

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ CO В СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЕ И ЭФФЕКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛИНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ В ОСНОВНОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНО-ВРАЩАТЕЛЬНОЙ ПОЛОСЕ

В. С. Петров

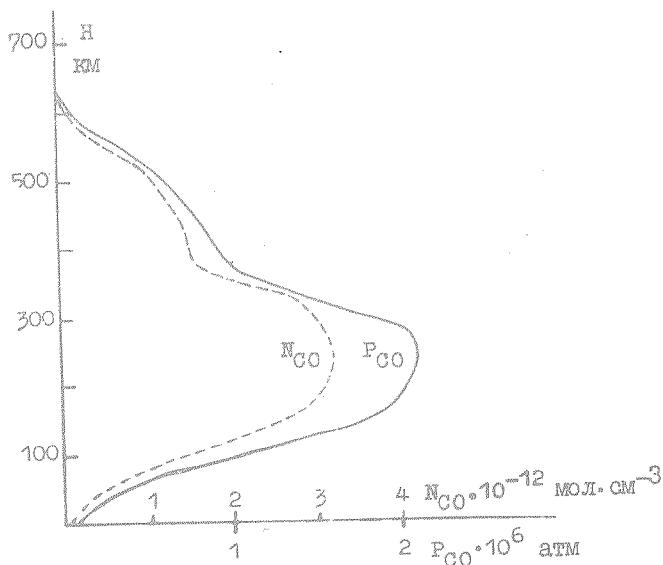
УДК 523.77:535.34

Рассчитаны распределение CO и концентрации некоторых молекул в солнечной атмосфере. Общее содержание CO в условиях спокойного Солнца  $1 \cdot 10^{20}$  мол·см<sup>-2</sup>. На основании полученного распределения определены для однослойной модели атмосферы основные параметры линий для расчета поглощения в колебательно-вращательной полосе CO (4,66 мкм).

I. Наиболее сильную связь в солнечной атмосфере имеют атомы в молекуле CO. Для CO константа равновесия реакции диссоциации может быть записана в следующем виде:

$$K_p = P_C P_O / P_{CO}, \quad (1)$$

где парциальные давления составляющих выражены в атмосферах. Результаты подробного расчета константы равновесия с шагом 100 K в интересующей нас области температур для различных газов даны в /2/. Для расчета высотного хода содержания CO мы воспользовались моделью стандартной атмосферы /3/. Вертикальное распределение CO показано на рис. 1. Максимальная концентрация соответствует высоте 235 км и довольно слабо изменяется по высоте. Интегральное содержание CO в столбе солнечной атмосферы, полученное из данного распределения, равно  $1 \cdot 10^{20}$  мол·см<sup>-2</sup>. Эта величина находится в хорошем соответствии с полученной на основании обработки экспериментальных спектров излучения Солнца в колебательно-вращательной полосе CO /4/.



Р и с. I. Распределение CO в солнечной атмосфере

Представляет интерес провести оценку содержания других молекулярных компонент атмосферы аналогичным методом. Работа /2/ предоставляет возможность выбора наиболее устойчивых к высоким температурам молекул, учитывая и менее устойчивые водородосодержащие молекулы. В табл. I приведены парциальные давления некоторых молекул и ионов и их содержание по отношению к CO.

Из таблицы видно, что наиболее распространенными молекулами в солнечной атмосфере являются  $H_2$  и CO. Количество остальных молекул на два и более порядков меньше первых. Различие в зависимости константы равновесия  $K_p$  от температуры для разных молекул и уменьшение полного давления  $P$  приводит к изменению относительного содержания молекул по высоте.

2. Для расчета параметров контура линии в случае многослойной модели разобьем атмосферу Солнца на 14 слоев (середина первого слоя - 36 км, последнего - 690 км) и будем считать, что основные параметры в пределах слоя остаются постоянными, толщина слоя определяется средними значениями между со-

седними высотами и форма контура линии описывается функцией Фойгта с относящимися к данному слою параметрами.

Таблица I.

Молекулы	Парциальное давл. $P_M$ атм., $T = 4700$ К, $P = 0,015$ атм.	$P_M/P_{CO}$	Парциальное давл. $P_M$ атм., $T = 4200$ К, $P = 0,0015$ атм	$P_M/P_{CO}$
$H_2$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	5,2	$4,6 \cdot 10^{-7}$	0,78
CO	$2,1 \cdot 10^{-6}$	I	$5,9 \cdot 10^{-7}$	I
$N_2$	$3,7 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$7,2 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
OH	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$8,5 \cdot 10^{-4}$
CN	$5,4 \cdot 10^{-9}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-11}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
CH	$1 \cdot 10^{-9}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-11}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$
NH	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-11}$	$6,8 \cdot 10^{-5}$
HCO	$3,1 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-13}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$
HCN	$3 \cdot 10^{-12}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-13}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$
$CO^+$	$3,8 \cdot 10^{-12}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$		
$OH^-$	$1,8 \cdot 10^{-16}$	$8,6 \cdot 10^{-11}$		

Для такой модели пропускание от внешнего слоя до  $k$ -того на частоте  $\omega$  можно записать в следующем виде:

$$T(\omega, k) = \exp \left( - 0,9394 \sum_{i=1}^k x_i S(\theta_i) f(\alpha_i, x_i) / V_{id} \right), \quad (2)$$

где  $x_i$  - поглощающая масса слоя в атм·см,  $S(\theta_i)$  - интегральный показатель поглощения линии,  $V_{id}$  - доплеровская полуширина линии в данном слое,  $f(\alpha_i, x_i)$  - функция Фойгта с параметрами  $\alpha_i = 0,8326 V_{il} / V_{id}$ ,  $x_i = 1,6651 (\omega_0 - \omega) V_{id}^{-1}$ . Уширение давлением учитывается через лоренцевскую полуширину линии -  $V_{il} = 0,12 P_{i0} \sqrt{300/\theta_i}$ . где  $P_{i0}$  - общее давление в слое

в атм,  $\Theta_1$  - температура слоя. Доплеровская полуширина содержит две части - уширение за счет температуры и за счет макротурбулентного движения газа. Если считать, что скорости макротурбулентного движения распределены по Максвеллу, то при среднеквадратической скорости 0,5 км/с суммарная полуширина может быть вычислена по формуле  $V_{1d} = \omega_0 \cdot 1,356 \cdot 10^{-7} \sqrt{\Theta_1} + \omega_0 \cdot 3,34 \cdot 10^{-6}$ . Расчет  $S(\theta)$  и  $\omega_0$  проводился описанным в работе /4/ способом.

Коэффициент излучения для  $k$ -того слоя рассчитывается по

$$\varepsilon(\omega, k) = T(\omega, k) - T(\omega, k-1). \quad (3)$$

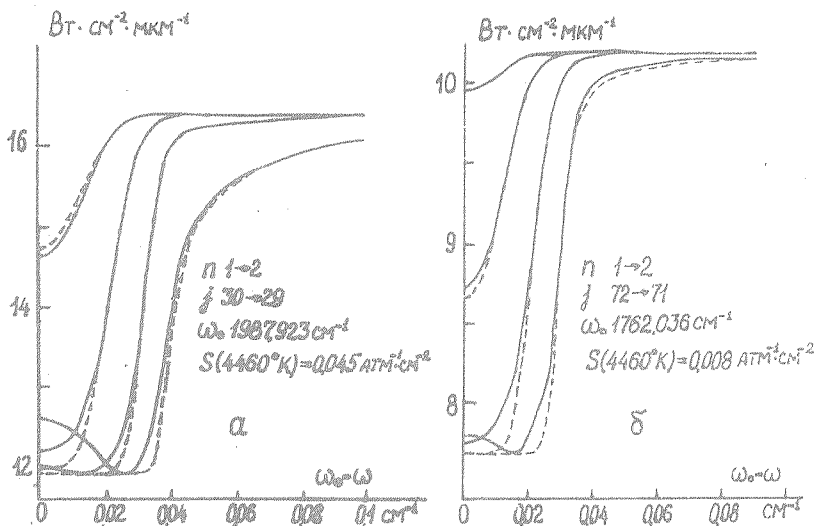
Для расчета интенсивности излучения системы (фотосфера Солнца - атмосфера) в качестве функции источника используем функцию Планка, тогда интенсивность

$$J(\omega) = J(\omega, \Theta_\Phi) T(\omega, 14) + \sum_{k=1}^{14} \varepsilon(\omega, k) J(\omega, \Theta_k). \quad (4)$$

Температура фотосферы табулирована для разных длин волн в соответствии с /5/.

На рис. 2а представлен спектр Солнца, рассчитанный по (4) для колебательно-вращательной линии ( $n = 1-2$ ,  $j = 30-29$ ,  $\omega_0 = 1987,923 \text{ см}^{-1}$ ,  $S(4460 \text{ К}) = 0,045 \text{ атм}^{-1} \text{ см}^{-2}$ ). Линия с наименьшим поглощением относится к общему содержанию CO в атмосфере  $1 \cdot 10^{18} \text{ мол} \cdot \text{см}^{-2}$ . При концентрации  $10^{21} \text{ мол} \cdot \text{см}^{-2}$  происходит самообращение линии за счет поглощения в верхних слоях с более высокой температурой. Линия находится в центре Р-ветви полосы и интенсивность ее уменьшается с ростом температуры ближе к фотосфере. Пунктиром показан результат расчета для однослойной модели атмосферы. Для этой модели использовались следующие параметры: поглощающая масса равна интегральному значению, умноженному на коэффициент 0,5, эффективное давление 0,011 атм, температура слоя для функции источника 4205 К, эффективная температура для определения параметров линий 4430 К.

На рис. 2б для сравнения показан спектр Солнца для линии, лежащей ближе к краю Р-ветви ( $n = 1-2$ ,  $j = 72-71$ ,  $\omega_0 = 1762,036 \text{ см}^{-1}$ ,  $S(4460 \text{ К}) = 0,008 \text{ атм}^{-1} \text{ см}^{-2}$ ). Интегральный



Р и с. 2. Спектр Солнца для многослойной (—) и однослойной (---) моделей атмосферы

показатель поглощения ее в 6 раз меньше первой и слабо изменяется с ростом температуры.

Из приведенных кривых видно, что для практических расчетов поглощения в колебательно-вращательной полосе CO в условиях солнечной атмосферы с целью сокращения расчетного времени можно ограничиться однослойной моделью с указанными выше параметрами.

3. В заключение сравним результаты этой работы по концентрациям молекул с литературными данными.

Подробный расчет концентрации CO без учета ангармонизма для 95 уровней дан в модели солнечной атмосферы NSRA /6/. Сравнение для расчета CO из таблиц /2/ и расчетов /6/ показывает, что первые значения несколько больше (T = 4200 K - 2%, 5200 K - 3%, 6200 K - 4%).

В нашей работе заниженная на 11% концентрация CO на уровне  $\tau = 1$ , по сравнению /7/, может быть объяснена меньшей кон-

центрацией исходных атомов (15%) и более высокими (4%) табличными данными /2/ по сравнению с рассчитанными в /6/. Для вышележащих уровней атмосферы концентрация CO растет значительно быстрее чем в (6) и различие достигает 40% на уровне  $\tau = 0,02$  ( $T = 4760$  K). Такой высотный ход определяется предпосылкой о постоянстве относительной концентрации атомарных составляющих по высоте. Концентрации таких компонентов атмосферы, как OH, CN, CO<sup>+</sup> близки к работе /7/, в то время как для молекулы HCO различие достигает порядка.

Для более точного расчета можно воспользоваться данными по относительной концентрации различных атомов, полученными в /8/.

Поступила в редакцию  
22 мая 1981 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. Э. Гибсон, Спокойное Солнце, Мир, М., 1977 г., с. 102.
2. Термодинамические свойства индивидуальных веществ, изд. АН СССР, М., 1962 г.
3. К. У. Аллен, Астрофизические величины, "Мир", М., 1977 г., с. 236.
4. В. С. Петров, М. Н. Марков, Препринт ФИАН № II6, 1980 г.
5. Е. А. Макарова, А. В. Харитонов, Распределение энергии в спектре Солнца и солнечная постоянная, "Наука", М., 1972 г.
6. O. Gingerich, R. W. Noyes, W. Kalkofen, Solar Phys., 18, N3, 347 (1971).
7. J. R. Riter, A. R. Chughtai, D. H. Yean, Bulletin Astron. Inst. Czech., 27, N 4, 231 (1976).
8. В. Е. Pagel, J. Phys. and Chem. Earth, N 11, 79 (1979).