

БЫСТРАЯ РАДИАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО ИК-ЗОНДИРОВЩИКА СПУТНИКОВ СЕРИИ “МЕТЕОР-М”

© 2013 г. А. Б. Успенский¹, А. Н. Рублев¹, Е. В. Русин², В. П. Пяткин²

¹ФГБУ “НИЦ “Планета”, Москва

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

E-mail: alex.rublev@mail.ru

Поступила в редакцию 06.05.2013 г.

Рассмотрены методические и вычислительные аспекты создания быстрых радиационных моделей (БРМ), предназначенных для анализа и валидации данных измерений спутниковой гиперспектральной аппаратуры – ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения. Приведено описание БРМ для анализа и моделирования измерений ИК-Фурье-спектрометра ИКФС-2 полярно-орбитальных метеоспутников серии “Метеор-М”, созданной на основе известной БРМ RTTOV. Оценивается вычислительная производительность и приводятся результаты верификации созданной БРМ, полученные путем сравнения модельных расчетов с точными полинейными расчетами для ИК-зондировщика ИКФС-2. Обсуждается повышение вычислительной производительности и точности БРМ за счет использования алгоритмов метода главных компонент. Рассмотрено построение радиационных моделей, использующих алгоритм метода Монте-Карло и пригодных для анализа и моделирования данных ИК-зондировщиков при наличии облачности в поле зрения прибора.

Ключевые слова: быстрая радиационная модель, ИК-зондировщик ИКФС-2, моделирование спутниковых измерений, RTTOV, оптическая толщина, якобиан, алгоритм Монте-Карло

DOI: 10.7868/S0205961413060109

ВВЕДЕНИЕ

Для обработки и анализа данных измерений гиперспектрального ИК-зондировщика ИКФС-2 (инфракрасный Фурье-спектрометр-2), устанавливаемого на российских метеоспутниках серии “Метеор-М”, требуется создание быстрых и высокоточных процедур радиационных расчетов. Указанные процедуры и соответствующие программные комплексы (быстрые радиационные модели (БРМ)) предназначены для:

– валидации измеряемых спектров уходящего инфракрасного (ИК) излучения и мониторинга качества абсолютной калибровки;

– тематической обработки или “обращения” спутниковых данных, т.е. восстановления различных параметров состояния системы “атмосфера–подстилающая поверхность” (Rodgers, 2000; Успенский и др., 2005);

– усвоения спутниковых данных в схемах численного анализа и прогноза погоды (Saunders et al., 1999).

Создаваемые БРМ должны обеспечить высокое быстродействие моделирования измеряемых спектров при погрешности расчетов на уровне

инструментального шума. Кроме того, с помощью БРМ необходимо выполнять расчеты ряда характеристик переноса ИК-излучения в атмосфере (оптические толщины, функции пропускания), а также вычислять вариационные производные (якобианы) смоделированных измерений по различным параметрам состояния системы атмосфера–подстилающая поверхность.

В настоящее время существует несколько программных комплексов, предназначенных для моделирования и анализа данных ИК-зондировщиков IASI, AIRS, CrIS, устанавливаемых на полярно-орбитальных метеоспутниках EPS/Metop, EOS/Aqua, Suomi-NPP соответственно (Успенский и др., настоящий выпуск). Большинство указанных комплексов (RTTOV, RTIASI, SARTA), которые за рубежом принято называть FRTM (Fast Radiative Transfer Model – быстрая модель радиационного переноса), базируется на параметризации результатов точного спектрального полинейного (line-by-line – LBL) и пространственного интегрирования уравнения переноса ИК-излучения для плоскопараллельной безоблачной атмосферы. Источником информации о параметрах спектральных линий для LBL-моделей типа LBLRTM

являются спектроскопические базы данных HITRAN (версии 2004, 2008 гг).

В статье рассмотрено построение БРМ для анализа данных ИКФС-2 (БРМ/ИКФС) на основе известного комплекса RTTOV (Saunders et al., 1999), см. <http://nwpsaf.org>. Дано краткое описание методики построения БРМ/ИКФС, ее программной реализации, приводятся результаты валидации радиационных расчетов. Показаны возможности применения алгоритмов метода главных компонент для повышения точности и быстродействия БРМ. Отдельный раздел посвящен описанию комплекса радиационных расчетов достаточно высокой производительности, основанного на алгоритме метода Монте-Карло. С помощью этого комплекса можно производить радиационные расчеты и анализировать данные ИК-зондировщиков при наличии облачности в поле зрения прибора.

МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ БЫСТРЫХ РАДИАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Гиперспектральный ИК-зондировщик ИКФС-2/“Метеор-М” измеряет спектры уходящего ИК-излучения (2701 каналов в области 667–2000 см⁻¹ или 5.0–15.0 мкм), причем общее время измерения одного спектра составляет 0.7 с (Завелевич и др., 2008). Это предъявляет высокие требования к быстродействию БРМ – время моделирования сигнала (интенсивности ИК-излучения, регистрируемой в одном канале) не должно превосходить нескольких миллисекунд. Такая скорость вычислений может быть достигнута путем использования простых аналитических выражений или интерполяционных схем без привлечения алгоритмов численного интегрирования уравнения переноса (спектрального и пространственного).

Рассмотрим кратко принципы построения подобных БРМ на примере FRTM RTTOV, SARTA (Saunders et al., 1999; Успенский и др., 2005; Strow et al., 2003). Основное назначение программных комплексов RTTOV (последние версии – RTTOV-10, RTTOV-11) – быстрый и достаточно точный расчет измеряемых на верхней границе атмосферы (ВГА) спектров уходящего излучения \mathbf{R} по заданному вектору состояния \mathbf{x} : $\mathbf{R} = H(\mathbf{x})$, где H – оператор уравнения переноса или оператор прямой задачи. Компонентами вектора \mathbf{x} являются профили температуры $T(p)$, отношения смеси водяного пара $q(p)$ и озона $Q(p)$, заданные на фиксированной сетке давлений $\{p_i\}$, а также T_s , ϵ (температура и излучательная способность поверхности) и T_a , q_a (температура и влажность воздуха в приповерхностном слое). В последних версиях RTTOV предусмотрено расширение \mathbf{x} за счет включения данных о параметрах облачности. Комплекс RTTOV позволяет также вычислить матрицу якобианов G (вариационных или функциональных производных \mathbf{R} по \mathbf{x}), с по-

мощью которой рассчитываются вариации излучения δR , соответствующие вариациям компонентов вектора состояния $\delta \mathbf{x}$ относительно исходного состояния \mathbf{x}_0 : $\delta \mathbf{R} = G(\mathbf{x}_0)\delta \mathbf{x}$.

Комплексы RTTOV обеспечивают моделирование измерений различных спутниковых радиометров, включая уже упомянутые ИК-зондировщики AIRS, IASI, CrIS. Специально разработанный для моделирования данных IASI программный комплекс RT IASI по принципам построения и использованным атмосферным моделям полностью соответствует RTTOV. Для моделирования и анализа измерений зондировщика AIRS разработан комплекс быстрых радиационных расчетов SARTA – Stand alone AIRS Radiative Transfer Algorithm. Методология быстрых расчетов характеристик переноса подобна используемой в RTTOV (Strow et al., 2003).

За основу при разработке БРМ применительно к ИК-зондировщику ИКФС-2 была принята методология создания RTTOV, основанная на “быстром” вычислении эффективных оптических толщин атмосферных слоев. Под эффективной оптической толщиной j -го слоя атмосферы на частоте, соответствующей центру выбранного канала, понимается величина $\Delta\phi_j$, для набора которых $\{\Delta\phi_j, j = 1, \dots, N\}$ выполняется соотношение

$$e^{-\sum_j^N \Delta\tau_j} = \Gamma.$$

Здесь N – число слоев атмосферы между земной поверхностью и ВГА, Γ – функция пропускания излучения атмосферы в данном канале (точнее, результат интегрирования функции пропускания со спектральной аппаратной функцией канала). Высокая скорость вычислений эффективных толщин $\Delta\phi_j$ достигается применением множественной линейной регрессии, в которой используются заранее выбранные предикторы – параметры состояния атмосферы или их функционалы для заданного зенитного угла наблюдений. Конкретный вид и параметры регрессии определяются на основе результатов точных радиационных расчетов со строгим полинейным учетом спектров поглощения атмосферных газов.

Вычисление эффективной оптической толщины в RTTOV выполняется суммированием определяемых в заданной последовательности вкладов поглощения отдельных газов. В версии RTTOV 9.1(принятой в качестве базовой при разработке БРМ) индивидуально учитывается поглощение ИК-излучения шестью газовыми компонентами: водяным паром H₂O, диоксидом углерода CO₂, озоном O₃, оксидом азота N₂O, оксидом углерода CO и метаном CH₄. Концентрации остальных оптически активных газов считаются постоянными, а их совокупный вклад в значение эффективной опти-

Таблица 1. Общее время (с) моделирования данных ИКФС-2 с помощью БРМ/ ИКФС и LBLRTM

Модель	Количество моделируемых каналов										
	2701	2500	2000	1500	1000	500	300	100	50	10	1
БРМ/ИКФС	1.3	1.2	0.96	0.72	0.48	0.24	0.14	0.049	0.026	0.007	0.003
LBLRTM	45.0	40.0	32.7	23.5	18.5	11.3	7.7	4.0	2.8	1.6	1.3

ческой толщины вычисляется отдельной суммарной функцией.

В качестве “точных” значений эффективных оптических толщин (“предиктантов” в уравнении регрессии) были использованы результаты расчетов с помощью точной полинейной модели LBLRTM (версия 11.7, январь 2010 г.). Модель LBLRTM разработана в американской корпорации AER (Atmospheric and Environmental Research, Inc) и находится в открытом доступе на сайте http://www.rtweb.aer.com/lblrmt_frame.html. Основным достоинством LBLRTM является то, что в ней учитываются последние достижения в области атмосферной спектроскопии, и она проходит тщательную экспериментальную проверку в рамках американской программы ARM и других натуральных экспериментов. Модель LBLRTM использовалась для расчетов монохроматических оптических толщин атмосферных слоев с высоким (0.0005 см^{-1}) спектральным разрешением, на основании которых затем выполнялся расчет аподизированных функций пропускания.

Для нахождения регрессионных коэффициентов используется обучение БРМ на представительном глобальном наборе из 83 моделей атмосферы (Matricardi, 2008). Указанный набор был ранее отобран при построении БРМ, предназначенной, в частности, для моделирования и анализа данных IASI, AIRS. В обучающем наборе вертикальные профили температуры и концентрации всех учитываемых газов-поглощителей заданы на 101 уровне давления. В вычислениях используется также “опорный” профиль, содержащий средние значения температур и концентраций. Вся спектральная область измерений ИКФС-2 разбита на 13 прилегающих спектральных диапазонов, для каждого из которых использован свой набор (от 73 до 89) предикторов.

Описанная методология стала основой при создании специализированного программного комплекса быстрого моделирования спутниковых измерений БРМ/ИКФС. Комплекс реализован в среде Microsoft Visual Studio 2008 на языках C++ и Fortran и обеспечивает построение БРМ и выполнение радиационных расчетов.

Время выполнения операции моделирования (в сек) для различного числа каналов с помощью БРМ/ИКФС в сравнении с “точными” вычисле-

ниями (LBLRTM) приведено в табл. 1. Замеры выполнялись на ПЭВМ с центральным процессором Intel Core i5 650 3.20 ГГц и 4 Гб оперативной памяти. Как видно, созданная БРМ обеспечивает существенное (30–200-кратное) ускорение по сравнению с LBLRTM. Для оперативного анализа данных ИКФС-2 требуется дальнейшее повышение вычислительной производительности БРМ, в связи с чем начаты методические проработки, связанные с распараллеливанием вычислений. Основой для распараллеливания вычислений является то, что моделирование измеренных спектров можно выполнять с помощью созданной БРМ/ИКФС одновременно для набора пикселей, меняя только входные данные (вектор состояния x).

В отсутствие прямых спутниковых измерений ИКФС-2 для валидации и оценки точности БРМ-спектры, рассчитанные с помощью БРМ/ИКФС и LBLRTM во всем рабочем спектральном диапазоне спектрометра ($660–2000 \text{ см}^{-1}$), сравнивались между собой. Сопоставление приведено для упомянутого выше обучающего набора атмосферных моделей, а также независимого набора стандартных моделей WCP-112. Приведенные на рис. 1 (см. на цветн. вклейках) кривые показывают, что среднеквадратическая невязка результатов расчетов БРМ и LBLRTM не превышает 0.3 К и всегда меньше 0.75 К. Важно при этом, что хорошее совпадение результатов наблюдается в полосе поглощения CO_2 в диапазоне $660–750 \text{ см}^{-1}$ — основном участке спектра, измерения в котором используются для восстановления вертикальных профилей температуры.

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ МГК ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ БЫСТРЫХ МОДЕЛЕЙ РАДИАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ

Согласно современным исследованиям наиболее эффективными по своему быстрдействию и точности являются радиационные модели, основанные на алгоритмах метода главных компонент (МГК). Алгоритмы МГК применяются для “сжатия” данных ИК-зондировщиков и фильтрации инструментального шума (Huang, Antonelly, 2001; Aires et al., 2002; Успенский и др., 2003), а также для построения супер-быстрых моделей радиационных расчетов (Liu et al., 2005). В сравне-

нии с моделями типа RTTOV, SARTA, RT IASI супербыстрые модели имеют производительность в 3–30 раз выше, что позволяет эффективно “обращать” и усваивать большие объемы спутниковых данных. Супербыстрые модели радиационных расчетов, использующие МГК, называют PCRTM (Principal Component Radiative Transfer Model) или БРМГК (быстрая радиационная модель, использующая МГК).

Теоретической основой использования МГК для построения PCRTM является большая избыточность измерений ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения; вследствие большого количества “подобных” линий поглощения многие каналы “подобны” друг другу, что приводит к избыточности поканальных радиационных расчетов, реализованных в комплексах RTTOV, SARTA, RT IASI. Рассмотрим в качестве примера практической реализации описанного подхода комплекс PC_RTTOV, разработанный (Matricardi, 2010) и интегрированный в версию 10.2 пакета RTTOV (RTTOV 10.2, доступен с января 2012 г. на сайте <http://nwpsaf.org>).

Техника использования алгоритмов МГК при построении БРМГК включает два этапа. На первом этапе рассчитывается ковариационная матрица спектров “канал–канал”. Для этого используются программа точных расчетов (LBLRTM) и репрезентативная выборка атмосферных моделей. Монохроматические радиации рассчитывались с шагом 0.001 см^{-1} , а затем “свертывались” со спектральной аппаратной функцией конкретного ИК-зондировщика (IASI, AIRS). Общий объем выборки моделированных спектров для пяти значений зенитных углов составляет 5195 реализаций. В вычислительном плане это трудоемкая задача, но необходимые расчеты выполняются однократно и могут быть сделаны заранее. Для уменьшения трудоемкости расчетов весь спектр разделен на несколько прилегающих областей. Для каждой из областей и соответствующей ковариационной матрицы определяются собственные векторы (с.в.) и собственные значения (с.з.). Старшие с.в., упорядоченные в соответствии с убыванием с.з., образуют базис эмпирических ортогональных функций (ЭОФ).

На втором этапе вектор $\delta \mathbf{R}_j = \mathbf{R}_j - \bar{\mathbf{R}}$ отклонений измеренного спектра \mathbf{R}_j от среднего спектра $\bar{\mathbf{R}}$ аппроксимируется разложением по базису ЭОФ, используя метод наименьших квадратов (МНК). При этом для определения коэффициентов разложения (главных компонент (ГК)) можно использовать данные измерений не во всех каналах, а только в m наиболее информативных каналах. С формальной точки зрения для применения МНК достаточно воспользоваться данными в $m \geq n_c$ каналах (n_c – размерность базиса ЭОФ).

Применительно к данным IASI весь спектр ($645\text{--}2760 \text{ см}^{-1}$) разбит на три области: I ($645\text{--}1210 \text{ см}^{-1}$); II ($1200\text{--}2000 \text{ см}^{-1}$); III ($2000\text{--}2760 \text{ см}^{-1}$). Для каждой области определены свои базисы ЭОФ: 40 для области I; по 30 для областей II и III. При моделировании сигналов в наиболее информативных каналах вместо многократных расчетов с помощью LBLRTM целесообразно применять пакет RTTOV. Это приводит к заметному сокращению объема вычислительной работы при моделировании полного спектра. Кроме того, как показали численные эксперименты, новая БРМ (названная PC_RTTOV) при надлежащем выборе параметров (количество главных компонент 200–300 и количество предикторов 300–400 для моделирования данных IASI) обеспечивает повышение точности моделирования полного спектра, по сравнению с использованием RTTOV.

Сравнение результатов моделирования спектров IASI с помощью LBLRTM и PC_RTTOV дает величины среднеквадратической невязки $\sim 0.05 \text{ К}$ для большинства каналов, что свидетельствует о повышении точности моделирования с помощью PC_RTTOV. Сравнение измеренных спектров IASI с модельными спектрами, полученными с помощью RTTOV (RT IASI) и PC_RTTOV, дает близкие результаты. При этом PC_RTTOV обеспечивает значительный выигрыш в быстродействии, по сравнению с комплексом RT IASI. Для моделирования спектра IASI с помощью RT IASI требуется 0.39 с (без расчета вариационных производных) и более 0.8 с с их расчетом. Расчет спектра IASI с помощью PC_RTTOV требует 0.045 с. Для расчета сигналов и вариационных производных в 100 каналах нужно 0.038 с.

РАДИАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ ИК-ЗОНДИРОВЩИКА В УСЛОВИЯХ ОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

Применительно к спутниковым ИК-зондировщикам высокого спектрального разрешения необходимо создание радиационных моделей, которые могли бы использоваться для анализа и валидации спектров уходящего излучения, измеренных в условиях облачной атмосферы. Для этих целей был разработан трехмерный алгоритм метода Монте-Карло (Метод Монте-Карло..., 1976), основанный на моделировании сопряженных траекторий фотонов (Рублев и др., 2004). Радиационная модель, использующая созданный алгоритм (кратко алгоритм МК), предназначена для расчета аподизированных значений интенсивностей и якобианов уходящего излучения в каналах ИК-зондировщиков IASI и ИКФС-2 и в дальнейшем тексте названа РМ-МК.

В качестве исходных данных РМ-МК может использоваться, наряду с горизонтально однородными моделями атмосферы (при отсутствии об-

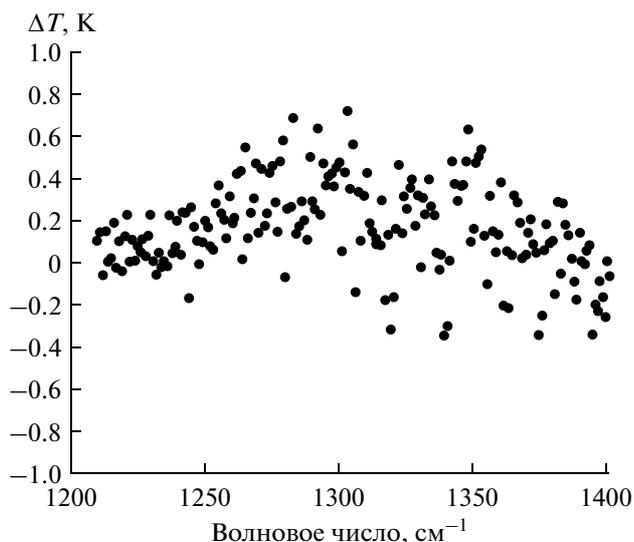


Рис. 3. Разность яркостных температур в спектральном диапазоне 1200–1400 см^{-1} , рассчитанных с помощью РМ-МК и модели (Trotsenko et al., 2001).

лачности), атмосферные модели при наличии разорванной и многослойной облачности, например, подобные рассмотренным в (Рублев и др., 2004) и разработанные на основе известного набора NOAA 88/89 радиозондовых измерений. Геометрическая схема расчетов в РМ-МК показана на рис. 2 (на цветн. вклейках).

Моделирование сопряженных траекторий начинается на верхней границе атмосферы (ВГА) в направлении оси визирования спутниковой аппаратуры (т.е. фотон движется в направлении, противоположенном стрелкам на рис. 3), а заканчивается при поглощении фотона в атмосфере, на поверхности или при его уходе в космос через ВГА. Координаты стартовой точки равномерно распределены в пределах квадрата со стороной $L = 50$ км.

Интенсивность уходящего излучения I рассчитывается как математическое ожидание

$$I = (\Delta \cdot W) \quad (1)$$

энергетических вкладов W фотонов для всех смоделированных траекторий. Индикатор Δ принимает значение 1 или 0, в зависимости от того, произошло поглощение фотона или нет. Энергетический вклад фотона W с частотой ν в оцениваемую интенсивность I определяется функцией Планка $B(\nu, T)$, т.е. $W = B(\nu, T)$ при поглощении в атмосфере с температурой T в точке поглощения или $W = \epsilon B(\nu, T_s)$ при поглощении на поверхности со спектральной излучательной способностью ϵ и температурой T_s .

При поглощении в атмосфере значение T находится линейной интерполяцией по высоте, используя заданные температуры на границах z_{i-1}, z_i

соответствующего атмосферного слоя. Далее для сокращения записи волновое число ν будет опущено во всех случаях, когда речь пойдет о монохроматическом излучении.

Вариационные производные (якобианы) по температуре, усредненные в заданном атмосферном слое, определяются как математическое ожидание

$$J_i^T = \frac{\delta I_i}{\delta T} = \left\langle \Delta_i \cdot \frac{\Delta B(T)}{\Delta T} \left(1 + \frac{\Delta k_g}{k_\Sigma} \right) \right\rangle. \quad (2)$$

Здесь Δ_i – индикатор, единичное значение которого указывает, что поглощение произошло в атмосферном слое $z_{i-1} - z_i$; ΔT – конечное приращение по температуре (в расчетах $\Delta T = 0.5$ К) и соответствующие ему смещение функции Планка $\Delta B(T)$ и суммарного газового коэффициента поглощения Δk_g ; k_Σ – суммарный (газовый + аэрозольный или облачный) коэффициент поглощения в точке обрыва траектории фотона. Поясним, что, несмотря на малую величину ΔT , определяемые им смещения $\Delta B(T)$ и Δk_g вычисляются аналитически, носят неслучайный характер и потому надежно определяются при любом уровне статистической ошибки, присущей методу Монте-Карло.

Аналогично (2) определяется якобиан по температуре поверхности T_s

$$J_s^T = \frac{\delta I_0}{\delta T} = \left\langle \Delta_0 \cdot \frac{\Delta B(T_s)}{\Delta T} \right\rangle.$$

Усреднение происходит по всем поглощениям фотонов подстилающей поверхностью, т.е. когда индикатор Δ_0 равен единице.

Для расчета якобианов по относительным изменениям концентраций газов также используется метод зависимых испытаний (Метод Монте-Карло..., 1976). На его основе получено выражение

$$J_{m,j}^q = \frac{\delta I_{m,j}}{\delta \ln(q_{m,j})} = \frac{1}{\alpha} \left\langle \Delta \cdot B(T) \times \left[\left(1 + \alpha \frac{k_{m,j}}{k_{m,\Sigma}} \cdot \Delta_m \right) \exp(-\alpha k_{m,j} l_{m,\Sigma}) - 1 \right] \right\rangle, \quad (3)$$

где $q_{m,j}$ – доля молекул j -газа в m -слое атмосферы; α – относительное приращение концентраций газов (в расчетах $\alpha = 0.1$); $k_{m,j}$ – коэффициент поглощения j -газа; $k_{m,\Sigma}$ – суммарный коэффициент поглощения; $l_{m,\Sigma}$ – накопленная геометрическая длина пробега фотона в m -слое атмосферы.

В отличие от (2), накопление для усреднения величин в (3) проводится по всем слоям атмосферы, если произошло поглощение фотона и $\Delta = 1$. В m -слое, в котором непосредственно произошло поглощение и $\Delta_m = 1$, умножением на отношение коэффициентов дополнительно учитывается из-

менение вероятности поглощения фотона за счет возмущения концентрации $q_{m,j}$.

Математические выражения (2), (3) довольно просты. Их вычисления алгоритмически хорошо увязываются с определением по формуле (1) энергетических вкладов фотонов в величину интенсивности уходящего излучения и практически не сказываются на времени счета. Предварительное вычисление коэффициентов газового поглощения производится LBL-методом (с помощью LBLRTM). Аподизация в алгоритме проводится за счет случайного выбора частоты фотона по нормальному закону, математическое ожидание которого совпадает с серединой канала, а дисперсия определяется шириной аподизирующей функции. Таким образом, интегрирование по геометрическому пространству при определении интенсивностей и якобианов происходит одновременно с интегрированием по спектру, что позволяет добиться достаточно высокой вычислительной эффективности алгоритма. Например, время расчета для 5361 каналов, равномерно расположенных с шагом 0.25 см^{-1} в диапазоне $660\text{--}2000 \text{ см}^{-1}$, составляет примерно 4 мин для горизонтально однородных моделей атмосферы и 9 мин для вариантов с разорванной облачностью. Среднеквадратическая погрешность расчетов яркостных температур находится в пределах $0.05\text{--}0.2 \text{ К}$ в зависимости от канала, а погрешность определения якобианов $\sim 5\%$ в области их максимумов. Приведенные оценки быстродействия получены для обычного персонального компьютера с частотой процессора 3.5 ГГц и жестким диском.

Коэффициенты газового поглощения определяются для участка спектра, размеры которого примерно совпадают с шириной аподизированной рабочей полосы выбранного канала. Так, при заданном положении середины канала ν_{ch} коэффициенты рассчитываются со спектральным разрешением 0.001 см^{-1} в полосе $(\nu_{ch} - 3s, \nu_{ch} + 3s)$, где s — СКО нормального распределения, которое обычно используется для аподизации интерферограмм. Величина $s = 0.4247 \text{ FWHM}$, где FWHM (Full Width at Half Maximum) — полная ширина аподизирующей функции, рассчитанная на половинном уровне от ее максимума.

Для проверки алгоритма использовалось сопоставление полученных с его помощью оценок интенсивностей и яркостных температур с известными результатами расчетов для горизонтально однородных моделей атмосферы (при отсутствии облачности). В первую очередь было проведено сравнение интенсивностей уходящего излучения, вычисленных с помощью РМ-МК и LBLRTM для летней среднеширотной модели атмосферы MLS (WCP-112, 1986). Сравнение подтвердило близость результатов расчетов с помощью обеих моделей. Дополнительное тестирование РМ-МК было

выполнено путем сопоставления яркостных температур в спектральном диапазоне $1200\text{--}1400 \text{ см}^{-1}$ с подобными оценками, полученными независимо. Параллельные расчеты были выполнены с помощью радиационной модели из (Trotsenko et al., 2000) использующей спектроскопическую базу данных HITRAN-96 и прошедшей тщательное тестирование по данным различных натуральных экспериментов. Максимальное расхождение в оценках яркостной температуры не превышает 0.7 К , что для подобного рода сравнений следует признать вполне приемлемым, учитывая различия в используемых спектроскопических базах данных, а также погрешности самой референсной радиационной модели.

Для проверки правильности вычисления якобианов по температуре и концентрациям оценивалась выполнимость приближенных равенств, основанных на формуле Лагранжа

$$\begin{aligned} I[T(z) + \Delta T] &\approx I[T(z)] + \Delta T \sum_m J_m^T, \\ I[T_s + \Delta T_s] &\approx I[T_s] + \Delta T_s J_s^T, \\ I[q(z)(1 + \alpha)] &\approx I[q(z)] + \alpha \sum_m \sum_j J_{m,j}^q. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь ΔT , ΔT_s , σ — постоянные величины, характеризующие сдвиг вертикального профиля температуры атмосферы или температуры подстилающей поверхности, а также относительное возмущение вертикальных профилей концентраций атмосферных газов. С этой целью интенсивности и якобианы собственного излучения невозмущенной атмосферы, используемые в правых частях (4), рассчитывались для модели MLS. Затем в исходные данные вносились возмущения ΔT , ΔT_s или σ и расчеты повторялись для определения интенсивностей $I[T(z) + \Delta T]$, $I[T_s + \Delta T_s]$, $I[q(z)(1 + \alpha)]$, стоящих в левых частях (4) и соответствующих им яркостных температур T_{B_0} . Результаты сопоставления значений яркостных температур T_{B_0} , полученных прямыми расчетами, с их оценками T_{Bp} на основе линейных приближений (4), представлены в табл. 2, 3 для трех волновых чисел при различных значениях возмущающих параметров. В табл. 2 также приведены разности рассчитанных значений яркостных температур, обозначенных $\Delta T_B = T_{B_0} - T_{Bp}$.

Данные табл. 2, 3 подтверждают правильность вычисления якобианов. Для температурных якобианов погрешность (разность между яркостными температурами, полученными прямыми расчетами, и их оценками) мала. Она в десятки раз меньше, чем диапазон изменчивости самих T_{B_0} . Например, при сдвигах температурного профиля атмосферы до 5 К , ошибка, связанная с применением

Таблица 2. Сравнение изменения оценок яркостных T_B температур уходящего излучения при постоянных сдвигах температурного профиля ΔT

ν	660 см^{-1}			1211.5 см^{-1}			1230.0 см^{-1}		
	T_{B_0}	T_{Bp}	ΔT_B	T_{B_0}	T_{Bp}	ΔT_B	T_{B_0}	T_{Bp}	ΔT_B
0	226.22	226.22	0.00	275.38	275.38	0.00	285.50	285.50	0.00
1	227.21	227.21	0.00	276.35	276.35	0.00	285.93	285.93	0.00
2	228.20	228.18	0.02	277.33	277.30	0.03	286.38	286.36	0.02
3	229.19	229.15	0.04	278.30	278.24	0.06	286.82	285.79	0.03
5	231.18	231.05	0.13	280.25	280.09	0.16	287.71	287.65	0.06
10	236.14	235.66	0.48	285.13	284.49	0.64	290.01	289.73	0.28

Таблица 3. Сравнение изменения оценок яркостных T_B температур уходящего излучения при увеличении относительного содержания атмосферных газов

ν	660 см^{-1}			1211.5 см^{-1}			1230.0 см^{-1}			
	α , %	T_{B_0}	T_{Bp}	ΔT_B	T_{B_0}	T_{Bp}	ΔT_B	T_{B_0}	T_{Bp}	ΔT_B
0		226.22	226.22	0.00	275.38	275.38	0.00	285.50	285.50	0.00
10		226.65	226.63	0.02	274.62	274.70	-0.08	284.81	284.53	0.28
20		227.04	227.05	-0.01	273.96	274.01	-0.05	284.16	283.57	0.59
30		227.41	227.46	-0.05	273.28	273.32	-0.04	283.52	282.58	0.94

линейных приближений (4), не превышает инструментальной ошибки приборов ~ 0.2 ч– 0.5 К. Для всех представленных волновых чисел согласие между T_{B_0} и T_{Bp} в пределах измерительной погрешности наблюдается при условиях, что изменение концентраций поглощающих газов составляет менее 10%. Необходимо учитывать, что кроме ошибок в определении якобианов, основной причиной расхождений может быть нелинейная зависимость T_{B_0} от концентраций газов. На это указывает увеличение ΔT_B с ростом α для волнового числа 1230.0 см^{-1} .

Для отработки алгоритма МК были проведены расчеты яркостных температур и якобианов в каналах ИКФС-2 для различных атмосферных условий. На рис. 4 (на цветн. вклейках) показаны яркостные температуры T_B во всех каналах ИКФС-2 для модели атмосферы MLS при наличии сплошного облачного слоя (Stratus). Границы облачного слоя фиксированы, меняется только его оптическая толщина слоя τ_0 . Для сравнения здесь же (верхние кривые) приведены результаты расчета T_B в отсутствии облаков при тех же вертикальных профилях атмосферных параметров.

Результаты расчетов яркостной температуры для различных баллов кучевых облаков Cumulus показаны на рис. 5 (на цветн. вклейках). Форма спектров уходящего излучения в условиях куче-

вой облачности похожа на форму спектра при слоистой облачности. Как и в предыдущем случае, наибольшая разница яркостных температур наблюдается в окнах прозрачности атмосферы. По сравнению с безоблачной атмосферы разница в значениях T_B монотонно увеличивается с ростом балла и достигает 8 К при $n_0 = 7$.

Представленные графики носят иллюстративный характер и показывают, главным образом, возможности и универсальность разработанной модели радиационных расчетов. Тем не менее, на основе их анализа можно сделать важный вывод о необходимости учета в расчетном алгоритме эффектов рассеяния ИК-излучения, которые определяют “нечерноту” оптически тонкого ($\tau_0 < 10$) облачного слоя в окнах прозрачности атмосферы. Например, в областях 800–1300 см^{-1} и 1900–2000 см^{-1} разница в яркостных температурах при переходе от $\tau_0 = 2$ к $\tau_0 = 10$ может достигать 6° – 7° . Согласно данным (Справочник, 1989) вероятность присутствия в атмосфере оптически тонких облаков stratus с $\tau_0 < 10$ может достигать 30–50% в зависимости от времени года и географического региона, т.е. это не какая-то “экзотическая” ситуация, а типовые условия работы ИК-зондировщика.

На рис. 6 показаны результаты расчетов температурного якобиана для канала с $\nu = 792.00$ см^{-1} при различных баллах кучевой облачности и вы-

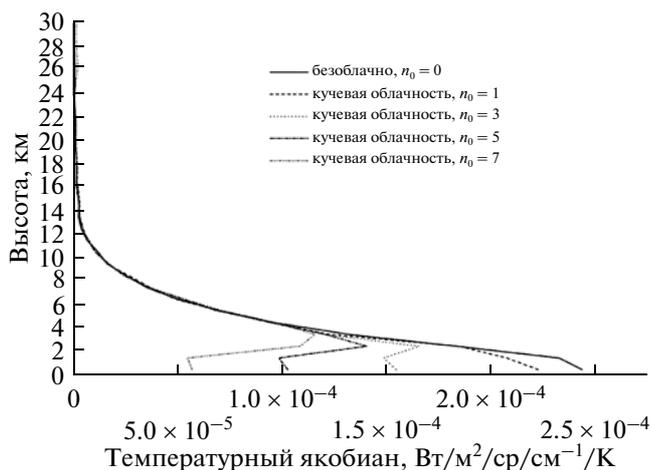


Рис. 6. Влияние кучевой облачности на форму температурного якобиана при $\nu = 792.00 \text{ см}^{-1}$, летняя среднеширотная модель атмосферы.

соте нижней границы $H_d = 2.1 \text{ км}$. В проведенных расчетах при использовании случайных реализаций гауссовского поля максимальное значение высоты верхней границы кучевых облаков не превышает 4 км. Это примерно совпадает с уровнем высот, начиная с которого облачность уже практически не оказывает влияние на форму температурного якобиана. В облачном слое влияние балла облачности на якобиан начинает заметно проявляться, начиная с $n_0 = 0.3$. При больших баллах становятся заметными количественные изменения в максимуме функции, и появление изломов в районе нижней границы облаков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований можно суммировать следующим образом:

1) разработаны метод и программные средства быстрых радиационных расчетов, предназначенные для анализа и моделирования измерений гиперспектрального ИК-зондировщика ИКФС-2, устанавливаемого на метеоспутниках серии “Метеор-М”. Сравнение с результатами полинейных расчетов (LBLRTM) подтверждает достаточную точность (рис. 1) и высокую вычислительную производительность (табл. 1) созданной БРМ. Обсуждается дальнейшее повышение вычислительной эффективности и точности БРМ за счет привлечения алгоритмов метода главных компонент;

2) рассмотрено построение радиационных моделей достаточно высокой производительности, использующих алгоритм метода Монте-Карло. Указанные модели могут применяться для анализа и моделирования данных ИК-зондировщиков

высокого спектрального разрешения при наличии облачности в поле зрения прибора.

Работа частично поддержана грантом РФФИ №13-07-0068.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Десятов А.В. и др. Фурье-спектрометр для дистанционного зондирования атмосферы Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: ИКИ РАН, 2008. Т. 3. № 1. С. 224–230.

Метод Монте-Карло в атмосферной оптике / Под. ред. Г.И. Марчука. Новосибирск: Наука, 1976. 276 с.

Облака и облачная атмосфера. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 647 с.

Рублев А.Н., Успенский А.Б., Троценко А.Н. и др. Детектирование и оценка балла облачности по данным атмосферных ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 2. С. 1–9.

Успенский А.Б., Романов С.В., Троценко А.Н. Применение метода главных компонент для анализа ИК-спектров высокого разрешения, измеренных со спутников // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 3. С. 26–33.

Успенский А.Б., Троценко А.Н., Рублев А.Н. Проблемы и перспективы анализа и использования данных спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 5. С. 18–33.

Aires F., Rossow W.B., Scott N.A. et al. Remote sensing from the infrared atmospheric sounding interferometer instrument. 1. Compression, denoising, and first-guess retrieval algorithms // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № D22.4619. doi: 10.1029/2001JD000955.

Huang H.-L., Antonelli P. Application of principal component analysis to high-resolution infrared measurement compression and retrieval // J. Clim. Appl. Meteorol. 2001. V. 40. P. 365–388.

LBLRTM. http://rtweb.aer.com/line_param_frame.html.

Liu X., Smith W.L., Zhou D.K. et al. Principal component-based radiative transfer model for hyperspectral sensors: Theoretical concept // Appl. Opt. 2006. V. 45. P. 201–209.

Matricardi M. The generation of RTTOV regression coefficients for IASI and AIRS using a new profile training set and a new line-by-line database // ECMWF Research Dept. Tech. Memo. 2008. V. 564. 54 p.

Matricardi M. A principal component based version of the RTTOV fast radiative transfer model // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2010. V. 136. P. 1823–1835. doi: 10.1002/gj.680.

Rodgers C.D. Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice. World Sci. Publ. Co., 2000. 238 p.

Saunders R.W., Matricardi M., Brunel P. An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations // Q.J.R. Meteorol. Soc. 1999. V. 125. P. 1407–1425.

Strow L.L., Hannon S.E., DeSouza-Mackado S. et al. An overview of the AIRS radiative transfer model // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2003. V. 41. № 2. P. 303–313.

Trotsenko, A.N., Kopylov A.V., Rublev A.N. et al. Efficient forward model to simulate IASI/METOP measurements and its validation against high-resolution field observations // IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation / Eds.: Smith and Timofeyev. Hampton: A. DEEPAK Publ., 2001. P. 401–404.

Trotsenko A.N., Uspensky A.B., Kopylov A.V. et al. Modular prototype processor for geophysical parameters retrieval from IASI: pilot version // Proc. “2003 Eumetsat Meteorological Satellite Conf.”. 29 Sept.–03 Oct. 2003. Weimar, Germany. 2003. P. 110–117.

WMO. A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation // World Climate Research Program. WCP-112, WMO/TD. 1986. № 24. 60 p.

Fast Radiative Transfer Model for “Meteor-M” Satellite-Based Hyperspectral IR Sounders

A. B. Uspensky¹, A. N. Rublev¹, E. V. Rusin², V. P. Pyatkin²

¹State Research Center “Planeta”, Moscow

²Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

The methodological and computational aspects of Fast Radiative Transfer Model (FRTM) development are under discussion. The FRTM has been developed on the base of well-known FRTM RTTOV. It provides fast and accurate modeling of spectra measured by IR Fourier-transform spectrometer IRFS-2 which is planned to be installed on board Russian meteorological satellites of “Meteor-M” series. The results of FRTM application and verification for modeling IRFS-2 data are presented. The computational performance of the FRTM is assessed. The more efficient and accurate version of FRTM is described that exploits principal component analysis. Along with this a new version of radiative transfer model has been developed that utilizes Monte-Carlo algorithm and is capable to simulate IRFS-2 data for cloudy atmosphere.

Keywords: fast radiative transfer model, IR sounder IRFS-2, remote sensing, satellite data modeling, RTTOV, optical depth, jacobian, Monte-Carlo algorithm