

Задачи и методики зондирования атмосферы при наземных измерениях Фурье- спектрометром в ИК-диапазоне

А.К. Городецкий

*Институт космических исследований РАН
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: gora@iki.rssi.ru*

Рассматриваются возможности постановки комплексной задачи зондирования, включающей как термическое зондирование для определения высотной структуры профилей температуры, влажности и основных радиационно-активных компонент, так и задачу определения оптической толщи аэрозоля. Решение комплексной задачи при наземных измерениях может базироваться на сочетании измерений спектральной структуры нисходящего излучения атмосферы и углового распределения излучения, выполненных Фурье-спектрометром в ИК-диапазоне.

Постановка измерений и аппаратура

Измерения тонкой спектральной структуры излучения в среднем ИК-диапазоне 5-16 мкм, осуществляемые в условиях наземных полигонов, проводятся как при исследовании функции спектрального пропускания атмосферы, определяемой по излучению от внеатмосферного источника – Солнца [1], так и при измерениях собственного теплового излучения атмосферы. При измерении солнечного излучения, прошедшего через атмосферу, реализуется высокое спектральное разрешение фурье-спектрометрии $0,005-0,01 \text{ см}^{-1}$, сочетающееся с высокотемпературным источником излучения и, как следствие, с высоким отношением сигнал/шум. При этих измерениях предполагается известной зависимость функции пропускания атмосферы от концентрации поглощающей компоненты (в [1] – озона), и геометрической воздушной массы атмосферы m на наклонных трассах $m = \sec\theta$, θ – зенитный угол. Из результатов этой работы следует, в частности, расхождение среднего значений общего содержания озона, определенного по данным этих спектрометрических измерений, как с данными спутниковых измерений (TOMS), так и с данными наземных измерений общего содержания озона (OCO), выполненных с Brewer-спектрометром в УФ-области по стандартной методике.

Измерения спектральной структуры нисходящего собственного теплового излучения проводятся, как правило, для радиации из направления в зенит [2, 3]. Задачей этих измерений является восстановление высотных профилей температуры, влажности и концентрации озона. Решение этих задач также предусматривает знание зависимости функции пропускания в полосах поглощения газовых компонент от температуры, давления и концентрации селективно-поглощающих компонент. Вопрос о возможности эффективного учета вариаций поглощения вне селективных линий в “окнах прозрачности атмосферы” остается пока недостаточно исследованным, несмотря на усилия, предпринятые в этом направлении, например [4]. Причиной этому является, по-видимому, значительные пространственно-временные вариации аэрозольного поглощения в атмосфере, корректный учет которых возможен при дополнительной информации о трансформации излучения в атмосфере. Задача учета вариаций оптической толщи в “окнах прозрачности” при наземных измерениях излучения рассматривалась как одна из задач, решаемых в ходе проекта разработки Фурье-спектрометра ИКФС2 [5].

Численное моделирование прямой задачи

Для решения прямой задачи расчета интенсивности нисходящего излучения атмосферы был проведен анализ банка спектроскопических линий и выделены интервалы спектра с наименьшим вкладом селективного поглощения в трансформацию излучения в атмосфере.

В табл. 1 приводятся 19 интервалов спектра в спектральном диапазоне $800-1000 \text{ см}^{-1}$, для которых выполнен расчет интенсивности нисходящего излучения атмосферы для модели атмосферы – средние широты, лето – с учетом поглощения водяным паром в континууме. Результаты позволяют рассмотреть две характеристики – спектральную и угловую.

Таблица 1. Спектральные интервалы с преобладанием континуального поглощения

| Интервал частот, см^{-1} | Число интервалов | Волновые числа, см^{-1} |
|-----------------------------------|------------------|---|
| 800-1000 | 19 | 811; 819; 833,25; 844,25; 856,75; 868; 873,75; 893,75; 900,25; 912,25; 916,5; 919,75; 927,5; 931,75; 950,75; 956,75; 963,5; 987,2; 992,25 |

Результаты расчетов показывают существенное, до 2,5 раз изменение интенсивности излучения атмосферы в пределах выделенного диапазона частот. Однако зависимость излучения от частоты представляет собой монотонную гладкую функцию, и в спектральном распределении, получаемом в эксперименте, дополнительное поглощение другими компонентами может быть выделено по локальному увеличению интенсивности.

Результаты расчета спектрального распределения нисходящего излучения атмосферы $I(m)$ по точному методу решения уравнения переноса для волновых чисел табл. 1 приводятся на рис. 1. Зависимость излучения от воздушной массы также монотонно возрастает с уменьшением волнового числа. На рис. 2 приводятся результаты расчетов $I(m)$ для частот 901 см^{-1} и $992,25 \text{ см}^{-1}$ для диапазона воздушных масс 1-4 с дискретностью по воздушной массе $dm=0,25$. Зависимость излучения от воздушной массы также монотонно возрастает с ростом воздушной массы.

Эти данные получены в результате прямого решения уравнения переноса излучения и поэтому позволяют провести проверку точности восстановления полной оптической толщи (замкнутая схема).

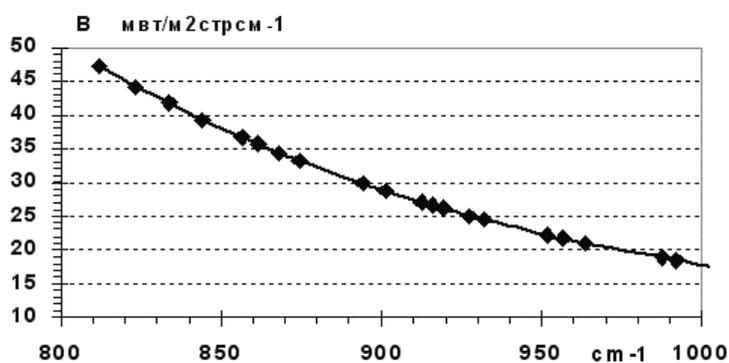


Рис. 1. Спектральная интенсивность излучения $I(m)$ в “микроокнах прозрачности атмосферы”

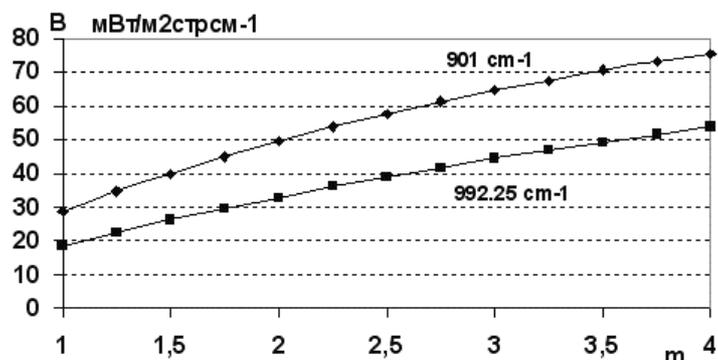


Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения от воздушной массы m для волновых чисел 901 и 992 см^{-1}

Метод определения оптической толщи атмосферы по данным наземных измерений с применением ФС

Метод основан на параметризации решения уравнения переноса излучения в атмосфере в диапазоне частот, в которых преобладает континуальное непрерывное поглощение. Поглощающими компонентами являются водяной пар и аэрозоль. Спектральные коэффициенты поглощения в «окнах прозрачности» атмосферы исследовались в условиях реальной атмосферы на горизонтальных и наклонных трассах. Получен значительный объем статистических данных о средних значениях коэффициентов поглощения. Однако коэффициенты поглощения водяным паром сильно варьируют с изменением упругости пара, длины волны и температуры. Тем не менее, определены минимальные значения оптических толщин, которые вызываются «фоновым» поглощением водяного пара. Превышение этого «фонового» значения вызывается аэрозольным ослаблением излучения. Разрабатываемый метод использует бугеровскую экспоненциальную зависимость монохроматической функции поглощения от воздушной массы. Входной измеряемой величиной является угловое распределение собственного нисходящего излучения атмосферы.

Аэрозольная оптическая толщина определяется в этом методе как разность между полной оптической толщиной и толщиной поглощения водяным паром. Толщина поглощения водяным паром определяется высотным распределением любой из его характеристик - удельной влажности, упругости пара или абсолютной влажности. Предполагается, что заданы два значения температуры атмосферы – на уровне земной поверхности и на уровне тропопаузы. Последнее условие не отягощает применимость метода, поскольку высота тропопаузы не лимитирует применение метода.

Интенсивность излучения атмосферы $I(\nu, m)$ измеряется в «микроокнах» прозрачности для ряда значений воздушной массы $m = \sec \varphi$, ν - волновое число.

Интенсивность нисходящего излучения представляется в виде

$$I(m) = m \int B_{\nu}(\tau) \exp(-m\tau) d\tau \quad (1)$$

В выражении (1) интегрирование проводится по τ в пределах $[0, \tau^*]$. Здесь τ - оптическая толщина (переменная), τ^* - определяемое значение полной оптической толщи атмосферы, $B_{\nu}(\tau)$ – интенсивность излучения по Планку на уровне с оптической толщиной τ . $B_{\nu}(\tau)$ аппроксимируется в виде

$$B_{\nu}(\tau) = B_0 - b\tau/\tau^* + b \sum c_k \sin k\pi\tau/\tau^* \quad (2)$$

В выражении (2) значение $b = B_0 - B_{\tau}$, где B_0 и B_{τ} – значения интенсивности излучения при температуре приземного слоя воздуха и тропопаузы соответственно.

Таким образом, неизвестными являются полная оптическая толщина τ^* и коэффициенты ряда Фурье c_k . Решение задачи проводится методом условного градиента [6] для ряда входных сеточных значений τ^* .

Таблица 2. Характеристики зависимости $I(m)$ и результаты определения оптической толщи

| Частота $\nu, \text{см}^{-1}$ | Оптическая толщина τ^* | Интенсивность $I(m=1)$ $\text{мВт/м}^2/\text{стр/см}^{-1}$ | Оптическая тол- щина τ_0 | Средняя ошибка ρ_1 $\text{мВт/м}^2/\text{стр/см}^{-1}$ |
|----------------------------------|--------------------------------|---|----------------------------------|--|
| 992.25 | 0,2468 | 18,40 | 0,250 | 0,0094 |

Результаты решения обратной задачи – определения полной оптической толщи по угловой зависимости $I(m)$ – даются в табл. 2, из которой следует, что ошибка восстановления τ^* в пределах 1-1,5% соответствует средней ошибке ρ_1 интенсивности излучения $0,0094 \text{ мВт/м}^2/\text{стр/см}^{-1}$. Эти данные характеризуют соотношение ошибок измерений и точности определения τ^* .

На следующем этапе была проведена проверка точности определения оптической толщи аэрозоля. Для этой цели при расчете интенсивности излучения с частотой $992,25 \text{ см}^{-1}$ дополнительно к континуальному поглощению водяным паром было введено аэрозольное поглощение с распределением оптической толщи по высоте в соответствии с данными табл. 3.

Таблица 3. Распределение оптической толщи аэрозоля по высоте для расчетов и данных рис. 3

| H, км | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Толща τ_a | 0,0787 | 0,126 | 0,173 | 0,190 | 0,196 | 0,1986 |

Приводим результаты решения обратной задачи определения полной оптической толщи τ_0 и аэрозольной толщи $\tau'_a = \tau_0 - \tau_w$:

$$\tau_w = 0,2468; \quad \tau_a = 0,20; \quad \tau^* = 0,4468; \quad \tau_0 = 0,435; \quad \tau'_a = 0,188;$$

$$\Delta\tau^*_0 = (\tau_0 - \tau^*) / \tau^* = 0,026; \quad \Delta\tau'_a = 1 - (\tau_0 - \tau_w) / \tau_a = 0,059$$

Среднее квадратическое отклонение (невязка) интенсивности $\sigma_1 = 0,041$ мВт/м²/стр/см⁻¹ нормированное среднеквадратическое отклонение по интенсивности излучения

$$\sigma'_1 = \sigma_1 / I(m=1) = 1,5 \cdot 10^{-3}$$

Приведенные данные соответствуют значительному увеличению интенсивности излучения $I(m=1)$ на 45%, вызванному увеличению оптической толщи за счет аэрозоля на 81%.

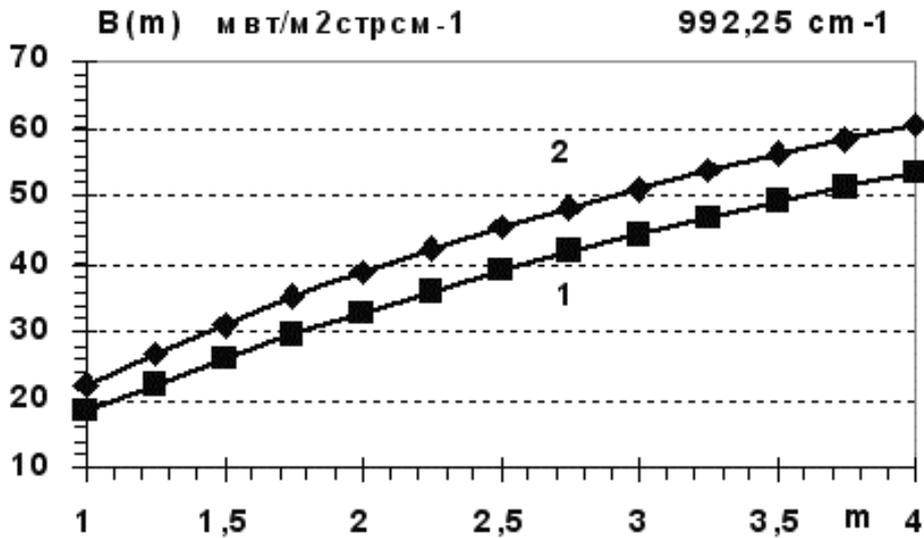


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения от воздушной массы m с аэрозольной компонентой: 1- $\tau_w=0,2468$; $\tau_a=0$; 2- $\tau_w=0,2468$; $\tau_a=0,20$

Выводы

Разработанная методика определения полной оптической толщи основывается на измерении углового распределения нисходящего излучения в «микроокнах прозрачности атмосферы» и может быть применена для Фурье-спектрометра с спектральным разрешением $0,5 \text{ см}^{-1}$ при точности измерений с относительной ошибкой порядка 0,001.

Аэрозольная оптическая толщина определяется по разности полной толщи и известной толщи поглощения водяным паром. Ошибка восстановления оптической толщи не превышает 10-15 % от величины τ^* в диапазоне ее изменения 0,2 – 0,6.

Полученные результаты позволяют рассматривать предложенную методику как часть комплексной задачи определения метеорологических и оптических параметров атмосферы, решаемой средствами и методами дистанционного зондирования.

Литература

1. *Pougatchev N.S., Connor B.J., Risland C.P.* Infrared measurements of ozone vertical distribution above Kitt Peak. *Journal of Geoph. Res.*, 1995, № 20, pp. 16689-16697.
2. *Spänkuch D., W. Döhler, J. Güldner, A. Keens.* Ground-based Passive Atmospheric Remote Sounding by FTIR Emission Spectroscopy – First Results with EISAR. *Beitr. Phys. Atmosph.*, Feb. 1996, 97–111.
3. *Виролайнен Я.А., А.В. Поляков, Ю.М. Тимофеев, Д. Шпенкух, В. Делер.* Определение характеристик газового состава атмосферы по измерениям нисходящего теплового ИК излучения. *Известия РАН, ФАО*, 2001, 37, 1, 1-8.
4. *Clough, S.A., F.X.Kneisys and R.W.Davies.* Line Shape and the Water Vapor Continuum, *Atmospheric Research*, 1989 23, 229-241.
5. *Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Десятов А.В., Мащицкий Ю.П., Никулин А.Г., Городецкий А.К.* Дистанционное зондирование Земли с помощью ИК Фурье-спектрометра // Тезисы доклада. Международная конференция МСАР-2006. Санкт-Петербург. Июль 2006.
6. *Черепашук А. М. и др.* Переменные звезды, 1973. Т 18, №3. С. 535-570.