

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.510

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДВУМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЛЕКУЛЯРНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ЗАТМЕННОГО СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В. Е. Куницын, Н. В. Савельева

(кафедра физики атмосферы)

E-mail: kunitsyn@phys.msu.su

Показана возможность восстановления двумерных профилей распределения коэффициента поглощения малых газовых составляющих с помощью метода компьютерной томографии.

В настоящей работе исследована возможность восстановления двумерного распределения коэффициента молекулярного поглощения малых газовых составляющих (МГС) атмосферы по данным затмленного спутникового зондирования. Исходные данные получены с помощью компьютерной модели, имитирующей эксперимент SAGE III [1]. Измерения в данной экспериментальной схеме проводятся в зоне смены ночного и дневного температурного режимов (на восходе или заходе солнца). Использование сферически-симметричной модели распределения МГС в данной ситуации может привести к искажениям. Использование томографических методов [2, 3] позволяет восстановить двумерные профили коэффициента поглощения (а следовательно, и концентрации МГС). Представленный в работе метод имеет ряд ограничений, основным из которых является горизонтальное разрешение, составляющее сотни километров.

1. Модель эксперимента

Схема затмленного эксперимента включает в себя внеатмосферный источник излучения (Солнце) и приемник, расположенный на искусственном спутнике, который регистрирует поток излучения на восходе или закате Солнца а) выше 300 км над поверхностью Земли (калибровочный цикл) и б) после прохождения через лимб атмосферы. Измеряется оптическая толщина лимба атмосферы для различных положений спутника и различных тангенциальных высот. По данной схеме был реализован спутниковый эксперимент SAGE II [4] и SAGE III [5], на примере которого будут проиллюстрированы основные приближения модели.

Для расчета траектории луча необходимо использовать следующие дополнительные данные:

а) данные баллистики о точном положении спутника и Солнца;

б) модель расчета коэффициента рефракции.

Величина коэффициента рефракции значимо зависит от температуры атмосферы. При расчете величины коэффициента преломления атмосферы как функции высоты была использована модель слоистой атмосферы [6, 7]. Коэффициент преломления выражается в виде

$$n = 1 + n_0 \cdot 10^{-6} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{g/R\beta-1} \quad (1a)$$

$$n = 1 + n_0 \cdot 10^{-6} \exp \left(-\frac{g(h-h_0)}{RT} \right) \quad (1б)$$

для участков с линейным изменением температуры и с постоянной температурой соответственно. Здесь N, N_0, T, T_0 — индексы преломления и величины абсолютной температуры на нижней границе слоя с геопотенциальной высотой h_0 и в текущей точке с геопотенциальной высотой h .

Уравнение луча для модели сферически-симметричной атмосферы записывается в виде

$$\frac{d^2r}{d\xi^2} = r + \frac{2}{r} \left(\frac{dr}{d\xi} \right)^2 + \left[r^2 + \left(\frac{dr}{d\xi} \right)^2 \right] \frac{dn}{dr} \frac{1}{n(r)} \quad (2a)$$

с начальными условиями

$$r(\xi_0) = R + h_{\tan} \frac{dr}{d\xi}(\xi_0) = (r + h_{\tan}) \operatorname{ctg} \alpha_1, \quad (2б)$$

$$\alpha_1 = \arcsin \left(\frac{R + h_{\tan}}{r_s} \sin \varphi_s \right),$$

где (r, ξ) — полярные координаты точки, R — радиус Земли, h_{\tan} — прицельная высота над поверхностью планеты для траектории луча, ξ_0 — координата точки выхода луча из атмосферы, φ_s — угол сканирования прибора. Для решения уравнения (2) используется метод Рунге–Кутты.

2. Постановка задачи компьютерной томографии

Освещенность R_λ , измеряемая прибором SAGE III с апертурой $\Delta\Omega$, на заданной длине волны λ выражается с помощью

$$R_\lambda(Z_i) = \int_{\Delta\Omega} d\Omega I(\lambda, 0) \exp(-\tau_\lambda(Z_i)) W(\Omega), \quad (3)$$

где $\tau_\lambda(Z_i)$ — суммарная оптическая толщина столба газа единичного сечения вдоль трассы луча, Z_i — тангенциальная высота, $\Delta\Omega$ — угловое поле зрения инструмента, $W(\Omega)$ — отклик прибора.

Суммарная оптическая толщина оценивается с помощью выражения

$$\tau_\lambda(Z_i) = -\ln(R_\lambda(Z_i)/R_\lambda(Z_i^*)), \quad (4)$$

где Z_i^* — тангенциальная высота проведения калибровочных изменений.

Измерения проводятся одновременно на нескольких частотах (с помощью 87 независимых каналов), что позволяет разделить вклады различных МГС в оптическую толщину. Суммарная оптическая толщина компоненты X выражается с помощью

$$\tau_\lambda^x(Z_i) = \int_L f(l) dl = \int_{\xi_0}^{\xi_N} f(r, \xi) \sqrt{r^2 + \left(\frac{dr}{d\xi}\right)^2} d\xi, \quad (5)$$

где $f(r, \xi)$ — функция распределения объемного коэффициента поглощения компоненты X , $L_i = r(\xi)$ — уравнение траектории луча, (r, ξ) — полярные координаты точки, (ξ_0, ξ_N) — координаты точек входа и выхода луча из атмосферы.

Уравнения вида (5), записанные для каждого изменения, формируют систему интегральных уравнений. Данная система может быть решена при помощи аппроксимации интегрального оператора линейным и поиском приближенного решения полученной переопределенной системы линейных уравнений итерационными методами.

Неизвестная функция $f(r, \xi)$ представляется в виде сеточной функции f_{nm} на сетке $\{r_n, \xi_m\}$ при $0 \leq n \leq N$ и $0 \leq m \leq M$.

В результате подстановки этой функции в (5) и интегрирования коэффициентов сеточной функции по траектории луча получаем систему линейных уравнений

$$\tau_\lambda^x(Z_i)_i = \sum_{n,m} L_{nm}^i f_{nm} \quad (6)$$

где i — номер измерения, L_{nm}^i — матрица коэффициентов при неизвестных значениях функции в узлах сетки f_{nm} , полученных при численном интегрировании функции вдоль трассы луча номер i .

Для поиска приближенного решения системы (6) выбирается начальное приближение $f^0 \in R^n$. На k -й

итерации приближение f^k корректируется в соответствии с выражениями

$$f^{k+1} = f^k + \lambda_k \frac{\tau_\lambda^x(Z_i)_i - (L^i, f^k)}{\|L^i\|^2} L^i, \quad (7)$$

$$(L^i, f^k) = \sum_{nm} L_{nm}^i f_{nm}^k, \quad \|L^i\|^2 = \sum_{nm} L_{nm}^i L_{nm}^i,$$

где λ_k — параметры релаксации, которые задаются в интервале $[\varepsilon_1, 2-\varepsilon_2] > 0$.

В метрике L^2 выражение для ошибки численного моделирования δ определяется как

$$\delta(L^2) = \sqrt{\frac{\sum_i (f_i - f_i^k)^2}{\sum_i f_i^2}}, \quad (8)$$

где δ — суммарное относительное отклонение приближенного решения f^k от значений функции f в узлах сетки.

3. Результаты моделирования и выводы

При помощи численного эксперимента было показано, что описанная измерительная схема обладает потенциалом с точки зрения получения двумерных распределений МГС. Показано, что с хорошей точностью восстанавливаются несимметричные по горизонтали распределения с разрешением порядка 100 км. Ошибка реконструкции по правой части при этом не превышает десятой доли процента.

На рис. 1 вверху приведена модель двумерного распределения МГС (наложение двух слоев с провалом). Рисунки выполнены в квазидекартеских координатах (τ, h) с различным масштабом по вертикальной и горизонтальной осям. Здесь и далее по оси X отложено расстояние вдоль поверхности Земли τ в км, вдоль Y — высота над поверхностью Земли h в км, по Z — величина объемного коэффициента молекулярного поглощения K в км⁻¹ (поглощение на единицу трассы луча). Средняя величина K задана произвольно, порядка 10⁻⁷ км⁻¹. Ошибка реконструкции (см. (8)) $\delta \leq 0.05\%$ по правой части. В нижней части рисунка изображена реконструкция модели с помощью метода компьютерной томографии. Размер сетки, на которой задается восстанавливаемая функция, 100 клеток по вертикали и 7 по горизонтали.

На рис. 2 вверху изображена модель другого варианта распределения МГС — разрыв слоя со смещением по вертикали. Внизу изображена реконструкция модельного распределения. Размер сетки, на которой задается восстанавливаемая функция, 100 клеток по вертикали и 7 по горизонтали.

На рис. 3 и 4 вверху изображена модель искривленного слоя. Внизу изображена реконструкция модельного распределения. Размер сетки, на которой задается восстанавливаемая функция, 100 клеток по

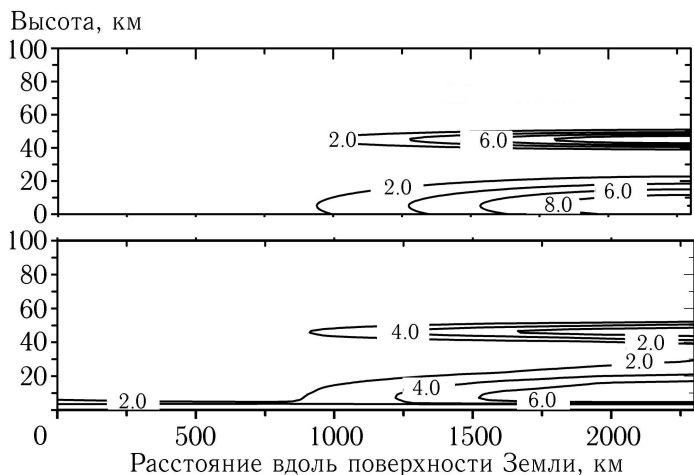


Рис. 1. Модель наложения двух слоев (вверху) и реконструкция (внизу)

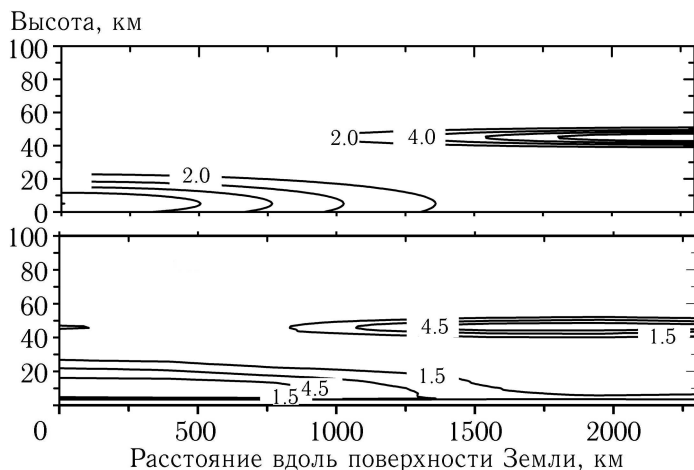


Рис. 2. Модель наложения двух слоев со смещением (вверху) и реконструкция (внизу)

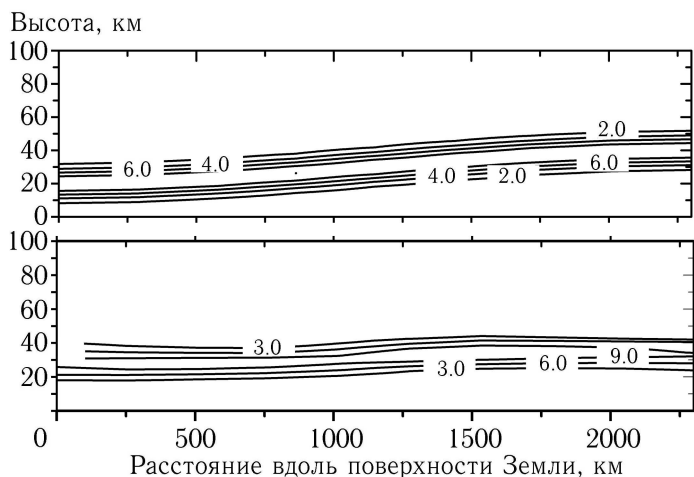


Рис. 3. Модель искривленного слоя (вверху) и реконструкция (внизу)

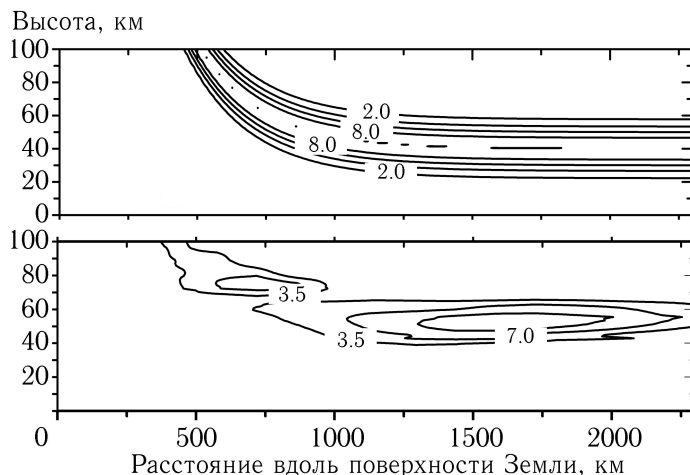


Рис. 4. Модель искривленного слоя с вертикальной деталью (вверху) и реконструкция (внизу)

вертикали и 10 по горизонтали для реконструкции рис. 3, 17 клеток по горизонтали для реконструкции, изображенной на рис. 4.

Выводы

Показана возможность восстановления двумерных распределений коэффициента объемного поглощения МГС при затменном зондировании атмосферы в оптическом диапазоне. Метод обладает явным преимуществом по сравнению с методами, базирующимися на преобразовании Абеля, так как позволяет реконструировать горизонтальные градиенты в распределении МГС, установить наличие неоднородностей и восстановить их форму и количественные характеристики их сечений плоскостью зондирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 05-05-65145).

Литература

1. Ward D.M., Herman B.M. // Applied Optics. 1998. **37**, N 36. P. 8306.
2. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. Томография ионосферы. М., 1991.
3. Kunitsyn V.E., Andreeva E.A. // Radio Science. 1997. **32**, N 5. P. 1953.
4. Fussen D., Arijs E. // Applied Optics. 1998. **37**, N 15. P. 3121.
5. Kent G.S., Wang P.H. // Applied Optics. 1997. **36**, N 33. P. 8639.
6. Фадеев В.Я. Оптическая рефракция в земной атмосфере. Рефракционные модели атмосферы. Новосибирск, 1987.
7. Алексеев А.В., Кабанов М.В. Оптическая рефракция в земной атмосфере. Горизонтальные трассы. Новосибирск, 1982.

Поступила в редакцию
05.12.05