

Спектроскопические проблемы в прямых задачах спутникового зондирования атмосферы и пути их преодоления

В.А. Фалалеева¹, Б.А. Фомин^{2*}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, пер. Пыжевский, 3

²Центральная аэрологическая обсерватория
141700, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, 3

Поступила в редакцию 23.05.2016 г.

Анализируются возможности повышения информативности спутникового зондирования атмосферы методами ИК-спектроскопии путем повышения спектрального разрешения аппаратуры и использования поляризационных измерений солнечного и теплового излучения. Показаны недостатки современных методов учета молекулярных спектров поглощения как в «строгих» (line-by-line), так и «быстрых» (основанных на k -распределениях) моделях переноса атмосферной радиации. Обсуждаются подходы для устранения этих недостатков.

Ключевые слова: спутниковое зондирование, поляризация, перенос атмосферной радиации, полинейный метод, форма линии, спектроскопические банки данных, метод k -распределений; remote sensing, polarization, atmospheric radiative transfer, line-by-line method, line shape, spectroscopic databank, k -distribution method.

Введение

Согласно отчетам IPCC [1] за 2013 г., современные прогнозы увеличения среднеглобальной температуры в приземном слое при удвоении концентрации атмосферного углекислого газа лежат в довольно широких пределах: 1,5–4,5 °С. Подобные прогнозы изменения климата практически бесполезны для выработки масштабных мер по ограничению выбросов парниковых газов. Наихудшим обстоятельством является полное отсутствие прогресса в увеличении точности этих прогнозов с 1980-х гг. [2]. Уже один этот факт убедительно показывает, что, несмотря на запуск десятков (если не сотен) спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), для прогноза климатических изменений еще не хватает понимания глобальных процессов в атмосфере, и геофизика стоит перед проблемой достижения качественно нового уровня знаний о климатической системе Земли. Причем опыт, полученный в результате уже затраченных гигантских усилий, делает очевидным невозможность достижения требуемого уровня этих знаний, если качественно не повысить информативность методов ДЗЗ, по крайней мере, до практически возможного предела. В рамках данной работы мы ограничимся рассмотрением

возможности повышения информативности ДЗЗ путем повышения спектрального разрешения аппаратуры и применения поляризационных измерений уходящего ИК-излучения (теплового и солнечного). Как будет показано ниже, это действительно может качественно улучшить информативность ДЗЗ, особенно в исследованиях вертикальной структуры атмосферы. Однако потребуются несколько изменить направления научных работ в области атмосферной ИК-спектроскопии и пересмотреть ряд бытующих представлений в этой области. Целью данной работы является обсуждение этих направлений и представлений. Также будут кратко рассмотрены некоторые вычислительные проблемы, связанные с учетом селективного газового поглощения и поляризации при моделировании атмосферной радиации. В том числе мы обсудим недостатки существующих методов «быстрого» учета молекулярных спектров поглощения в прямых задачах ДЗЗ и радиационных блоках климатических моделей, а также пути их преодоления.

1. Спектроскопия высокого разрешения в ДЗЗ

Исследования атмосферы методами ИК-спектроскопии высокого разрешения давно и с успехом применяются в ДЗЗ. Разрешение спутниковых приборов для надирного зондирования (AIRS, IASI, IMG, IRS, TANSO-FTS, ИКФС и др.) в основном

* Виктория Анатольевна Фалалеева (victory@phystech.edu); Борис Алексеевич Фомин (b.fomin@mail.ru).

лежит в пределах $\sim 0,2\text{--}0,6\text{ см}^{-1}$, а характерное разрешение приборов для лимбового зондирования (ATMOS, ACE, MIPAS, TES-Limb и др.) на порядок выше: от $\sim 0,015$ до $\sim 0,035\text{ см}^{-1}$. Первые применяются главным образом для исследований тропосферы и поверхности, а вторые — для верхней тропосферы и нижней стратосферы. Поэтому спектральное разрешение этих приборов полезно сопоставить с характерной шириной спектральных линий оптически активных газов в средней тропосфере ($\sim 0,1\text{ см}^{-1}$) и в районе тропопаузы ($\sim 0,01\text{ см}^{-1}$). Сравнение показывает, что с таким разрешением форма линий в данных приборах заметно искажается и некоторая информация об атмосфере, содержащаяся в спектрах регистрируемого уходящего излучения, теряется. Обсудим, насколько важна теряемая информация.

По форме спектральных линий тонкого слоя оптически активного газа в атмосфере, излучающего тепловое или поглощающего солнечное излучение, не составляет труда определить давление окружающего воздуха и, следовательно, высоту слоя. Это возможно (даже без решения «обратных» задач) благодаря сильной зависимости формы линий от давления уходящего газа. Так, в тропосфере полуширина линий практически пропорциональна давлению воздуха. Но при грубом спектральном разрешении прибор вместо контуров линий будет регистрировать некие интегральные по частоте величины (свертки контуров с аппаратными функциями), т.е. величины типа интенсивностей линий, которые зависят от температуры, но слабо зависят от давления воздуха. В этом случае высоту слоя можно будет определить только по спектру пропускания атмосферы над слоем, что также требует хорошего спектрального разрешения (см. ниже). Следовательно, при низком спектральном разрешении аппаратуры искажается форма линий и теряется важная информация о вертикальном распределении оптически активных газов (вертикальных профилях). Это поясняет, почему с помощью вышеуказанной аппаратуры для надирного зондирования в основном определялись лишь содержания парниковых газов.

Таким образом, повышение спектрального разрешения на порядок и более в приборах для надирного зондирования атмосферы представляется весьма перспективным. Тогда с помощью ДЗЗ могут быть более детально исследованы трехмерные распределения парниковых газов в атмосфере, а также других оптически активных компонент. Сейчас, кроме озона, результатом надирных измерений являются по большей части лишь двумерные распределения газов (содержания в столбе атмосферы). А трехмерная картина может действительно дать новый уровень понимания распределения глобальных источников и стоков парниковых газов, а также механизмов их переноса. Заметим, что в лимбовых наблюдениях уже получается трехмерная картина, но при этом горизонтальное разрешение составляет сотни километров, а приземный слой $\sim 0\text{--}5$ км фактически не виден.

Однако при повышении спектрального разрешения, помимо чисто технических трудностей (отношение сигнал-шум и др.), возникает большая проблема, связанная с теорией спектров молекулярного поглощения. Дело в том, что по результатам валидации спутниковых спектрометров расчетные и измеренные спектры уходящего излучения согласуются не очень хорошо. Пример такой валидации приведен на рис. 1 (валидация IASI, подспутниковый эксперимент JAIVEx [3]).

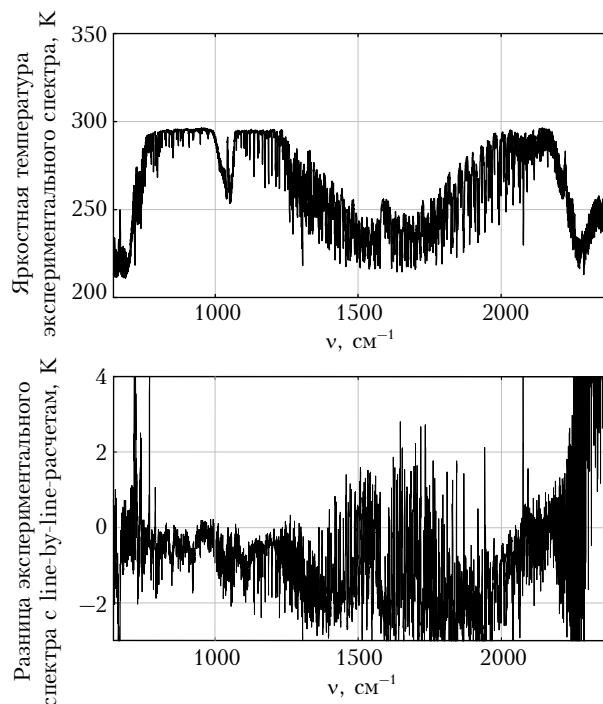


Рис. 1. Пример экспериментального спектра уходящего теплового излучения атмосферы в единицах яркостной температуры (К) и его разница с line-by-line-расчетом (прибор IASI, разрешение $0,25\text{ см}^{-1}$).

Расчет выполнен с помощью line-by-line-модели (lbl), разработанной авторами. Измерения и расчеты в аналогичных валидационных экспериментах, полученные другими исследователями с помощью различных lbl-моделей, качественно дают похожую картину. Как видно из рисунка, различие между расчетом и экспериментом представляет собой «шум» с характерной амплитудой порядка 1 К. Но в отдельных участках спектра различие увеличивается на порядок. Различия особенно велики в районе 15 и $4,3\text{ мкм}$ полос поглощения CO_2 : ~ 700 и $\sim 2300\text{ см}^{-1}$ соответственно на рис. 1.

Эти данные были получены для прибора IASI с разрешением $\sim 0,25\text{ см}^{-1}$. Следует ожидать, что дальнейшее увеличение спектрального разрешения может многократно увеличить этот «шум». В силу известных требований к высокой точности прямых задач становится сомнительной польза от дальнейшего увеличения спектрального разрешения приборов. Даже для обработки данных ДЗЗ, полученных современной аппаратурой, согласие расчетов и из-

мерений желательно повысить. Так, для задач определения источников и стоков CO_2 с помощью приборов типа TANSO-FTS желательно иметь согласие на уровне 0,2 К (частное сообщение проф. Р. Имасу, Токийский университет).

Основной проблемой в $|\text{bl}|$ -моделях является расчет молекулярных ИК-спектров коэффициента поглощения. В настоящее время этот расчет в основном базируется на представлении спектра как суммы независимых спектральных линий. Необходимые параметры для расчета контура линий (положения, полуширины и интенсивности в предположении локального термодинамического равновесия (ЛТР)) представлены в спектроскопических базах HITRAN [4] и др. Современные версии этих баз содержат информацию о нескольких миллионах спектральных линий десятков атмосферных газов, а также нескольких сотен их изотопов.

Эти базы являются выдающимся достижением атмосферной спектроскопии и примером плодотворного международного сотрудничества. С их помощью расчет переноса атмосферной радиации позволил выйти на качественно новый уровень точности по сравнению с использовавшимися ранее приближенными методами, основанными на «моделях полос» [5]. Интенсивная работа по усовершенствованию баз продолжается: увеличивается число линий, а их параметры уточняются. Но разница в расчетах и измерениях, показанная на рис. 1, оказалась в разы больше, чем разница в расчетах с использованием новейших и предыдущих версий.

Проблему пытаются решить использованием в расчетах различных моделей контуров линий, теория которых интенсивно разрабатывается, а также добавлением «континуального поглощения» (см., например, [6, 7]). Особую сложность представляет описание далеких крыльев линий, которые определяют очень важные для переноса радиации окна и микроокна прозрачности атмосферы. Но здесь есть принципиальная трудность: в $|\text{bl}|$ -моделях (LBRTM [7] и др.) на основе многолетнего опыта расчетов принято обрывать контур линий на расстояниях в 25 см^{-1} от центра, что неявно предполагает ширину уровня в 50 см^{-1} . А например, для CO_2 характерное расстояние между уровнями составляет порядка 1 см^{-1} в так называемых P - и R -ветвях и всего порядка 10^{-3} см^{-1} в Q -ветвях.

Следовательно, в нижней атмосфере уровни существенно перекрываются, и в таких условиях неизбежен эффект интерференции линий. Детально этот эффект учитывается с помощью сложных квантово-механических моделей [8]. Сейчас эти модели наиболее часто применяют для описания спектров поглощения в Q -ветвях, где учет эффекта интерференции уровней особенно важен. Такая модель [8] применялась и для расчета, показанного на рис. 1. Ее применение позволило существенно улучшить согласие расчета и эксперимента по сравнению с расчетом, использующим сумму независимых контуров Фойгта (с форм-факторами), хотя значительные отличия еще остались (см. на рис. 1, область $\sim 700 \text{ см}^{-1}$).

Важно отметить следующее обстоятельство: новейшие модели контуров линий и квантово-механические модели сложны и требуют значительных затрат компьютерного времени. Поэтому на практике эти модели сначала применяют для получения так называемых РТ-таблиц, т.е. расчетов спектров поглощения при определенных давлениях и температурах, а уже потом эти таблицы используются при решении уравнений переноса радиации. Причем использование таких таблиц практически не отличается от использования хорошо известных РТ-таблиц для сечений поглощения некоторых сложных молекул, полученных экспериментально и представленных в базе HITRAN (например, фреонов). Таким образом, для решения проблемы повышения точности расчетов в прямых моделях для ДЗЗ крайне полезными могут быть включения в спектроскопические базы не только РТ-таблиц сложных молекул, но и газов типа CO_2 , CH_4 и др., по крайней мере для узких ($\sim 10\text{--}100 \text{ см}^{-1}$) спектральных областей с сильной интерференцией уровней или особенно информативных для ДЗЗ. Особый интерес для задач переноса радиации представляет описание поглощения между линиями (в микроокнах прозрачности). Таблицы могут быть получены как теоретически, так и, что особенно ценно на наш взгляд, экспериментально. Важно отметить, что благодаря недавнему прогрессу в вычислительной технике (увеличению оперативной памяти и объемов дисков) работа с подобными таблицами не представляет особой проблемы.

В конце раздела кратко обсудим еще одну важную проблему — отмеченное на рис. 1 существенное различие в измерениях и расчетах в области 4,3 мкм полос поглощения CO_2 ($\sim 2300 \text{ см}^{-1}$). Дело в том, что здесь отсутствует Q -ветвь и расхождение невозможно объяснить интерференцией уровней. Как убедительно показано в работах Теофилова и др. [9], это расхождение (до $\sim 10 \text{ К}$ в единицах яркостной температуры) обусловлено нарушением ЛТР при эмиссии теплового излучения уже в нижней атмосфере. Согласно этой работе, подобный эффект наблюдается в 1/3 каналов IASI, так что проблема учета нарушения ЛТР при обработке данных ДЗЗ достаточно серьезна. Здесь следует отметить, что в настоящее время обычно предполагается нарушение ЛТР лишь для высот больше $\sim 70 \text{ км}$ [10]. Таким образом, базовые представления о ЛТР, обычно используемые в моделировании переноса атмосферной радиации, определенно требуют коррекции (см. также [6]).

2. Применение поляризационных измерений ИК-излучения в ДЗЗ

Облака и аэрозоли играют важную роль в радиационном теплообмене атмосферы. А мониторинг их глобального распределения является одной из основных задач ДЗЗ в климатических исследованиях [1]. Однако при их изучении лишь по спектрам интенсивности уходящего ИК-излучения (только

первой компоненты вектора Стокса) возникает известная проблема, связанная с маскировкой вклада в радиацию полупрозрачных слоев аэрозоля и облаков (особенно перистых) вкладом атмосферных газов. Тогда такие слои зачастую становятся «невидимыми» и не учитываются при обработке данных ДЗЗ, что может привести к существенным ошибкам (например, в определении поверхностной температуры). Для решения этой проблемы представляется перспективным использовать поляризационные измерения. Дело в том, что молекулы воздуха практически не поляризуют тепловую радиацию, а поляризация солнечной радиации молекулами (рэлеевское рассеяние) очень быстро падает с увеличением длины волны (обратно пропорционально четвертой степени). Напротив, поляризационные свойства частиц облаков и аэрозоля сильно отличаются от свойств рэлеевского рассеяния, которое для тепловой радиации вообще отсутствует.

Поляризационные измерения отраженного солнечного излучения применяются уже давно, в том числе с высоким спектральным разрешением (например, прибор TANSO-FTS, разрешение $\sim 0,5 \text{ см}^{-1}$, отношение сигнал-шум 300, проект GOSAT, Япония). Для планирования и анализа подобных измерений был разработан ряд прямых моделей, в том числе основанных на «векторном» методе Монте-Карло (1D, с детальным учетом молекулярных спектров [11], а также 3D [12]). На рис. 2 приведен пример модельных спектров нормализованной Q -компоненты вектора Стокса уходящего солнечного излучения, отраженного двумя аэрозольными слоями. Нормализация осуществлялась с помощью фактора $\pi/(\cos\Theta I_v)$, где I_v — солнечный спектр на верхней границе атмосферы, а Θ — зенитный угол Солнца (в примере зенитный и азимутальный углы равны 60 и 180° соответственно). Оптические толщины слоев одинаковы ($0,3262$), но вертикальные профили аэрозоля разные: постоянная и линейно убывающая по высоте функции от поверхности до высоты 1 км . Важно отметить, что рассмотрен-

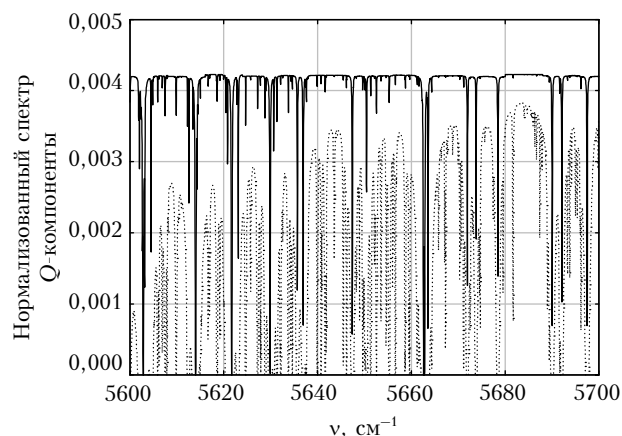


Рис. 2. Спектры нормализованной Q -компоненты уходящего солнечного излучения, отраженного слоями аэрозоля $0\text{--}1 \text{ км}$, при оптической толщине $0,3262$. Пунктирная линия соответствует однородному слою, сплошная — плотности аэрозоля, линейно убывающей с высотой

ный спектральный интервал находится в области Ψ -полосы H_2O ($1,87 \text{ мкм}$). Методика и подробности расчета даны в работе авторов [11]. Здесь этот пример приведен для демонстрации пользы поляризационных измерений с высоким спектральным разрешением в области полос поглощения атмосферных газов. Так, в работе [11] показано, что уже с помощью современной аппаратуры типа TANSO-FTS вполне возможно определить $3\text{--}4$ параметра вертикальной структуры аэрозоля даже в приземном слое.

Поляризация тепловой радиации из-за облаков и аэрозоля также существует. Однако поляризационные измерения тепловой ИК-радиации в ДЗЗ еще не применялись. Основная причина — малость эффекта по сравнению с поляризацией солнечной радиации. Оценки показывают, что линейная поляризация тепловой радиации в атмосфере (отношение второй компоненты вектора Стокса к первой (Q/I)) должна быть на уровне всего 1% . Другая причина — поляризация может наблюдаться лишь на лимбовых трассах. Есть и еще одна причина — сложность описания переноса тепловой радиации в рассеивающей среде с учетом поляризации и селективного газового поглощения в прямых моделях. Впрочем, последняя трудность уже в значительной мере преодолена [13, 14]. Несмотря на малость эффекта, есть область исследований, где применение поляризационных измерений спутниковой аппаратурой высокого спектрального разрешения представляется эффективным: исследование полярных облаков зимой и в отсутствие Солнца. Актуальность исследований связана с тем, что некоторые важные химические реакции, определяющие содержание озона в атмосфере, гетерогенны и протекают на поверхности частиц полярных облаков. На рис. 3, полученном с помощью модели авторов [13], показаны поляризационные характеристики кристаллических облаков. Использовалась модель кристаллического облака '010' из базы данных [15] (детали см. в [13]). Заметим, что поляризация

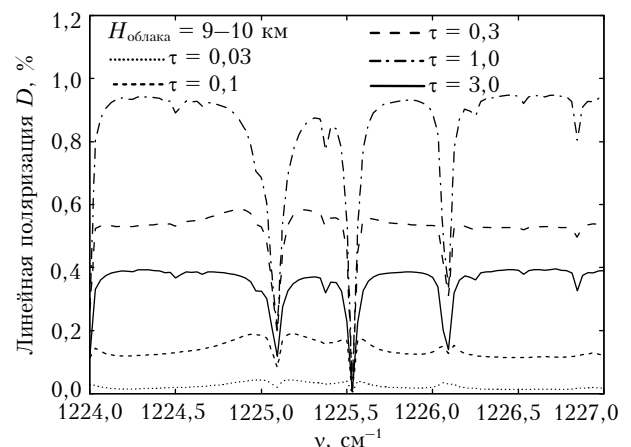


Рис. 3. Характерные спектры линейной поляризации уходящей тепловой радиации, рассеянной кристаллическими облаками оптической толщины $0,03; 0,1; 0,3; 1,0; 3,0$ (модель атмосферы «арктическая зима», лимбовая трасса, угол между трассой и нормалью к облаку $84,26^\circ$)

теплового ИК-излучения другим типом полярных облаков, состоящих из капель серной кислоты, практически отсутствует.

3. Вычислительные проблемы учета спектров атмосферной радиации

Обработка результатов измерений, полученных аппаратурой с высоким спектральным разрешением, приводит к проблеме решения сложных вычислительных задач. Так, AIRS в день регистрировал ~3 000 000 спектров с разрешением ~0,5 см⁻¹, состоящих из 2378 точек (каналов) каждый. Увеличение спектрального и пространственного разрешения еще больше увеличит объемы обрабатываемой информации. Для решения этой проблемы может быть полезным дальнейшее развитие метода нейронных сетей, который, в частности, с успехом применялся для IASI [16]. Также представляется перспективным применение параллельных вычислений с использованием вычислительной технологии CUDA (Computer Unified Device Architecture) на базе GPU (Graphic Processing Unit) [17].

В данной работе рассмотрим другую сложную проблему: «быструю» параметризацию селективного газового поглощения в широких спектральных интервалах, содержащих множество спектральных линий. Такими интервалами могут быть каналы прибора среднего спектрального разрешения, предназначенного для исследования атмосферного рассеивания (например, POLDER, ширина каналов ~10² см⁻¹). Для радиационных блоков МОЦА такими интервалами служат полные спектральные области тепловой и солнечной радиации. Здесь проблема быстрой параметризации очень остра и в значительной степени объясняет разброс климатических прогнозов. Дело в том, что международные сравнения имеющихся «быстрых» радиационных кодов до сих пор выявляют существенные разногласия в расчетах потоков атмосферной радиации [18]. Зачастую этот разброс даже превышает форсинги климатических факторов. По нашему мнению, современные параметризации селективного газового поглощения неправильно используют метод *k*-распределений (*k*-distribution), который основан на замене реального спектра более простым «искусственным». Точнее используется разновидность метода, предложенная В.А. Амбарцумяном почти 80 лет назад. Его подход основан на замене реального спектра, включающего до нескольких миллионов линий, более простым «искусственным», состоящим всего из нескольких прямоугольных линий (обычно их несколько десятков). Рис. 4 иллюстрирует такой «искусственный» спектр (тонкая сплошная линия) и спектр, полученный методом line-by-line (толстая сплошная линия). В примере использован объемный коэффициент поглощения O₂ на высоте 10 км. Опуская подробности получения таких «искусственных» ступенчатых спектров, изложенных в многочисленных статьях и монографиях, отметим главное: вместо решения уравнений переноса на множестве спектральных точек интер-

вала теперь достаточно решить это уравнение один раз для каждой «ступеньки», т.е. всего четыре раза для всего интервала в данном примере. Для однородного слоя и одного оптически активного газа этот метод работает очень хорошо. Но в реальной атмосфере его известными недостатками являются трудности описания перекрытия полос поглощения различных газов, а также поглощения в стратосфере и выше. Очевидно, что такой «искусственный» спектр слишком груб. Но, как показано в работах [19, 20], эти недостатки устраняются с помощью другого подхода. Пример использования такого подхода показан штрихпунктирной линией на рис. 4.

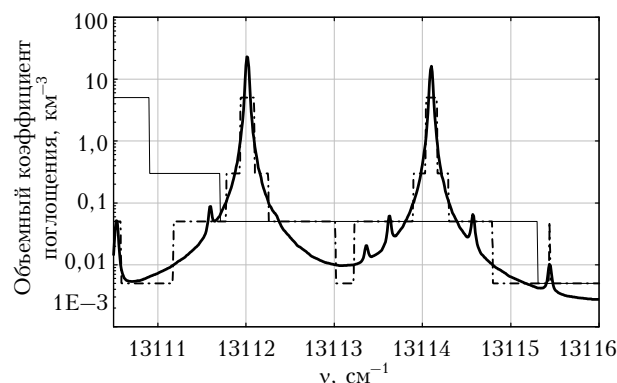


Рис. 4. Спектр объемного коэффициента поглощения O₂ на высоте 10 км, рассчитанный с помощью точного line-by-line-метода и приближенных нового и общепринятого *k*-распределений

Здесь число линий почти равно числу линий исходного спектра, но число значений коэффициента поглощения дискретно — равно четырем в данном примере. Легко видеть, что и это приводит всего к четырехкратному решению уравнений переноса. Так как спектр теперь искажается значительно меньше (сравните все линии на рис. 4), это позволяет легко решить проблему перекрытия полос и др. Недостатком такого подхода является лишь его трудоемкость, впрочем, преодоливая [20].

Заключение

Для решения климатических проблем настоятельно требуется качественно повысить информативность ДЗЗ. Для этого желательно существенно улучшить спектральное разрешение спутниковой аппаратуры, чтобы регистрация спектров ИК-излучения из тропосферы и нижней стратосферы происходила без искажений. Это может дать новое качество в исследовании вертикальной структуры деятельного слоя атмосферы. Однако это также потребует качественного улучшения точности учета молекулярных спектров в прямых задачах ДЗЗ. По нашему мнению, здесь крайне полезными могут стать включения в спектроскопические базы типа HITRAN не только РТ-таблиц сложных молекул, но и высокоточных таблиц для газов типа CO₂, CH₄ и др., по крайней мере для узких спектральных областей (~10–100 см⁻¹) с сильной интерференцией

уровней или особенно информативных для ДЗЗ. Также требуется существенно расширить учет нарушений ЛТР в прямых задачах. С помощью международного сотрудничества такая работа может быть выполнена в достаточно короткие сроки.

Применение поляризационных измерений для исследования свойств аэрозолей и облаков также повышает информативность ДЗЗ. В частности, лимбовые поляризационные измерения тепловой радиации могут использоваться для исследования полярных облаков, если решить технические проблемы измерения линейной поляризации на уровне десятых долей процента.

Для решения проблемы обработки данных ДЗЗ высокого спектрального разрешения представляется перспективным интенсифицировать работы по разработке алгоритмов на основе нейронных сетей и применения GPU. Для обработки данных ДЗЗ среднего и низкого спектрального разрешения, а также параметризации газового поглощения в климатических моделях необходимо использовать принцип получения k -распределений, альтернативный общепринятому в настоящее время.

Работа поддержана грантами РФФИ № 15-01-00783 и 14-01-00197.

1. IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: <http://www.ipcc.ch>
2. Бах В., Крейн А., Берже А., Лонгетто А. Углекислый газ в атмосфере. М.: Мир, 1987. 532 с.
3. JAIVEx – The Joint Airborne IASI Validation Experiment, 2007. URL: <http://www.cimss.ssec.wisc.edu>
4. The HITRAN Database. URL: <http://www.cfa.harvard.edu/hitran/>
5. Гуди Р.М. Атмосферная радиация. М.: Мир, 1966. 522 с.
6. Родимова О.Б. Контур спектральной линии и поглощение в окнах прозрачности атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 5. С. 460–473.
7. Clough S.A., Shephar M.W., Mlawer E.J., Delamere J.S., Iacono M.J., Cady-Pereira K., Boukabara S., Brown P.D. Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2005. V. 91, iss. 2. P. 233–244.
8. Hartman J.M., Boulet C., Robert D.A. Collisional effects on molecular spectra: Laboratory experiments and models, consequence for applications. Amsterdam: Elsevier, 2008. 411 p.
9. Feofilov A., Rezac L., Kutepov A., Capelle V. Non-LTE radiative transfer in the context of infrared satel-

lite observations of the lower atmosphere // Int. Symp. «Atmospheric Radiation and Dynamics» (ISARD-2015). St. Petersburg-Petrodvorets. St. Petersburg State University, 2015.

10. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 475 с.
11. Fomin B., Falaleeva V. A polarized atmospheric radiative transfer model for calculations of spectra of the Stokes parameters of shortwave radiation based on the line-by-line and Monte Carlo methods // Atmosphere. 2012. V. 3, N 4. P. 451–467.
12. Cornet C., C-Labonnote L., Szczap F. Three-dimensional polarized Monte Carlo atmospheric radiative transfer model (3DMCPOL): 3D effects on polarized visible reflectances of a cirrus cloud // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2010. V. 111, iss. 1. P. 174–186.
13. Fomin B., Falaleeva V. Spectra of polarized thermal radiation in a cloudy atmosphere: Line-by-Line and Monte Carlo model for passive remote sensing of cirrus and polar clouds // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2016. V. 177. P. 301–317.
14. Fauchez T., Cornet C., Szczap F., Dubuisson P., Rosambert T. Impact of cirrus clouds heterogeneities on top-of-atmosphere thermal infrared radiation // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14, N 11. P. 5599–5615.
15. Yang P., Bi L., Baum B.A., Liou K.N., Kattawar G.W., Mishchenko M.I., Cole B. Spectrally consistent scattering, absorption, and polarization properties of atmospheric ice crystals at wavelengths from 0.2 to 100 μm . // J. Atmos. Sci. 2013. V. 70, N 1. P. 330–347.
16. Turquety S., Hadji-Lazaro J., Clerbaux C., Hauglustaine D.A., Clough S.A., Casse V., Schlüssel P., Megie G. Operational trace gas retrieval algorithm for the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer // J. Geophys. Res. D. 2004. V. 109, N 21. DOI: 10.1029/2004JD004821.
17. Боресков А.В., Харламов А.А. Основы работы с технологией CUDA. М.: ДМК Пресс, 2010. 232 с.
18. Oreopoulos L., Mlawer E., Delamere J., Shippert T., Cole J., Fomin B., Iacono M., Jin Z., Manners J., Rösönen P., Rose F., Zhang Y., Wilson M.J., Rossow W. The continual intercomparison of Radiation Codes: Results from Phase I // J. Geophys. Res. D. 2012. V. 117, N 6. DOI: 10.1029/2011JD016821.
19. Fomin B.A. A k -distribution technique for radiative transfer simulation in inhomogeneous atmosphere: 1. FKDM, fast k -distribution model for the longwave // J. Geophys. Res. D. 2004. V. 109, N 2. DOI: 10.1029/2003JD003802.
20. Tarasova T.A., Fomin B.A. The use of new parameterization for gaseous absorption in the CLIRAD-SW solar radiation code for models // J. Atmos. Ocean. Technol. 2007. V. 24, N 6. P. 1157–1162.

V.A. Falaleeva, B.A. Fomin. Spectroscopic challenges in direct problems of the satellite atmospheric sounding and ways of their resolving.

In this work, we discuss the possibilities to obtain more information content from atmospheric IR sounding through an increase in the instruments' spectral resolution and the use of the polarization measurements of solar and thermal radiation. The disadvantages of the modern methods for accounting the molecular absorption spectra in both rigorous and fast (based on k -distributions) atmospheric radiative transfer models are shown. The approaches to eliminate these disadvantages are suggested.