УДК 523.4-852-65

А. С. Овсак

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27

Расчет эффективной оптической глубины формирования линии поглощения в однородной полубесконечной планетной атмосфере при анизотропном рассеянии

Приведен алгоритм определения эффективной оптической глубины формирования линии поглощения в плоскопараллельной полубесконечной однородной планетной атмосфере планеты. Рассмотрен случай анизотропного рассеяния. Представлены результаты численных расчетов величины $_e(\ _0)$ *при угле рассеяния* $=$ *для некоторых значений альбедо однократного рассеяния и параметра g индикатрисы рассеяния Хеньи — Гринстейна. Приведена уточненная формула для функции* $T^m(\ ,\ _0)$.

РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОЇ ОПТИЧНОЇ ГЛИБИНИ ФОРМУВАННЯ ЛІНІЇ ПОГЛИНАННЯ У ОДНОРІДНІЙ НАПІВНЕСКІНЧЕННІЙ ПЛАНЕТНІЙ АТМОСФЕРІ З АНІЗОТРОПНИМ РОЗСІЯННЯМ, Овсак О. С. — Наведено алгоритм визначення ефективної оптичної глибини формування лінії поглинання у плоскопаралельній напівнескінченній однорідній планетній атмосфері. Розглянуто випадок анізотропного розсіяння. Приведено результати чисельних розрахунків величини $_e(\ _0)$ *при куті розсіяння* $=$ *для різних значень альбедо однократного розсіяння та параметра g індикатриси розсіяння Хеньї — Грінстейна. Наведено уточнену формулу для функції* $T^m(\ ,\ _0)$.

CALCULATIONS OF EFFECTIVE OPTICAL DEPTH OF ABSORPTION LINE FORMATION IN HOMOGENEOUS SEMI-INFINITE PLANETARY ATMOSPHERE WITH ANIZOTROPIC SCATTERING, by Ovsak A. S. — A plane-parallel semi-infinite homogeneous atmosphere is considered. An algorithm for the determination of effective optical depth of absorption line formation is given. The anizotropic scattering case is studied in detail. Our results of numerical calculations of the value $_e(\ _0)$ *are given for the case*

of scattering angle = for various values of single scattering albedo, and the parameter of the Heyney — Greenstein phase function, g. A refined formula for the function $T^m(\ ,\ _0)$ *is presented.*

В предыдущей работе [3] мы привели алгоритм решения задачи определения эффективной оптической глубины формирования линии поглощения в анизотропной рассеивающей однородной полубесконечной атмосфере и сделали ряд модельных расчетов для атмосфер с изотропной и простейшей несферической индикатрисой рассеяния. К сожалению, приведенная в работе [3] формула (18) для вычисления величины $A_h^m(\ ,\ _0)$ содержит опечатку. Поэтому ниже представлена соответствующая исправленная формула. Также приведены некоторые результаты расчетов при анизотропном рассеянии.

Рассматривается плоская полубесконечная атмосфера с произвольными значениями альбедо однократного рассеяния и индикатрисой рассеяния ( ) (— угол рассеяния). Атмосфера освещена параллельными лучами, создающими освещенность $_0$ на верхней ее границе (при азимуте $_0 = 0$). Обобщая данное Чемберленом [4] определение понятия эффективной оптической глубины формирования линии поглощения на случай анизотропного рассеяния в однородной атмосфере, в работе [3] мы дали определение $_e$

$$_e = \frac{\ _0 B(\ ;\ ,\ _0,\ )d}{\ _0 B(\ ;\ ,\ _0,\ )d}, \tag{1}$$

где $B(\ ;\ ,\ _0,\ )$ — функция источника, $,\ _0\ \ [0, 1]$. Знак минус у величины означает, что рассматривается выходящее из атмосферы диффузное излучение. Представляя функцию источника в виде ряда Фурье по азимуту [2]

$$B(\ ;\ ,\ _0,\ ) = B^0(\ ;\ ,\ _0) + 2 \sum_{m\ 1} B^m(\ ;\ ,\ _0)\cos m\ , \tag{2}$$

и подставляя (2) в (1), получим

$$_e = \frac{A(\ ,\ _0)\ \ 2 \sum_{m\ 1} A^m(\ ,\ _0)\cos m}{(C(\ ,\ _0)\ \ 2 \sum_{m\ 1} C^m(\ ,\ _0)\cos m\ )}.$$

Здесь

$$A^m(\ ,\ _0)\ \ _0 B(\ ;\ ,\ _0)d\ ,$$

$$C^m(\ ,\ _0)\ \ _0 B(\ ;\ ,\ _0)d\ ,$$

причем $A^0(\ ,\ _0)\ \ A(\ ,\ _0)$, $C^0(\ ,\ _0)\ \ C(\ ,\ _0)$.

Использование Q-формы уравнения переноса излучения [1] (см. также [2, § 3.12]) позволило решить задачу нахождения $\ _e$ путем использования функций $C_h^m(\ ,\ _0)$ и $A_h^m(\ ,\ _0)$, вычисляемых с помощью формул (17) и (18) в работе [3]:

$$C_h^m(\ ,\ _0)=\frac{}{4}\ _0\ Q^m(\ \ ,\ _0)\ \ 2\ \int_0^1\ ^m(\ ,\ _0)Q^m(\ ,\ )\ d\ \ , \qquad (3)$$

$$A_h^m(\ ,\ _0)=\frac{}{4}\ Q^m(\ \ ,\ _0)\ _0\ \ 2\ \int_0^1\ ^m(\ ,\ _0)Q^m(\ ,\ )(\ )^2 d\ \ +$$

$$+T^m(\ ,\ _0)\ \ 2\ \int_0^1\ ^m(\ ,\ _0)T^m(\ \ ,\ )\ d\ \ , \qquad (4)$$

а функции $Q^m(\ ,\ _0)$ и $T^m(\ ,\ _0)$ определяются по формулам (13), (14) и (19) из работы [3]:

$$Q^m(\ ,\ _0)=\sum_{i\ m}\frac{(2i\ \ 1)x_i^m}{2i\ \ 1\ \ x_i}P_i^m(\ )P_i^m(\ _0),$$

$$x_i^m\ \ x_i\frac{(i\ \ m)!}{(i\ \ m)!},$$

$$T^m(\ \ ,\ _0)=\frac{}{2}\int_{\ 1}^{1}Q^m(\ ,\ )Q^m(\ ,\ _0)\ d\ .$$

Здесь x_i — коэффициенты разложения индикатрисы рассеяния в ряд по полиномам Лежандра, $P_i^m(\ )$ — присоединенная функция Лежандра.

Для контроля точности вычислений функций $C_h^0(\ ,\ _0)$ и $A_h^0(\ ,\ _0)$ мы использовали известные интегральные соотношения (30) и (31) из работы [3] вида

$$2k\int_0^1 C_h^0(\ ,\ )i(\ )d\ \ \ (1\ \ k\ )i(\ \ ),$$

$$2k^2\int_0^1 A_h^0(\ ,\ )i(\ )d\ \ \ (1\ \ k\ )i(\ \ ),$$

где k — показатель диффузии, а для контроля точности вычислений функции $Q^0(\ ,\ _0)$ — соотношение (115) в работе [2, § 3.12]:

$$\frac{k}{2}\int_{\ 1}^{1}i(\ )Q^0(\ ,\ )d\ \ \ (1\ \ k\ )i(\ ).$$

Входящие в выражения (3) и (4) азимутальные гармоники $\ ^m(\ ,\ _0)$ коэффициента отражения полубесконечной атмосферы для случая анизотропного рассеяния находились численно с помощью метода, приведенного в работах [5; 2, § 3.5].

В качестве примера в таблице приведены рассчитанные значения отражательной способности $\ ^m(\ _0)$ и эффективной оптической глуби-

Значения отражательной способности ($_0$) и эффективной оптической глубины $_e$ ($_0$)

$_0$	$g = 0$				$g = 0.9$			
	= 0.70		= 0.999		= 0.70		= 0.999	
		$_e$		$_e$		$_e$		$_e$
1.0	0.183	1.43	0.949	18.6	0.010	2.82	0.816	58.3
0.8	0.173	1.23	0.747	18.4	0.0098	2.36	0.594	58.1
0.6	0.160	1.03	0.564	18.1	0.0095	1.94	0.397	58.1
0.4	0.144	0.834	0.400	17.9	0.0089	1.54	0.227	58.1

ны $_e$ ($_0$) при = для двух значений альбедо однократного рассеяния (0.7, 0.999). Поскольку эти расчеты предназначены только для выявления чувствительности оценок к изменению оптических характеристик атмосферы, то при расчетах была взята однопараметрическая индикатриса рассеяния со значениями параметра $g = 0$ и 0.9. Как видно, значение $_e$ ($_0$) сравнительно слабо зависит от угла падения света, но сильно — от оптических свойств атмосферы, особенно от формы индикатрисы рассеяния.

1. *Яновицкий Э. Г.* Новая форма уравнения переноса излучения в неизотропно рассеивающей атмосфере // Кинематика и физика небес. тел.—1986.—**2**, № 6.—С. 3—13.

2. *Яновицкий Э. Г.* Рассеяние света в неоднородных атмосферах. — Киев, 1995.— 400 с.

3. *Яновицкий Э. Г., Овсак А. С.* Эффективная оптическая глубина формирования линии поглощения в полубесконечной планетной атмосфере // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—**13**, № 4.—С. 3—21.

4. *Chamberlain J. W.* The atmosphere of Venus near her cloud tops // Astrophys. J.— 1965.—**141**, N 3.—P. 1184—1205.

5. *Dlugach J. M., Yanovitsky E. G.* The optical properties of Venus and Jovian planets // Methods and results of calculations of the intensity of radiation diffusely reflected from semi-infinite homogeneous atmospheres // Icarus.—1974.—**22**, N 1.— P. 66—81.

Поступила в редакцию 27.02.09