

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ
ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 551.593.5:510.67

С.Г. Звенигородский, А.А. Кривобок

**К РАСЧЕТУ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ
В ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЯХ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Рассмотрена возможность использования упрощенного двухпоточкового метода для расчета радиационных характеристик в УФ и видимом диапазоне в радиационно-конвективных и фотохимических моделях атмосферы. Проведены сравнительные расчеты с использованием более точной схемы Δ-Эддингтон. Показано, что при сохранении удовлетворительной (в пределах 10–15%) точности расчетов восходящих и нисходящих потоков и температурных профилей может быть достигнута значительная экономия времени ЦП ЭВМ, что принципиально важно для вышеуказанных моделей, где радиационный блок используется в режиме многократного обращения на каждом последующем временном шаге модели.

Иллюстрируется возможность учета в рамках упрощенного алгоритма облачных эффектов в трансформации радиационных полей, что, как показывают выполненные расчеты, важно для моделирования газового состава нижней тропосферы.

Радиационные блоки являются важнейшей составной частью современных численных моделей, имитирующих различные типы физических процессов в атмосфере (модели общей циркуляции, радиационно-конвективные модели, фотохимические модели газового состава атмосферы и т. д.). Использование радиационных блоков в этих моделях в режиме многократного — на каждом временном шаге — обращения предполагает применение экономных (в смысле затрат времени ЦП ЭВМ) численных алгоритмов, обеспечивающих в то же время достаточно высокую точность. В этой связи в последнее время вновь получили широкое распространение двухпоточковые схемы интегрирования уравнения переноса. Вместе с тем используемые упрощенные схемы требуют подробного исследования на предмет оценки их чувствительности к различным возмущающим атмосферным факторам (влияние облачности, изменение содержания озона, аэрозоля и т. д.) и точности в сравнении с более совершенными алгоритмами (метод сложения слоев, Δ-Эддингтон метод и т. д.), что и является основной целью выполненных в рамках настоящей работы численных экспериментов.

В качестве объекта такого анализа был выбран двухпоточковый метод, разработанный в [1] и используемый в большинстве современных фотохимических моделей атмосферы. Идея метода состоит в раздельном расчете потоков прямого и диффузного излучения в плоскостратифицированной атмосфере, разбитой на N слоев. Предполагается сферичность индикатрисы, что позволяет рассчитывать диффузные восходящие и нисходящие потоки, исходя из равной вероятности рассеяния фотонов вверх и вниз вдоль трассы распространения излучения. Рекуррентные соотношения, полученные в [1] для произвольного слоя, имеют вид

$$\downarrow F_i^{np} = \downarrow F_{i+1}^{np} \exp(-\Delta\tau_{i+1/2}) - \quad (1)$$

для прямого нисходящего потока;

$$\downarrow F_i^k = \left[\frac{1}{2} (\downarrow F_{i-1}^{k-1} + \uparrow F_{i-1}^{k-1}) (1 - \exp(-\Delta\tau_{i+1/2})) + F_{i+1}^k \right] \exp(-\Delta\tau_{i+1/2}) - \quad (2)$$

для нисходящего диффузного потока;

$$\uparrow F_i^k = \left[\frac{1}{2} (\uparrow F_{i-1}^{k-1} + \downarrow F_{i-1}^{k-1}) (1 - \exp(-\Delta\tau_{i-1/2})) + \uparrow F_{i-1}^k \right] \exp(-\Delta\tau_{i-1/2}) - \quad (3)$$

для выходящего диффузного потока;

$$\uparrow F_i^{np} = \downarrow F_1^{np} \cdot A \exp\left(-\sum_{j=1}^{i-1} \Delta\tau_{j+1/2}\right) - \quad (4)$$

для потока прямой радиации, отраженной от земной поверхности. Здесь τ — оптическая толщина; A — альbedo подстилающей поверхности; k — порядок рассеяния; $t = 1, N$, где N — количество уровней. Метод позволяет рассчитывать потоки диффузного излучения произвольной кратности, однако, как показано в [1], существен учет только первых пяти порядков рассеяния.

Рассмотренный выше алгоритм был реализован нами на высотной сетке 0–50 км с шагом по высоте 1 км со спектральным разрешением $\Delta\lambda = 0,005$ мкм. Использовались вертикальные профили концентрации O_2 , O_3 и внеатмосферные потоки радиации из [2]. Время ЦП ЭВМ ЕС 1045, необходимое для решения монохроматической задачи, не превышает 2 с. Алгоритм был реализован в спектральном диапазоне 0,175–0,75 нм.

В качестве альтернативного численного метода нами использовалась модификация Δ -Эддингтон метода, разработанная в [3] и реализованная в радиационно-фотохимической модели, разработанной в ГГО [4]. Как известно, этот двухпоточковый метод позволяет достигать хорошей точности в расчетах потоков диффузного излучения для среды с сильно вытянутой вперед индикатрисой рассеяния. Однако время решения монохроматической задачи увеличивается, по крайней мере, на порядок, что принципиально при режимах счета с многократным обращением к радиационному блоку. Численные эксперименты для сравнения двух вышеуказанных алгоритмов проводились с синхронизированным комплектом исходных данных (сечения поглощения O_2 , O_3 и NO_2 , внеатмосферные потоки радиации и т.д.) и с одинаковым высотным и спектральным разрешением.

Результаты численных экспериментов

На рис. 1 представлены интегральные восходящие и нисходящие потоки излучения (прямое плюс рассеянное) для спектральной области 0,3125–0,750 мкм, полученные методом [1] и Δ -Эддингтон методом, откуда следует, что различия незначительны для потоков нисходящего излучения и более заметны для потоков восходящего выше 15 км, однако максимальное расхождение и в этом случае не превышает 10–15%. Очевидно, что близкое совпадение расчетных значений потоков позволяет использовать более простой алгоритм [1] и для вычисления вертикальных профилей равновесной температуры в стратосфере, добиваясь тем самым значительной экономии времени счета. На рис. 2 представлены профили температуры, полученные при стыковке упрощенного алгоритма с ИК-блоком радиационно-конвективной модели ГГО [4] (в варианте модели ГГО для расчета скоростей нагрева в УФ и видимом диапазоне используется Δ -Эддингтон метод).

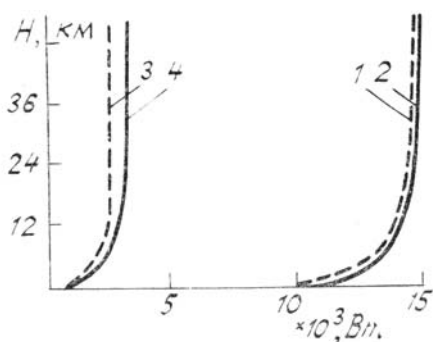


Рис. 1. Нисходящие (1, 2) и восходящие (3, 4) интегральные потоки в диапазоне 0,3125–0,75 нм, полученные с использованием [1] (1, 3) и Δ -Эддингтон метода (2, 4)

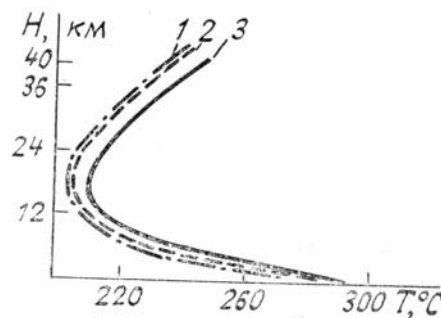


Рис. 2. Вертикальные профили температуры, полученные в рамках радиационно-конвективной модели (РКМ), в сравнении со стандартным профилем: 1 — РКМ, упрощенный алгоритм; 2 — РКМ, Δ -Эддингтон метод; 3 — стандартная атмосфера, США, 1962, 45 с. ш., июль

Следующая группа численных экспериментов иллюстрирует чувствительность этих алгоритмов к вариациям содержания озона. Результаты расчетов показывают, что обе численные схемы достаточно устойчивы, а их чувствительность к вариациям оптической толщины поглощения практически идентична. Количественные оценки отклика радиационной схемы [1] на удвоение и уменьшение в два раза содержания озона в атмосфере приводятся в таблице.

Таким образом, можно рекомендовать использование значительно более экономичного алгоритма [1] в качестве составной части радиационных блоков в численных моделях атмосферы климатического класса.

Другим важным аспектом применения двухпоточкового метода [1] является расчет констант реакций фотодиссоциации малых газовых составляющих в фотохимических моделях атмосферы, где этот метод получил большое распространение в силу своей экономичности. Вместе с тем при расчете констант фотодиссоциации

$$J^A(z) = \int_{\Delta\lambda} P_\lambda(z) q_\lambda^A \sigma_\lambda^A d\lambda \quad (5)$$

(где $J(z)$ — скорость фотодиссоциации газа А на уровне z атмосферы; $P_\lambda(z)$ — монохроматический приток излучения на уровне z ; q_λ^A — квантовый выход реакции; σ_λ^A — сечение поглощения газа А на длине волны λ ; $\Delta\lambda$ — спектральный диапазон фотодиссоциации газа А) возникает ряд особенностей в области тропосферы, обусловленных необходимостью учета эффекта облачности. Тем не менее попытки адаптировать алгоритм [1] к облачным условиям (по крайней мере по современным литературным данным) еще не предпринимались. В рамках настоящей работы такая попытка, основанная на параметризации, предложенной в [5], была предпринята.

Чувствительность радиационной схемы [1] к изменениям содержания озона в атмосфере

H, км	Двукратное увеличение (верхняя строка) и двукратное уменьшение (нижняя строка) содержания озона		
	Для нисходящих потоков	Для восходящих потоков	Для температуры
	$\Delta = \frac{\downarrow F_\varphi - \downarrow F^*}{\downarrow F_\varphi} \cdot 100\%$	$\Delta = \frac{\uparrow F_\varphi - \downarrow F^*}{\uparrow F_\varphi} \cdot 100\%$	$\Delta = \frac{T_\infty - T^*}{T_\varphi} \cdot 100\%$
0	-3,5 1,6	-3,0 1,2	0 0
10	-3,4 1,5	-3,1 1,3	0,04 0,04
20	-2,5 1,3	-3,3 1,8	0,12 0,8
30	-1,3 0,5	-3,3 2,4	0,3 -0,19
40	-0,6 0,3	-3,7 2,8	0,3 -0,2
50	-0,3 0,2	-3,8 2,9	1 -1,2

F^* — поток, характерный для невозмущенного состояния атмосферы.

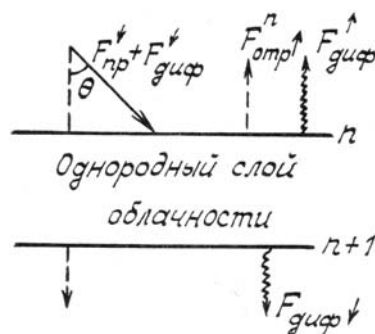


Рис. 3. Схема параметризации облачности

Схема параметризации облачности, представляющей собой однородный слой километровой толщины, отражена на рис. 3. На верхней границе облака к восходящему диффузному потоку добавляется отраженная от верхней границы облака часть прямого и диффузного нисходящего потоков:

$$F_{отр}^n \uparrow = A_{обл} (2 \cos \theta \cdot F_{пр}^n \downarrow + F_{диф}^n \downarrow), \quad (6)$$

где $A_{обл}$ — альbedo облачности.

Неотраженная часть излучения достигает нижней границы облака только в виде диффузной компоненты:

$$F_0^{n+1} \downarrow = (1 - A_{обл}) (2 \cos \theta \times F_{пр}^n \downarrow + F_{диф}^n \downarrow). \quad (7)$$

(Предполагается, что в облаке поглощения фотонов не происходит). Суммарный нисходящий диффузный поток в первом подоблачном слое складывается из радиации, прошедшей через облако, и части отраженного от нижней границы восходящего снизу диффузного потока:

$$F_{\text{диф}}^{n+1} \downarrow = F_0^{n+1} \downarrow + A_{\text{обл}} \times F_{\text{диф}}^{n+1} \uparrow. \quad (8)$$

Таким образом, в соотношения (6–8) входит только один параметр, характеризующий оптические свойства облачности, — альbedo. В численных экспериментах, выполненных в рамках настоящей работы в соответствии с [5], предполагалось $A_{\text{обл}} = 0,8$. На рис. 4 приводятся результаты расчетов относительного изменения общего потока излучения в облачной атмосфере на высотах 0 и 10 км (выше и ниже облачного слоя, расположенного между 2 и 3 км) в сравнении с результатами [5], где указанная параметризация облачности включалась в радиационную схему Лютера [6]. На рис. 5 представлены результаты расчетов вертикальных профилей констант скоростей для следующих принципиально важных в атмосферной фотохимии процессов фотолиза:



Тот факт, что значения констант реакций (9–11), рассчитанные в облачных и безоблачных условиях, отличаются в несколько раз, подчеркивает необходимость учета облачных эффектов при моделировании фотохимических процессов в нижней тропосфере. Влияние облачности на интенсивность фотолиза в верхней тропосфере проявляется в значительно меньшей степени, что иллюстрирует рис. 6, где приводится отношение скоростей реакции (11) и (9) как функции зенитного угла, рассчитанное в облачной и безоблачной атмосфере для высоты 10 км в сравнении с аналогичными расчетами, выполненными в [5].

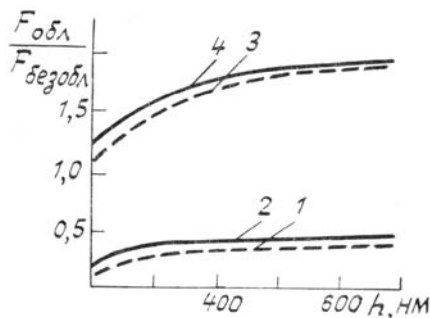


Рис. 4. Спектральный ход отношения потоков излучения в облачной и безоблачной атмосфере: зенитный угол $\Theta = 60^\circ$; $A_{\text{обл}} = 0,8$; $A = 0$; 1 — подоблачный слой, $z = 0$, расчетные данные; 2 — то же, по данным [5]; 3 — надоблачный слой, $z = 10 \text{ км}$, расчетные данные; 4 — то же, по данным [5]

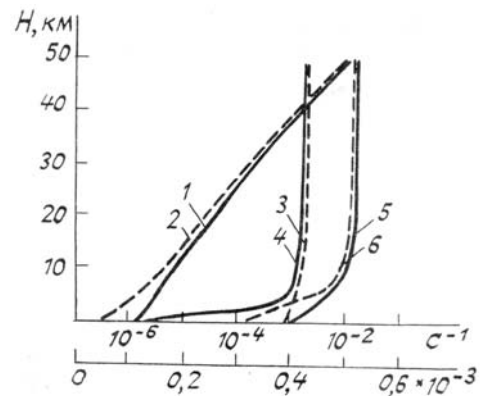


Рис. 5. Вертикальные профили констант скоростей реакций (9–11) в безоблачной и облачной атмосфере согласно результатам расчетов (см. текст): $A = 0$, $A_{\text{обл}} = 0,8$, $\Theta = 60^\circ$, $z_{\text{обл}} = 2-3 \text{ км}$; 1 — (9) безоблачная атмосфера; 2 — (9) учтена облачность; 3 — (10) безоблачная атмосфера; 4 — (10) учтена облачность; 5 — (11) безоблачная атмосфера; 6 — (11) учтена облачность

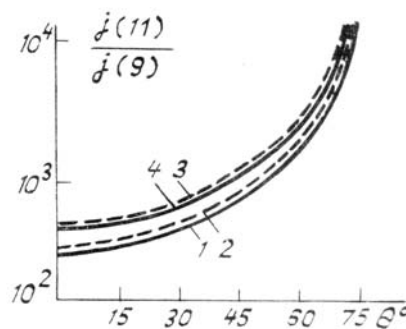


Рис. 6. Отношение скоростей реакций фотодиссоциации $j_{(11)}/j_{(9)}$ на высоте 10 км для безоблачной и облачной атмосферы в функции от зенитного угла солнца. $A_{\text{обл}} = 0,8$; 1 — безоблачная атмосфера, результаты расчетов; 2 — то же, по данным [5]; 3 — учтена облачность; 4 — то же, по данным [5]

Резюмируя вышеизложенное, можно сформулировать следующие рекомендации для расчетов радиационных характеристик при численном моделировании различных типов атмосферных процессов:

– двухпотоковая схема [1] может быть использована для расчета характеристик радиационного и термического режима атмосферы в УФ и видимой области спектра;

– рекомендуемая схема обеспечивает достаточную точность в уравнении с более сложными алгоритмами при значительной экономии времени ЦП ЭВМ;

– исследованный алгоритм позволяет учитывать эффект воздействия облачности на радиационные поля в тропосфере, а выполненные на его основе расчеты свидетельствуют о необходимости учета облачности при вычислении констант фотолиза в нижней атмосфере, что соответствует и выводам [5].

В заключение авторы выражают свою признательность к. ф.-м. н. Е.В. Розанову (ГГО) за предоставленную возможность использования разработанного им пакета программ (Δ -Эддингтон метод и блок переноса ИК-излучения) для выполнения сравнительных расчетов и полезные рекомендации.

1. Isaksen I. S. A. // *Geophys. Norvegica*. 1977. V. 81. № 4. P. 1125–1132.
2. The natural stratosphere of 1974. CIAP monograph 1. Final Report DOTST-75-51, 1975.
3. Joseph J. H., Wiskombe W. J., Weinman J. A. // *J. Atm. Sci.* 1976 № 12 P. 2452–2459.
4. Андропова Н. Г., Бабанова В. В., Кароль И. И. и др. Радиационно-фотохимические модели атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 191 с.
5. Thompson A. M. // *J. Geoph. Res.* 1984. V. 89. № 1. P. 1341–1349.
6. Luther F. M., Gehnas R. J. // *J. Geoph. Res.* 1976. V. 81. P. 1125–1132.

Ленинградский гидро- метеорологический институт

Поступила в редакцию
1 марта 1989 г.

S. G. Zvenigorodskii, A. A. Krivobok. On Calculations of the Radiation Fields Characteristics in Numerical Simulations of the Atmospheric Processes.

The possibility is analyzed in the paper of using a simplified two fluxes method for calculating the radiation characteristics in the UV and visual regions in application to radiation-convective and photochemical models of the atmosphere. The results of comparison made between this technique and more exact Δ -Eddington scheme are presented. It is shown that the use of the simplified method allows one to save essentially the computation time, the accuracy of calculations being at satisfactorily high level of 10 to 15 per cent, when calculating the up-going and down-going radiation fluxes. This is of particular importance for these models since the radiation program block is frequently referred to during the calculation procedure.

The paper also illustrates the capabilities of this algorithm to take into account the effects of clouds and radiation field transformations what is very important when modeling the gaseous composition of the atmosphere.