

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

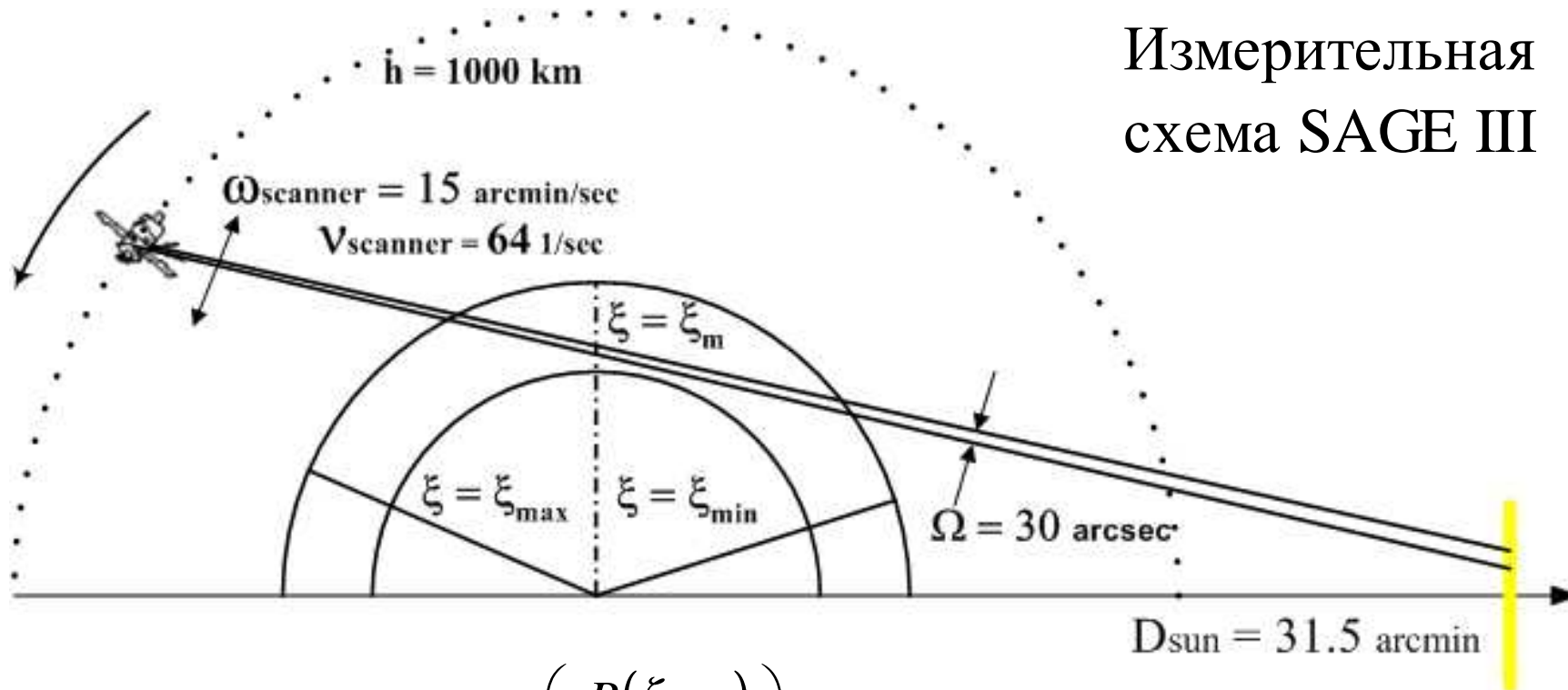
кафедра физики атмосферы

kunitsyn@phys.msu.su, 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
Параметры орбиты носителя			
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
Параметры прибора			
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 ₃ , H ₂ O, NO ₂ , CO ₂ , O ₂ , аэрозоль	O ₃ , NO ₂ , NO ₃ , OClO, H ₂ O температура	O ₃ , HNO ₃ , NO ₂ , N ₂ O, CH ₄ , H ₂ O, CFC-112, CO ₂ , ClONO ₂ 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 $\Delta\Omega$;

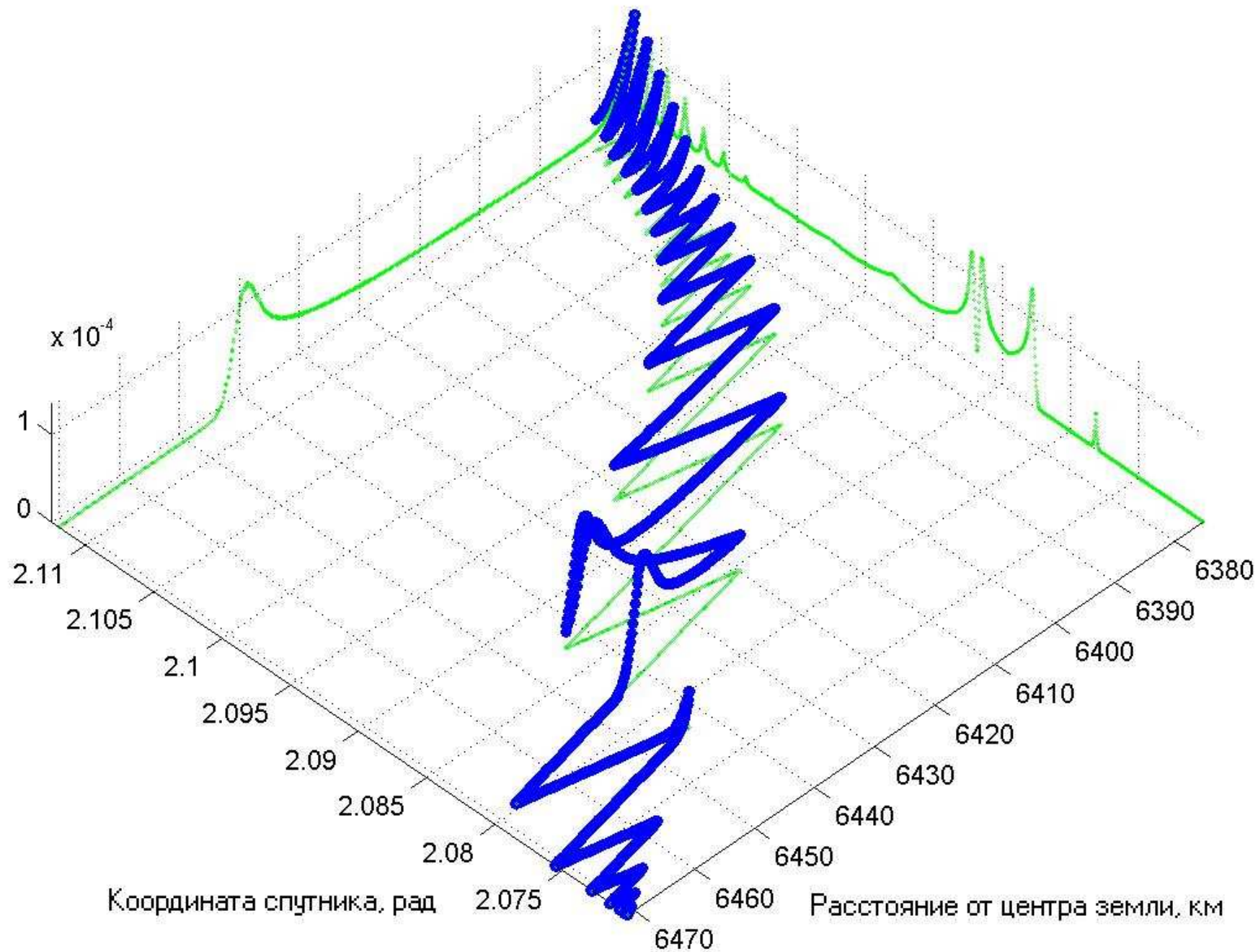
r_t - прицельная высота, ξ_s - угловая координата спутника;

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

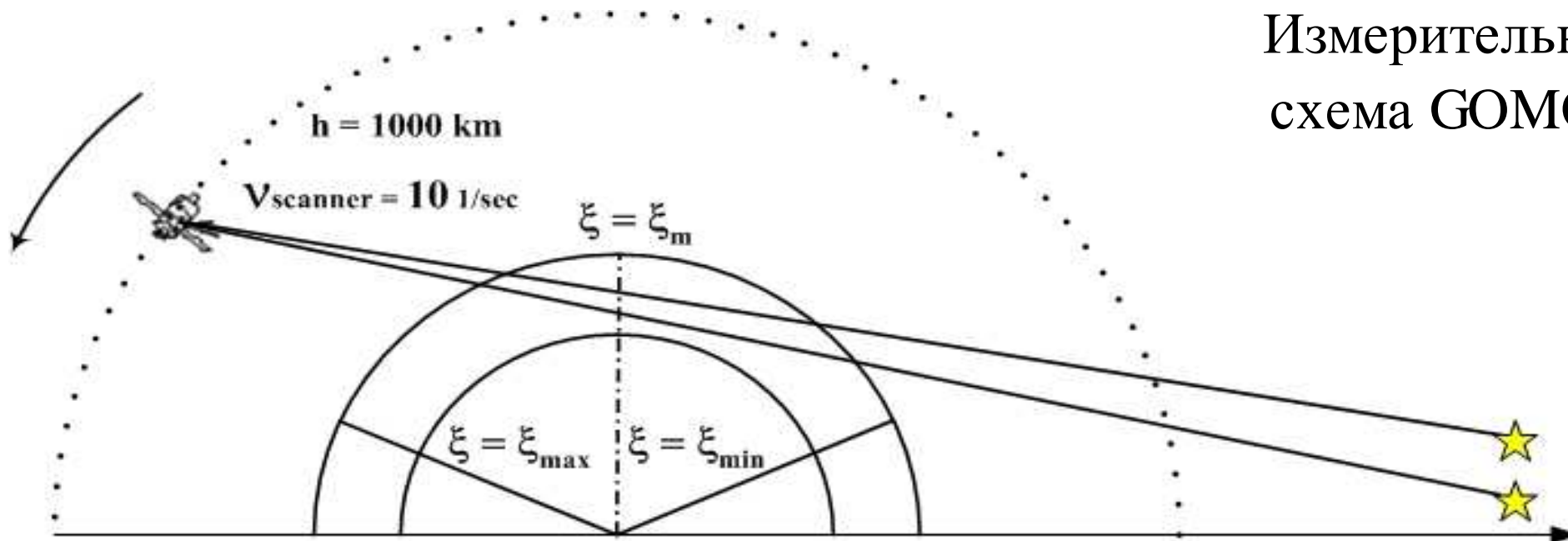
$\tau(l)$ - оптическая толщина единичного объема с центром в точке l ;

$L(\xi_s, r_t)$ - 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;

ξ_s - координата спутника; r_t - прицельный параметр, λ - 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 ξ . 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

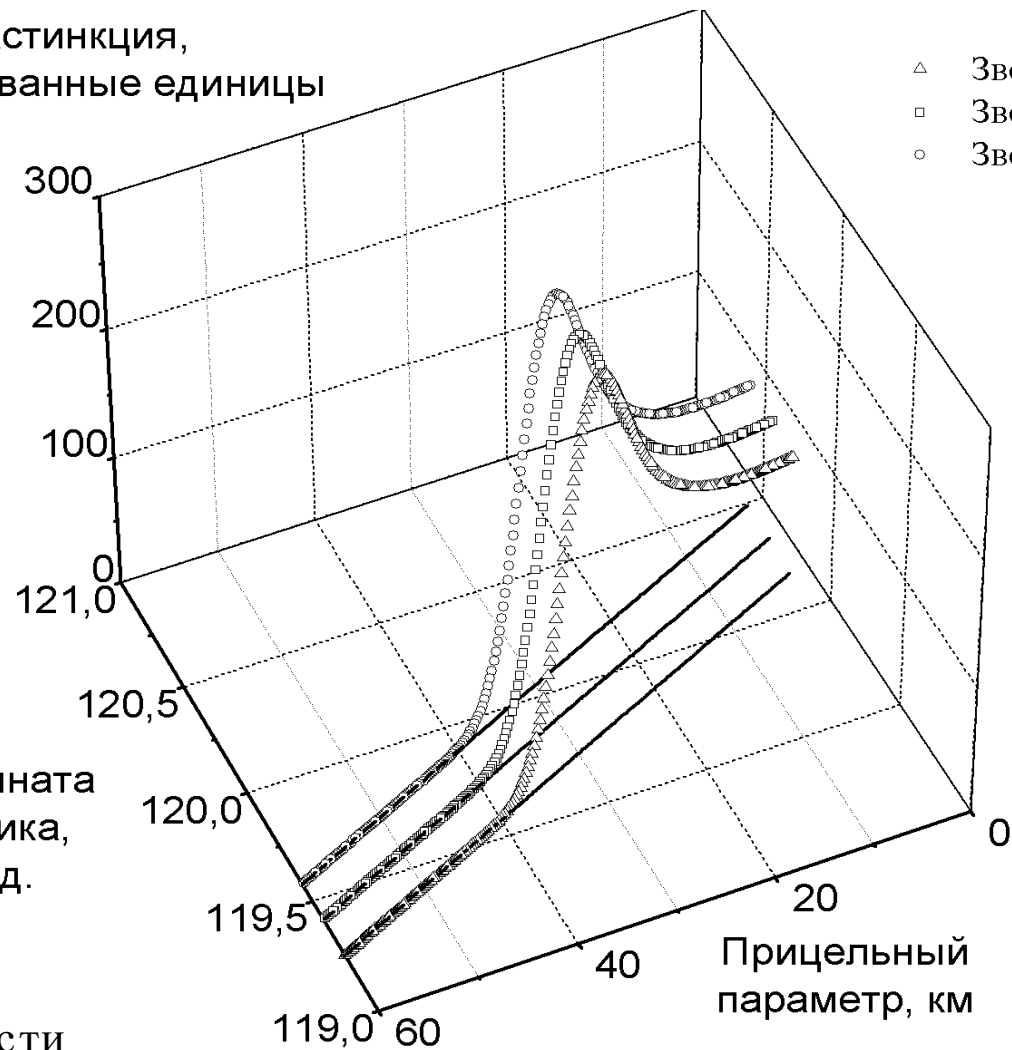
зондирования по угловой координате можно аппроксимировать с помощью ряда Тейлора с центром в точке ξ_0 с точностью до $S-1$ производной (S – количество звезд):

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

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 ξ_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 ξ_0 использовался критерий Δ_S , а для оценки ошибок восстановления двумерного профиля экстинкции $\tau(\xi, r)$ в произвольной точке P – критерий Δ_P .

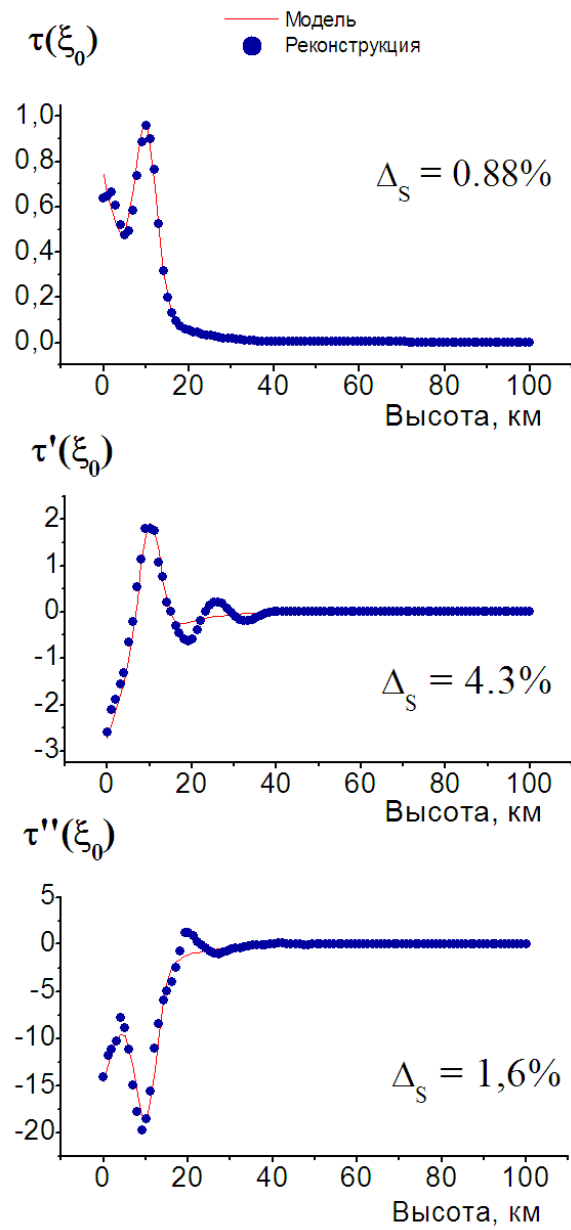
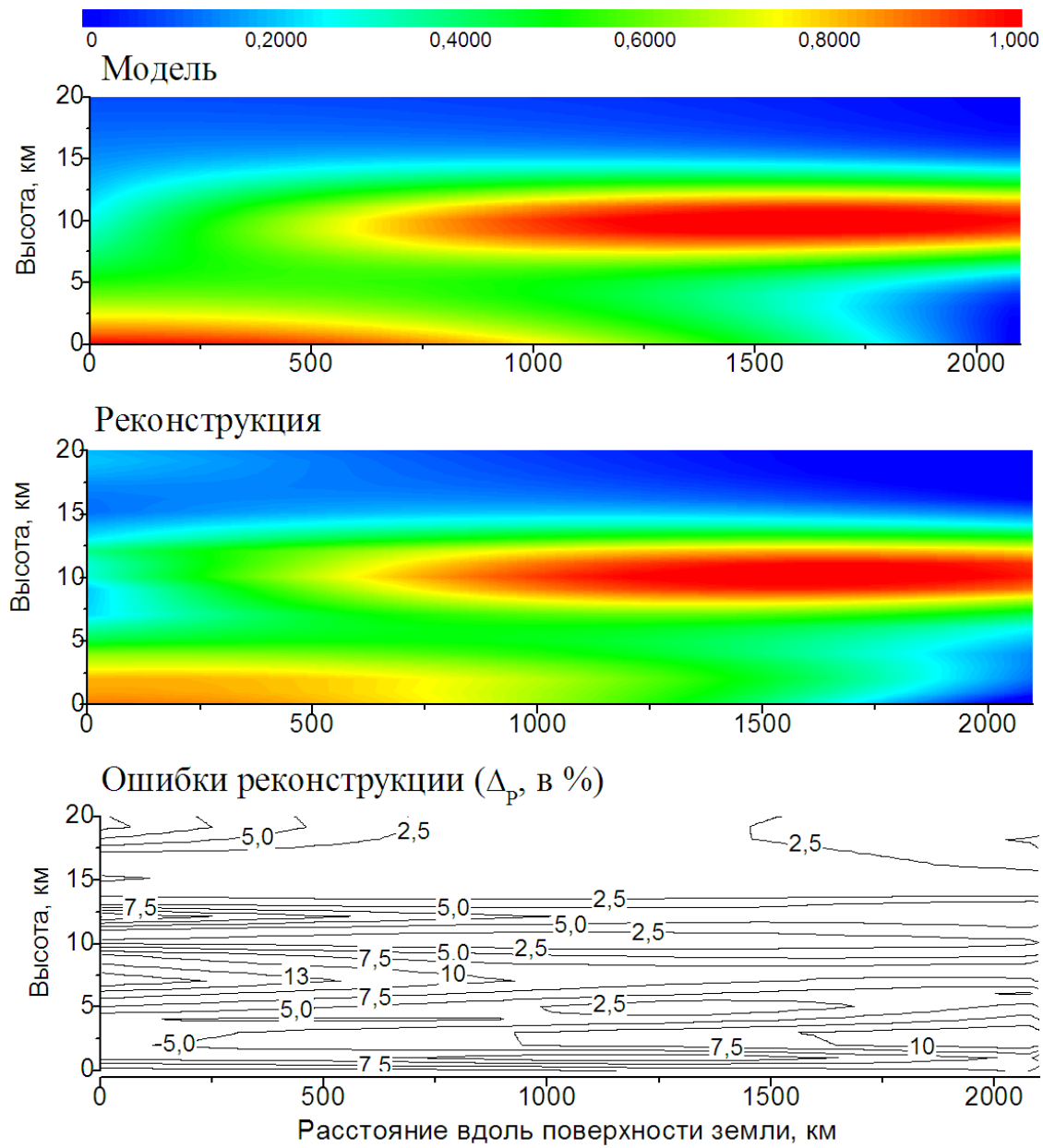
$$\Delta_S = \sqrt{\frac{\sum_i (\tau_i - \tilde{\tau}_i)^2}{\sum_i \tilde{\tau}_i^2}} * 100\%$$

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

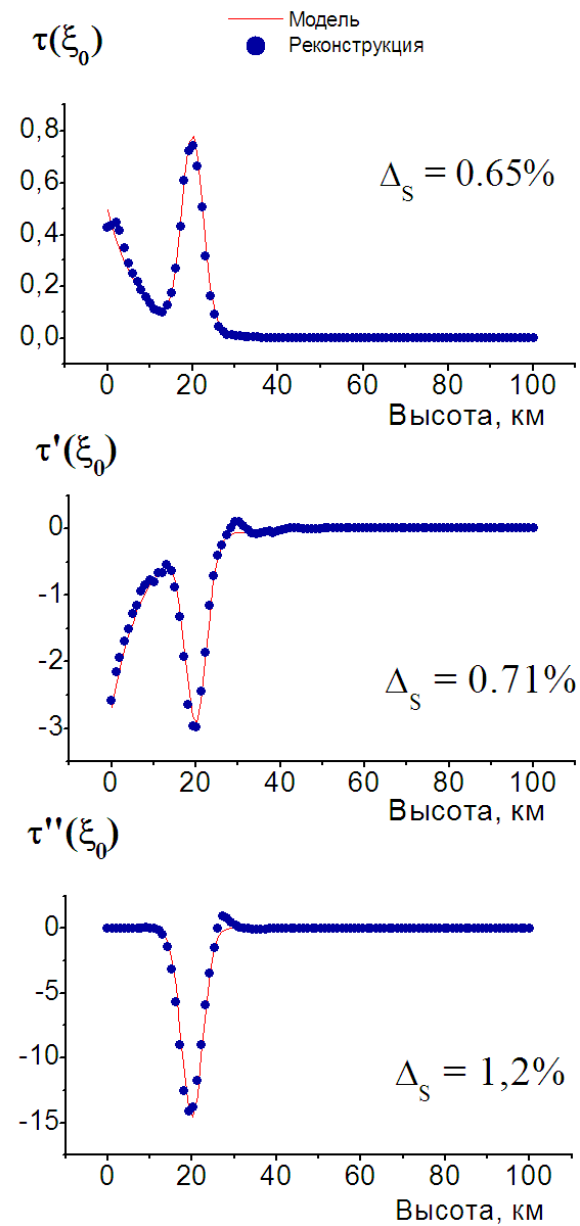
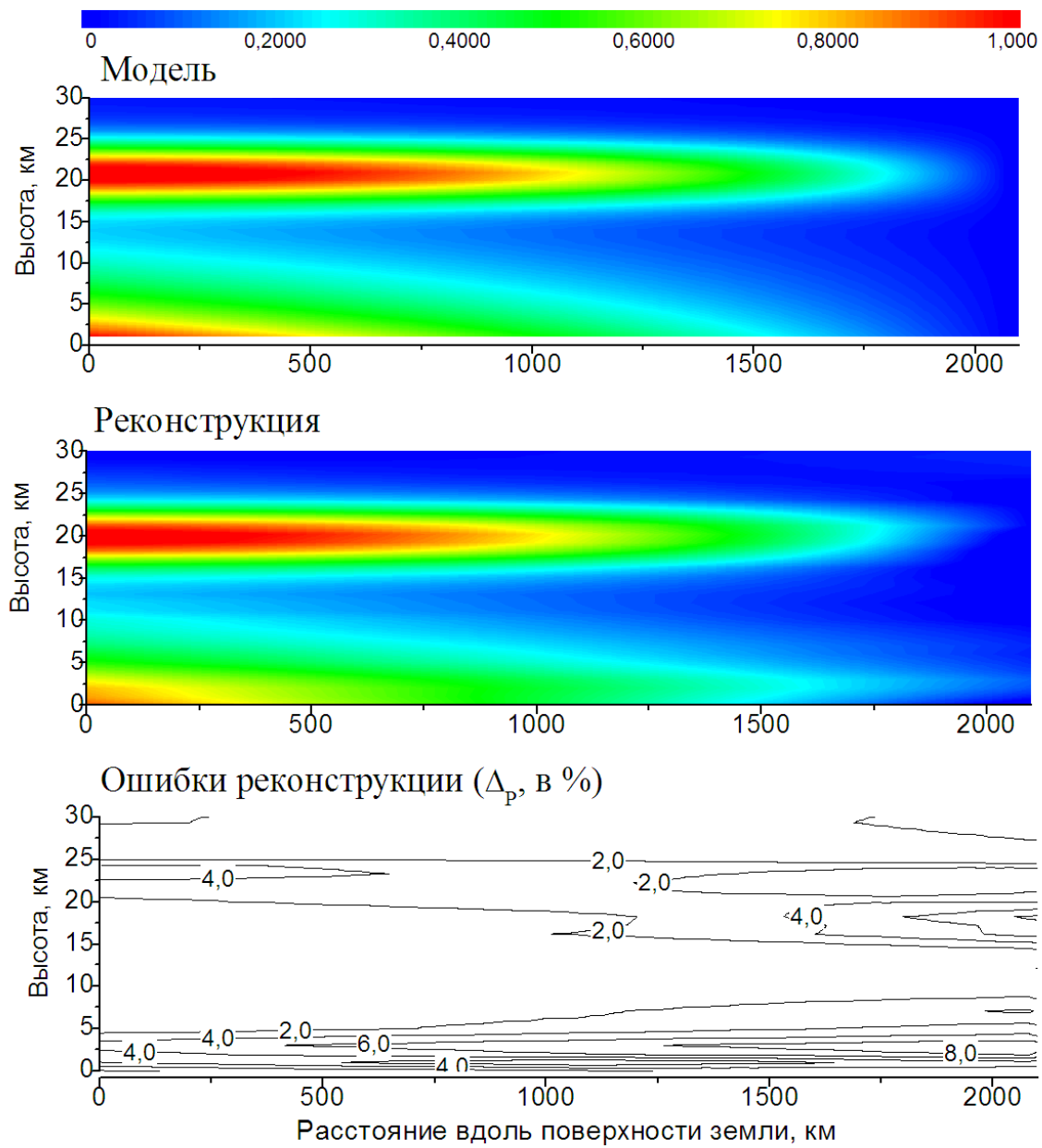
τ_P – полученное решение в точке P ;

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

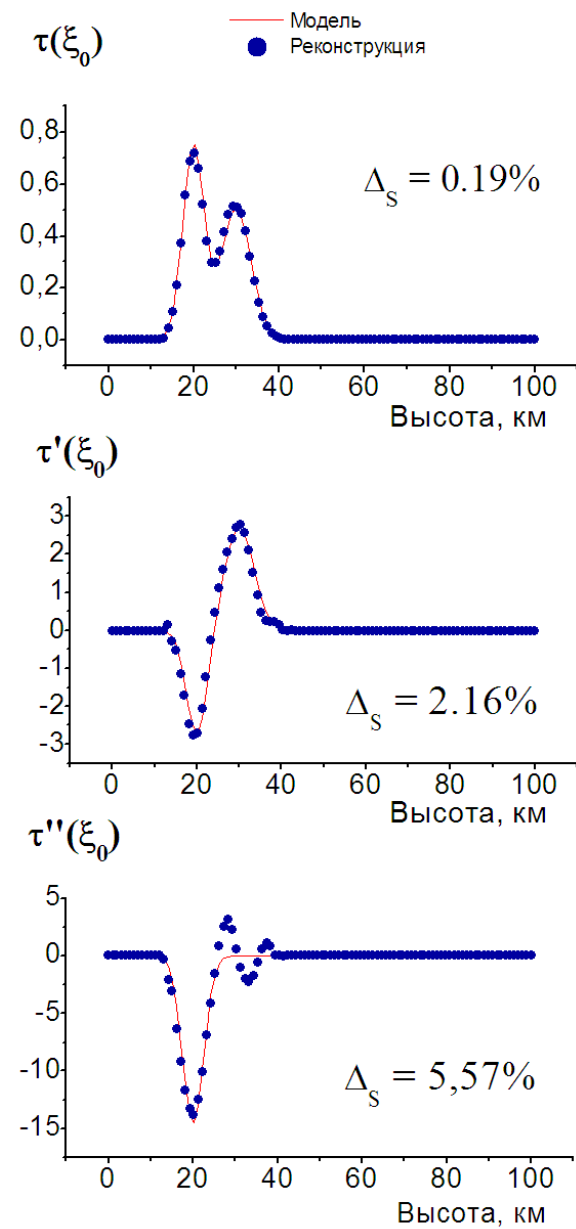
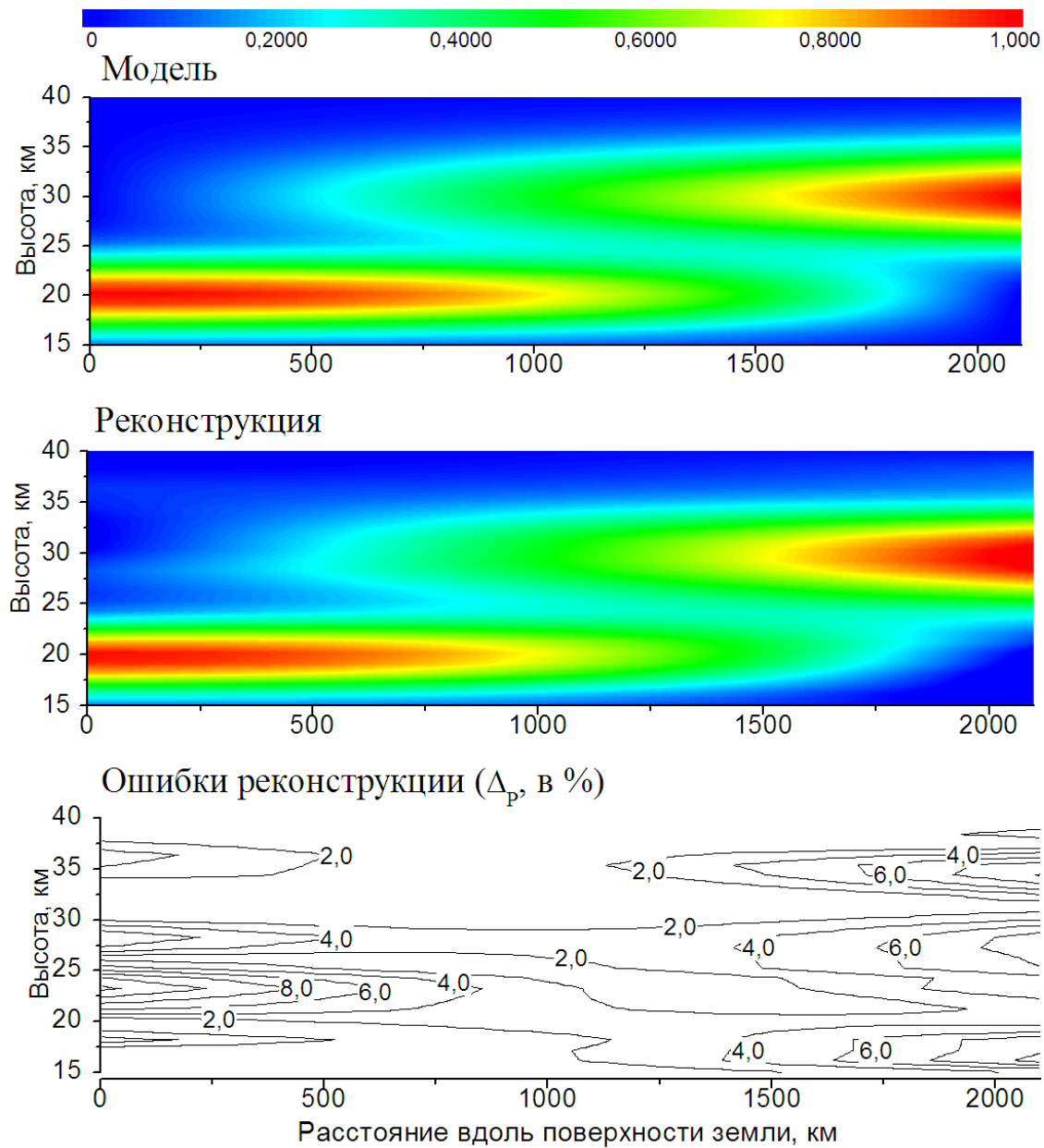
Реконструкция неоднородности
в слое от 0 до 15 км,
модель с 3 звездами



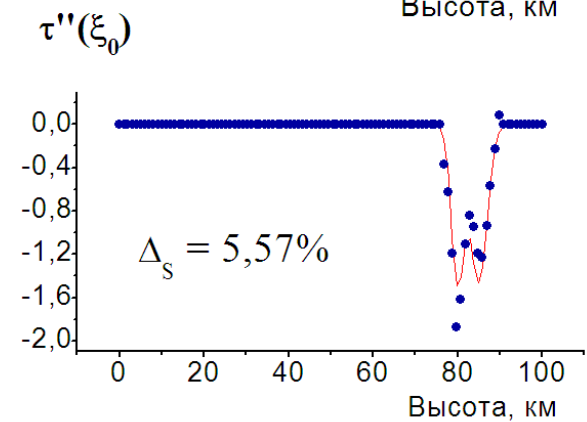
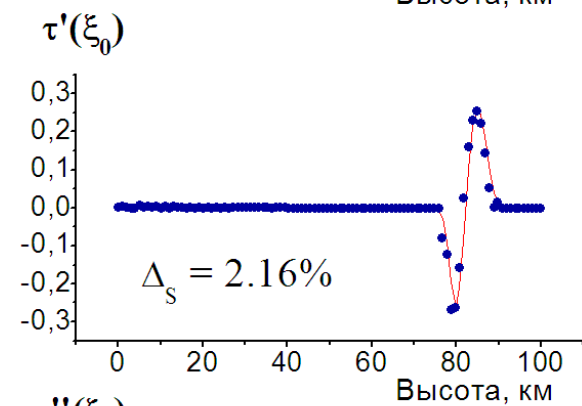
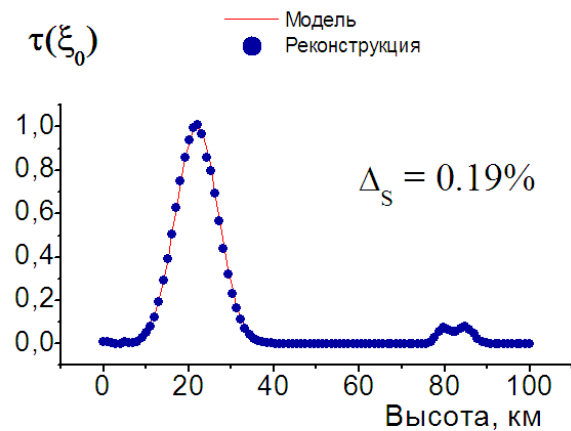
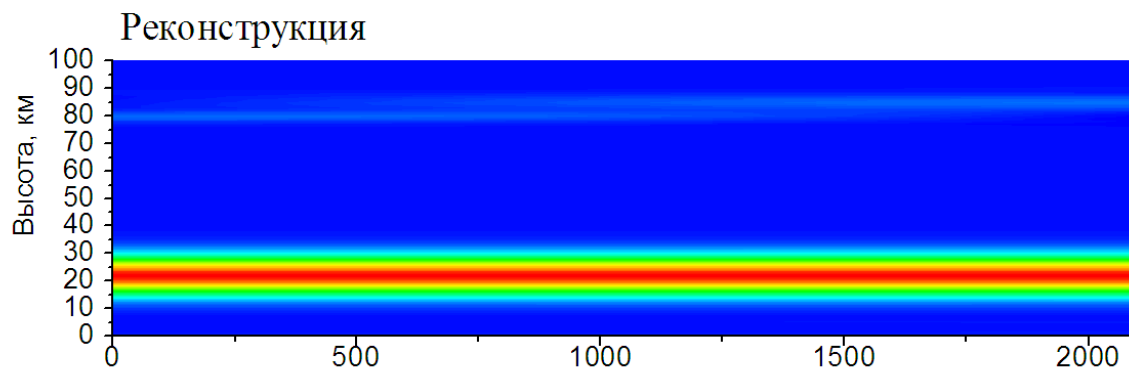
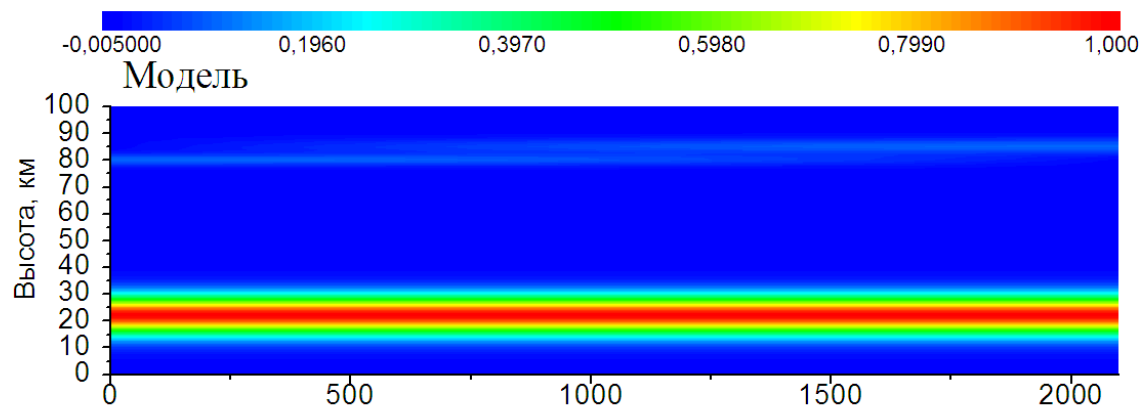
Реконструкция неоднородности в слое от 0 до 30 км, солнечный диск



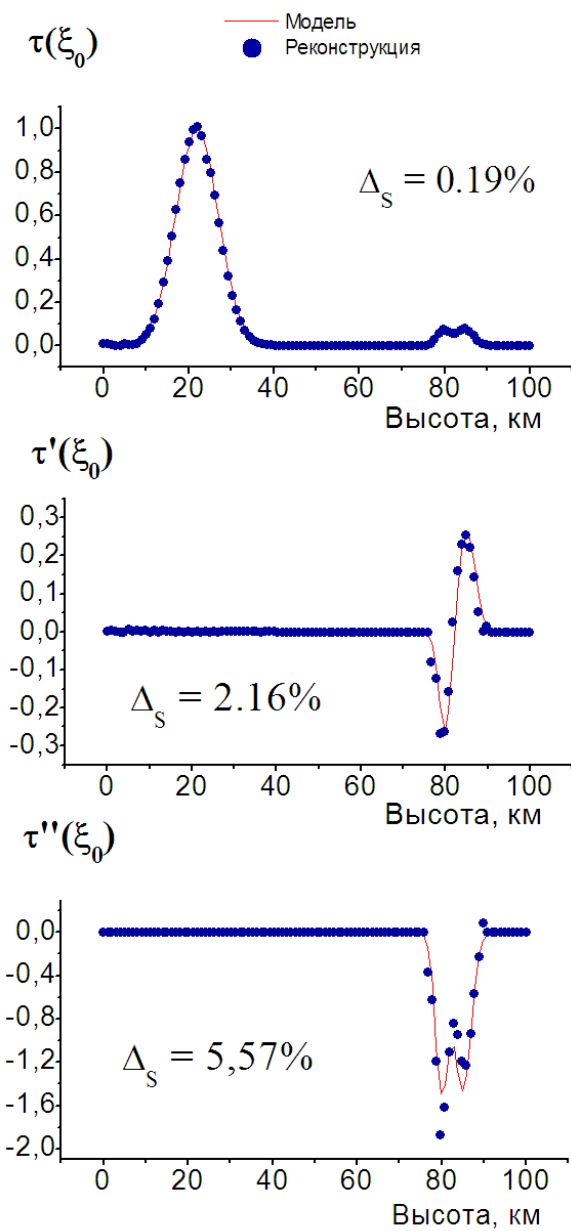
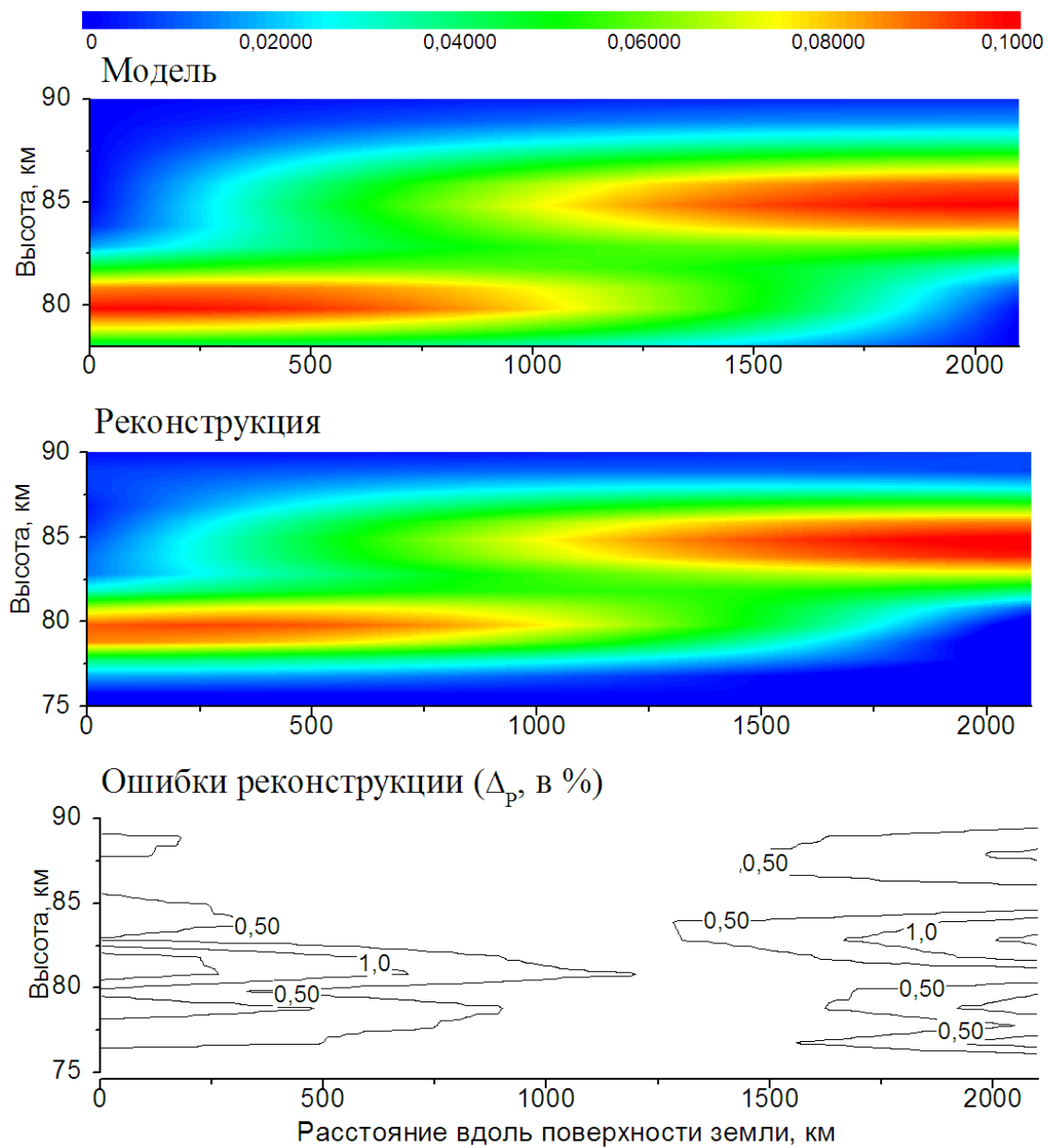
Реконструкция неоднородности экстинкции в слое от 15 до 40 км, 3 звезды



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!