

**Восстановление общего содержания NO_2
по данным спектрометрических
измерений в метеорологической
обсерватории МГУ**

О.В.Николаева, Л.П.Басс (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН),

А.С.Елохов, В.В.Иванов (ИФА им.А.М. Обухова РАН),

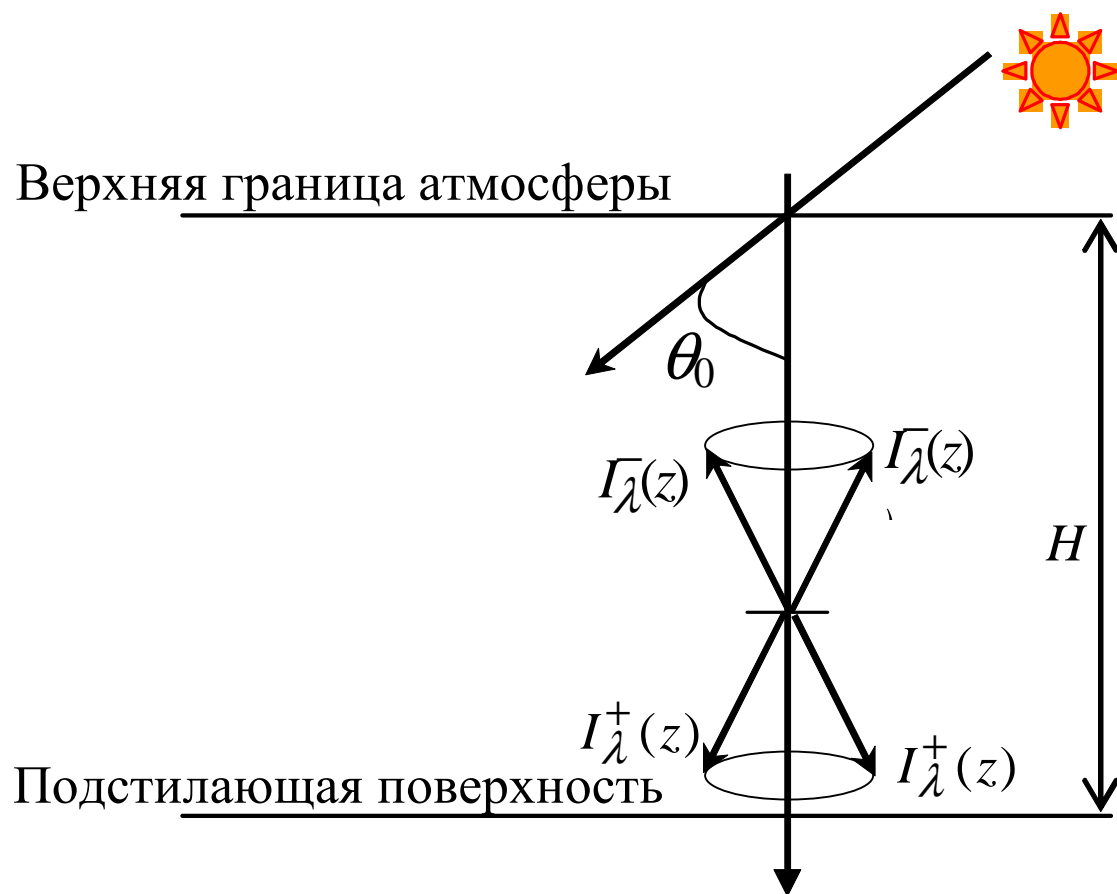
А.Н.Рублев (РНЦ Курчатовский институт)

**Общее содержание
диоксида азота NO₂
(число молекул/см²)
в атмосфере**

Спектр прошедшего в надир через
безоблачную атмосферу солнечного
излучения видимого диапазона

Спектрометр Oriel-260

Двухпоточковая модель распространения излучения в атмосфере



$I_{\lambda}^{+}(z)$ - интенсивность излучения вниз, длина волны λ , высота z

$I_{\lambda}^{-}(z)$ - интенсивность излучения вверх, длина волны λ , высота z

Уравнения переноса излучения в двухпоточковом приближении

косинус
зенитного
угла солнца

$$\mu_0 \frac{\partial I_{\lambda}^{+}}{\partial z} + \sigma_{\lambda} I_{\lambda}^{+}(z) = \sigma_{s,\lambda}^{+} I_{\lambda}^{+}(z) + \sigma_{s,\lambda}^{-} I_{\lambda}^{-}(z)$$

коэффициент
экстинкции

коэффициент
рассеяния
вперед

коэффициент
рассеяния
назад

$$-\mu_0 \frac{\partial I_{\lambda}^{-}}{\partial z} + \sigma_{\lambda} I_{\lambda}^{-}(z) = \sigma_{s,\lambda}^{+} I_{\lambda}^{-}(z) + \sigma_{s,\lambda}^{-} I_{\lambda}^{+}(z)$$

Краевые условия

Входящий поток

$$I_{\lambda}^{+}(0) = I_{0,\lambda}$$

↑
Интенсивность
внеатмосферной
радиации

Поток, отраженный от земли

$$I_{\lambda}^{-}(H) = A_{\lambda} I_{\lambda}^{+}(H)$$

↑
Альбедо
подстилающей
поверхности

Коэффициент пропускания атмосферой солнечного света

$$T_\lambda = I_\lambda^+(H)/I_{0,\lambda} = \frac{2u_\lambda}{\left(1 + u_\lambda - A_\lambda \sqrt{1 - u_\lambda^2}\right) e^{u_\lambda \alpha_\lambda / \mu_0} - \left(1 - u_\lambda - \sqrt{1 - u_\lambda^2} A_\lambda\right) e^{-u_\lambda \alpha_\lambda / \mu_0}}$$

альbedo подстилающей поверхности

косинус зенитного угла солнца

$$u_\lambda = \sqrt{1 - \left(\tau_{s,\lambda}^- \right)^2 / \left(\tau_\lambda - \tau_{s,\lambda}^+\right)^2} \in (0,1)$$

оптическая толщина рассеяния назад
 $\tau_{s,\lambda}^- = \sigma_{s,\lambda}^- H$

полная оптическая толщина слоя атмосферы
 $\tau_\lambda = \sigma_\lambda H$

оптическая толщина рассеяния вперед
 $\tau_{s,\lambda}^+ = \sigma_{s,\lambda}^+ H$

$$\alpha_\lambda = \tau_\lambda - \tau_{s,\lambda}^+$$

Зависимость оптических толщин от длины волны. Выбор спектра

Поглощение на молекулах NO_2

$$\tau_\lambda = D_0 + D_1 \lambda + D_2 / \lambda^4 + \underbrace{\sigma_\lambda \rho}_{\text{поглощение на молекулах NO}_2}$$

← общее содержание NO_2 в столбе атмосферы (число молекул/см²)

$$\tau_{s,\lambda}^+ = D_3 + D_4 \lambda + D_2 / 2\lambda^4$$

сечение поглощения излучения длины волны λ на молекулах NO_2 (см²).

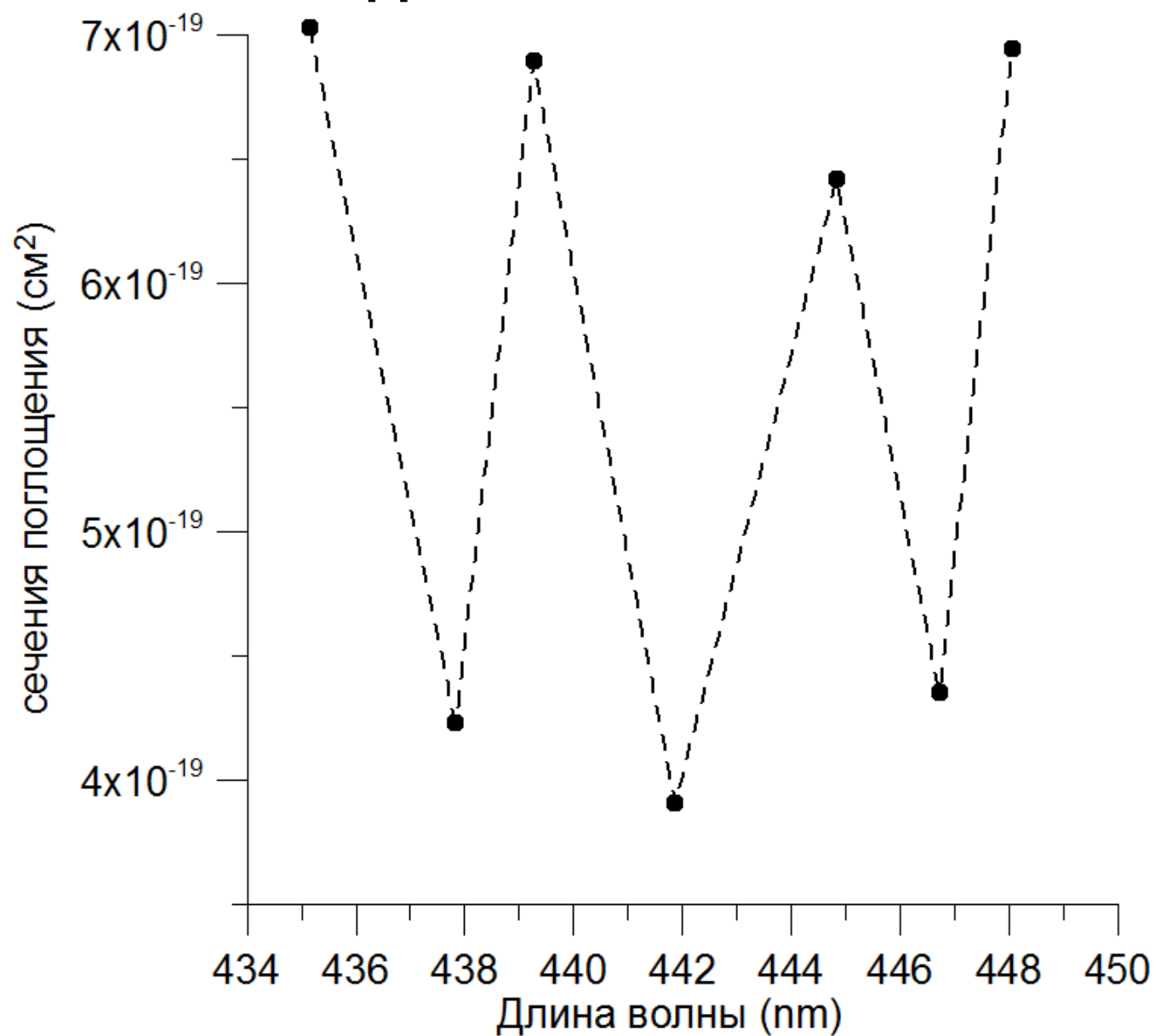
$$\tau_{s,\lambda}^- = \underbrace{D_5 + D_6 \lambda}_{\text{Рассеяние и поглощение на аэрозолях}} + \underbrace{D_2 / 2\lambda^4}_{\text{Рэлеевское рассеяние}}$$

Рассеяние и поглощение на аэрозолях

Рэлеевское рассеяние

D_i , $i=0, \dots, 6$, - некоторые коэффициенты, не зависящие от λ

Сечения поглощения NO_2 на выбранных длинах волн



Зависимость оптических параметров от длины волны

$$\tau_{\lambda} - \tau_{s,\lambda}^{+} = C_0 + C_1 \lambda + C_2 / \lambda^4 + \sigma_{\lambda} \rho$$

$$\tau_{s,\lambda}^{-} = C_3 + C_4 \lambda + C_2 / \lambda^4$$

← общее содержание NO₂ в столбе атмосферы (число молекул/см²)

← сечение поглощения излучения длины волны λ на молекулах NO₂ (см²).

C_i , $i=0, \dots, 6$, - некоторые коэффициенты, не зависящие от λ

Метод наименьших квадратов

число длин волн в алгоритме восстановления

$$\sum_{i=1}^I \left(\bar{T}_{\lambda_i} - T_{\lambda_i} (C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, \rho) \right)^2 \rightarrow \min$$

↑
коэффициенты
пропускания,
получаемые из
измерений

↑
коэффициенты
пропускания,
получаемые из
двухпотоковой
модели

↑
восстанавливаемые
коэффициенты

Предлагаемый алгоритм

- I. учитывает процессы многократного рассеяния света в атмосфере,
- II. является оперативным (быстрым),
- III. требует знания только спектрального хода коэффициентов
 - a. пропускания солнечного света через атмосферу,
 - b. отражения света земной поверхностью,
- IV. не опирается на какие-либо априорные предположения о профилях NO_2 и аэрозолей.

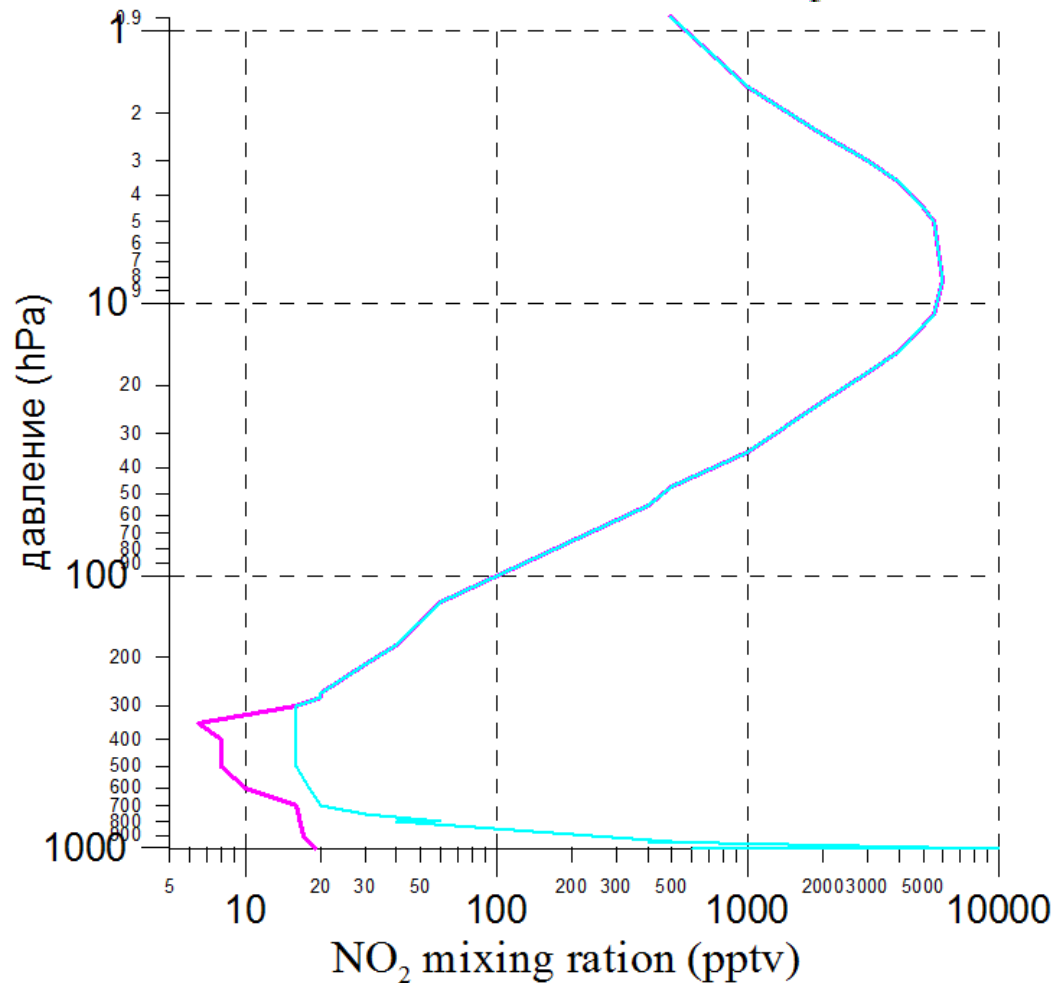
Тестирование модели

IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 44, NO. 5, MAY 2006

1245

Algorithm for NO₂ Vertical Column Retrieval From the Ozone Monitoring Instrument

Eric J. Bucsela, Edward A. Celarier, Mark O. Wenig, James F. Gleason, J. Pepijn Veefkind, K. Folkert Boersma, and



Стратосферный профиль -
GSFC CTM модель

Тропосферные профили -
GEOS-CHEM модель

Методика тестирования

Шаг 1. Определение общего содержания NO_2 (то есть $\rho^{\text{точн}}$), отвечающего заданному профилю

Шаг 2. Расчет с заданным профилем NO_2 и стандартной моделью атмосферы коэффициентов пропускания для фиксированного зенитного угла солнца (программа РАДУГА).

Шаг 3. Восстановление по рассчитанным коэффициентам значений общего содержания NO_2 (то есть $\rho^{\text{восс}}$).

Шаг 4. Сравнение величин $\rho^{\text{точн}}$ и $\rho^{\text{восс}}$.

Программа РАДУГА-5.2(П)

Решение уравнения переноса нейтральных частиц
(стационарного или нестационарного)

1D, 2D, 3D геометрии

Метод дискретных ординат

Регулярные сетки

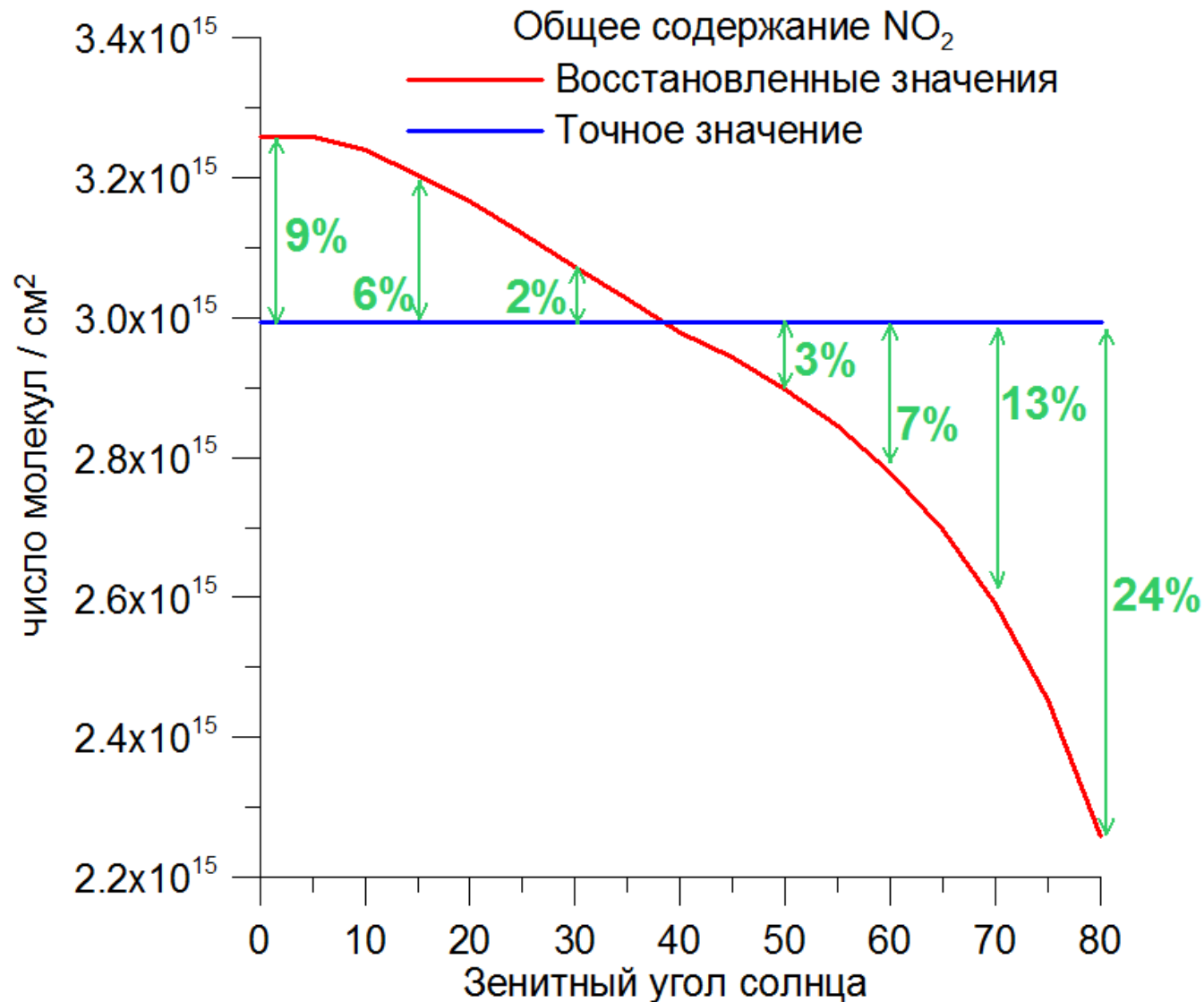
Различные типы источников и граничных условий

Представление индикатрис рассеяния разложениями
по полиномам Лежандра или в дискретной форме

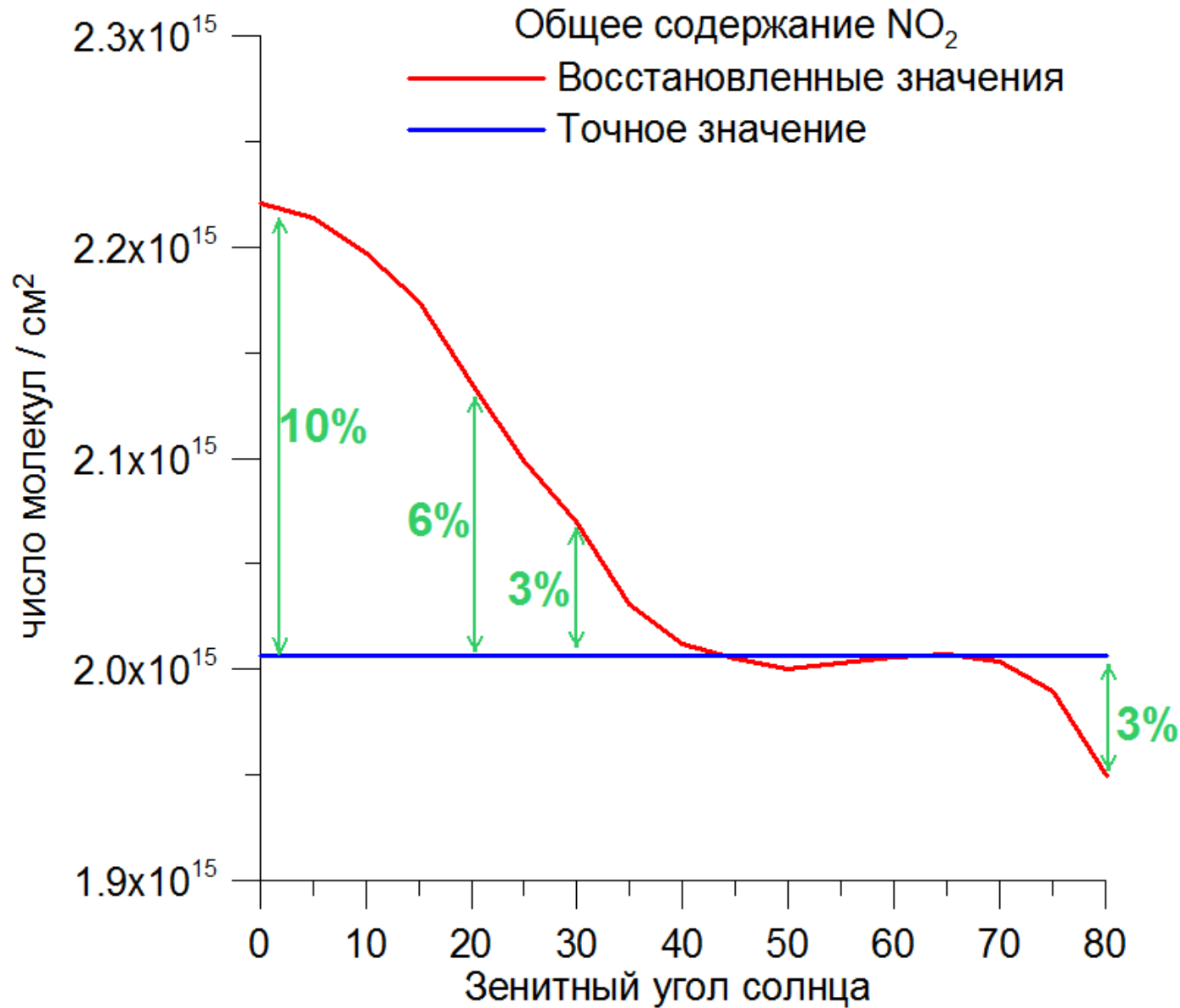
Двуслойная итерационная схема

Присоединенные модели атмосферы

Точные и восстановленные значения общей концентрации. Загрязненный профиль



Точные и восстановленные значения общей концентрации. Незагрязненный профиль



Обработка результатов измерений спектрометром Oriel-260

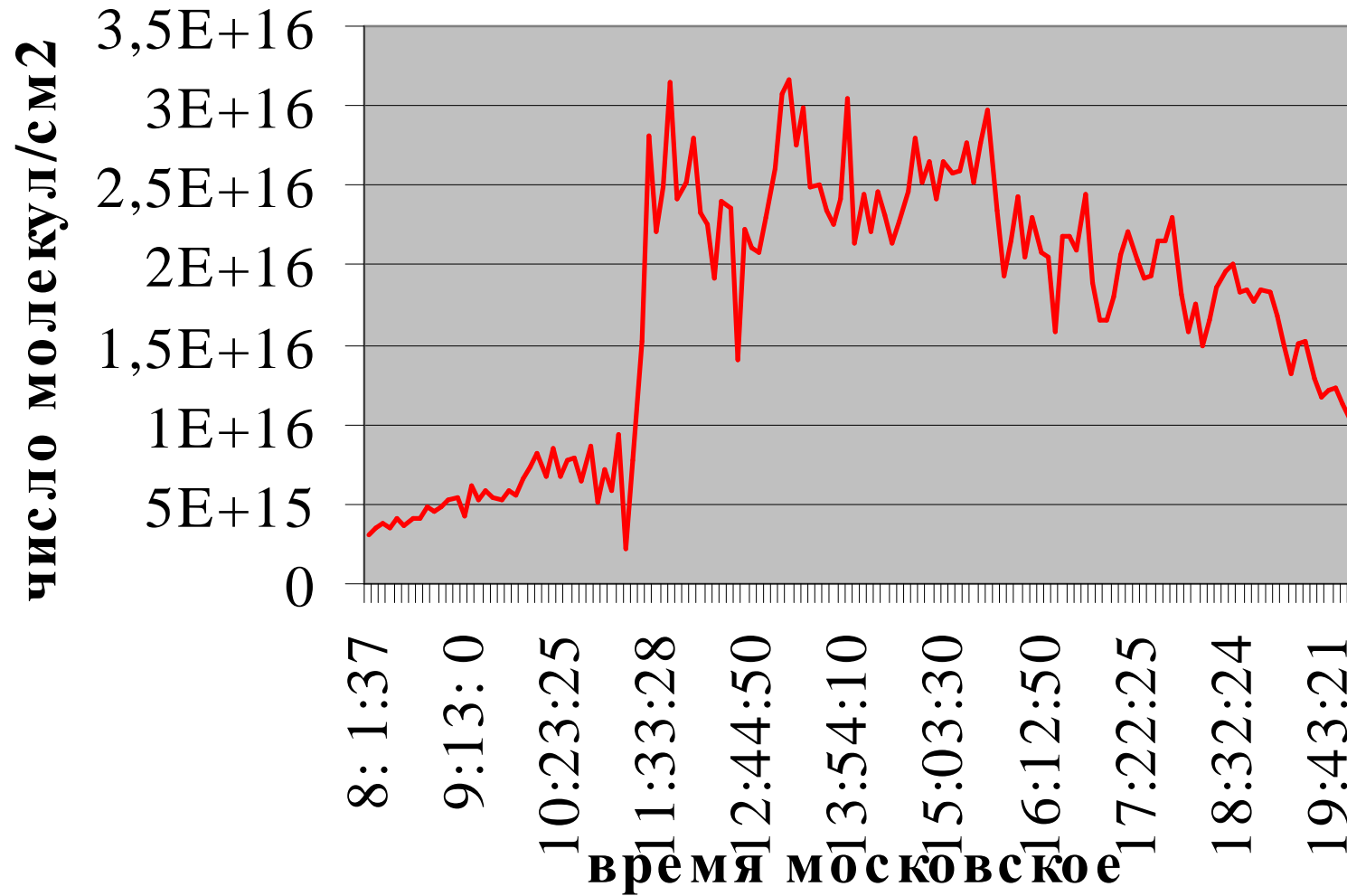
опорный спектр (утренние часы)

$$\sum_{i=1}^I (S_0 \bar{T}_{\lambda_i} - T_{\lambda_i}^0)^2 \rightarrow \min$$

Спектр, рассчитанный по программе РАДУГА для модели атмосферы с минимальным содержанием NO_2

Калибровочная константа для измеренных спектров \bar{T}_{λ_i}

Обработка измерений за 3 мая 2008 года



Обработка измерений за 3 мая 2008 года

