

Б.А. Фомин

Метод параметризации газового поглощения атмосферной радиации, позволяющий получить К-распределение с минимальным числом членов

РНИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

Поступила в редакцию 27.12.2002 г.

Описан метод, основанный на полинейных (line-by-line) вычислениях, который позволяет в заданном широком спектральном интервале по заранее заданной точности эффективно оценивать минимально возможное число членов К-распределения, а затем находить их параметры для моделирования потоков радиации и радиационных выхолаживаний/нагревов в атмосфере. Его применение может существенно повысить точность и примерно втрое быстрее действие современных радиационных блоков климатических моделей, основанных на методе К-распределения.

Введение

В последнее время для параметризации атмосферной радиации в основном применяется метод К-распределения [1, 2]. В этом методе спектры газов на «широких» ($\sim 100 \text{ см}^{-1}$) интервалах заменяются суммой нескольких прямоугольных «квазилиний», множества спектральных точек которых, следуя работе [3], будут далее называться каналами (channels). «Квазилинии» получаются путем сортировки точек спектра, объединения их в каналы, а затем приписывания всем точкам канала единого «эффективного» коэффициента поглощения. После этого в уравнениях переноса с «квазилинией» можно оперировать как с монохроматическим излучением. Так как быстродействие параметризации прямо пропорционально числу каналов, то требуется минимизировать их число при одновременном удовлетворении заданным требованиям точности. Задача минимизации часто решалась подбором стандартных квадратур (обычно Гаусса–Лежандра, в так называемом g -пространстве [1–4]). Эта процедура, эффективная для однородных условий, оказалась не очень эффективной в неоднородной атмосфере, и здесь был найден резерв повышения быстродействия. В работе описывается метод, позволяющий в заданном спектральном интервале по заданной точности эффективно оценивать минимально возможное число каналов (членов К-распределения), а затем находить их параметры именно в неоднородной атмосфере. Этот метод также позволяет более эффективно, чем обычный метод корреляции К-распределения (correlated k-distribution [5]), контролировать точность аппроксимации радиационных выхолаживаний и нагревов в верхней атмосфере и, что следует особо подчеркнуть, учитывать перекрывание полос разных газов.

Реализация метода, требующего интенсивных полинейных вычислений, оказалась возможной благодаря эффективному алгоритму [6].

1. Процедура нахождения каналов

В предлагаемом методе, как и в методе корреляции К-распределения, точки спектрального интервала объединяются в каналы по критерию схожести поведения коэффициента поглощения атмосферной радиации. Предлагается следующая процедура.

А) Для каждого газа и для каждого уровня некой модели атмосферы (например, «тропической» [7]) вычисляются объемные коэффициенты поглощения K_i в точках i сетки волновых чисел (как обычно для полинейных вычислений потоков радиации в атмосфере).

Б) Выбирается один из уровней, на котором производится отбор точек в первый канал U_1 с помощью критерия: точка считается входящей в канал, если коэффициент поглощения в этой точке на данном уровне меньше заранее заданного порога S_1 ($i \in U_1$, если $K_i < S_1$).

В) На множестве точек канала U_1 производится полинейное вычисление профилей трех величин: восходящих и нисходящих потоков атмосферной радиации, а также радиационных выхолаживаний/нагревов для всех горизонтальных уровней модели атмосферы.

Г) По одному из этих трех профилей (с помощью численной процедуры) определяется профиль «эффективного» объемного коэффициента поглощения на каждом уровне атмосферной модели, который, будучи подставлен в уравнение переноса, дает тот же профиль исходной величины (т.е. решается как бы обратная задача).

Д) С полученным профилем «эффективного» объемного коэффициента поглощения решается уравнение переноса, а затем найденные решения сравниваются с тремя исходными полинейными решениями (при этом одна из трех пар решений совпадает автоматически).

Е) Если различия не удовлетворяют заданным требованиям точности или слишком малы, то канал сужается или расширяется путем соответственно понижения или повышения порога S_1 , а работа возобновляется с пункта «Б», пока не будет найден порог, обеспечи-

вающий нужную точность при максимальной ширине канала U_1 .

Ж) Затем точки найденного канала U_1 исключаются из дальнейшего рассмотрения и для оставшихся работа возобновляется с пункта «Б» (может быть использован иной атмосферный уровень), что позволяет последовательно определить все N каналов U_1, U_2, \dots, U_N . «Эффективное» поглощение возрастает с номером канала, а его ширина обычно сужается.

Метод основан на следующем простом факте: только для монохроматического излучения существует единый профиль коэффициента поглощения, позволяющий точно описать и восходящее и нисходящее излучение одновременно. Предлагаемая процедура выделяет множества спектральных точек, т.е. каналов, в которых коэффициенты поглощения ведут себя достаточно одинаково (практически не зависят от частоты излучения), чтобы с требуемой точностью можно было применять соотношения, справедливые для монохроматического излучения (например, закон Бугера–Ламберта–Бера). На рис. 1 представлена часть реального расчета для 15-микронной полосы углекислого газа, разбитой на 10 каналов.

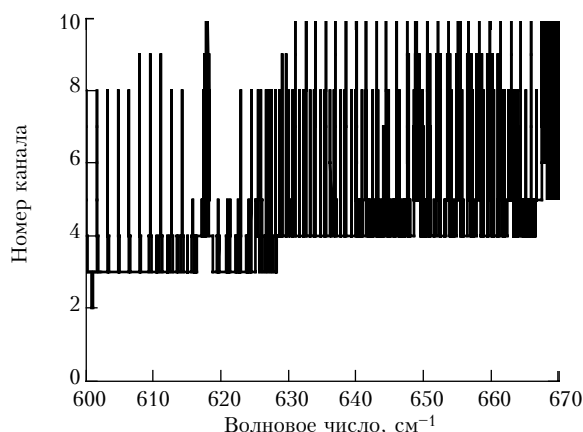


Рис. 1. Часть 15-микронной полосы углекислого газа, разбитой на 10 каналов

Выбор уровней атмосферной модели, где производится отбор точек в каналы, и самой модели достаточно произволен. Заметим, что в верхней атмосфере лучше использовать радиационные выхолаживания/нагревы, а не потоки, что позволяет существенно повысить точность параметризации в этой области. Важно отметить, что в отличие от обычного метода корреляции К-распределения (использующего сортировку спектра) сохраняется информация о том, в какой канал входит каждая спектральная точка. Это значительно облегчает решение проблемы перекрытия полос разных газов. Так,

рассмотрение пересечений каналов (как множеств), полученных для каждого из газов, фактически определяет каналы смеси.

2. Процедура получения параметров К-распределения

Вышеописанная процедура полностью решает проблему нахождения К-распределения, но только для использованной модели атмосферы. Если применить эту процедуру, *не меняя каналов*, для других моделей атмосферы, то будут получены разные профили. На рис. 2 для четырех из шести стандартных моделей атмосферы («Tropical» TRP, «Mid-Latitude Summer» MLS, «Mid-

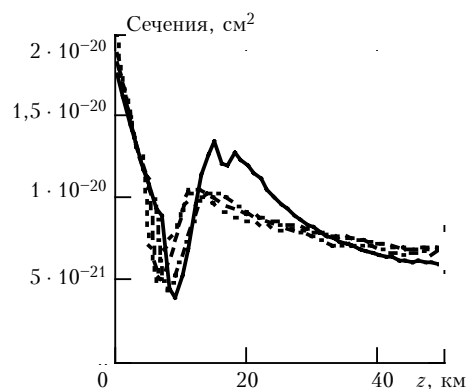


Рис. 2. Спектральный интервал 50–250 см^{-1} . Вертикальные профили «эффективного» сечения молекул H_2O (см^2), полученные для TRP (—), SAW (---), MLW (- · -) и USA (- · · -) атмосферных моделей

Latitude Winter» MLW, «Sub-Arctic Summer» SAS, «Sub-Arctic Winter» SAW, «Standard USA» USA) показаны вертикальные профили «эффективного» сечения, см^2 , молекул H_2O в интервале 50–250 см^{-1} для единственного канала. Здесь и далее примеры будут даны только для описания длинноволновой радиации. Изменения в профилях «эффективных» коэффициентов поглощения отражают зависимость реальных коэффициентов поглощения от температуры и давления. Для данного интервала зависимость поглощения водяного пара от температуры, как известно, невелика, и ею часто можно пренебречь. Поэтому для рассмотренного случая может быть рекомендован некий средний профиль «эффективного» коэффициента поглощения, единый для всех атмосферных условий. Он задан в табл. 1, предназначенной для простой линейной интерполяции по давлению. Качество этой простой одноканальной параметризации обеспечивает точность в вычислении радиационных выхолаживаний более чем 0,1 град/сут для всех рассмотренных выше моделей атмосферы.

Таблица 1
Узловые точки для линейной интерполяции по давлению P (мбар) сечений S (см^2) молекул H_2O в интервале 50–250 см^{-1}

$\ln(P)$	-8	-6	-4	-3	-2	-1	0	3
S	3E-19	3,8E-19	4,4E-20	1,35E-20	7,65E-21	6,6E-21	6,6E-21	8,2E-21
$\ln(P)$	4	5	5,8	6,0	6,4	6,6	7,0	-
S	9E-21	1,15E-20	5,7E-21	5,7E-21	1,2E-20	1,4E-20	2E-20	-

Примечание. 3E-19 обозначает $3 \cdot 10^{-19}$ и т.д.

Число каналов, полученных методом корреляции К-распределения и предлагаемым методом

Публикация	[1]	[3]	[4]	[8]	Данная работа
Интервал, см ⁻¹		50–250	10–250	0–340	40–250
Состав	–	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
Число каналов		7	16	6	1
Интервал, см ⁻¹	10–550	50–550	10–500	0–540	40–550
Состав	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
Число каналов	10	17	32	12	4
Интервал, см ⁻¹	550–990	570–990	500–980	540–980	550–990
Состав	H ₂ O, CO ₂	H ₂ O, CO ₂	H ₂ O, CO ₂	H ₂ O, CO ₂	H ₂ O, CO ₂
Число каналов	29	11	112	24	10

На других участках спектра температурную зависимость необходимо учитывать. Оказывается, довольно неплохую точность учета температурной зависимости в параметризации дает следующий предельно простой способ:

а) вычисляются «эффективные» коэффициенты для двух наиболее разных моделей атмосферы (обычно TRP и SAW);

б) для каждого давления эти коэффициенты, соответствующие разным температурам, используются как узловые точки в простой линейной интерполяции по температуре.

Как уже отмечалось в предыдущем разделе, анализ каналов, полученных для разных газов, позволяет достаточно просто получить каналы для смеси газов. Все это уже сейчас дает возможность разрабатывать эффективные параметризации радиации, например для климатических моделей. Об их качестве может дать представление рис. 3, где показано радиационное выхолаживание (град/сут) из-за поглощения в линиях CO₂ и H₂O на интервале 550–990 см⁻¹. Как видно из рисунка,



Рис. 3. Радиационные выхолаживания, полученные полинейным (—) и предлагаемым (· · ·) методами (10 каналов). Модель TRP, поглощения в линиях H₂O и CO₂, интервал 550–990 см⁻¹

десять каналов позволяют достичь точности более 0,1 град/сут в тропосфере и ~ 0,5 град/сут в верхней атмосфере (что сопоставимо с точностью известных

параметризаций, например [1–3], ныне применяемых в радиационных блоках для климатических моделей). Следует подчеркнуть, что такая точность не является предельной для данного метода. В настоящее время она ограничена, в основном, вышеописанным простым способом учета температурной зависимости поглощения. Точность может быть повышена в несколько раз без увеличения числа каналов, т.е. без потерь быстродействия, только улучшением способа учета этой зависимости (например, использованием для получения интерполяций не двух, а большего числа атмосферных профилей). Сама же процедура разбиения интервала на каналы представляется достаточно эффективной, как это следует из табл. 2, где сопоставлены числа каналов, полученные разными методами.

Эффективность параметризаций, представленных в табл. 2, вообще говоря, сравнивать следует с осторожностью, так как они обладают разной точностью. Тем не менее можно ожидать, что предлагаемая методика может примерно втрое уменьшить число необходимых каналов.

Заключение

Полученные результаты указывают на возможность разработки параметризаций длинноволновой радиации для климатических исследований, основанных на К-распределениях, состоящих из ~ 15 членов, для вычислений до 40 км и ~ 20 членов до 70 км во всем спектральном диапазоне, точность которых для радиационных выхолаживаний будет выше 0,1 град/сут. Можно также ожидать существенного повышения эффективности параметризаций и в коротковолновой области. В итоге можно примерно втрое увеличить быстродействие радиационных блоков климатических моделей и увеличить их точность, особенно в верхней атмосфере. Предложенная методика может быть полезной и в других приложениях, например при разработке математического обеспечения для экспериментов со спектральным разрешением (~ 1–100 см⁻¹).

Автор выражает искреннюю благодарность проф. Т. Накаджиме за предложенную тему и поддержку работы.

Работа была частично поддержана грантом РФФИ № 02-05-64529.

1. *Cusack S., Edwards J.M., Crowther J.M.* Investigating k -distributing method for parametrizing gaseous absorption in the Hadley Centre Climate Model // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 2051–2057.
2. *Мицель А.А., Фирсов К.М., Фомин Б.А.* Перенос оптического излучения в молекулярной атмосфере. Томск: Изд-во «СТТ», 2000. 443 с.
3. *Nakajima T., Tsukamoto M., Tsushima Y., Numaguti A., Kimura T.* Modeling of the radiation process in an atmospheric general circulation model // *Appl. Opt.* 2000. V. 39. P. 4869–4878.
4. *Mlawer E.J., Taubman J., Brown P.D., Iacono M.J., Clough S.A.* Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated- k model for the longwave // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 16663–16682.
5. *Lacis A.A., Oinas V.* A description of the k -distribution methods for modeling nongray gaseous absorption, thermal emission and multiple scattering in vertically inhomogeneous atmospheres // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 9027–9063.
6. *Fomin B.A.* Effective interpolation technique for line-by-line calculations of radiation absorption in gases // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 1995. V. 53. P. 663–669.
7. *Ellingson R.G., Ellis J., Fels S.* The intercomparison of radiation codes used in climate models: longwave results // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 8929–8953.
8. *Chou M.-D., Ridgway W., Yan M.-H.* One-parameter scaling and exponential sum fitting for water vapor and CO₂ infrared transmission function // *J. Atmos. Sci.* 1993. V. 50. P. 2294–2303.

B.A. Fomin. A method for parameterization of gas absorption of atmospheric radiation giving k -distribution with the minimum number of terms.

A method based on line-by-line calculations is described. In a wide spectral region for a preset accuracy, this method provides for efficient estimation of the minimal possible number of terms in the k -distribution and then determination of their parameters for simulation of radiative fluxes and radiative cooling/heating in the atmosphere. The application of this method can significantly increase the accuracy and roughly triple the speed of current radiative blocks of climatic models based on the method of k -distribution.