

А.И. Демьяников

ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ЗОНДИРОВАНИЮ ВЕРХНИХ СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ В 15-МКМ ПОЛОСЕ CO₂. ТЕМПЕРАТУРА, КИНЕТИКА, СОСТАВ

В работе приводятся результаты решения задачи выбора совокупности спектральных измерительных каналов, обеспечивающих минимум погрешности восстановления температуры при дистанционном зондировании верхних слоев атмосферы Земли по неравновесному излучению 15-мкм полосы CO₂. Рассматриваемый подход решения обратной задачи дополнительно к температуре обеспечивает информацию о вертикальном профиле отношения смеси CO₂ и вероятности выживания квантов при рассеянии.

Показано, что, используя современные охлаждаемые приемники излучения, можно определять температуру до 100 км с точностью до 1 К.

Введение. В настоящее время ведется подготовка к комплексному эксперименту по зондированию атмосферы на борту космических кораблей многоразового использования [1]. Основным элементом научной программы предстоящих полетов будут измерения инфракрасного (ИК) излучения атмосферы Земли в интервале от 1,4 до 16,5 мкм [2], охватывающем полосы поглощения таких важных компонентов атмосферы, как CO₂, O₃, NO, H₂O, NO₂, HNO₃ и OH. Угловое сканирование радиометра дает возможность получить информацию о термической структуре атмосферы и ее химическом составе от 0 до 250 км.

Перенос ИК-излучения для большинства (если не для всех) из перечисленных компонентов в указанном диапазоне высот, вообще говоря, не может быть рассмотрен без учета нарушения локального термодинамического равновесия (ЛТР). Область нарушения ЛТР в атмосфере зависит от конкретной спектральной полосы. Так, для полосы CO₂ 15 мкм она лежит выше 70 км [3].

Возможность восстановления температурного распределения $T(z)$ этой области атмосферы из дистанционных измерений на наклонных трассах впервые корректно рассмотрена в [4]. Предложенный там метод обращения является прямым обобщением метода, изложенного в [5] и основанного на предположении об ЛТР. Недостатком метода [4] является необходимость априорного задания вертикального профиля вероятности выживания квантов при рассеянии $\Lambda(z)$, величина которой зависит от содержания атомарного кислорода в атмосфере [6].

В работе [7] показано, что одновременное определение $T(z)$ и $\Lambda(z)$ из измерений в 15-мкм полосе возможно лишь при специальном выборе двух спектральных каналов, каждый из которых объединяет участки полосы, функция пропускания в которых имеет одинаковый характер зависимости от температуры атмосферы, различный в каждом из этих каналов.

Во всех перечисленных выше работах предполагалось известным содержание CO₂ в атмосфере. В то же время прямые измерения отношения смеси CO₂, $q_{CO_2}(z)$, показали, что выше турбопаузы (~ 100 км) оно может отличаться от широко используемых модельных профилей в 5, а в некоторых случаях в 10 раз [8].

Настоящая работа посвящена изложению метода дистанционного определения $T(z)$ в области нарушения ЛТР, не требующего априорного задания $\Lambda(z)$ и $q_{CO_2}(z)$. Метод основывается на строгом решении задачи оптимального выбора трех спектральных каналов, обеспечивающих при обработке экспериментальных данных дополнительно к $T(z)$ информацию о $\Lambda(z)$ и $q_{CO_2}(z)$. Здесь же приводится улучшенный по сравнению с [7] вариант двух спектральных каналов для решения задачи о совместном восстановлении $T(z)$ и $\Lambda(z)$ при известном $q_{CO_2}(z)$.

Математическая формулировка задачи. Будем исходить из следующего выражения для интенсивности уходящего из атмосферы излучения, обусловленного фундаментальным переходом основного изотопа CO₂:

$$I_{\Delta\nu}(h) = \int_h^{z_{\max}} R_{\Delta\nu}^{\text{ЛТР}}(h, z) S_{10}(z) dz, \quad (1)$$

где

$$R_{\Delta\nu}^{\text{ЛТР}}(h, z) = \sum_m \frac{\partial P_m(h, z)}{\partial z} E_m(z) \quad (2)$$

– функция ядра интегрального уравнения для нахождения температуры при условии ЛТР [5];

$$P_m(h, z) = \int_0^{\infty} d\nu P_{m,\nu}(h, z) \quad (3)$$

– функция пропускания атмосферой излучения от уровня z до верхней границы атмосферы при определенном параметре h , обусловленного поглощением в m -й спектральной линии; $S_{10}(z)$ – функция источников для частоты колебательного перехода $1 \rightarrow 0$;

$$E_m(z) = \left(\frac{\nu_{10}}{\nu_m} \right)^3 \exp \left[- \frac{\delta E_{10,m}}{KT(z)} \right] \quad (4)$$

– функция, учитывающая спектральную зависимость функции источников в пределах рассматриваемой колебательной полосы.

Как известно [3], S_{10} удовлетворяет интегральному уравнению

$$S_{10}(z) = \frac{\Lambda_{10}(z)}{2} \int_0^{z_{\max}} K_{10}(z, z') S_{10}(z') dz' + [1 - \Lambda_{10}(z)] B_{10}(z), \quad (5)$$

которое учитывает посредством ядра $K_{10}(z, z')$ вклад в $S_{10}(z)$ рассеянных фотонов, приходящих со всех уровней атмосферы. В плотных слоях, где $\Lambda_{10}(z)=0$, решение этого уравнения совпадает с функцией Планка B_{10} – реализуется ЛТР. В общем случае решение (5) можно записать через функцию Грина (9)

$$S_{10}(z) = \int_0^{z_{\max}} G_{10}(z, z') \cdot B_{10}(z') dz' [1 - \Lambda_{10}(z')]. \quad (6)$$

Варьируя (1) по $T(z')$, $\Lambda_{10}(z')$ и $q_{CO_2}(z')$ на произвольном уровне z' получим:

$$\delta I_{\Delta\nu}(h) = \int_0^{z_{\max}} \left\{ \left[R_{\Delta\nu}(h, z') [1 - \Lambda_{10}(z')] \frac{\delta B_{10}(z')}{\delta T(z')} + M_{\Delta\nu}(h, z') \right] \delta T(z') + \right. \\ \left. + R_{\Delta\nu}(h, z') \frac{S_{10}(z') - B_{10}(z')}{\Lambda_{10}(z')} \delta \Lambda(z') + Q_{\Delta\nu}(h, z') \delta q_{CO_2}(z') \right\} \cdot dz, \quad (7)$$

где

$$R_{\Delta\nu}(h, z') = \int_0^{z_{\max}} R_{\Delta\nu}^{ЛТР}(h, z) G_{10}(z, z') dz \quad (8)$$

– компонента, учитывающая вариацию излучения за счет температурной зависимости функции источников; $\eta_{10}(z') = (S_{10}(z') - B_{10}(z'))/\Lambda_{10}(z')$ – была введена в [6];

$$M_{\Delta\nu}(h, z') = \int_h^{z_{\max}} \sum_m \left[\underbrace{\frac{\partial^2 P_m(h, z)}{\partial z \partial T(z')} E_m(z) S_{10}(z)}_I + \underbrace{\frac{\partial P_m(h, z)}{\partial z} S_{10}(z) \frac{\delta E_m(z)}{\delta T(z')}}_{II} \right] dz \quad (9)$$

– компонента, учитывающая температурную зависимость функции пропускания и частотную зависимость в пределах рассматриваемой полосы функции источников;

$$Q_{\Delta\nu}(h, z') = \int_n^{z_{\max}} \sum_m \frac{\partial^2 P_m(h, z)}{\partial z \delta q_{CO_2}(z')} E_m(z) S_{10}(z) dz \quad (10)$$

– компонента, учитывающая зависимость от содержания CO_2 на трассе функции пропускания.

Выбирая произвольным образом три спектральных канала и записывая (7) для каждого из них, а затем переходя к конечному подпространству искомым поправкам и исключая из полученных алгебраических систем $\delta \Lambda_{10}$ и δq_{CO_2} , получим

$$K_{T;1,2,3}\delta T = \delta I_{1,2,3}, \quad (11)$$

где

$$K_{T;t,j,\kappa} = \delta Q_{ij}^{-1}\delta M_{ij} - \delta Q_{j\kappa}^{-1}\delta M_{i\kappa}; \quad (12)$$

$$\delta M_{ij} = (R_i^{\text{ЛТР}})^{-1} M_i - (R_j^{\text{ЛТР}})^{-1} M_j; \quad (13)$$

$$\delta Q_{ij} = (R_i^{\text{ЛТР}})^{-1} Q_i - (R_j^{\text{ЛТР}})^{-1} Q_j; \quad (14)$$

$$\delta I_{j\kappa} = \delta Q_{ij}^{-1}\delta I_{ij} - \delta Q_{j\kappa}^{-1}\delta I_{j\kappa}; \quad (15)$$

$$\delta I_{ij} = (R_i^{\text{ЛТР}})^{-1} \delta I_i - (R_j^{\text{ЛТР}})^{-1} \delta I_j. \quad (16)$$

Здесь индексами нумеруются спектральные измерительные каналы.

Из (11–16) видно, что определение кинетической температуры верхних слоев атмосферы Земли при неизвестных $\Lambda_{10}(z)$ и $q_{\text{CO}_2}(z)$ возможно лишь при условии учета зависимости от температуры функции пропускания и зависимости от частоты в пределах рассматриваемой полосы поглощения функции источников. Аналогичный вывод был сделан в [7] для задачи совместного определения $T(z)$ и $\Lambda_{10}(z)$, где сравнивались вклады I и II члена в [9] и был сделан вывод о главенствующей по сравнению с II роли члена I.

Заметим, что все обратные задачи определения температуры по излучению 15-мкм полосы поглощения CO_2 при ЛТР основывались на температурной зависимости функции источников [10], тогда как зависимость функции пропускания от температуры принималась во внимание лишь при ее итеративном уточнении. Таким образом, основной отличительной особенностью обратных задач при нарушении ЛТР является использование температурной зависимости пропускания атмосферой.

Функция пропускания на трассе зависит от температуры сложным образом. Сюда входит зависимость от температуры интенсивностей линий [11], массы поглощающего вещества [5] и, наконец, контура спектральной линии поглощения. Два первых фактора являются основными. Для средней температуры атмосферы $T = 200$ К производная объемного коэффициента поглощения по температуре с учетом основных факторов температурной зависимости пропускания меняет знак на частотах спектральных линий, имеющих квантовые вращательные числа $j \sim 30$. Это обстоятельство является основой для выбора оптимальных измерительных каналов.

Предлагая погрешности по отдельным измерительным каналам некоррелированными между собой и по высоте, можно получить апостериорную матрицу ковариации температуры

$$\begin{aligned} V_T = & K_{T,1,2,3}^{-1} \left\{ \delta Q_{1,2}^{-1} \sum_{i=1}^2 [(R_i^{\text{ЛТР}})^+ R_i^{\text{ЛТР}}]^{-1} (\delta Q_{1,2}^+)^{-1} + \delta Q_{2,3}^{-1} \times \right. \\ & \times \sum_{i=2}^3 [(R_i^{\text{ЛТР}})^+ R_i^{\text{ЛТР}}]^{-1} \cdot (\delta Q_{2,3}^+)^{-1} + \delta Q_{1,2}^{-1} [(R_2^{\text{ЛТР}})^+ R_2^{\text{ЛТР}}]^{-1} (\delta Q_{2,3}^+)^{-1} + \\ & \left. + \delta Q_{2,3}^{-1} [(R_2^{\text{ЛТР}})^+ R_2^{\text{ЛТР}}]^{-1} (\delta Q_{1,2}^+)^{-1} \right\} (K_{T,1,2,3}^+)^{-1}, \quad (17) \end{aligned}$$

диагональные члены которой представляют собой дисперсию погрешностей восстановления температуры, $\sigma_T^2(z)$.

Будем считать спектральные измерительные каналы оптимальными для определения температуры, если они обеспечивают минимум величине

$$D = \text{Sp} \left(\frac{V_T}{\sigma_T^2} \right). \quad (18)$$

При решении задачи нахождения минимума (18) использовался подход, развитый в [12]. Рассматриваемая колебательная полоса в интервале от 620 до 720 см^{-1} разбивалась на N спектральных участков. Каждая из величин, определяемых соотношениями (2,9–10), представлялась в виде суммы вкладов всех спектральных участков с весом α_i . Например,

$$R_i^{\text{ЛТР}}(h, z') = \sum_{l=1}^N R_e^{\text{ЛТР}}(h, z') \cdot \alpha_{l+(i-1) \cdot N}; \quad i = 1, 2, 3, \quad (19)$$

где все α_l могут принимать значения в интервале $0 \leq \alpha_l \leq 1$. Это приводит к задаче нахождения минимума функции, зависящей от $3N$ переменных при наличии простых двухсторонних ограничений.

Аналогичные задачи нахождения оптимальных измерительных каналов для определения Λ_{10} и q_{CO_2} легко формулируются, заменяя в (18) V_T на соответствующие рассматриваемой задаче матрицы V_λ или V_q .

Численные результаты. Задача нахождения минимума (18) решалась методом сопряженного градиента [13].

На первом этапе вместо спектральных интервалов рассматривались отдельные изолированные линии. Большая размерность получаемой при этом функции затрудняет решение задачи. Были использованы приближение жесткого ротатора, позволяющее в явном виде представить зависимость интенсивности спектральных линий от вращательного квантового числа, и замена $R_i^{стр}(h, z')$, $M_i(h, z')$, $Q_i(h, z')$ на $R_i^{стр}(h, h)\delta(z' - h)$, $M_i(h, h)\delta(z' - h)$, $Q_i(h, h)\delta(z' - h)$, устраняющая необходимость обращения матриц большой размерности. Эта замена может быть обоснована доминирующим вкладом в уходящее излучение области атмосферы вблизи $z' = h$ [5]. Совокупность линий, отобранных из приближенного решения задачи, использовалась для разбиения полосы на спектральные интервалы, включающие уже группы линий. Таких интервалов оказалось 12.

На втором этапе описанные выше приближения уже не использовались, а интенсивности спектральных линий соответствовали [11]. Основное отличие положения полученных каналов на первом и втором этапах связано с R -ветвью фундаментальной полосы, где перемешаны линии с различными по величине квантовыми вращательными числами, тогда как в P - и Q -ветвях границы каналов отличаются не более чем на расстояние между соседними спектральными линиями.

Границы спектральных участков измерительных каналов, $см^{-1}$

Двухканальная система		Трехканальная система		
1-й канал	2-й канал	1-й канал	2-й канал	3-й канал
648—668	620—647	620—638	639—668	659—667,4
671—677	668—671	669—677	677—682	668—671
—	688—720	688—720	—	668—720

В таблице представлены результаты решения задач выбора двух и трех оптимальных измерительных каналов для определения $T(z)$ при неизвестном $\Lambda_{10}(z)$ и $T(z)$ при неизвестных $\Lambda_{10}(z)$ и $q_{CO_2}(z)$ соответственно.

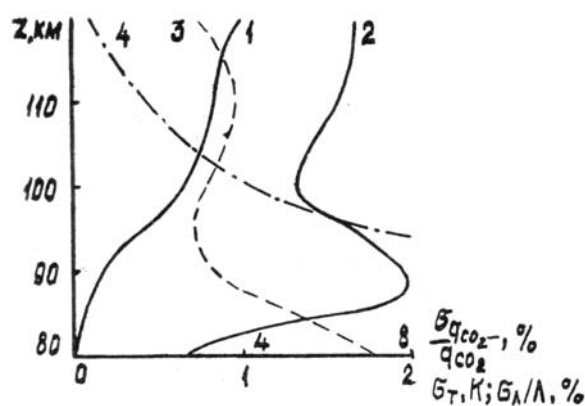


Рис. 1. Теоретические оценки вертикальных профилей погрешностей восстановления: кривая 1 — $\sigma_T(z)$ при известном составе (двухканальная измерительная система); кривая 2 — $\sigma_T(z)$ при неизвестном составе (трехканальная измерительная система); кривая 3 — σ_L / Λ_{10} при неизвестном составе; кривая 4 — $\sigma_{q_{CO_2}} / q_{CO_2}$

Рис. 1 содержит вертикальные профили теоретической оценки погрешностей восстановления температуры и относительной погрешности $\Lambda_{10}(z)$ $q_{CO_2}(z)$ при использовании трехканальной системы измерений, а также погрешности восстановления температуры по улучшенному варианту двухканальной системы.

Из сравнения данных, приведенных на рис. 1, с аналогичными в работе [7] видно, что, используя строгий подход при оптимизации выбора измерительных каналов, можно улучшить точность метода в 5–6 раз.

На рис. 2 изображена весовая функция трехканального метода, определяемая соотношениями (11–14). Как и в случае двухканальной измерительной системы, она близка по своему виду к σ -функции. Это говорит о высокой устойчивости предлагаемого метода.

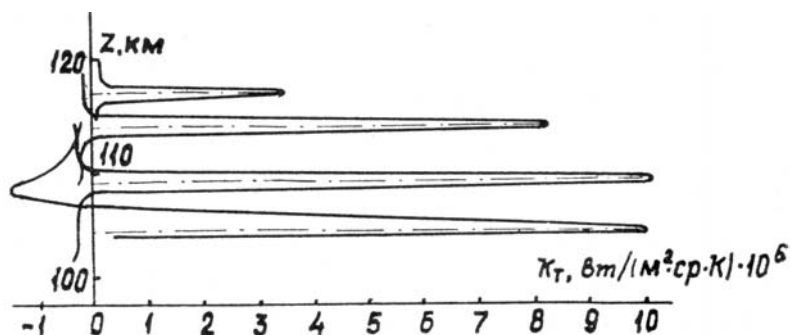


Рис. 2. Весовая функция трехканального метода восстановления температуры, $K_{T,1,2,3}(h, z')$. Штрихпунктиром отмечены прицельные высоты зондирования

В заключение автор выражает благодарность В.В. Розанову за полезные советы в ходе выполнения работы, а также А.А. Кутепову за предоставленную возможность использовать в работе программы расчета функции источников при нарушении ЛТР.

1. Zachog A.S., Sharma R.D. // J. Geoph. Res. 1985. V. 90. № A1. P. 467–475.
2. Stair A.T., Sharma R.D. e. a. // J. Geoph. Res. 1985. V. 90. № A10. P. 9763–9775.
3. Кутепов А.А., Швед Г.М. // Изв. АН СССР. ФАО. 1978. № 1. С. 28–43.
4. Демьяников А.И., Кутепов А.А. // Изв. АН СССР. ФАО. 1987. Т. 23. № 5. С. 510–518.
5. Gille J.C., House F.V. // J. Atmos. Sci. 1971. V. 28. № 11. P. 1427–1442.
6. Демьяников А.И., Кутепов А.А. // Изв. АН СССР. ФАО. 1988. Т. 24. № 4. С. 387–393.
7. Демьяников А.И. Двухканальный метод термического зондирования верхних слоев атмосферы Земли на касательных трассах в 15-мкм полосе CO_2 при нарушении ЛТР. Деп. в ВИНТИ АН СССР. № 1398-В от 22 февраля 1988. 15 с.
8. Offerman D., Friedrich V. e. a. // Planetary and Space Science. 1981. V. 29. № 7. P. 747–764.
9. Иванов В.В. Перенос излучения и спектры небесных тел. М.: Наука, 1969. 471 с.
10. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 280 с.
11. Mc Clatchey R.A., Benedict W.C., Clough S.A. e. a. AFGRL atmospheric absorption line parameters compilation // Rep. AFGRL-TR-73-0096. Cambridge, Mass.: Air Force Cambridge Res. Lab. 1973.
12. Козлов В.П. // Инверсия Абеля и ее обобщения: Сб. статей. Новосибирск, 1978. С. 68–95.
13. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 509 с.

A. I. Demjyanikov. **Optimal Planning of the Experiments of Sensing the Upper Atmospheric Layers in the 15 μm Absorption Band of CO_2 . Temperature, Kinetics, Composition.**

The paper presents the results of solving the problem on choosing the set of spectral measurements channels capable of providing minimum errors in restoration of temperature from the data of sensing the upper atmospheric layers in the 15 μm absorption band of CO_2 . The approach to solving the inverse problem allows one, in addition to temperature data, to extract the information on the profile of CO_2 mixture ratio and on the probability of scattered photons survival.

It is shown that using modern cooled detectors of radiation one can determine the atmospheric temperature up to 100 km with the accuracy of 1 K.