

УДК @@@

## МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В СФЕРИЧЕСКОЙ АТМОСФЕРЕ С РАСЧЕТОМ ПОСЛОЙНЫХ ВОЗДУШНЫХ МАСС И НЕКОТОРЫЕ ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

© 2004 г. О. В. Постыляков

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН*

*119017 Москва, Пыжевский пер., 3*

*E-mail: ovp@ifaran.ru*

Поступила в редакцию 08.01.2003 г., после доработки 06.01.2004 г.

Для использования в обратных задачах атмосферной оптики разработана модель переноса излучения с расчетом интенсивностей и их производных по коэффициентам объемного поглощения. В иной терминологии упомянутые производные называются также весовыми функциями, или воздушными массами слоя атмосферы. Расчеты многократного рассеяния выполняются методом Монте-Карло. Моделирование выполняется для сферически симметричной атмосферы с учетом поляризации, релеевского и аэрозольного рассеяния, поглощения газов и аэрозоля, альбедо Ламбертовой подстилающей поверхности. Скорость расчета интенсивностей по модели для точности 1% примерно соответствует скорости псевдосферических моделей других авторов, с которыми проводилось сравнение. Одновременный расчет интенсивностей и производных занимает только в 1.2–1.8 раз больше времени, чем расчет одних интенсивностей. Модель прошла сравнения с другими сферическими и псевдосферическими моделями для геометрий, в которых важна сферичность атмосферы: сумеречные наблюдения с поверхности Земли и наблюдения лимба Земли из космоса, – а также сравнения расчетов производных. На примере Умкер метода определения озона показано, что традиционное использование в обратных задачах производных, рассчитанных в приближении однократного рассеяния, ведет к дополнительным и существенным ошибкам измерения.

### ВВЕДЕНИЕ

Пассивное оптическое зондирование в УФ и видимой областях спектра используется для определения газового состава и характеристик аэрозоля атмосферы с поверхности Земли, со спутников и летательных аппаратов. Зондирование с использованием более простых схем: определение содержания озона, двуокиси азота и аэрозоля по наблюдениям прямого солнечного излучения наземными ([1–7] и др.) и спутниковыми фотометрами (SAM, SAGE, SAGE II [8], СФМ–2 [9]), наблюдения рассеянного в зените излучения для определения содержания озона ([1,10,11] и др.), надирное зондирование озона со спутников (приборы TOMS, SBUV, SBUV/2 [12], БУФС [13]), – способствовало развитию более совершенных моделей измерений и лучшему пониманию подходов к решению обратных задач. С одной стороны, это привело к переходу от многоволновых к спектральным методикам зондирования атмосферы (приборы Озон-М/Мир [14], GOME [15] и последующие), что позволило расширить количество наблюдаемых газов за счет постоянных или эпизодических измерений содержания  $O_2$ ,  $O_4$ ,  $NO$ ,  $NO_3$ ,  $OCIO$ ,  $ClO$ ,  $BrO$ ,  $IO$ ,  $HCHO$ ,  $SO_2$ ,  $H_2O$ ,  $HNO_3$ ,  $HO_2$ ,  $ClONO_2$ . С другой стороны, в качестве ос-

новной или дополнительной начинает использоваться более сложная для интерпретации геометрия наблюдений – лимбовая (приборы OSIRIS [16], SAGE III [17], SCIAMACHY [18], GOMOS [19], OMPS [20]), что дает возможность увеличить пространственное покрытие спутниковых измерений при сохранении высокого высотного разрешения, свойственного для наблюдений прямого Солнца, а впоследствии перейти к решению 2–3-х мерных томографических задач. В области наземного оптического зондирования также произошло смещение интересов исследователей к спектральным методикам и к более информативной геометрии наблюдений – сумеречной. Проведение измерений в сумеречный период позволяет повысить чувствительность оптического метода зондирования, а в ряде случаев определять не только общее содержание, но и вертикальный профиль компонент атмосферы ([21–25] и др.).

Основой для построения модели оптических измерений является теория переноса излучения в атмосфере. Задача моделирования спектральных измерений потребовала разработки эффективных методов расчета рассеянного излучения для больших массивов мало различающихся длин волн. Это в большинстве случаев связано с объ-

емными вычислениями при малых изменениях параметров состояния атмосферы, что может быть эффективно реализовано через расчет характеристик переноса для одной длины волны – точку линеаризации уравнения переноса – и производную этих характеристик по меняющемуся параметру состояния атмосферы. Характеристики переноса и одновременно их производные по оптическим параметрам необходимы также при решении обратных задач атмосферной оптики. Вычисленные производные используются для линеаризации оператора переноса с последующим рассмотрением линейной схемы измерения или в итерационных алгоритмах решения обратной задачи. По этой причине от модели переноса, предназначенной для использования в дистанционном зондировании, требуется не только вычисление характеристик переноса излучения, но и эффективный алгоритм вычисления их производных по параметрам состояния атмосферы. При этом точная интерпретация наиболее информативных лимбовых и сумеречных измерений должна опираться на модели со сферической геометрией атмосферы.

В иностранной литературе, посвященной решению обратных задач атмосферной оптики, производные по оптическим характеристикам часто называются весовыми функциями (the weighting functions), следуя терминологии К. Роджерса [26]. Далее будет также рассмотрено понятие эффективной воздушной массы (the air mass factor) слоя атмосферы, связанное с упомянутой производной. Вводимое для рассеянного излучения понятие эффективной воздушной массы слоя имеет наглядный физический смысл, сходный с аналогичным понятием для прямого излучения.

Общий подход к построению моделей переноса излучения в атмосфере с вычислением производных по параметрам, основанный на теории возмущения, впервые был предложен в работе Г.И. Марчука [27]. В работе Г.А. Михайлова [28] начато рассмотрение проблемы вычисления производных при использовании метода Монте-Карло. Впервые эффективный алгоритм вычисления производных по параметру для задачи переноса в атмосфере был построен в модели, описанной в монографии [29]. Он был реализован в сферической геометрии для вычисления производных по коэффициенту аэрозольного рассеяния в методе двойной локальной оценки Монте-Карло. Дальнейшее развитие идеи монографии [29] о вычислении производных получили в работе [57]. В последние несколько лет стали появляться другие модели с вычислением производных по параметрам: модель GOMETRAN метода конечных раз-

ностей [30], модель LIDORT метода дискретных ординат [31], модель LIRA метода итераций Гаусса–Шейделя [32], модель CDI на основе комбинированного интегродифференциального подхода [33, А. Розанов – устное сообщение]. Эти модели не учитывают поляризацию и были разработаны для плоской атмосферы, но, как правило, имеют псевдосферические модификации. В псевдосферических моделях в сферической геометрии рассматривается только первый порядок рассеяния, а последующие – в приближении плоской атмосферы. Отдельные вопросы линеаризации уравнения переноса по аэрозольным параметрам с учетом многократного рассеяния были также рассмотрены в работах [34–36].

В работе представлена модель переноса излучения, разработанная для использования в обратных задачах атмосферной оптики. Изложены принципы построения модели и, вкратце, результаты ее сравнения с другими моделями переноса. Рассмотрены возможности улучшения результатов восстановления при использовании весовых функций, учитывающих многократное рассеяние, по сравнению с весовыми функциями, рассчитанными в приближении однократного рассеяния.

#### МЕТОД РАСЧЕТА ПРОИЗВОДНЫХ, ВЕСОВЫХ ФУНКЦИЙ И ПОСЛОЙНЫХ ЭФФЕКТИВНЫХ ВОЗДУШНЫХ МАСС

Применение метода Монте-Карло к задачам атмосферной оптики основано на том, что процесс распространения света можно рассматривать как случайную марковскую цепь столкновений фотонов с молекулами атмосферы, которые приводят либо к рассеянию, либо к поглощению фотонов. Метод Монте-Карло заключается в моделировании случайных траекторий этой цепи на ЭВМ и вычислении ее характеристик, являющихся оценками искомых величин [29, 37–39]. Важно, что при таком моделировании возможно одновременно вычислять вероятностную оценку точности полученных результатов. С целью минимизации времени вычислений для различных условий наблюдения разработаны специализированные методы моделирования, модифицирующие алгоритмы розыгрыша прохождения фотона через атмосферу и учитывающие симметрию задачи.

Рассмотрим теоретическое обоснование метода расчета производных, используемого в представляемой модели. Распространение света в атмосфере описывается интегральным уравнением переноса относительно плотности столкновений фотонов  $\rho = \rho(\mathbf{x})$  в фазовом пространстве  $X$ :

$$\rho = \mathbf{K}\rho + \psi, \quad (1)$$