

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ
И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДВУМЕРНОГО ПОЛЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ В СТРАТОСФЕРЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ
ИЗЛУЧЕНИЯ ЛИМБА В ПОЛОСЕ ПОГЛОЩЕНИЯ CO₂ 15 МКМ
С ВЫСОКИМ СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

© 2011 г. А. В. Ракитин*, В. С. Косцов, Ю. М. Тимофеев

Физический факультет Санкт-Петербургского государственного университета

*E-mail: kit@troll.phys.spbu.ru

Поступила в редакцию 10.09.2010 г.

Сформулирована и на основе численных экспериментов проанализирована задача восстановления распределения температуры вдоль оптических трасс по спутниковым измерениям излучения лимба Земли в полосе поглощения CO₂ 15 мкм с высоким спектральным разрешением. За основу численных экспериментов взят сценарий эксперимента MIPAS. Показано, что двумерное поле температуры может быть получено в результате обработки измерений излучения на трассах с различными прицельными высотами при условии использования спектральных каналов с существенно различной оптической толщиной. Погрешность определения температуры в стратосфере варьирует в пределах от 1.8 К до 5.6 К и зависит от прицельной высоты оптической трассы и расстояния от прицельной точки. Наилучшее горизонтальное разрешение составляет 73–100 км и реализуется для оптических трасс с прицельной высотой около 18–20 км.

Ключевые слова: стратосфера, термическое зондирование, спутниковые измерения излучения, касательная геометрия

ВВЕДЕНИЕ

Касательная (лимбовая) геометрия наблюдений широко используется в спутниковых экспериментах по дистанционному определению параметров различных слоев атмосферы. При касательной геометрии реализуется высокое вертикальное разрешение зондирования, отсутствует мешающее влияние излучения подстилающей поверхности, большая протяженность трасс (и соответственно значительная оптическая толщина) позволяет зондировать атмосферные слои с малым содержанием поглощающих компонент. Касательная геометрия используется в спутниковых экспериментах по измерению прозрачности атмосферы (источники излучения – Солнце, Луна, звезды), рассеянного солнечного излучения, а также в экспериментах по измерению собственного излучения атмосферы.

В настоящей работе рассматриваются эксперименты по регистрации спектров собственного излучения атмосферы. Прежде чем перейти к обсуждению проблемы учета горизонтальной неоднородности атмосферы, отметим несколько существенных моментов:

1) входными данными для интерпретации являются результаты измерения спектров излучения для совокупности оптических трасс с различными прицельными высотами (эту совокупность принято называть атмосферным сканом). Периодичность вы-

сотного сканирования определяется главным образом скоростью регистрации спектра прибором;

2) при использовании касательной геометрии, как правило, выбираются спектральные каналы измерений, которые достаточно прозрачны, чтобы область формирования излучения лежала в окрестности прицельной точки оптической трассы;

3) область формирования излучения на оптических трассах является достаточно протяженной (около 250–500 км). Соответственно этим значением определяется и горизонтальное разрешение измерений при использовании касательной геометрии. Движение спутника по орбите является дополнительным фактором пространственного осреднения измерений. Подробные оценки горизонтального усреднения для эксперимента с интерферометром MIPAS и их анализ можно найти, например, в работе (Clarmann et al., 2009a);

4) как правило, в подавляющем большинстве случаев при интерпретации результатов измерений излучения (при решении обратной задачи по определению параметров атмосферы) используется приближение сферически однородной атмосферы (COA), при котором учитывается зависимость параметров только от вертикальной координаты.

Таким образом, при традиционном подходе результатом проведения спутникового эксперимента с касательной геометрией по дистанционному зон-

дированию какого-либо параметра атмосферы является набор вертикальных профилей, расположенных, как правило, в плоскости орбиты, при этом каждый из профилей относится к пространственной области порядка 250–500 км по горизонтали. Если учесть большую протяженность как областей формирования излучения на оптических трассах, так и самих трасс, то становится очевидным, что пренебрежение горизонтальными градиентами атмосферных параметров может являться существенной компонентой полной погрешности получаемых результатов. Например, в работах (Ridolfi et al., 2000; Carli et al., 1998) показано, что температурные градиенты 3К/100 км могут приводить к погрешностям определения газового состава по лимбовым измерениям в десятки процентов, если горизонтальная неоднородность не принимается во внимание. Анализ влияния горизонтальных градиентов атмосферных параметров на результаты, получаемые в спутниковых экспериментах с касательной геометрией, был проведен также в работах (Kemnitzer et al., 2002), (Ракитин, Косцов, 2005; Косцов, Ракитин, 2006).

Следует подчеркнуть, что проблема горизонтальной (сферической) неоднородности атмосферы в задачах спутникового дистанционного зондирования на касательных трассах шире, чем просто оценивание дополнительной компоненты погрешности. Основная цель исследований — получение информации о горизонтальных градиентах с максимально достижимым пространственным разрешением, другими словами, определение двумерных и трехмерных полей атмосферных параметров. В простейшем случае двумерное поле определяют с помощью интерполяции в плоскости орбиты результатов, полученных для отдельных сканов в приближении сферически однородной атмосферы. Горизонтальное разрешение измерений такого поля зависит от частоты выполнения отдельных сканов, т.е. от времени, необходимого для регистрации излучения прибором, которое, в свою очередь, в случае использования интерферометров зависит от спектрального разрешения, реализуемого в приборе. Очевидно, что чем дольше происходит регистрация излучения, тем реже сканирование, тем хуже будет горизонтальное разрешение. Для улучшения горизонтального разрешения поля искомого параметра атмосферы, определяемого по результатам спутниковых экспериментов с касательной геометрией измерений, возможно несколько подходов. Первый подход заключается в проведении более частых измерений за счет уменьшения времени регистрации излучения, что достигается в интерферометрах (типа MIPAS) ухудшением спектрального разрешения. Второй подход — извлечение информации о параметре атмосферы не только в прицельной точке, но и в других пространственных областях атмосферы, ответственных за формирование

излучения регистрируемого спутниковым прибором.

Применение второго подхода для определения отношения смеси озона по данным измерений спутникового прибора MIPAS представлено в статьях (Carlotti et al., 2001; Ridolfi et al., 2004). Предлагаемый авторами в данных статьях метод под названием “geo-fit” не использует приближение COA. В основе метода лежит тот факт, что при движении спутника по орбите информация об искомом параметре в некоторой области атмосферы поступает из измерений на нескольких касательных трассах, пересекающих данную область. Таким образом, при наличии измерений прибора за период полного прохода спутника по своей орбите появляется возможность определения двумерного поля искомого параметра в плоскости орбиты на пространственной сетке более частой, чем измерительная сетка, за счет использования информации одновременно от всех касательных трасс, лежащих в плоскости данной орбиты. Используя данный метод, авторы (Carlotti et al., 2001; Ridolfi et al., 2004) провели численный эксперимент для спутникового прибора MIPAS по определению поля отношения смеси озона в плоскости орбиты спутника. Исследования проводились на основе модельных данных о распределении параметров атмосферы, и в качестве начального приближения авторы возмущали вертикальный профиль отношения смеси озона случайным образом, оставляя температуру и давление неизменными. В статье (Ridolfi et al., 2004) этот метод сравнивается с первым подходом, соответствующим проведению более частых измерений спутниковым прибором. Поскольку увеличение частоты измерений в интерферометре MIPAS достигается за счет ухудшения спектрального разрешения, результатом является ухудшение потенциальной точности определения отношения смеси озона. Сравнивая два подхода по улучшению горизонтального разрешения данных спутникового зондирования, авторы делают вывод о том, что подход с более частыми (в 2 раза) измерениями определения отношения смеси озона увеличивает погрешность на 40%, в то время как подход с более частой (в 2 раза) пространственной сеткой (так называемый “geo-fit”) увеличивает погрешность на 100%. Таким образом, проведение более частого высотного сканирования является предпочтительнее решения задачи одновременного определения распределения параметров во всей плоскости орбиты по результатам измерений на всех оптических трассах на этой орбите. Результаты, полученные в эксперименте MIPAS при высокой частоте сканирования с ограниченным спектральным разрешением, с их подробным анализом представлены в работе (Clarmann et al., 2009b).

Подход, аналогичный описанному подходу “geo-fit”, использовался и при интерпретации данных эксперимента SCIAMACHY (Pukite et al., 2007),

поскольку проблема учета горизонтальной неоднородности существует при интерпретации лимбовых измерений рассеянного солнечного излучения в видимой и ультрафиолетовой областях спектра, в частности в эксперименте с аппаратурой SCIAMACHY. В работе (Pukite et al., 2007) показано, что пренебрежение горизонтальной неоднородностью приводит к типичным погрешностям определения концентрации NO_2 20%, а погрешности определения ОСЮ могут достигать 50% в области максимума концентрации в случае, если измерения проводятся вблизи границы Арктического полярного вихря в зимний сезон. Учет неоднородности основан на одновременной интерпретации измерений в северной части орбиты спутника, где атмосферные сканы расположены достаточно близко в пространстве, и их области пространственной чувствительности пересекаются.

В случае спутниковых измерений ИК-излучения задачу двумерного зондирования атмосферы можно решать, используя отдельный набор последовательных оптических трасс с различными прицельными высотами (другими словами, отдельно взятый атмосферный высотный скан). Необходимым условием этого является наличие измерений в спектральных каналах с существенно различной оптической толщиной. В таких каналах области формирования излучения оказываются сдвинутыми на оптической трассе от прицельной точки по направлению к прибору на различное расстояние. На принципиальную возможность этого подхода указывалось достаточно давно, в частности для атмосферы Венеры в работе (Тимофеев и др., 1978) и для атмосферы Земли в работе (Косцов и др., 1992). Работы, в которых подробно анализируется данный подход, нам не известны. В некоторых зарубежных работах содержатся лишь упоминания о нем, например в (Kemnitzer et al., 2002; Papandrea, 2007). В работе (Kemnitzer et al., 2002) подчеркивается аналогия между данным подходом и определением профиля в случае надирной геометрии по спектральным измерениям в каналах различной оптической толщины. Однако в ней делается акцент на адаптацию существующих алгоритмов и программных кодов решения обратных задач для случаев, когда априори известны амплитуды и направления градиентов атмосферных параметров. В работе (Papandrea, 2007) отмечается сложность задачи определения атмосферных параметров в различных точках оптической трассы и предлагается ставить упрощенную задачу по определению градиента.

Цель настоящей работы — подробный анализ указанного подхода для задачи двумерного термического зондирования в полосе CO_2 15 мкм в условиях, близких к условиям спутникового эксперимента с интерферометром MIPAS.

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ И ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

Исходными данными служат измерения уходящего излучения в спектральной области полосы CO_2 15 мкм на наборе касательных трасс с различными прицельными высотами, соответствующими области стратосферы (атмосферный скан). В качестве основного “целевого” параметра рассматривается температура. Значения давления, концентрации углекислого газа и озона рассматриваются как “контролируемые мешающие” параметры. Задача формулируется в терминах вариаций параметров от среднего значения.

Уравнение переноса

$$J(\nu, z_t) = \int_0^{s_0} \varepsilon(\nu, s) \exp \left[- \int_0^s \alpha(\nu, s') ds' \right] ds,$$

где $J(\nu, z_t)$ — интенсивность излучения на частоте ν для прицельной высоты z_t , s — координата вдоль оптической трассы, ε и α — объемные коэффициенты излучения и поглощения, линеаризуется и приводится к виду

$$\delta J(\nu, z_t) = \sum_i \int_0^{s_0} J'_i(\nu, s) \frac{\delta x_i(s)}{x_{im}(s)} ds,$$

где δ обозначает вариацию параметра x , суммирование идет по числу параметров (учитываются как целевые, так и мешающие контролируемые параметры), значок m обозначает среднее значение пара-

метра. Величина $J'_i(\nu, s)$ представляет собой значение вариационной производной интенсивности излучения по параметру, умноженное на среднее значение параметра. Анализ этой величины удобен тем, что позволяет оценивать и сравнивать вклад относительных вариаций параметров в вариацию интенсивности излучения. Ниже для краткости мы будем употреблять термин “производная”, подразумевая вариационную производную, умноженную на среднее значение параметра в рассматриваемой точке трассы.

Линеаризованное уравнение переноса представляется в векторно-матричной форме и решается методом статистической регуляризации.

Для иллюстрации физических основ рассматриваемого метода были проведены расчеты производных интенсивности уходящего излучения по основным параметрам атмосферы — температуре, давлению, содержанию CO_2 и O_3 . Расчеты проводились для спектрального диапазона 680–720 cm^{-1} , значение спектрального разрешения было взято равным 0.05 cm^{-1} , что соответствует разрешению прибора MIPAS. На рис. 1 представлены эти производные в зависимости от координаты вдоль трассы с прицельной высотой 18 км. Различные кривые соот-

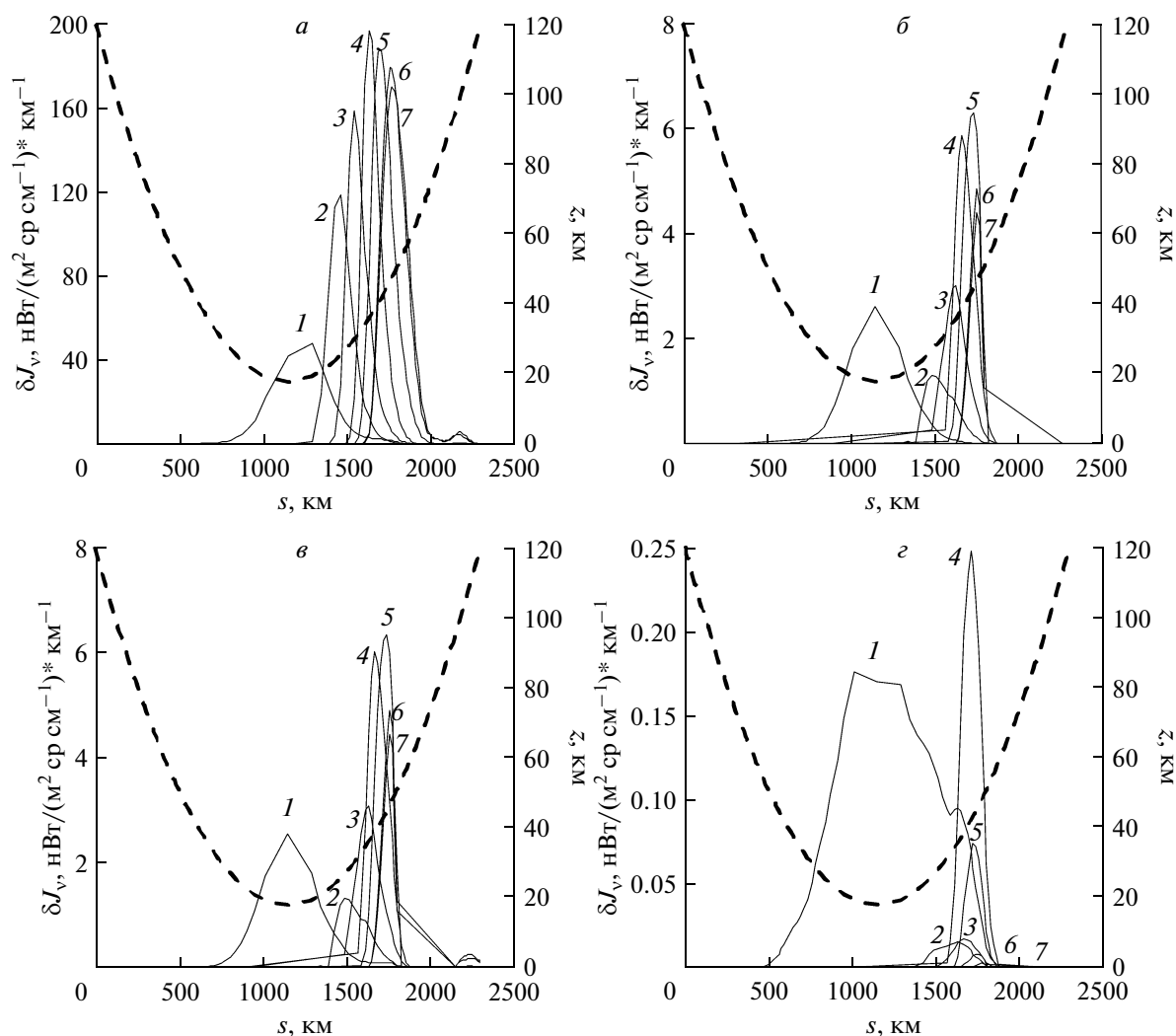


Рис. 1. Производные интенсивности излучения по: *a* – температуре; *б* – давлению; *в* – счетной концентрации CO_2 ; и *г* – счетной концентрации озона в зависимости от координаты вдоль оптической трассы с прицельной высотой 18 км – сплошные линии (каждая линия соответствует отдельному спектральному каналу (см^{-1}): 1 – 713.400, 2 – 688.225, 3 – 683.725, 4 – 682.275, 5 – 683.325, 6 – 687.150, 7 – 680.775). Штриховая линия – высота в зависимости от координаты вдоль трассы (минимум соответствует прицельной точке).

ветствуют различным спектральным каналам из спектрального диапазона, используемого в расчетах. Из приведенного рисунка следует, что чувствительность уходящего излучения к относительному изменению температуры составляет $50 \text{ нВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1}) \text{ км}^{-1}$ в прицельной точке трассы и имеет максимум в точке трассы, удаленной от прицельной на 500 км в направлении прибора со значением $200 \text{ нВт}/(\text{м}^2 \text{ ср см}^{-1}) \text{ км}^{-1}$. Вариации уходящего излучения, обусловленные “мешающими” параметрами (вариациями давления, концентрации CO_2 и озона), значительно меньше, чем вариации интенсивности излучения за счет изменений температуры, что позволяет сделать вывод о малой чувствительности регистрируемого излуче-

ния к изменениям этих параметров в сравнении с чувствительностью к изменению температуры.

В различных спектральных каналах максимальные значения производной по температуре находятся на различном удалении от прицельной высоты. Именно эта особенность является физической основой рассматриваемого дистанционного метода восстановления двумерного поля температуры.

С увеличением прицельной высоты касательной трассы оптическая толщина атмосферы становится меньше, что приводит к смещению максимумов производных к прицельной точке, т.е. к уменьшению протяженности участка, на котором возможно определение температуры вдоль трассы формирования излучения. Для трасс с прицельными высотами 30, 39 и 48 км соответствующие участки состав-

ляют 400, 350 и 300 км от прицельных точек. При этом максимальные значения производных интенсивности излучения по температуре для указанных трасс составляют 150, 120 и 80 нВт/(м² ср см⁻¹)км⁻¹ соответственно.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА, МЕТОД РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ И ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Численный эксперимент проводился с использованием характеристик функционирующего на космической платформе ENVISAT спутникового прибора MIPAS. Для расчетов была выбрана область *R*-ветви полосы поглощения CO₂ 15 мкм, а именно спектральный диапазон от 680 до 720 см⁻¹, который практически соответствует режиму измерений A(685–970 см⁻¹) прибора MIPAS (MIPAS Product Handbook, 2002). Вид спектральной аппаратной функции можно найти в работе (Kostsov et al., 1997), спектральное разрешение составляет 0.05 см⁻¹. В указанном диапазоне волновых чисел использовались 1600 спектральных каналов с шагом между ними 0.025 см⁻¹. Расчеты проводились для набора из 11 касательных трасс с прицельными высотами от 18 до 48 км с шагом между ними в 3 км (отметим, что высотный диапазон сканирования MIPAS 6–68 км). При моделировании измеренных спектров к значениям интенсивности излучения добавлялась случайная составляющая погрешности измерений, соответствующая прибору MIPAS, со стандартным отклонением, рассчитанным по формуле (Kostsov et al., 1997)

$$\delta\varepsilon = 2 \text{ NESR} + J0.02,$$

где NESR (Noise Equivalent Spectral Radiation) – спектральный шум прибора MIPAS для режима измерений A, который составляет 50 нВт/(м² ср см⁻¹), *J* – рассчитанное излучение.

Для каждой касательной трассы из набора решалось отдельное линейаризованное векторно-матричное уравнение

$$\delta y = \mathbf{A} \delta \mathbf{x},$$

где *y* – вектор “измеренной” интенсивности излучения (размерность соответствует числу спектральных каналов); *x* – совокупный вектор параметров атмосферы (состоит из набора значений в точках трассы последовательно температуры, давления, счетных концентраций CO₂ и O₃); *δ* – обозначает вариацию величины от среднего значения; *A* – линейаризованный интегральный оператор прямой задачи, сформированный из производных интенсивности излучения по параметрам атмосферы с соответствующими квадратурными коэффициентами. Содержание углекислого газа входит в уравнение в виде счетной концентрации. Информация о значе-

нии отношения смеси CO₂ в стратосфере, которое постоянно и известно, учитывается как дополнительное условие в алгоритме обращения линейаризованного уравнения, основанном на методе статистической регуляризации. Подробное описание метода статистической регуляризации с учетом дополнительных условий можно найти в работе (Косцов, Тимофеев, 2005). Приведем окончательную итерационную формулу

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_m + \left(\mathbf{A}_k^T \mathbf{S}^{-1} \mathbf{A}_k + \mathbf{D}^{-1} + \sum_{n=1}^N \mathbf{C}_{nk}^T \mathbf{E}_n^{-1} \mathbf{C}_{nk} \right)^{-1} \times \\ \times \left[\mathbf{A}_k^T \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{y}_k + \mathbf{A}_k \delta \mathbf{x}_k) + \sum_{n=1}^N \mathbf{C}_{nk}^T \mathbf{E}_n^{-1} (\mathbf{z}_n - \mathbf{z}_{nk} + \mathbf{C}_{nk} \delta \mathbf{x}_k) \right],$$

где *k* – номер итерации; *x_k* – вектор определяемых параметров на *k*-итерации; *x_m* – вектор средних значений параметров атмосферы; *y_m* – вектор значений интенсивности излучения, рассчитанных для средних значений параметров; *S* – ковариационная матрица случайных ошибок измерений; *D* – априорная ковариационная матрица параметров атмосферы. Параметры *z*, *E* и *C* относятся к дополнительным условиям (общее число условий – количество элементов суммирования *N*). Дополнительные условия записываются в линейаризованной форме

$$\delta z = \mathbf{C} \delta \mathbf{x}.$$

Если представить *z* как “псевдоизмерения”, то для каждого условия можно ввести матрицу ошибок *E*, соответствующую *z*. Эта матрица будет определять точность выполнения условия, другими словами “силу” вводимого ограничения. В проведенных нами численных экспериментах учитывалось два дополнительных условия: 1) информация о значении отношения смеси CO₂ в стратосфере; 2) ограничение на сдвиг решения на отдельном шаге итерационного процесса для обеспечения быстрой сходимости.

Совокупная модельная ковариационная матрица температуры, давления, и концентраций газов *D* формировалась из блоков, соответствующих каждому из рассматриваемых параметров. Для каждого конкретного параметра элементы ковариационной матрицы рассчитывались по формуле

$$\mathbf{D}_{ij} = \sigma_i \sigma_j \exp \left[-\frac{(z_i - z_j)^2}{r_c^2} \right],$$

где *σ_i* и *σ_j* – априорные неопределенности параметра на высотах *z_i* и *z_j*; а *r_c* – радиус корреляции. В наших расчетах значения априорной неопределенности для трасс с прицельными высотами от 18 до 36 км были взяты равными 10 К для температуры и

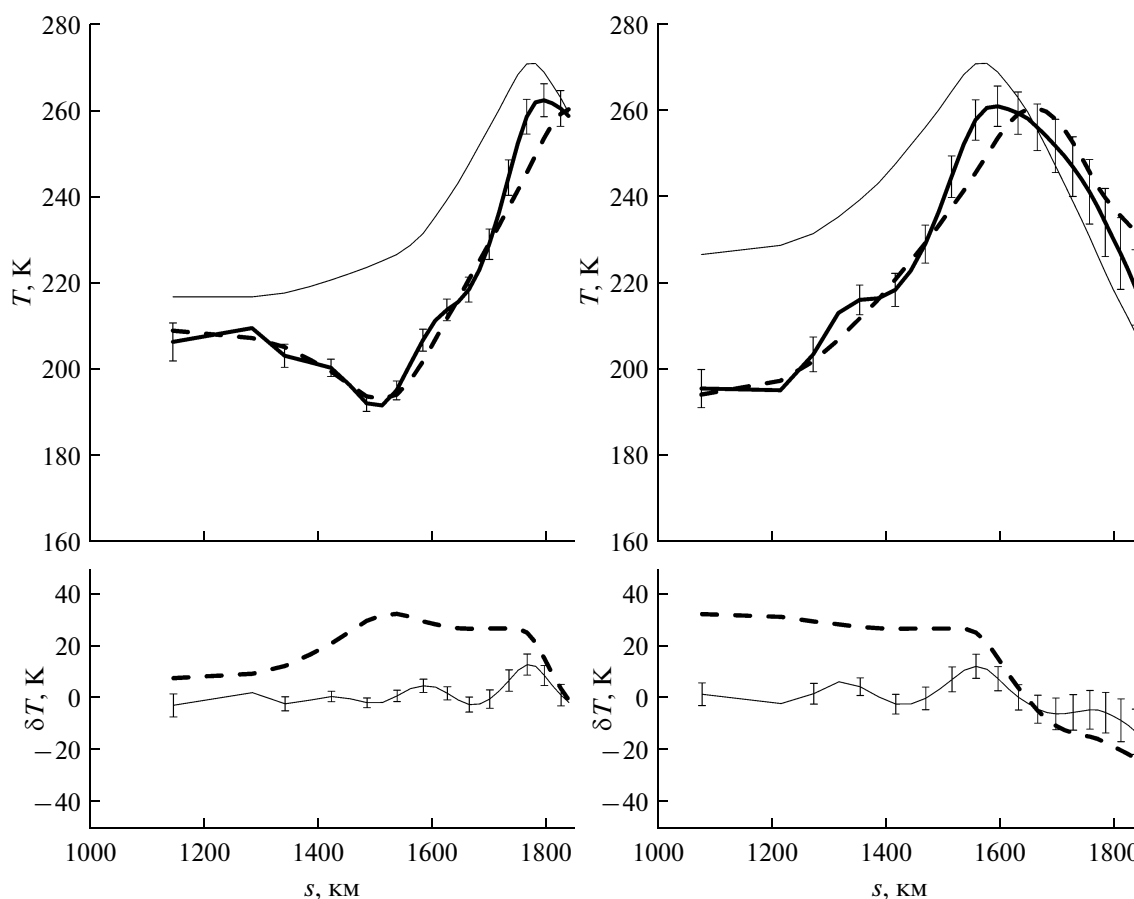


Рис. 2. Результаты определения температуры вдоль трасс с прицельными высотами 18 км (слева) и 30 км (справа). Вверху: тонкая сплошная линия – “среднее” распределение температуры, штриховая линия – “истинное” распределение температуры, жирная сплошная линия – полученное распределение температуры. Внизу: сплошная линия – отличие полученного распределения от “истинного”, штриховая линия – отличие “среднего” от “истинного”, s – координата вдоль трассы. Отрезками обозначены погрешности определения температуры, полученные из расчета матрицы ошибок.

15% для давления и счетных концентраций CO_2 и озона. Для трасс с прицельными высотами от 39 до 48 км – 10 К для температуры, 15% для счетной концентрации CO_2 и 20% для давления и счетной концентрации озона. Для всех трасс и всех параметров радиусы корреляции были выбраны равными 80 км.

Матрица ошибок метода при учете дополнительных условий определяется выражением

$$\mathbf{R}_k = \left(\mathbf{A}_k^T \mathbf{S}^{-1} \mathbf{A}_k + \mathbf{D}^{-1} + \sum_{n=1}^N \mathbf{C}_{nk}^T \mathbf{E}_n^{-1} \mathbf{C}_{nk} \right)^{-1}.$$

Диагональные элементы этой матрицы описывают погрешности определения параметров на различных высотах в атмосфере.

Рассмотрим результаты численных экспериментов. На рис. 2 представлены результаты определения температуры вдоль касательных трасс с прицельными высотами 18 и 30 км. Верхние графики демонстрируют распределения по трассе “средней”, “истинной” и полученной температур. Ниж-

ние графики – соответствующие отличия между ними. Подчеркнем, что отрезками обозначены погрешности, полученные по расчетам матрицы ошибок метода. На каждом из графиков результаты представлены, начиная с прицельной точки соответствующей трассы и до некоторой точки на половине трассы, ближайшей к измерительному прибору.

Прежде всего, обратим внимание на то, что для численных экспериментов были выбраны среднее и истинное распределения температуры по трассам, которые существенно различаются. Отличия достигают по абсолютной величине 35 К. Для прицельной высоты 18 км на участке трассы 1150–1700 км (от прицельной точки до точки, удаленной на 550 км от нее) температура определяется с погрешностью 1.8–3.5 К, наблюдается хорошее согласие восстановленных и истинных распределений температуры, как качественное, так и количественное. На участке трассы 1700–1900 км (удаление от прицельной точки 550–850 км) кривая, полученная в

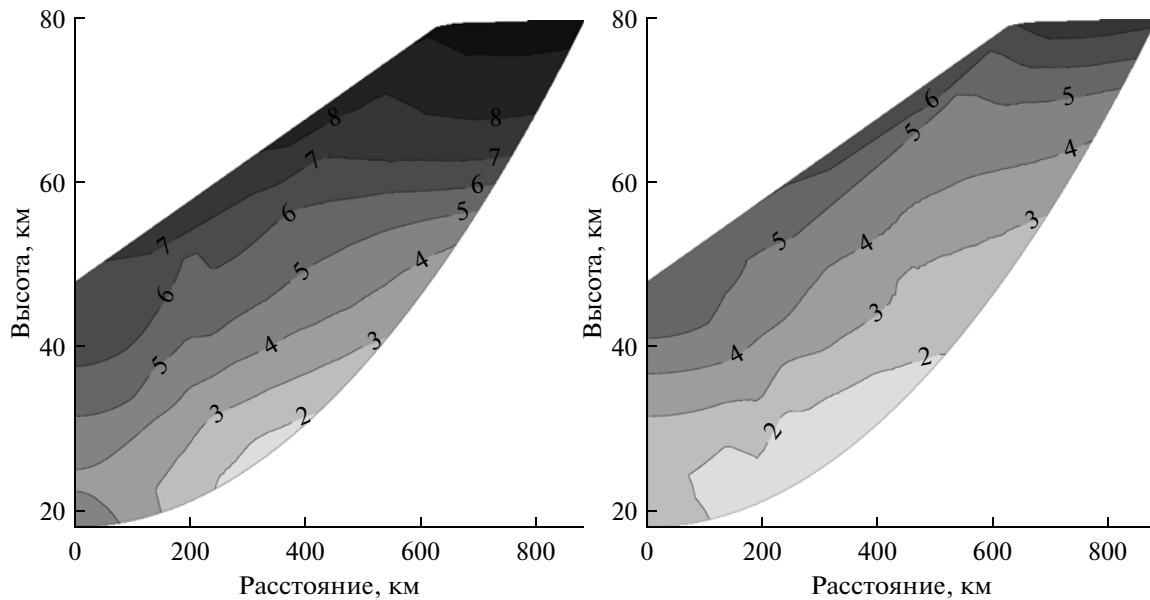


Рис. 3. Потенциальная точность определения двумерной структуры поля температуры (К). Погрешности спектральных измерений соответствуют эксперименту MIPAS (слева) и в 4 раза меньше их (справа).

решении распределения температуры, находится между “истинным” и “средним” распределениями. Погрешности на данном участке возрастают от 3.5 до 6.5 К. Вне указанного интервала по координате уточнения профиля температуры не происходит, так как в измерениях нет фактической информации об этих областях атмосферы (см. рис. 1)

Для прицельной высоты 30 км на участке трассы от 1080 до 1500 км (0–520 км от прицельной точки) наблюдается качественное и количественное согласие восстановленных и истинных значений температуры, при этом погрешности составляют 3.5–4.7 К, заметно превышая соответствующие значения для прицельной высоты 18 км.

Что касается трасс с другими прицельными высотами, то для прицельной высоты 39 км определение температуры в численном эксперименте дает величины, близкие к “истинным” на участке трассы 1020–1300 км (0–280 км от прицельной точки), с погрешностью 5–5.6 К. Для прицельной высоты 48 км на участке трассы 960–1400 км (0–440 км) погрешности определения температуры составляют 6–6.6 К. Таким образом, с ростом прицельной высоты участок реального восстановления температуры в ходе решения обратной задачи уменьшается от 550 км для прицельной высоты 18 км до 280 км для прицельной высоты 39 км. При этом погрешности определения температуры на таких участках увеличиваются от 1.8 до 5.6 К. Для трасс с прицельными высотами выше 39 км погрешности определения температуры превышают 6 К.

Полученные решения обратной задачи для набора касательных трасс позволяют оценить потенциальную точность определения двумерной структу-

ры поля температуры в рассматриваемом подходе. Такие оценки представлены на рис. 3. Ось абсцисс данного рисунка представляет собой расстояние на поверхности Земли. Нулевая координата соответствует точке на поверхности Земли, лежащей на радиусе-векторе, проходящем через прицельные высоты всех касательных трасс по очереди от 18 до 48 км. Для данной точки погрешность определения температуры будет 4 К на высоте 18 км и 7 К на высоте 48 км. При координате, например, 200 км соответствующий радиус-вектор пересечет все касательные трассы в точках, удаленных от прицельных на разное расстояние для каждой трассы, что позволит оценить потенциальные точности определения температуры на высотах 20–55 км и т.д. Из данного рисунка следует, что наилучшая точность достигается на расстоянии 150–550 км от “прицельной” точки на поверхности Земли для высот 20–35 км и составляет 1.8–3 К. С ростом высоты точность ухудшается и достигает 7–8 К на высотах 50–70 км. Возле “прицельной” точки и на большом удалении от нее точности низки и составляют 4–8 К.

В связи с постоянным совершенствованием спутниковой аппаратуры представляет интерес оценить погрешности рассмотренного метода для приборов с более низким уровнем шумов, чем у MIPAS. На рис. 3 справа для примера представлены оценки потенциальной точности определения двумерного поля температуры для спутникового прибора с уровнем шумов в 4 раза меньше, чем у MIPAS. Из рис. 3 видно, что погрешности определения температуры уменьшились на 1–2 К по сравнению с расчетами для стандартного уровня шумов.

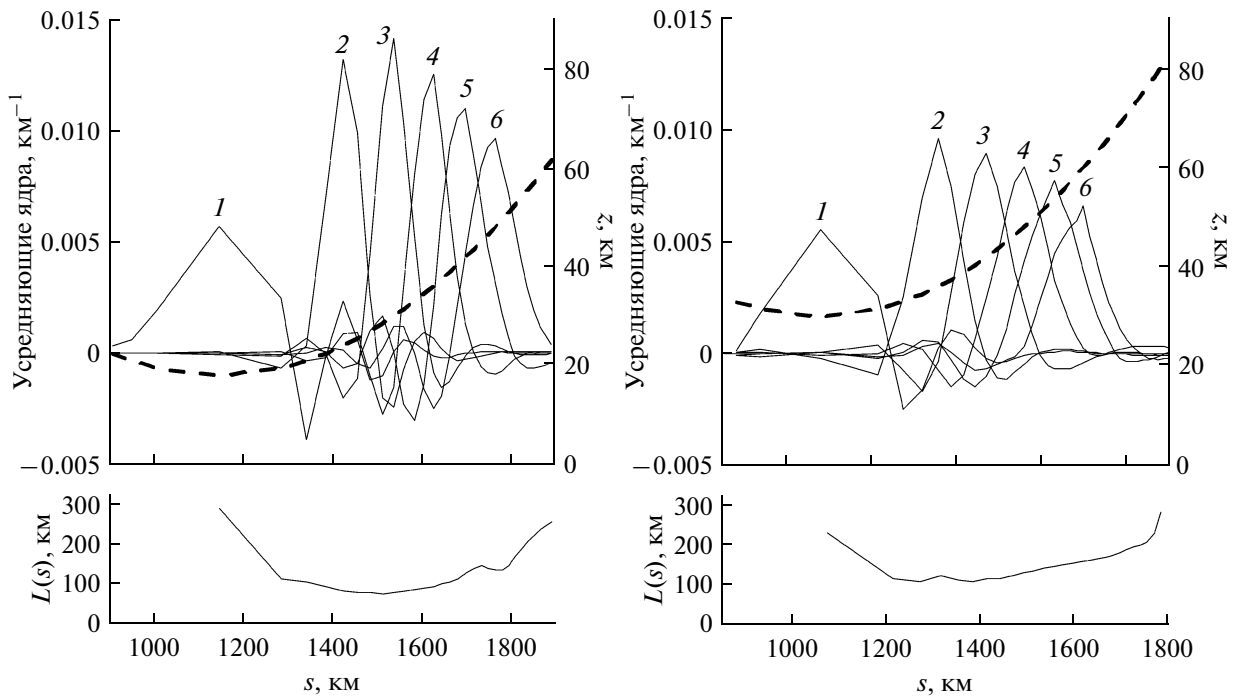


Рис. 4. Усредняющие ядра при определении температуры вдоль касательной трассы (вверху) и величина пространственного разрешения (внизу). Прицельные высоты 18 км (слева) и 30 км (справа). Каждая линия на верхних рисунках соответствует ядру при определении температуры в точке трассы с высотой в атмосфере (км): 1 – 18, 2 – 24, 3 – 30, 4 – 36, 5 – 42, 6 – 48 (слева); 1 – 30, 2 – 36, 3 – 42, 4 – 48, 5 – 54, 6 – 60 (справа). Штриховая линия – высота в зависимости от координаты вдоль трассы. s – расстояние вдоль трассы, $L(s)$ – пространственное разрешение.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ПОЛУЧАЕМЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВДОЛЬ КАСАТЕЛЬНЫХ ТРАСС

Наряду с погрешностью, важной характеристикой результатов дистанционного зондирования является пространственное разрешение. Оценки пространственного разрешения удобно проводить с помощью матрицы усредняющих ядер. В первом приближении вектор определяемых параметров \mathbf{x}_r можно представить в виде линейной комбинации “истинного” вектора параметров атмосферы \mathbf{x}_a и “среднего” \mathbf{x}_m (Rodgers, 2000)

$$\mathbf{x}_r = \mathbf{x}_m + \mathbf{B}(\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_m),$$

где \mathbf{B} – матрица усредняющих ядер. Перепишем это выражение для вариаций векторов параметров атмосферы (отклонение от “среднего”)

$$\delta \mathbf{x}_r = \mathbf{B} \delta \mathbf{x}_a.$$

Тогда элементы матрицы \mathbf{B} можно представить в виде

$$B_{ij} = \frac{\delta x_{ri}}{\delta x_{aj}}.$$

В поставленной задаче матрица усредняющих ядер будет иметь следующее выражение:

$$\mathbf{B} = \left(\mathbf{A}^T \mathbf{S}^{-1} \mathbf{A} + \mathbf{D}^{-1} + \sum_{n=1}^N \mathbf{C}_n^T \mathbf{E}_n^{-1} \mathbf{C}_n \right)^{-1} \times \\ \times \left[\mathbf{A}^T \mathbf{S}^{-1} \mathbf{A} + \sum_{n=1}^N \mathbf{C}_n^T \mathbf{E}_n^{-1} \mathbf{C}_n \right].$$

Усредняющие ядра играют роль “аппаратной функции” и могут служить мерой пространственного разрешения косвенных измерений (Тимофеев, Поляков, 2001). Количественно “толщину” усредняющих ядер Гильберт и Бэкус предложили характеризовать следующей величиной (Cram, 1978):

$$L(s) = N \int (s' - s)^2 B^2(s, s') ds',$$

где для поставленной задачи s и s' – координата вдоль трассы; N – нормирующий множитель, подбираемый в зависимости от формы усредняющих ядер. Величину L будем ниже рассматривать как характеристику пространственного разрешения.

На рис. 4 приведены на верхних графиках усредняющие ядра для температуры в нескольких точках трассы (они имеют максимумы в соответствующих точках трассы), а на нижних – кривая, показывающая пространственное разрешение по трассе (прицельные высоты 18 и 30 км). Для прицельной высоты 18 км на участке трассы 1150–1500 км (0–350 км от прицельной точки) пространственное разрешение

ние улучшается от 280 до 73 км. Далее, до 1650 км (350–500 км от прицельной точки), оно не превышает 100 км, и затем наблюдается ухудшение до 260 км в точке трассы с координатой 1900 км (750 км от прицельной точки). Для прицельной высоты 30 км высокое пространственное разрешение достигается на участке трассы 1200–1500 км (120–420 км от прицельной точки) со значениями 100–130 км. В прицельной точке оно составляет около 230 км.

Анализ аналогичных расчетов для прицельных высот 39 км и 48 км показал, что наилучшее пространственное разрешение достигается на участках 1200–1500 км (порядка 200–500 км от прицельных точек) и составляет 140–190 км и 180–240 км соответственно.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проанализирован спутниковый метод двумерного термического зондирования стратосферы, основанный на особенностях формирования спектров уходящего ИК-излучения лимба Земли в 15 мкм полосе CO_2 в спектральных каналах с различной оптической плотностью. На основе анализа производных интенсивности уходящего излучения по различным параметрам атмосферы и результатов численных экспериментов по определению распределения температуры вдоль оптических трасс показано, что:

1) специфика формирования уходящего излучения в спектральных интервалах 15 мкм полосы CO_2 с различной оптической плотностью может являться физической основой для получения информации о двумерном поле температуры на высотах 18–39 км. Соответствующие этому диапазону высот области зондирования температуры вдоль касательных трасс составляют по протяженности 280–550 км от прицельной точки по направлению к прибору и зависят от прицельной высоты трассы, уменьшаясь с ее увеличением;

2) величины производных по “мешающим” параметрам (давление, счетные концентрации CO_2 и O_3) значительно меньше по сравнению с производными по температуре на прицельных высотах нижней и средней стратосферы. Для прицельных высот, соответствующих верхней стратосфере, влияние мешающих параметров может оказаться значимым;

3) с ростом прицельной высоты погрешности определения температуры в областях зондирования увеличиваются от 1.8 до 5.6 К. Точности определения температуры в прицельных точках трасс составляют 4–5.5 К;

4) уменьшение спектрального шума спутникового прибора в 4 раза по сравнению со стандартным шумом для прибора MIPAS приводит к уменьшению погрешностей определения двумерного поля температуры на 1–2 К;

5) горизонтальное разрешение при определении температуры на высотах стратосферы составляет 73–200 км, что в несколько раз лучше, чем при традиционном подходе к решению обратной задачи (при использовании модели горизонтально однородной атмосферы).

Отметим, что Всемирной метеорологической организацией сформулированы требования к точности и пространственному разрешению определения температуры (Тимофеев, 2010). Так для задач синоптической метеорологии горизонтальное разрешение должно быть не хуже 200 км, а точность определения температуры должна быть не хуже 3 К для нижней стратосферы и 5 К для верхней атмосферы. Таким образом, рассмотренная методика позволяет в основном удовлетворить международные требования к определению температуры стратосферы как по погрешностям измерений, так и по пространственному разрешению.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 09-05-00797-а, а также грантов РНП №. 2.1.1.1138 и РНП №. 2.2.1.1.3846.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Косцов В.С., Ракитин А.В.* Погрешности приближения сферически однородной атмосферы в задаче расчета уходящего неравновесного излучения в полосе озона 9.6 мкм на касательных трассах в мезосфере // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 5. С. 38–48.
- Косцов В.С., Розанов В.В., Тимофеев Ю.М., Грассл Х., Кутенов А.А.* Спектральная структура неравновесного уходящего излучения горизонта в полосе поглощения CO_2 15 мкм // Физика атмосферы и океана. 1992. Т. 28. № 3. С. 283–293.
- Косцов В.С., Тимофеев Ю.М.* Озон в мезосфере по данным спутникового эксперимента CRISTA-1: 1. Метод определения вертикальных профилей и анализ его точности // Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 2. С. 58–71.
- Ракитин А.В., Косцов В.С.* Границы применимости приближения сферически однородной атмосферы в задаче спутникового дистанционного ИК-зондирования мезосферы на касательных трассах // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 5. С. 10–17.
- Тимофеев Ю.М. и др.* Термическое зондирование надоблачной атмосферы Венеры // Проблемы физики атмосферы. Вып. 15. Л.: ЛГУ, 1978. С. 129–139.
- Тимофеев Ю.М., Поляков А.В.* Математические аспекты решения обратных задач атмосферной оптики. СПб.: СПбГУ, 2001. 188 с.
- Тимофеев Ю.М.* Глобальная система мониторинга параметров атмосферы и поверхности. СПб.: СПбГУ, 2010. 130 с.
- Carli B., Ridolfi M., Raspollini P., Dinelli B.M., Dudhia A., Echle G.* Study of the retrieval of atmospheric trace gas profiles from infrared spectra // Fin. Rep. ESA Study 12055-96-NL-CN (European Space Research and Technology Centre, Noordwijk, The Netherlands, 1998).

- Carlotti M., Dinelli B.M., Raspollini P., Ridolfi M.* Geo-fit approach to the analysis of satellite limb-scanning measurements // *Appl. Opt.* 2001. V. 40. № 12. P. 1872–1885.
- Clarmann T.V., De Clercq C., Ridolfi M., Hoepfner M., Lambert J.C.* The horizontal resolution of MIPAS // *Atmos. Meas. Tech.* 2009a. № 2. P. 47–54.
- Clarmann T.V., Hoepfner M., Kellmann S., Linden A., Chauhan S., Funke B., Grabowski U., Glatthor N., Kiefer M., Schieferdecker T., Stiller G.P., Versick S.* Retrieval of temperature, H₂O, O₃, HNO₃, CH₄, N₂O, ClONO₂ and ClO from MIPAS reduced resolution nominal mode limb emission measurements // *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* 2009b. № 2. P. 181–236.
- Cram L.E.* Inversion problem in radiative transfer theory: The Backus-Gilbert formalism // *J. Quant. Spectr. Rad. Trans.* 1978. V. 20. P. 305–315.
- Kemnitzer H., Hilgers S., Schwarz G., Steck T., von Clarmann T., Hoepfner M., Ressel K.* Trace gas retrieval including horizontal gradients // *Adv. Space Res.* 2002. V. 29. № 11. P. 1631–1636.
- Kostsov V.S., Polyakov A.V., Timofeyev Yu.M.* Study for the intercomparison between the global fit and the optimal estimation methods in case of the MIPAS Space Experiment // *Forschungszentrum Karlsruhe Contract Rep.* 1997. 105 p.
- MIPAS Product Handbook. ESA. 2002.
- Papandrea E.* Tomographic Inversion of MIPAS Measurements; Optimization of Retrieval Grids and Generation of Innovative Products. PhD Thesis. University of Bologna, 2007. 125 p.
- Pukite J., Kuehl S., Deutschmann T., Platt U., Wagner T.* Accounting for the effect of horizontal gradients in limb measurements of scattered sunlight // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2007. № 7. P. 16155–16183.
- Ridolfi M., Carli B., Carlotti M., Clarmann T.V., Dinelli B.M., Dudhia A., Flaud J.M., Hoepfner M., Morris P.E., Raspollini P., Stiller G., Wells R.J.* Optimized forward model and retrieval scheme for MIPAS near-real-time data processing // *Appl. Opt.* 2000. V. 39. P. 1323–1340.
- Ridolfi M., Magnani L., Carlotti M., Dinelli B.M.* MIPAS-ENVISAT limb-sounding measurements: trade-off study for improvement of horizontal resolution // *Appl. Opt.* 2004. V. 43. № 31. P. 5814–5824.
- Rodgers C.D.* Inverse methods for atmospheric sounding. Theory and practice // *Series on Atmospheric, Oceanic and Planetary Physics V. 2.* Singapore – New Jersey – London – Hong-Kong: World Scientific, 2000. 238 p.

Accuracy Estimations for the Problem of Two-Dimensional Temperature Sounding of the Stratosphere Using Space-Borne High Spectral Resolution Limb Radiation Measurements in the CO₂ 15 μm Band

A. V. Rakitin, V. S. Kostsov, Yu. M. Timofeyev

Faculty of Physics, St. Petersburg State University

The problem of the retrieval of temperature distribution along the line-of-sight (LOS) from space-borne high spectral resolution measurements of limb radiation in the CO₂ 15 m band is formulated and analyzed on the basis of numerical experiments. The measurement scenario has been chosen similar to scenario of the MIPAS experiment. It is demonstrated that two-dimensional temperature field can be obtained as a result of processing measurements with various tangent heights, if spectral channels with considerably different optical thickness are used. The accuracy of temperature retrieval in the stratosphere ranges from 1.8 to 5.6 K depending on the tangent height of LOS and the distance from tangent point. The highest horizontal resolution is about 73–100 km and is achieved for LOS with tangent altitude of about 18–20 km.

Keywords: stratosphere, thermal sounding, satellite measurements of radiation, limb geometry