

# **ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ЗАТМЕННО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ МГС АТМОСФЕРЫ**

*Савельева Н.В., Куницын В.Е.*

Физический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова

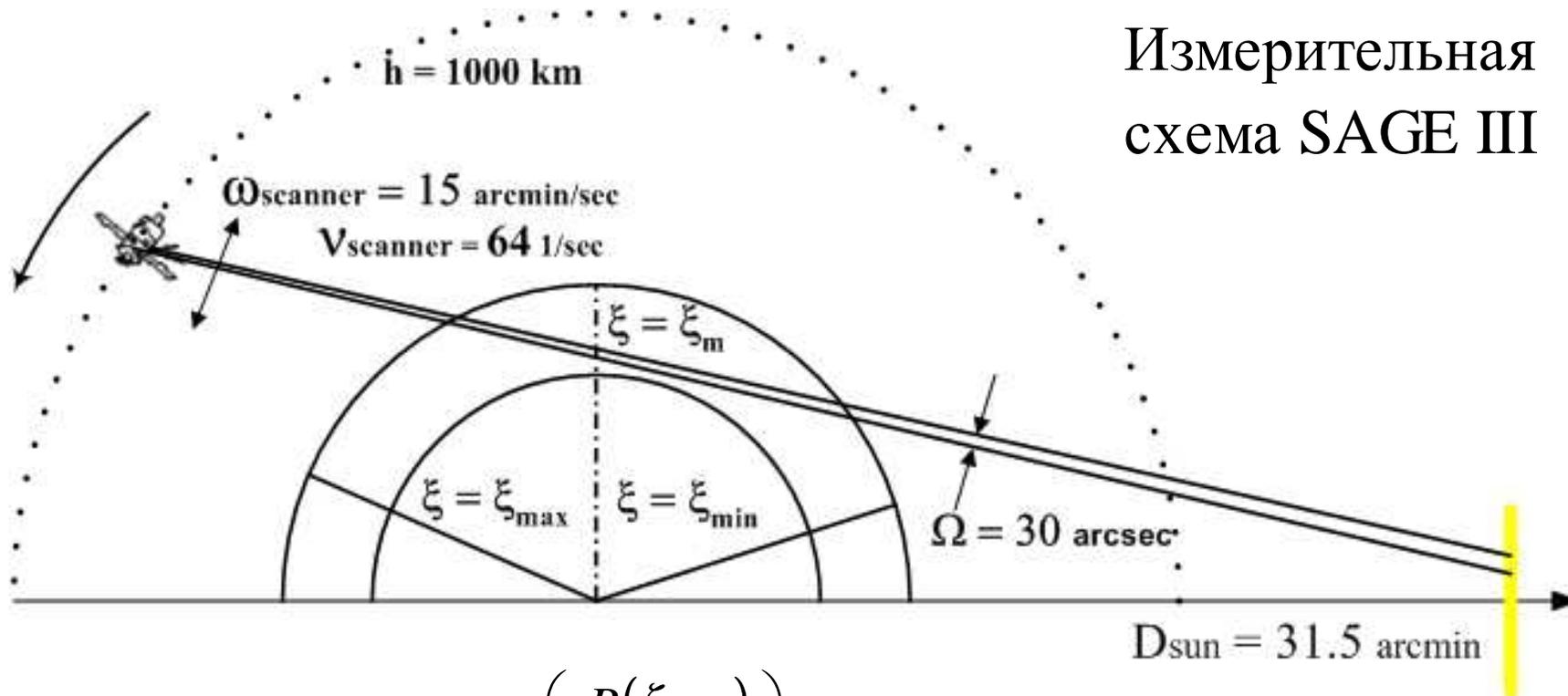
*кафедра физики атмосферы*

[kunitsyn@phys.msu.su](mailto:kunitsyn@phys.msu.su), [nasa2000@yandex.ru](mailto:nasa2000@yandex.ru)

# Существующие лимбовые сканирующие спектрометры в оптическом диапазоне

Прибор	Stratospheric Aerosol and Gas Experiment (SAGEII)	Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars (GOMOS)	Improved Limb Atmospheric Spectrometer-II (ILAS-II)
Носитель	METEOR-3	ENVISAT	ADEOS-2
Финансирование	NASA, USA	ESA, EU	JAXA, Japan
<b>Параметры орбиты носителя</b>			
Тип орбиты	ССО (полярная)	ССО, круговая	ССО, круговая
Наклон	99.64°	98°	98.6°
Перигей	1 012 км	800 км	803 км
Период	105 мин	101 мин	101 мин
Дата запуска	10 Декабря 2001	1 Марта 2002	14 Декабря 2002
<b>Параметры прибора</b>			
Источник	Солнце, Луна	Звезды от -1.6 до 4 зв. величины 180 ярких звезд, 1450 слабых звезд	Солнце
Количество каналов	87	4+2	4
Спектральный диапазон	от 290 до 1540 нм (разрешение 1-2 нм)	Вид: 248 - 371 нм Вид: 387 - 693 нм ИК1: 750 - 776 нм ИК2: 915 - 956 нм + 466-528 нм и 644-705 нм (фотометр)	6.21-11.76 мкм 3.0 - 5.7 мкм 12.78 - 12.85 мкм 0.753 - 0.784 мкм
МГС	O <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O, NO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , аэрозоль	O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , OClO, H <sub>2</sub> O температура	O <sub>3</sub> , HNO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O, CFC-112, CO <sub>2</sub> , ClONO <sub>2</sub> аэрозоль, температура, давление
Диапазон высот	10-300 км	тропопауза - 100 km	10 - 60 км
Вертикальное разрешение	0.5 км	1.7 км	1 км

## Измерительная схема SAGE III



$$T(\xi_s, r_t) = \int_{L(\xi_s, r_t)} \tau(l) dl = -\ln \left( \frac{R(\xi_s, r_t)}{R_0(\xi_s^0, r_t)} \right)$$

$R$  - освещенность, измеряемая сквозь лимб атмосферы в лучевом конусе  $\Delta\Omega$ ;

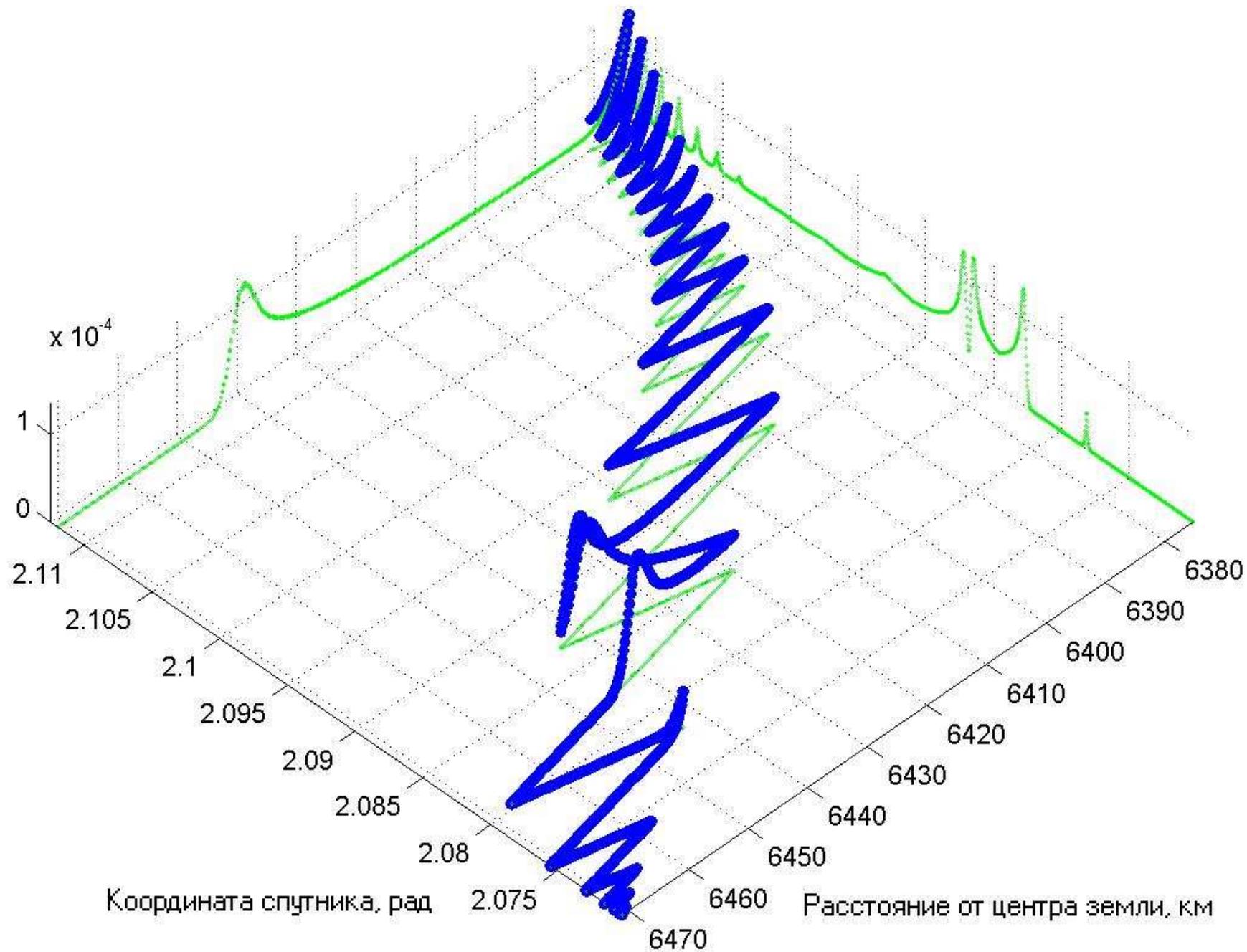
$r_t$  - прицельная высота,  $\xi_s$  - угловая координата спутника;

$T(\xi_s, r_t)$  - величина пропускания;

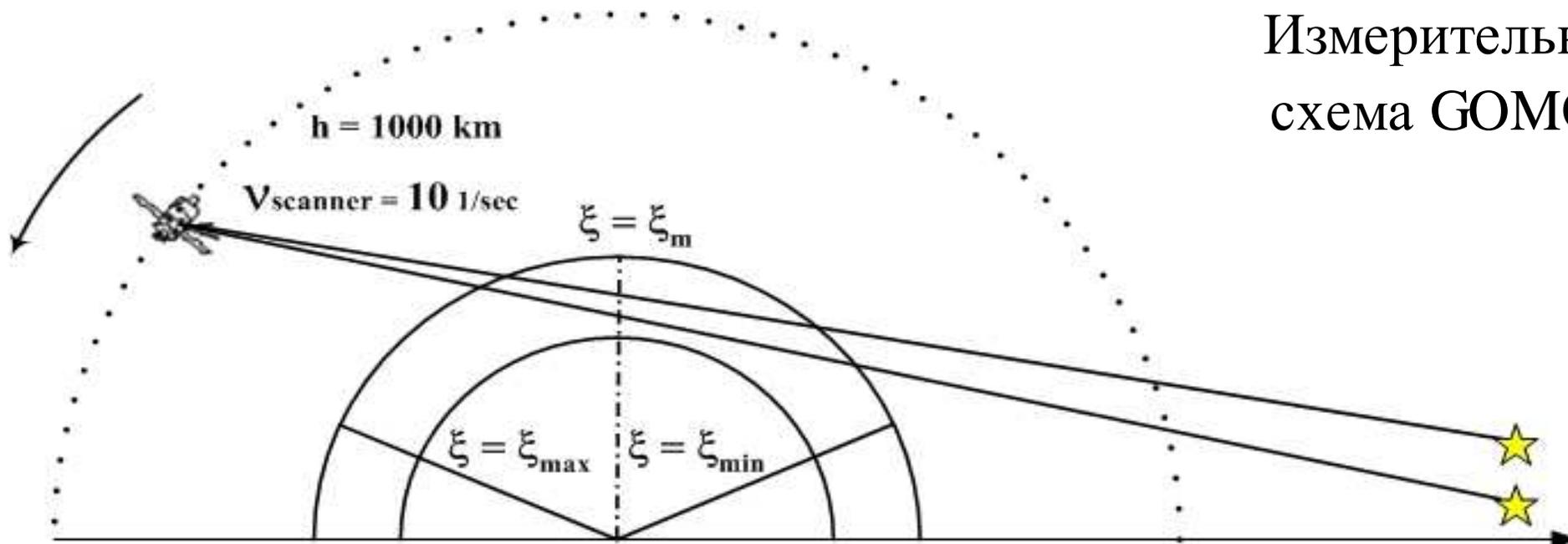
$\tau(l)$  - оптическая толщина единичного объема с центром в точке  $l$ ;

$L(\xi_s, r_t)$  - траектория центрального луча лучевого конуса  $\Delta\Omega$  в атмосфере;

# Пропускание лимба атмосферы



## Измерительная схема GOMOS



Суммарная оптическая толщина лимба атмосферы выражается с помощью соотношения:

$$T(\lambda, \xi_s, r_t) = \int_{L(\xi_s, r_t)} \tau(\lambda, l) dl = -\ln \left( \frac{R(\lambda, \xi_s, r_t)}{R_0(\lambda)} \right)$$

$R(\lambda, \xi_s, r_t)$  - измеренный поток излучения от звезды, прошедший сквозь атмосферу;

$R_0(\lambda)$  - поток от той же звезды, измеренный вне атмосферы;

$\xi_s$  - координата спутника;  $r_t$  - прицельный параметр,  $\lambda$  - длина волны;

$T(\xi_s, r_t)$  - величина пропускания;

$\tau(\lambda, l)$  - оптическая толщина единичного объема с центром в точке  $l$ ;

$L(\xi_s, r_t)$  - траектория ручки параллельных лучей от звезды в атмосфере.

# Производные по угловой координате

Для заданного значения прицельного параметра существует три различных величины  $T$  для разных  $\xi$ . Это говорит о наличии угловой (горизонтальной) неоднородности в распределении экстинкции.

$$T'_n = \left. \frac{\partial}{\partial \xi} T(\xi, r) \right|_{\xi=\xi_n, r=r_n}$$

$$T''_n = \left. \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} T(\xi, r) \right|_{\xi=\xi_n, r=r_n}$$

Искомое распределение экстинкции в области

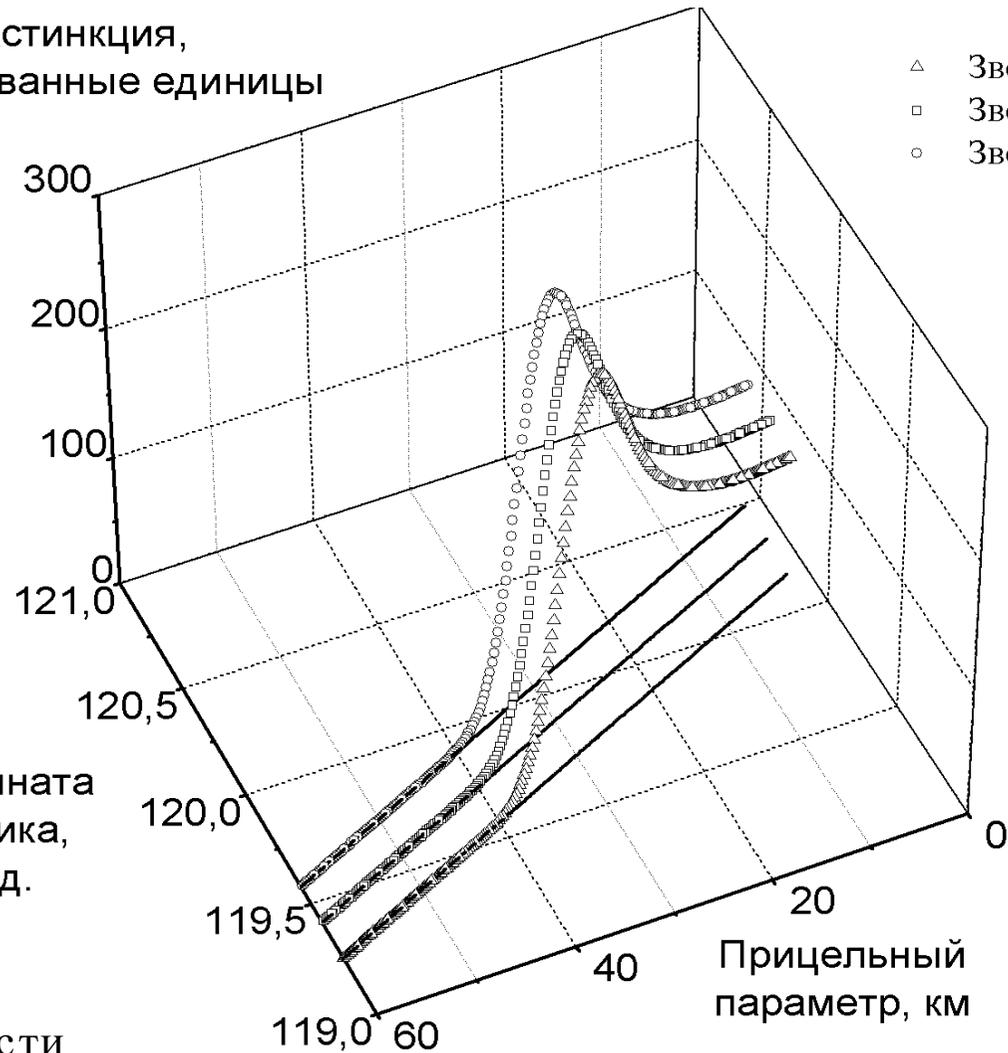
зондирования по угловой координате можно аппроксимировать с помощью ряда Тейлора с центром в точке  $\xi_0$  с точностью до  $S-1$  производной ( $S$  – количество звезд):

$$\tau(\xi, r_i) = \sum_{k=0}^{S-1} \frac{1}{k!} \left. \frac{d^k \tau(r_i, \xi_0)}{d\xi^k} \right|_{\xi=\xi_0} (\xi - \xi_0)^k = \tau_i + \tau'_i (\xi - \xi_0) + \frac{1}{2} \tau''_i (\xi - \xi_0)^2$$

Экстинкция,  
нормированные единицы

- △ Звезда 1
- Звезда 2
- Звезда 3

Координата  
спутника,  
град.



Прицельный  
параметр, км

# Решение обратной задачи и оценка ошибок

Аппроксимация экстинкции и ее производных для случая трех звезд с помощью набора сеточных функций  $\{\tau_i, \tau_i', \tau_i''\}$  позволяет перейти к системе линейных уравнений:

$$A_i^n \tau_i + B_i^n \tau_i' + C_i^n \tau_i'' = T_n$$

$$D_i^n \tau_i + E_i^n \tau_i' + F_i^n \tau_i'' = T_n'$$

$$G_i^n \tau_i + H_i^n \tau_i' + I_i^n \tau_i'' = T_n''$$

где  $n$  – номер измерения, при проведении которого спутник находится в точке с угловой координатой  $\xi_n$  и зондирует лимб с прицельным параметром  $r_n$ . Коэффициенты матриц вычисляются при помощи численного интегрирования.

Для оценки суммарных ошибок реконструкции функций  $\{\tau_i(\xi_0), \tau_i'(\xi_0), \tau_i''(\xi_0)\}$  в точке  $\xi_0$  использовался критерий  $\Delta_S$ , а для оценки ошибок восстановления двумерного профиля экстинкции  $\tau(\xi, r)$  в произвольной точке  $P$  – критерий  $\Delta_P$ .

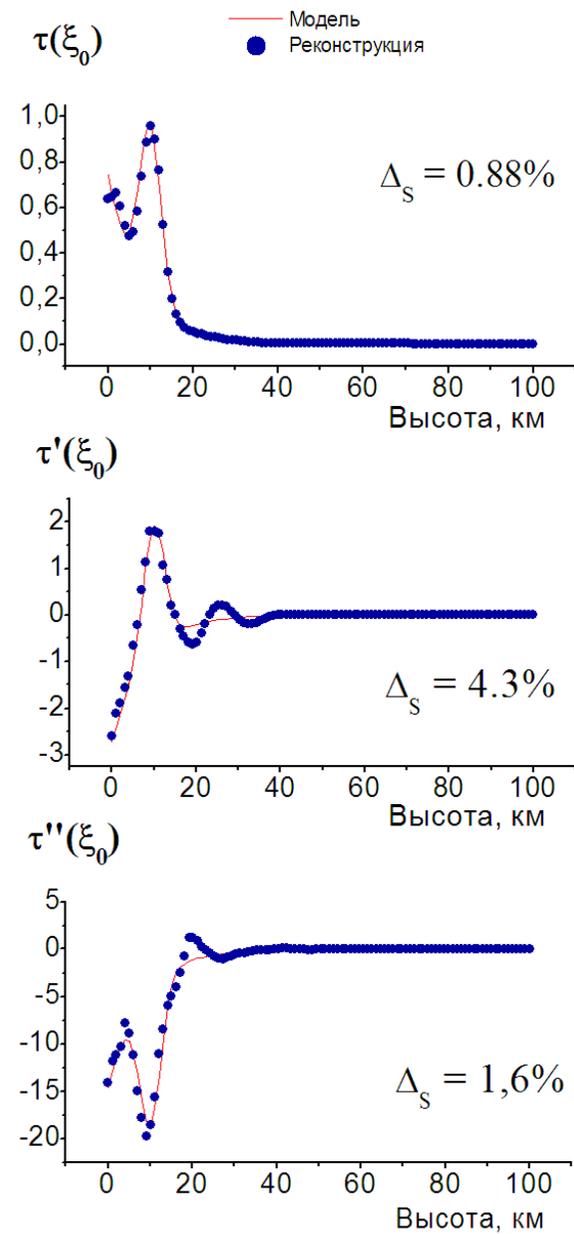
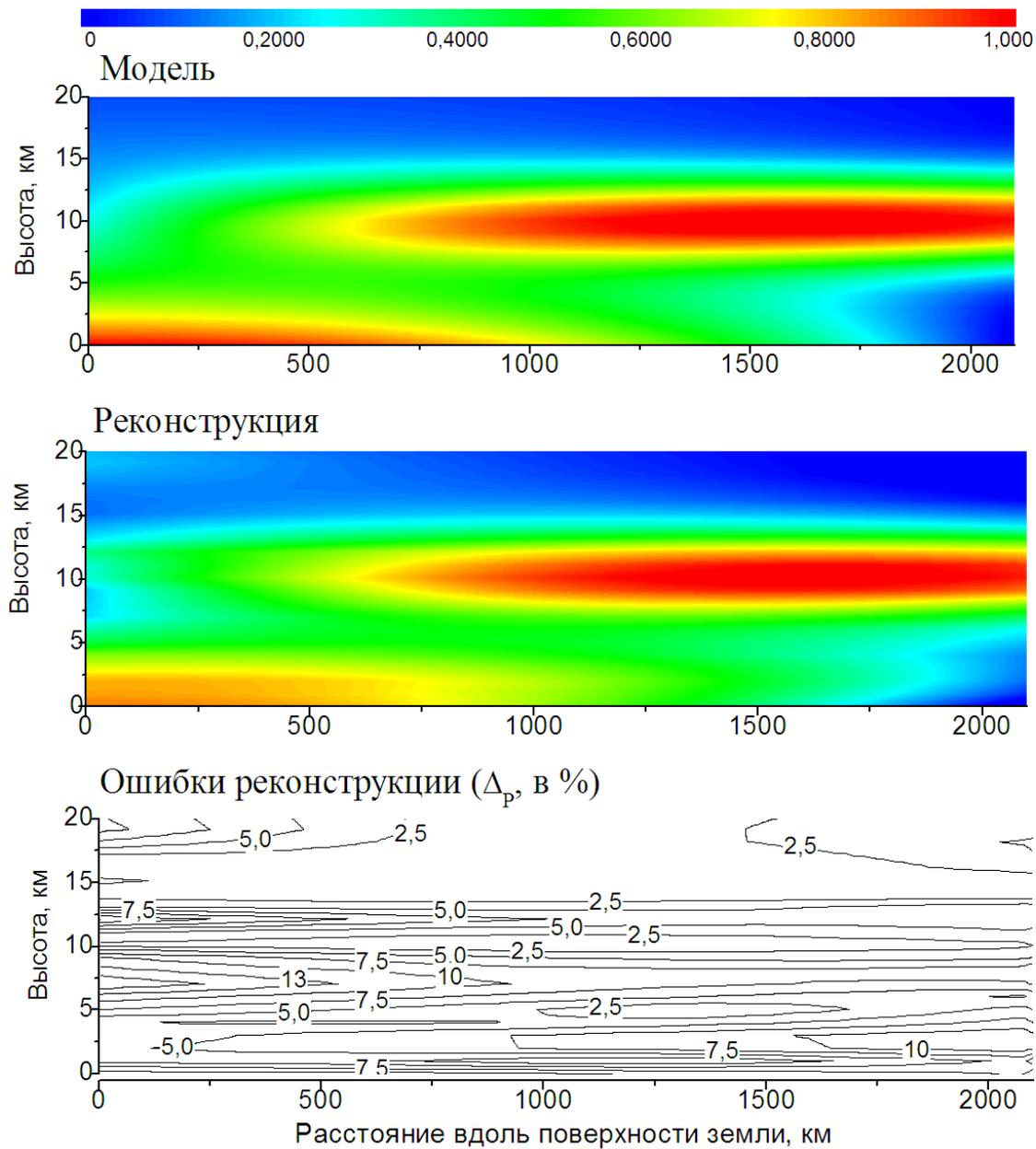
$$\Delta_S = \sqrt{\frac{\sum_i (\tau_i - \tilde{\tau}_i)^2}{\sum_i \tilde{\tau}_i^2}} * 100\%$$

$$\Delta_P = \frac{|\tau_P - \tilde{\tau}_P|}{\max(\tilde{\tau}_P)} * 100\%$$

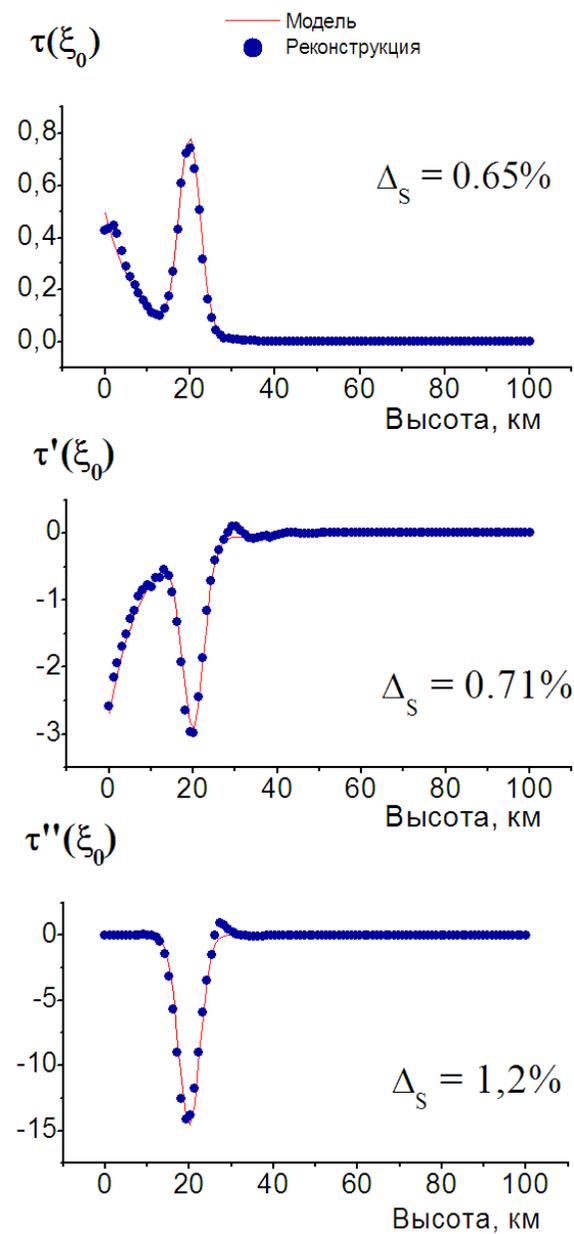
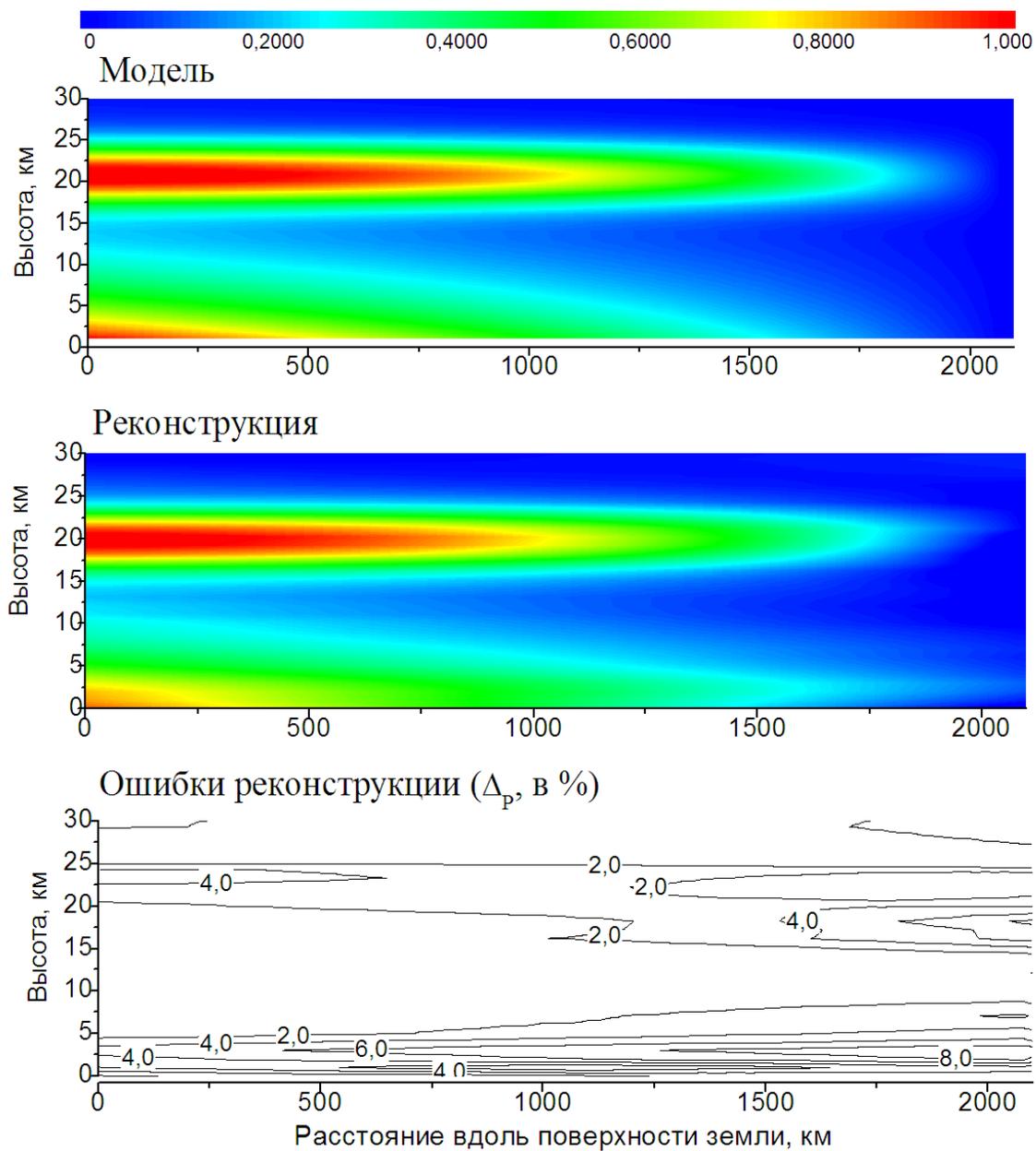
$\tau_P$  – полученное решение в точке  $P$ ;

$\tilde{\tau}_P$  – истинное решение в точке  $P$ .

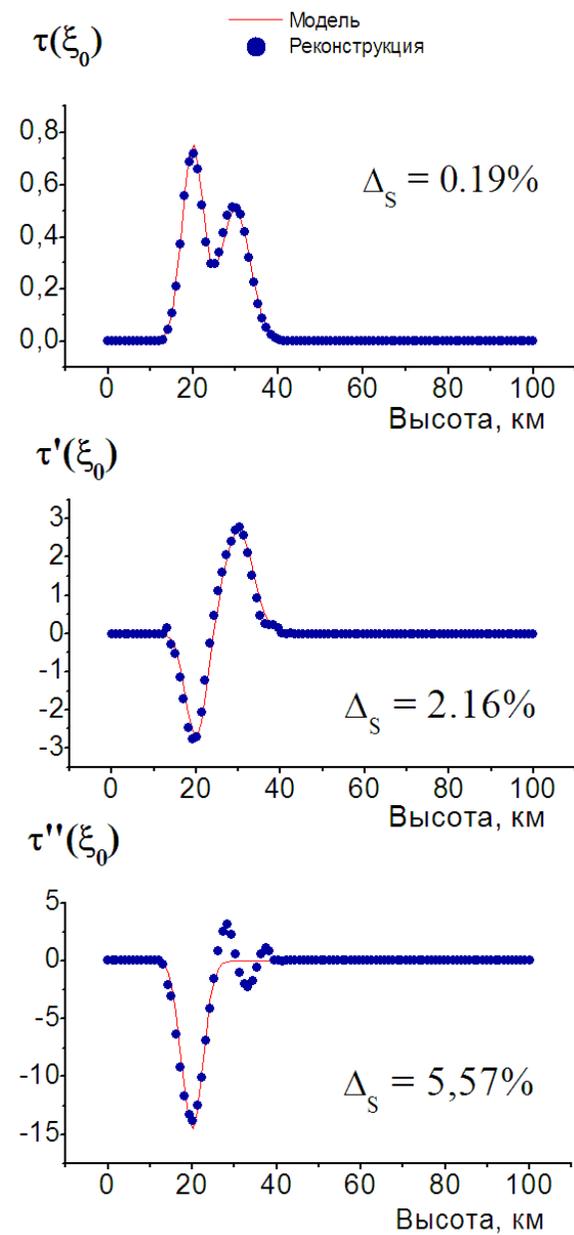
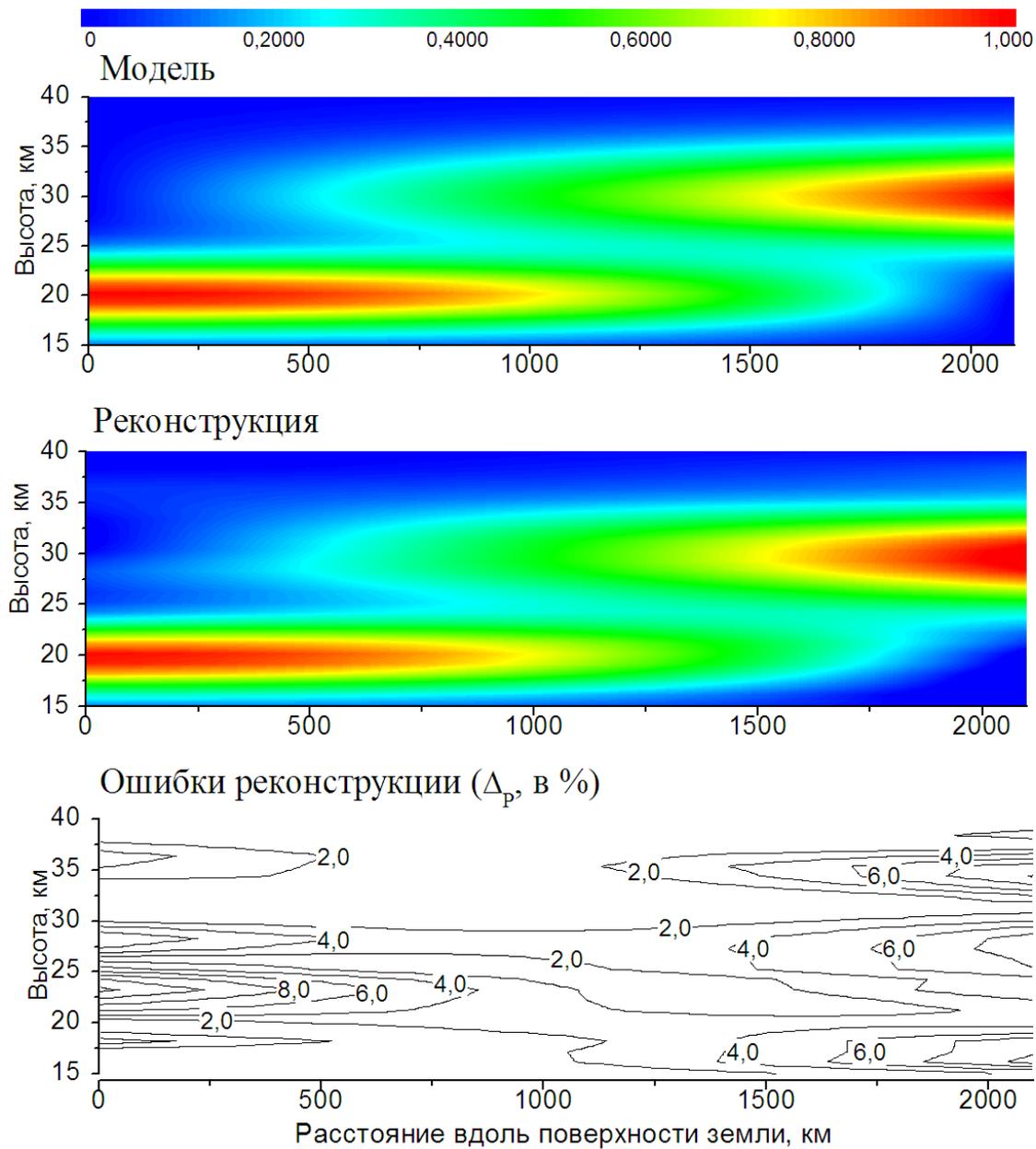
Реконструкция неоднородности  
в слое от 0 до 15 км,  
модель с 3 звездами



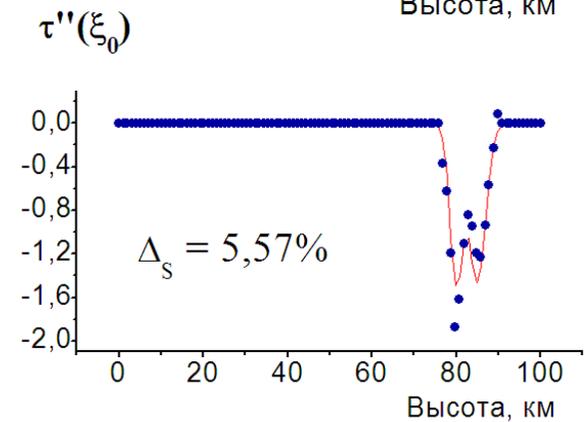
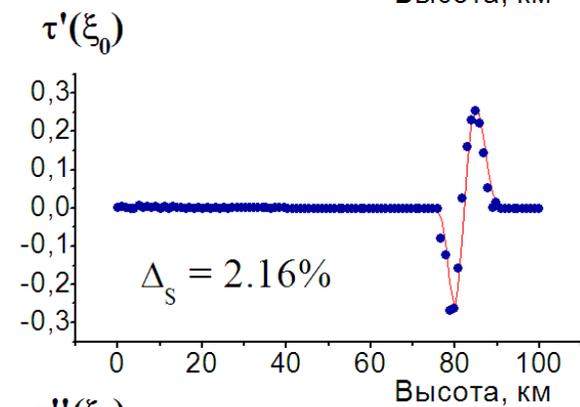
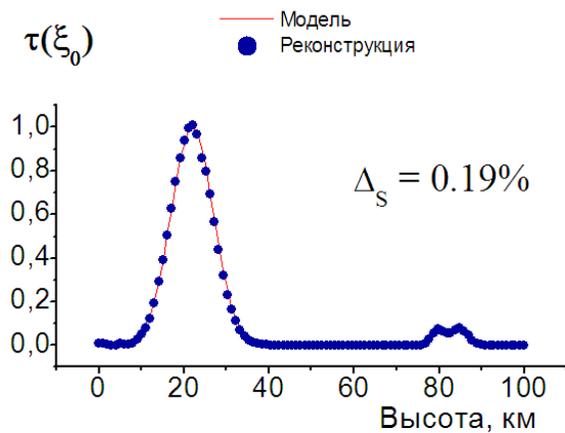
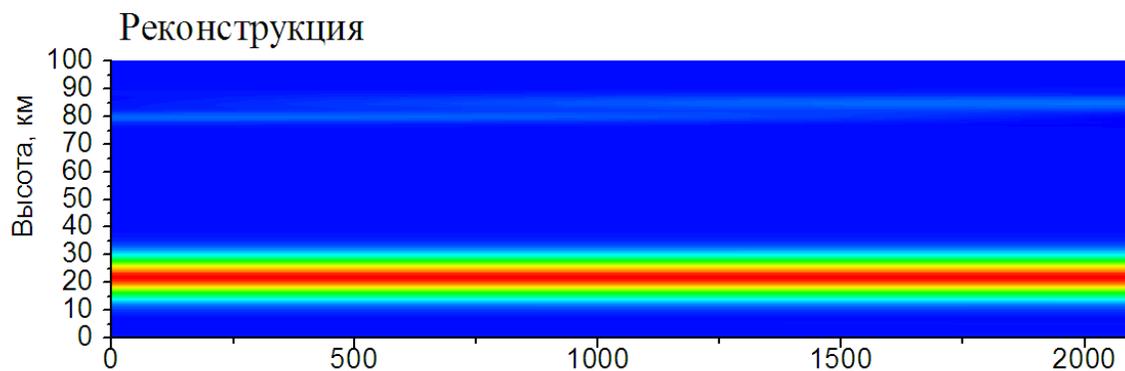
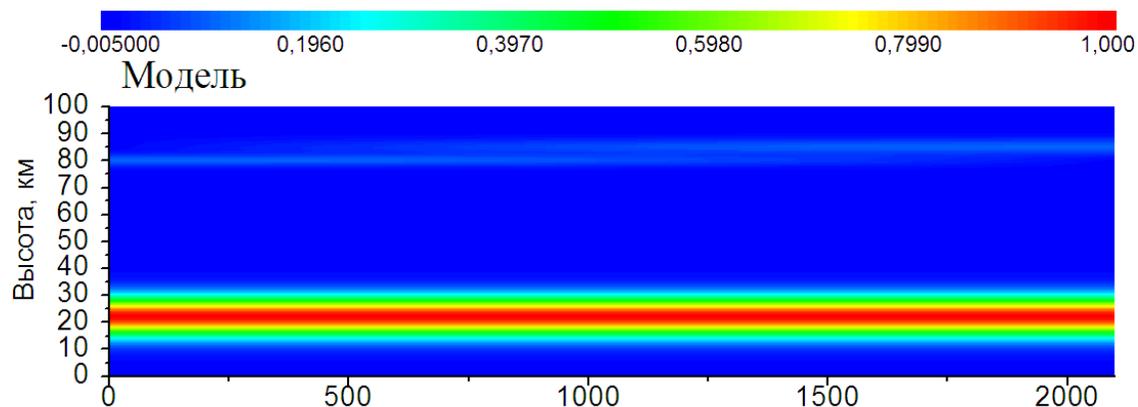
# Реконструкция неоднородности в слое от 0 до 30 км, солнечный диск



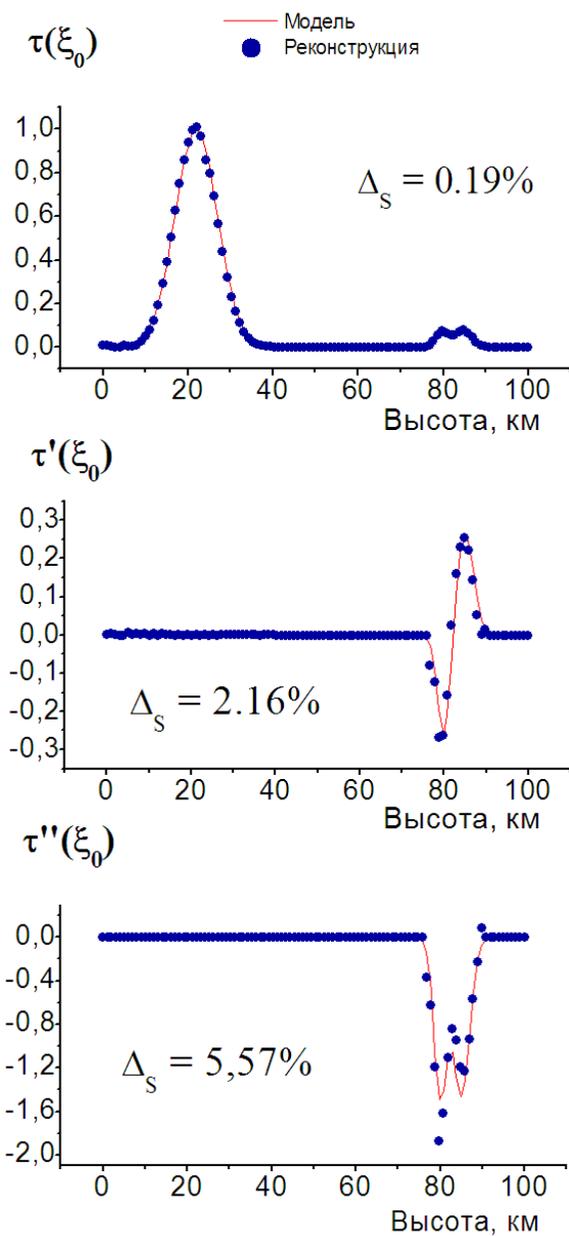
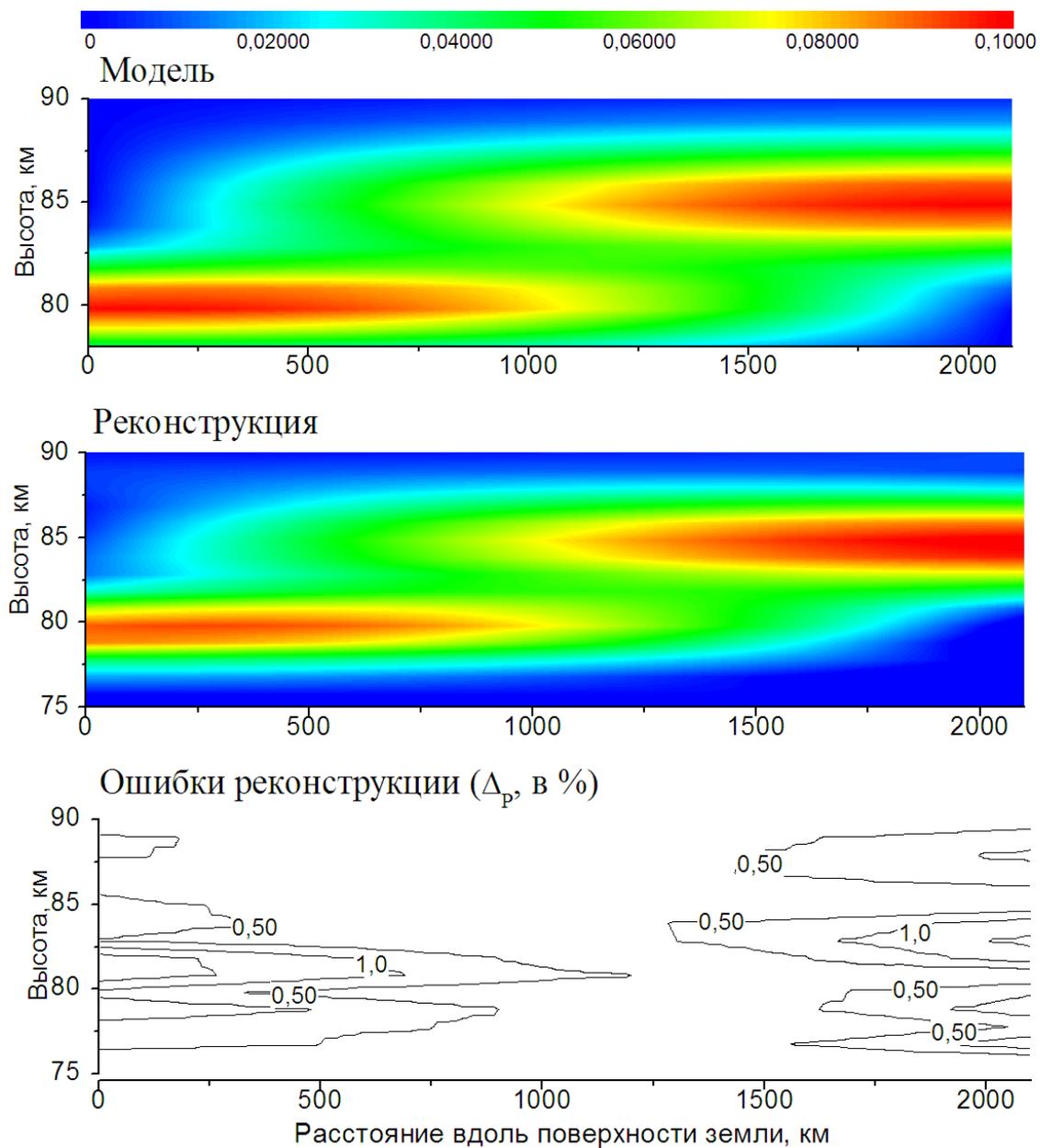
# Реконструкция неоднородности экстинкции в слое от 15 до 40 км, 3 звезды



# Реконструкция неоднородности в слое от 70 до 90 км, солнечный диск



# Реконструкция неоднородности в слое от 70 до 90 км, солнечный диск



## **ВЫВОДЫ**

1. По данным затменных наблюдений можно восстанавливать двумерные сечения распределения коэффициентов экстинкции атмосферы.
2. Вертикальное разрешение метода составляет 1-2 км, горизонтальное – 300-400 км.
3. Метод в состоянии обнаружить и восстановить форму таких неоднородностей, как: провалы, сдвиги или наложения вертикальных слоев, а также неоднородности в высоких слоях на фоне мощного стратосферного слоя (например, неоднородность в распределении мезосферного озона).
4. Метод дополняет и расширяет возможности наземных методов зондирования.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**