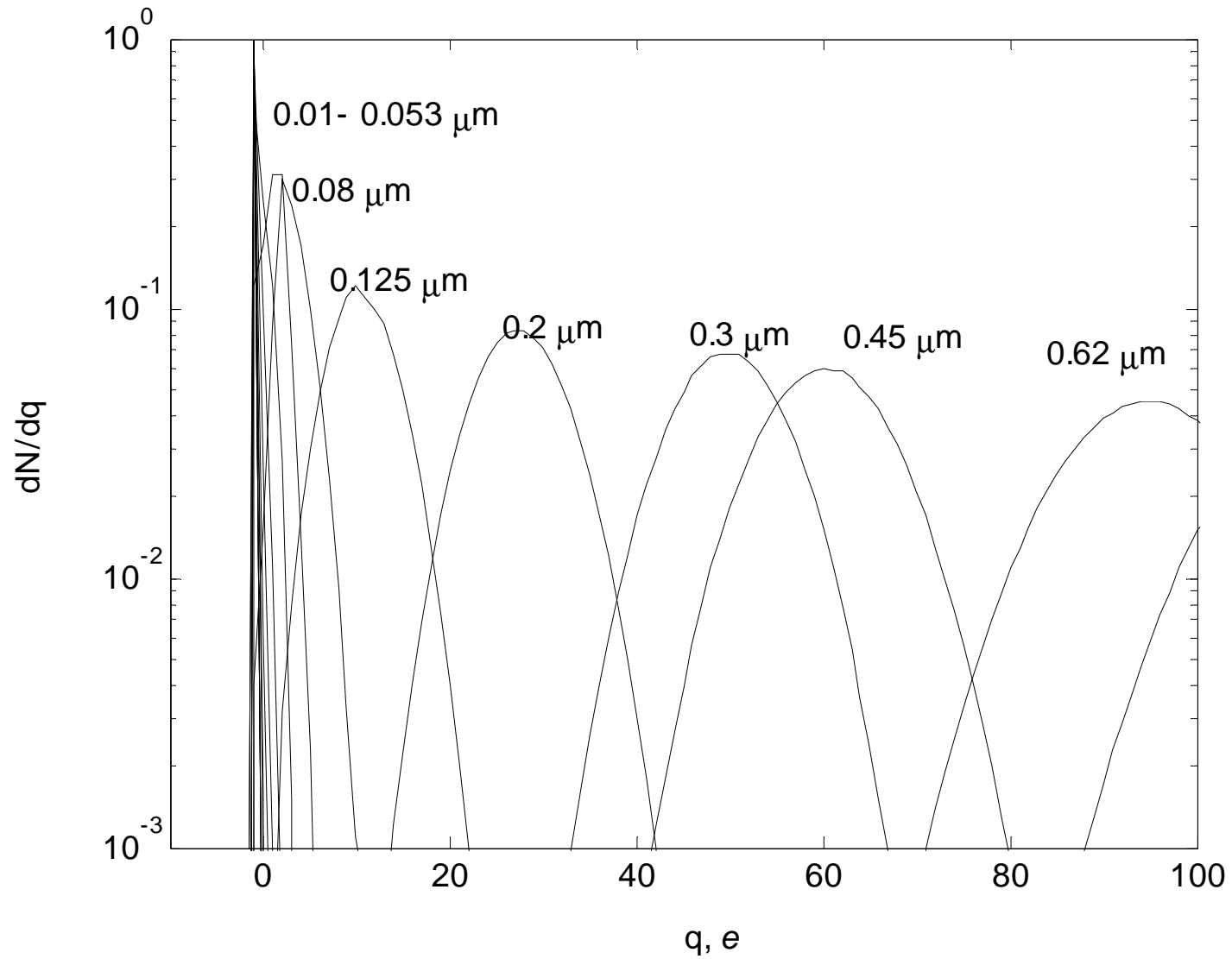
Дискретное распределение при малых зарядах



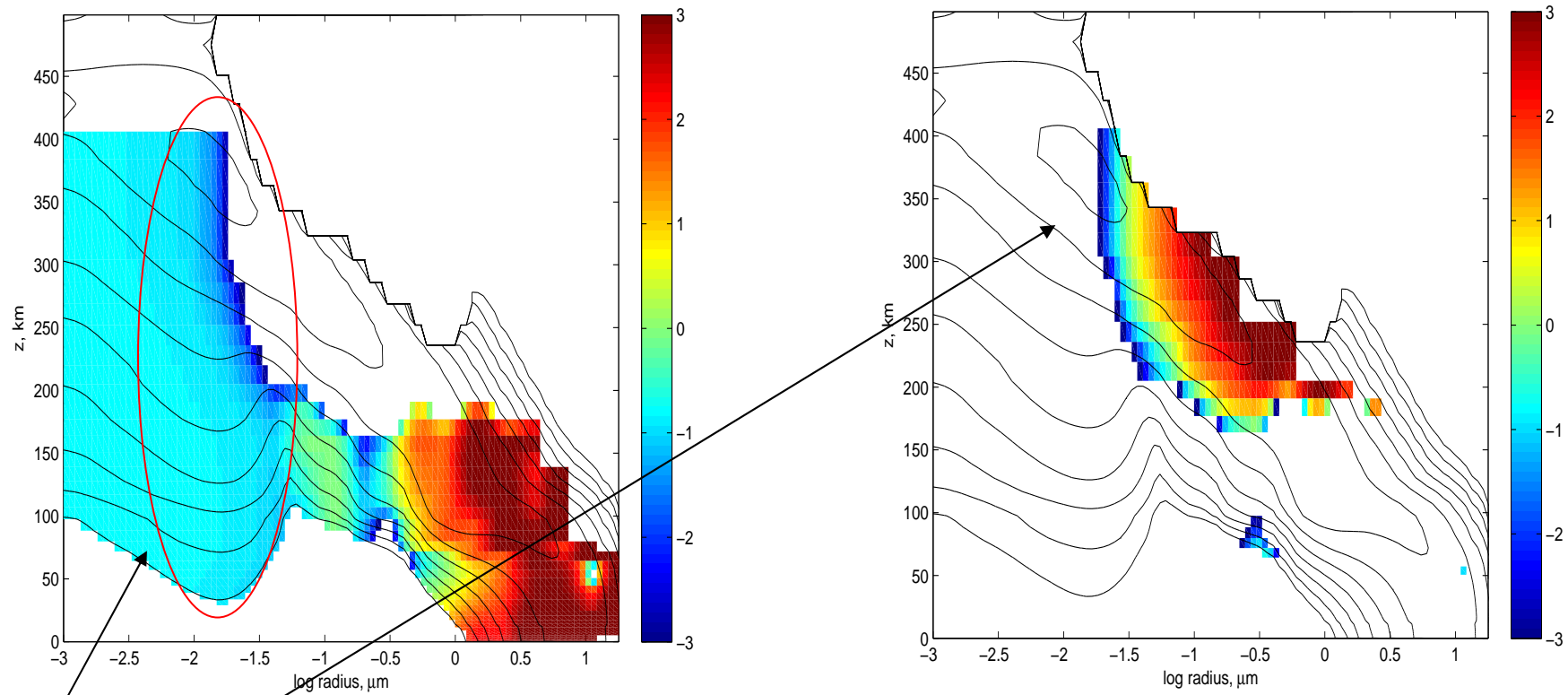
Дискретное распределение ниже тропопаузы



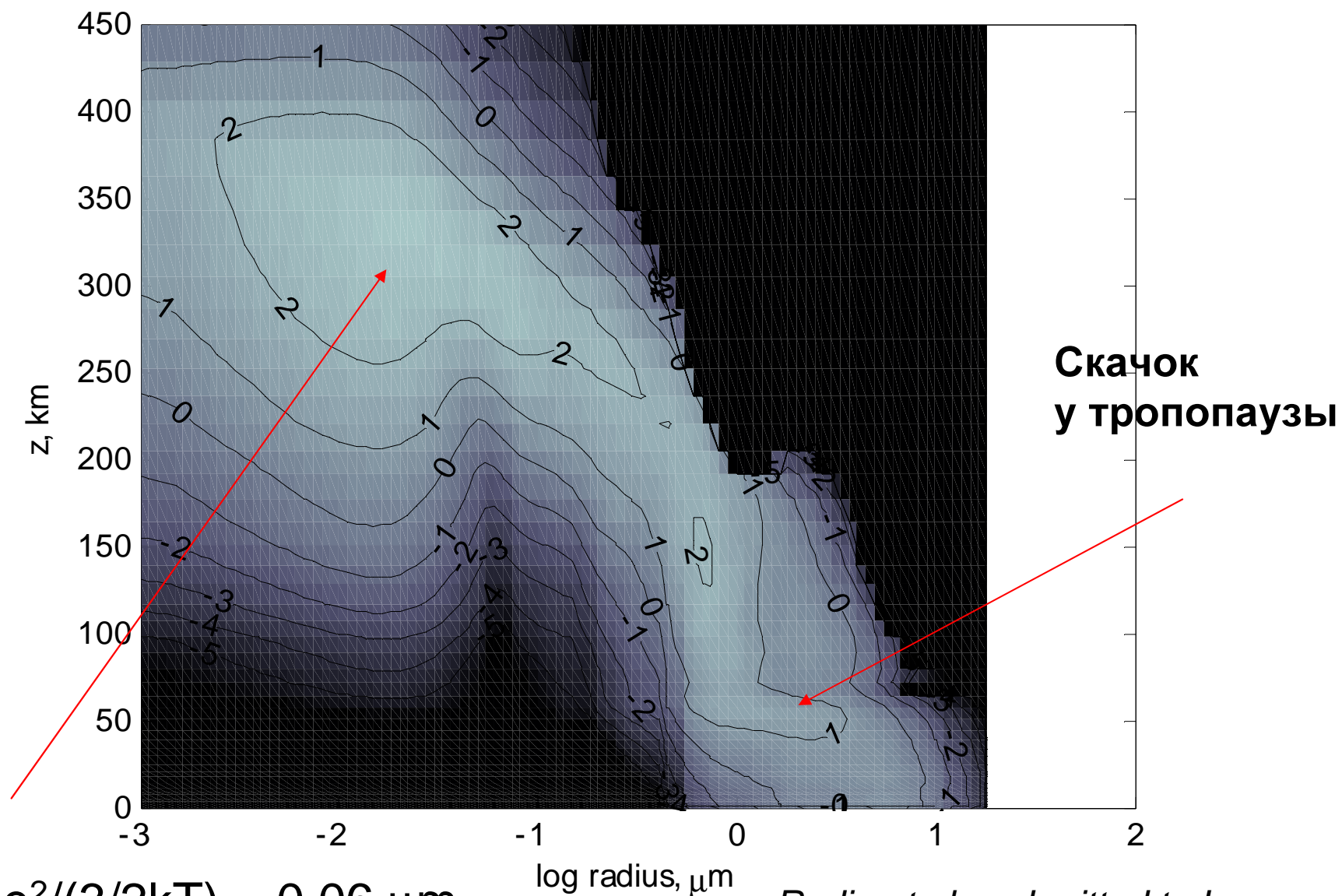
Распределение зарядов на дневной стороне



1D самосогласованное распределение по размерам и высоте



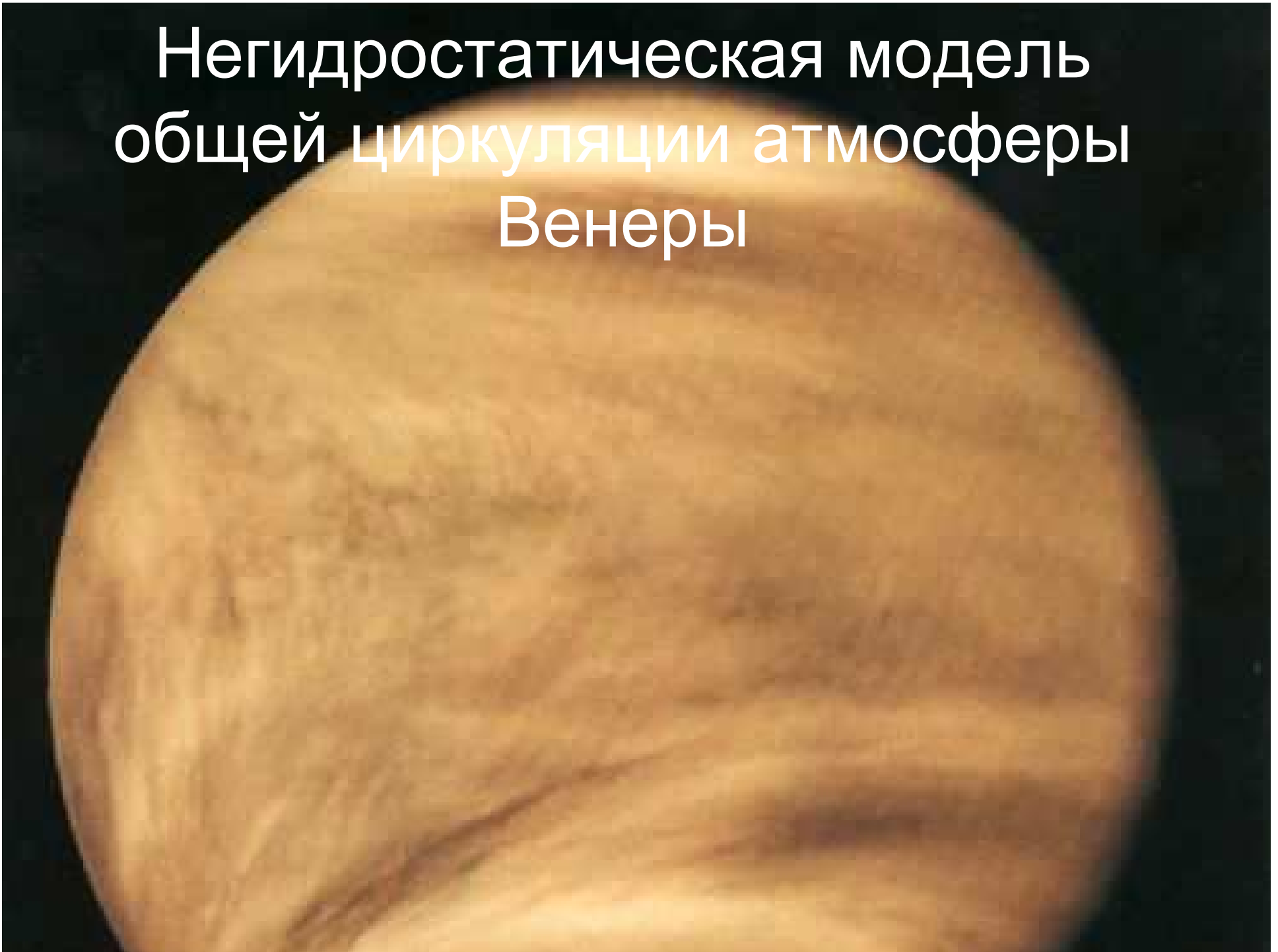
$$R_0 = e^2 / (3/2kT) \sim 0.06 \mu\text{m}$$



$R_0 = e^2 / (3/2kT) \sim 0.06 \mu\text{m}$

Rodin et al., submitted to Icarus

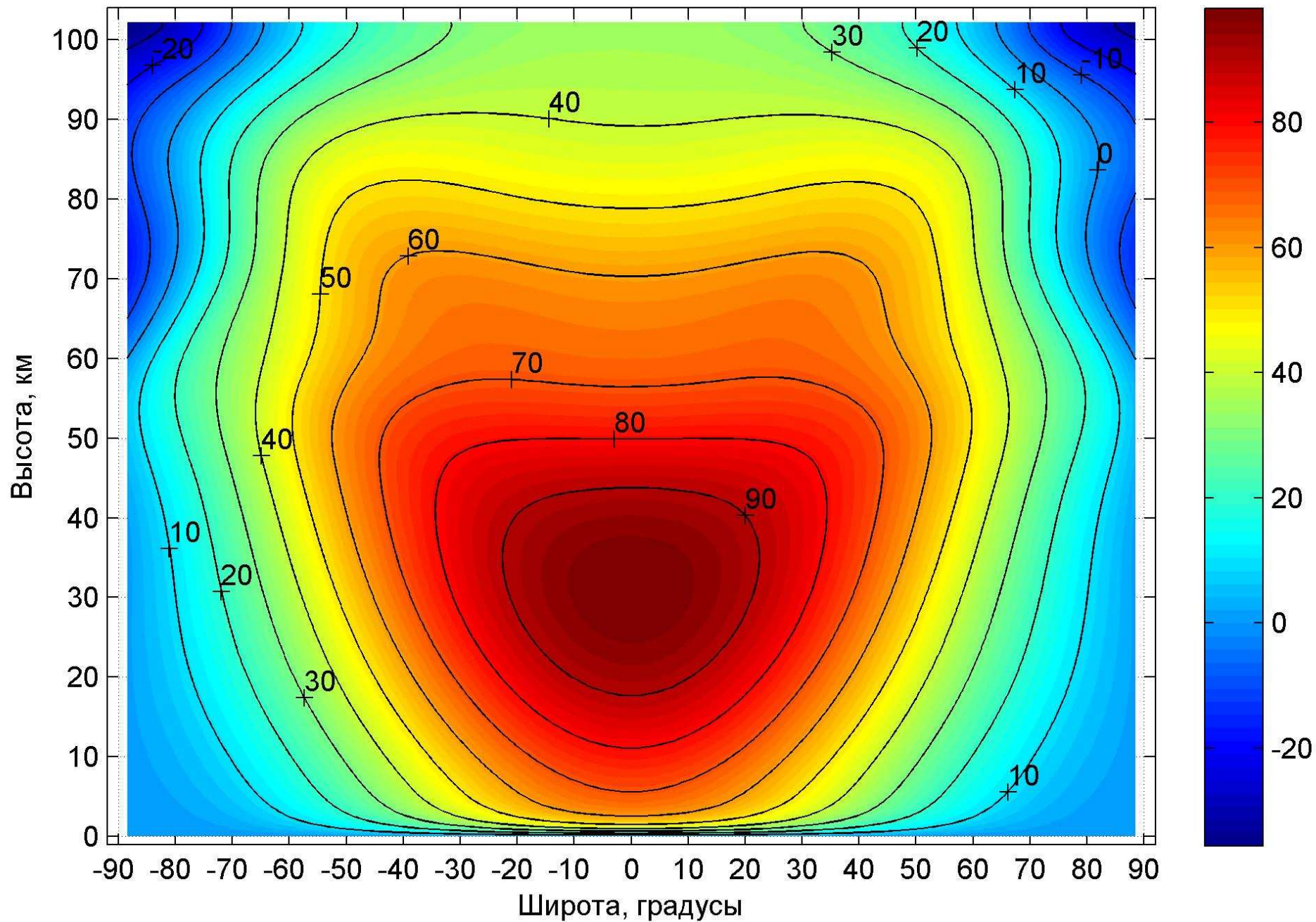
Негидростатическая модель общей циркуляции атмосферы Венеры



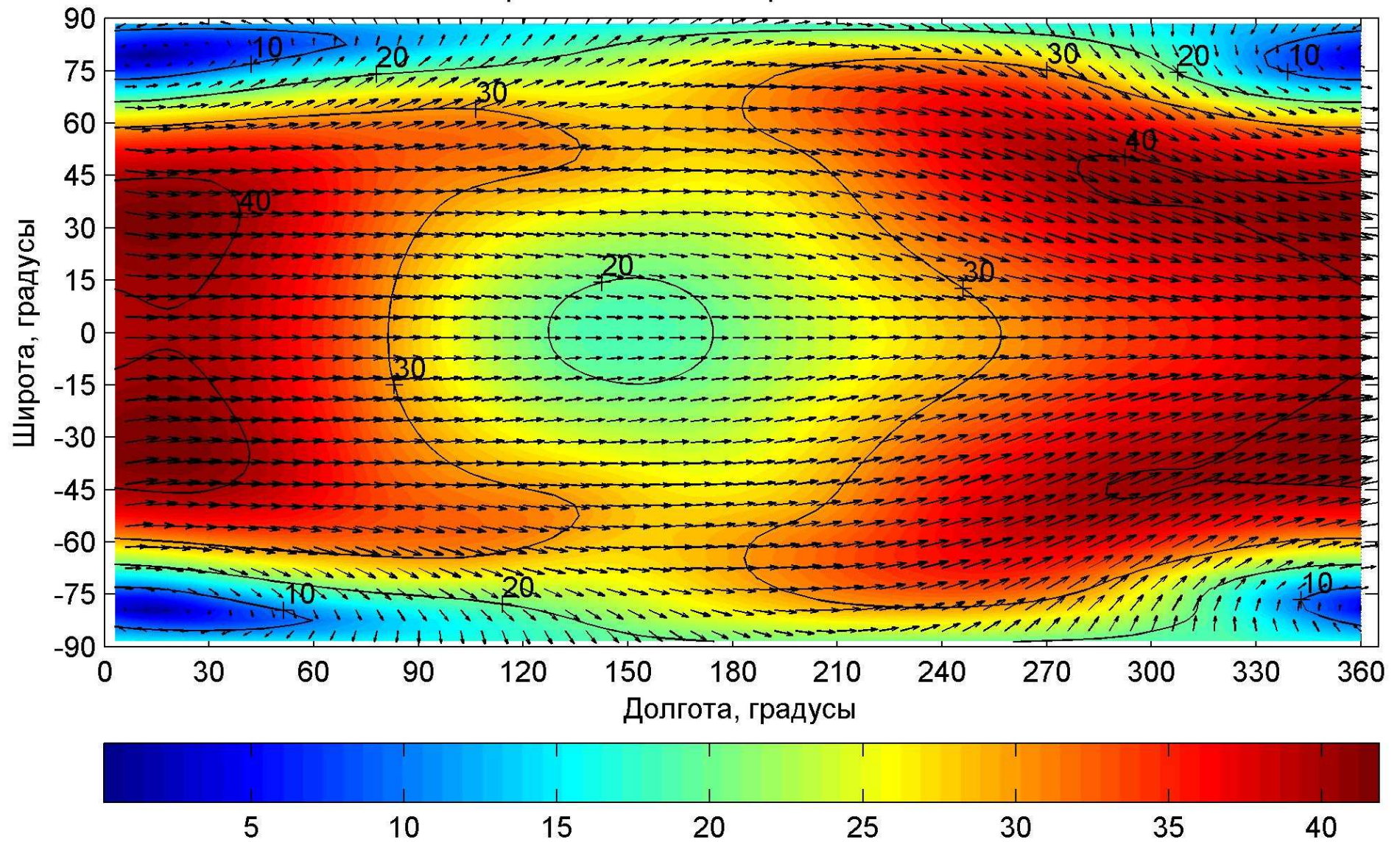
Физические блоки:

- Заданный профиль скоростей нагрева и выхолаживания
- Либо полноценный радиационный блок (трудности со спектроскопией CO₂ при высоких давлениях)
- Микрофизика облаков

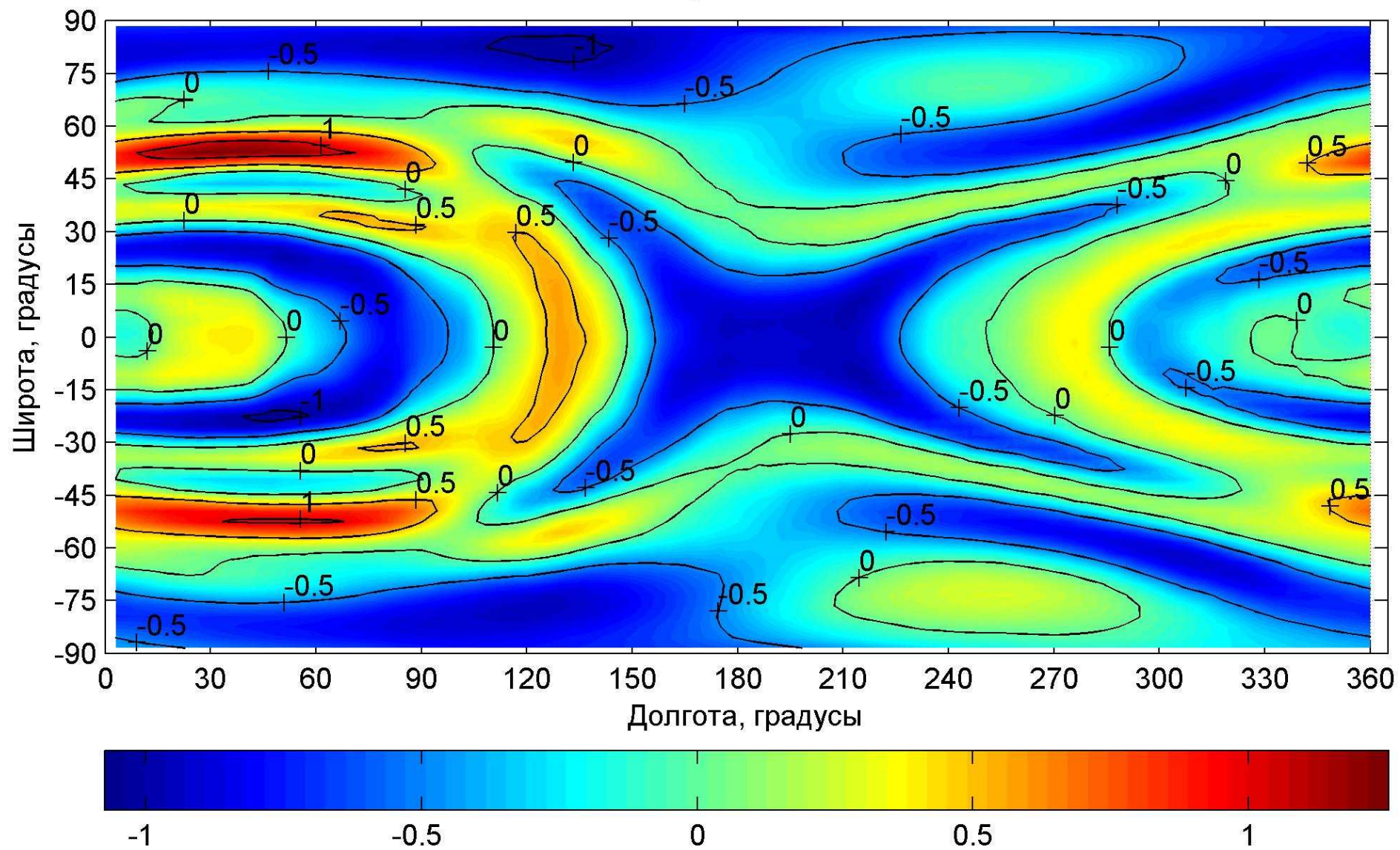
Зональная компонента ветра при долготе 0°



Горизонтальный ветер на высоте 90 км



V_r , H=90км



Основной перенос энергии осуществляется
в далеких крыльях спектральных линий

Эффекты, влияющие на формфактор
Интерференция состояний (квази-Лоренц, ν^{-4}), N

- Далекое крыло, $\exp(-(\nu - \nu_0)/\Delta\nu)$, N^2
- Индуцированное поглощение, N^2

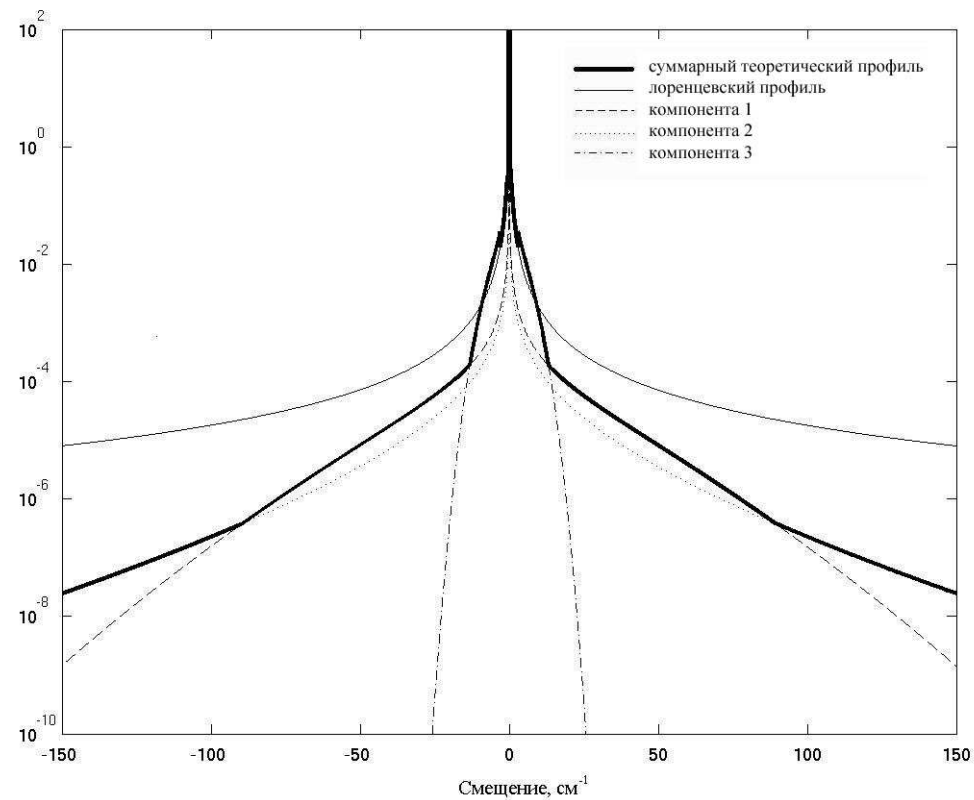
Модели:

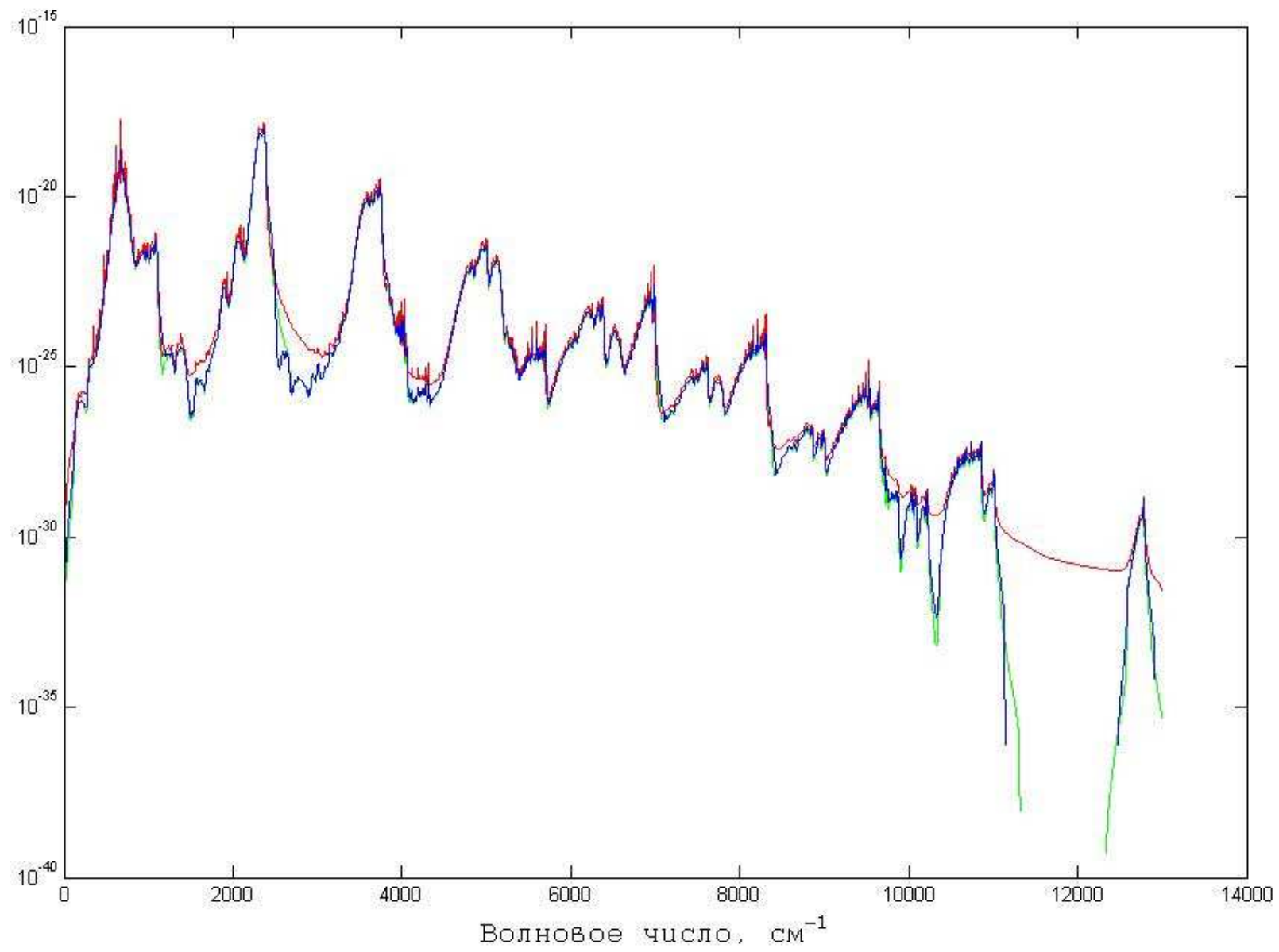
- Бёрч
- Творогов, Родимова, Несмелова
- Ма, Типпинг
- Розенкранц
- Тонков, Филиппов

Модель далекого крыла (С.Д.Творогов и др.)

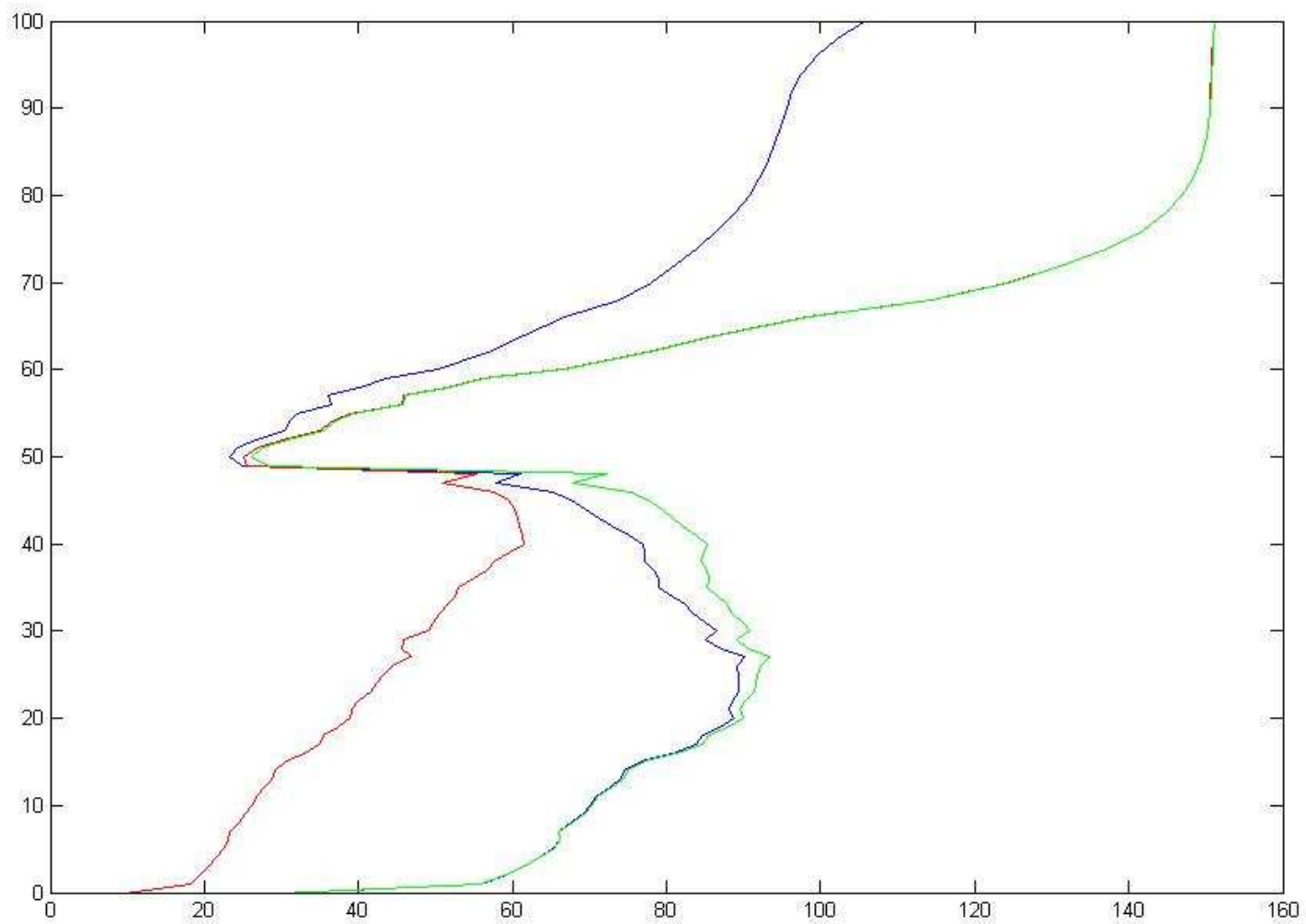
$$f = \frac{1}{Rs} \frac{Ds * \delta\omega}{(\omega - \omega_0)^{(1+\frac{3}{As})}} \int_0^{Rs} \frac{\exp(-\varepsilon((\frac{\sigma}{r})^{12} - (\frac{\sigma}{r})^6) \frac{hc}{kT})}{\sqrt{Rs^2 - r^2}} r dr,$$

$$Rs = \frac{Cs}{(\omega - \omega_0)^{\frac{1}{As}}}$$





Профили потоков ИК излучения в различных приближениях



Выводы

- Задачи моделирования планетных атмосфер имеют огромный потенциал для массового параллелизма
- Проблема – большой объем кода и сложные алгоритмы