

УДК 523.94

## О содержании углерода в солнечной атмосфере и уточнении сил осцилляторов линий нейтрального углерода

Б. Т. Бабий, М. Б. Гирняк

Определено содержание углерода в солнечной атмосфере ( $\lg A_C=8.40$ ) и уточнены силы осцилляторов линий нейтрального углерода на основании теоретических расчетов эквивалентных ширин линий нейтрального углерода и сравнении их с наблюдаемыми значениями.

*ON DETERMINATION OF CARBON ABUNDANCE IN THE SOLAR ATMOSPHERE AND IMPROVEMENT OF NEUTRAL CARBON OSCILLATOR STRENGTHS, by Babij B. T., Girnyak M. B.*— Carbon abundance in the solar atmosphere ( $\lg A_C=8.40$ ) has been determined and neutral carbon oscillator strengths have been improved comparing theoretical calculations of equivalent widths of the neutral carbon lines with observational data.

Вопрос о точном значении содержания углерода в солнечной атмосфере остается актуальным и в настоящее время, несмотря на многократные попытки его определения различными авторами. Знание содержания углерода важно как в общекосмологическом плане, так и для построения точной модели солнечной атмосферы. Известно, что углерод — один из наиболее распространенных химических элементов во Вселенной после водорода и гелия. Классической проблемой астрофизики является вопрос о тождественности химического содержания Солнца и метеоритов. Метеоритное содержание углерода оценивается сейчас значением  $A_C \equiv \lg N_C/N_H = 8.72$  [24] в шкале  $\lg N_H = 12.00$ ;  $N_C$  и  $N_H$  — количество атомов углерода и водорода в единице объема соответственно. Что же касается солнечного содержания углерода, то, как это видно из табл. 1, его значение по данным многочисленных работ колеблется от 8.05 до 8.88, т. е. примерно в 6 раз. Из анализа табл. 1 мы не можем прийти к определенному выводу, каким же все-таки является содержание углерода на Солнце: относительно высоким, близким к метеоритному, или относительно низким, отличающимся от него. Тре-

Таблица 1. Содержание углерода в солнечной атмосфере

Год определения	Авторы	Литературный источник	Содержание	Примечание
1960	Голдберг и др.	[12]	8.72	Кривые роста, фотосфера
1962	Башек	[7]	8.55	Фотосфера, молекулы
1966	Атей	[6]	8.88	Корона, УФ-спектр
1968	Ламберт	[17]	8.55	Фотосфера
1968	Вайдинг, Сандлин	[27]	8.68	Корона, УФ-спектр
1969	Никольский	[23]	8.30	Корона, УФ-спектр
1970	Тейкенс	[25]	8.60	Ревизия сил осцилляторов
1972	Дюпре	[9]	8.55	Корона, хромосфера, УФ-спектр
1973	Николайдес, Синаноглоу	[22]	8.60	Фотосфера, запрещенные линии
1975	Маунт, Линский	[21]	8.35	Отсутствие ЛТР, молекулы
1975	Крофорд и др.	[8]	8.34	Корпускулярное излучение вспышек
1975	Янг и др.	[28]	8.05	Протуберанцы, корона
1975	Маунт, Линский	[20]	8.30	Фотосфера, молекулы
1976	Росс, Аллер	[24]	8.62	Сводное значение
1977	Хеуге, Энгвольд	[14]	8.4	Сводное значение
1977	Энгвольд	[10]	8.7	Сводное значение
1978	Ламберт	[18]	8.67	Фотосфера, атомы и молекулы

буются дальнейшие исследования, и одна из таких попыток предпринята нами в данной работе.

Назовем некоторые из причин расхождений: неточности эквивалентных ширин, полученных из наблюдений; ненадежность значений сил осцилляторов для многих линий. В меньшей степени значения содержания подвержены влиянию постоянной затухания или неточности сумм по состояниям. Кроме того, источниками ошибок могут быть недостаточно надежные модели солнечной атмосферы, неучет отклонений от локального термодинамического равновесия (ЛТР), неправильный или приближенный учет механизма образования линий.

**Наблюдательный материал.** Первоначально для определения содержания углерода нами из каталога [19] отобраны 45 линий нейтрального углерода в области длин волн 420.0—810.0 нм с известными эквивалентными ширинами  $W$  для центра солнечного диска и значениями абсолютных сил осцилляторов  $lg gf$  согласно [16]. Данные о линиях

Таблица 2. Наблюдательные данные, атомные характеристики и найденные значения содержания углерода по разным линиям

$\lambda$ , нм	$EP$ , эВ	$W$ [19], пм	$lg gf$ [16]	$lg gf$ уточн.	$A_C$ HSRA	$A_C$ VAL-80	$A_C$ HOLMU
402.286	7.48	0.50	-2.70	-2.66	8.40	8.51	8.45
406.524	7.49	0.55	-3.85	-2.60	9.61	9.71	9.65
422.831	7.68	1.10	-2.11*	-2.12	8.36	8.45	8.41
426.903	7.68	1.50	-1.84*	-1.96	8.26	8.34	8.30
476.664	7.48	2.10	-2.38*	-1.90	8.86	8.91	8.91
477.000	7.48	1.60	-2.16*	-2.05	8.49	8.54	8.53
477.171	7.48	6.10	-1.56*	-1.20	8.83	8.85	8.87
477.588	7.49	2.00	-1.97*	-1.92	8.44	8.48	8.48
481.738	7.48	0.95	-2.34*	-2.31	8.41	8.46	8.45
505.210	7.65	3.80	-1.25*	-1.39	8.29	8.29	8.33
530.056	8.64	0.20	-4.19	-2.10	10.47	10.52	10.49
538.020	7.65	2.60	-2.03*	-1.62	8.83	8.83	8.86
554.505	8.64	0.40	-2.51	-1.78	9.12	9.15	9.14
555.155	8.64	0.50	-1.69*	-1.67	8.40	8.43	8.43
569.313	8.53	0.25	-1.85*	-2.07	8.05	8.19	8.19
579.446	7.94	0.10	-2.24*	-2.94	7.68	7.70	7.71
596.398	8.64	0.20	-2.80	-2.08	9.11	9.13	9.13
601.065	8.64	0.50	-1.82*	-1.66	8.56	8.56	8.57
601.320	8.64	0.70	-1.47*	-1.50	8.37	8.37	8.39
601.484	8.64	0.45	-1.71*	-1.71	8.40	8.41	8.41
601.641	8.64	0.20	-1.82*	-2.07	8.13	8.15	8.15
658.762	8.53	2.10	-0.57	-1.02	7.99	7.95	8.01
665.553	8.53	0.30	-1.37*	-1.96	7.80	7.79	7.81
667.419	8.84	0.10	-2.25*	-2.21	8.43	8.43	8.44
667.958	8.85	0.10	-2.28*	-2.20	8.47	8.46	8.48
706.591	8.64	0.10	-3.41	2.38	9.42	9.40	9.43
707.652	8.64	0.20	-3.39	-2.07	9.71	9.69	9.72
708.553	8.64	0.30	-3.31	-1.84	9.82	9.80	9.83
708.782	8.64	0.70	-3.16	-1.49	10.07	10.04	10.08
709.334	8.64	0.40	-3.26	-1.76	9.90	9.88	9.91
710.013	8.64	1.60	-1.60*	-1.07	8.94	8.89	8.95
710.892	8.64	0.35	-1.68*	-1.82	8.26	8.23	8.27
711.145	8.64	2.30	-0.81	-0.87	8.38	8.30	8.38
711.317	8.64	3.00	-0.35	-0.71	8.09	8.00	8.10
711.517	8.64	3.30	-0.71	-0.65	8.52	8.42	8.52
711.696	8.64	2.10	-0.91	-0.92	8.42	8.35	8.43
713.221	8.64	0.30	-1.59*	-1.89	8.10	8.07	8.11
747.615	8.77	1.20	-0.76	-1.12	8.05	8.00	8.06
748.342	8.77	0.90	-0.49	-1.26	7.62	7.59	7.64
766.242	8.77	0.80	-1.42*	-1.32	8.50	8.46	8.51
783.710	8.85	0.20	-1.46*	-1.90	7.96	7.92	7.96
784.820	8.85	1.50	-0.92	-0.94	8.33	8.33	8.41
805.874	8.85	0.70	-1.18*	-1.33	8.26	8.20	8.27
807.850	8.85	1.10	-1.66*	-1.10	8.91	8.90	8.92
808.382	8.85	0.50	-1.60*	-1.49	8.52	8.47	8.52

приведены в колонках 1—4 табл. 2: длина волны, потенциал возбуждения нижнего уровня  $EP$ , эквивалентная ширина, сила осциллятора.

**Расчеты эквивалентных ширин слабых фраунгоферовых линий углерода.** Методика расчета теоретических профилей, применяемая нами, подробно описана в работах [1, 2], поэтому здесь остановимся лишь на деталях расчетов, имеющих отношение к углероду. По согласованию крыльев наблюдаемого [5] и теоретически рассчитанного профилей линии  $C \lambda 538.02$  нм нами подобрана эмпирическая постоянная затухания  $\gamma$ , оказавшаяся почти равной  $\gamma_6$ . Проведенные расчеты показали, что изменения  $\gamma$  вдвое меняют определяемое содержание не более чем на 0.01 в принятой логарифмической шкале. Поэтому подобранная эмпирическая постоянная затухания принята для всех исследуемых линий. При определении  $\gamma$  предварительно были согласованы полуширины и центральные глубины линии  $\lambda 538.02$  нм. Содержание углерода для каждой из 45 линий находилось по совпадению теоретических и наблюдаемых эквивалентных ширин с рекомендуемой в последнее время скоростью микротурбулентных движений  $V_{\text{микро}} = 1$  км/с [4], а также с целью выявления возможной зависимости содержания от значения турбулентных скоростей и так называемого общего поля скоростей [13]. Как и следовало ожидать (поскольку мы имеем дело с химическим элементом с относительно низким атомным весом), такой зависимости практически не обнаружено. Так как рассчитываемые линии характеризуются высоким потенциалом возбуждения, и к тому же весьма слабые, т. е. образующиеся глубоко в фотосфере, то для их расчета вполне применима гипотеза ЛТР, чем мы и воспользовались.

С целью обнаружения влияния модели солнечной атмосферы на определяемое содержание, все расчеты проведены по 3 моделям солнечной атмосферы: Гарвард — Смитсоновской [11] (HSRA), Холвегера — Мюллер [15] (HOLMU) и Вернацца и др. [26] (VAL-80).

**Обсуждение полученных результатов.** Содержание химического элемента можно считать правильно установленным, если оно не зависит ни от эквивалентных ширин линий, ни от их потенциалов возбуждения и сил осцилляторов.

Нами не обнаружено зависимости определяемого содержания от эквивалентных ширин и потенциалов возбуждения. Что же касается зависимости от сил осцилляторов, то для линий с высокими и низкими значениями сил осцилляторов содержание получается различным. Лишь в области значений  $-2.5 \leq \lg gf \leq -1.0$  такой зависимостью, по-видимому, можно пренебречь. Поэтому для окончательного установления содержания углерода мы отобрали лишь 27 линий, имеющих значения сил осцилляторов в вышеуказанном интервале.

Результаты расчетов содержания углерода для 3 моделей солнечной атмосферы с постоянной по глубине микротурбулентной скоростью  $V_{\text{микро}} = 1$  км/с приведены в 6—8 колонках табл. 2. В этой же таблице линии, отобранные для определения среднего значения содержания, отмечены звездочкой.

Найденные средние значения содержания приведены в табл. 3. Укажем еще, что по 8 линиям с  $\lg gf > -1$  можно получить  $A_C = 8.01$ , а по 10 линиям с низкими  $\lg gf < -2.5$  соответственно  $A_C = 8.56$ .

Таблица 3. Значение содержания углерода в зависимости от модели атмосферы и поля скоростей

Поле скоростей	Модель		
	HSRA	VAL-80	HOLMU
$V_{\text{микро}} = 1$ км/с постоянно по глубине [4]	$8.39 \pm 0.3$	$8.38 \pm 0.3$	$8.41 \pm 0.3$
Общее поле скоростей [13]	$8.37 \pm 0.3$	$8.38 \pm 0.3$	$8.39 \pm 0.3$

Учитывая, что в последнее время модели HOLMU отдается некоторое предпочтение по сравнению с другими, мы предлагаем для содержания углерода в солнечной атмосфере значение  $A_C=8.40\pm 0.3$ , которое гораздо ближе к величине 8.35, полученной в [20] по молекулярным спектрам с учетом отклонений от ЛТР, нежели к недавно предложенному значению 8.67 [18]. В качестве последнего этапа нашей работы мы, исходя из полученного значения содержания  $A_C=8.40$ , установили по методике, предложенной в [3], новую, внутренне согласованную шкалу сил осцилляторов исследуемых линий углерода. Уточненные величины  $\lg gf$  приведены в колонке 5 табл. 2.

Справедливости ради отметим, что при уточнении абсолютных значений сил осцилляторов линий, мы могли исходить не из нами установленного значения  $A_C=8.40$ , а от такого же сводного (по многим исследованиям) значения [14].

В заключение отметим, что вопрос о причинах расхождения солнечного и метеоритного значений содержания углерода остается открытым и требует объяснения.

1. *Бабий Б. Т., Козак М. М., Рикалюк Р. Е.* Исследование обилия железа в невозмущенной солнечной фотосфере. I. Методика расчета теоретических профилей Fe I. — Пробл. косм. физики, 1982, вып. 17, с. 70—75.
2. *Бабий Б. Т., Кордуба Б. М., Рикалюк Р. Е.* Теоретический расчет фраунгоферовых линий в невозмущенной фотосфере Солнца. — Циркуляр Львов. астроном. обсерватории, 1978, № 53, с. 32—41.
3. *Гуртовенко Э. А., Костык Р. И.* Построение фундаментальных систем сил осцилляторов и содержание химических элементов. Fe I. — Киев, 1980. — 45 с. — (Препринт / АН УССР, Ин-т теорет. физики; ИТФ-79-138Р).
4. *Костык Р. И.* Постоянная затухания и поля скоростей в фотосфере Солнца. — Киев, 1981. — 46 с. — (Препринт / АН УССР, Ин-т теорет. физики; ИТФ-81-20Р).
5. *Кохан Е., Крат В.* Фраунгоферова линия C I 5380.322 Å как индикатор пространственных флуктуаций температуры солнечной фотосферы. — Солнеч. данные, 1982, № 11, с. 81—87.
6. *Athay R.* Theoretical line intensities. V. Solar UV emission lines of heavy elements. — *Astrophys. J.*, 1966, 145, p. 784—795.
7. *Baschek B.* Häufigkeitsbestimmung für Kohlenstoff aus CH-Banden im Subdwarf HD 140 283 und in der Sonne. — *Z. Astrophys.*, 1962, 56, S. 207—220.
8. *Crawford H. J., Price P. B., Cartwright B. G., Sullivan J. D.* Solar flare particles: energy-dependent composition and relationship to solar composition. — *Astrophys. J.*, 1975, 195, p. 213—221.
9. *Dupree A. K.* Analysis of the extreme-ultraviolet quiet solar spectrum. — *Ibid.*, 1972, 178, p. 527—541.
10. *Engvold O.* The solar chemical composition. — *Phys. scr.*, 1977, 16, p. 48—50.
11. *Gingerich O., Noyes R. W., Kalkofen W., Cuny Y.* The Harvard-Smithsonian reference atmosphere. — *Solar Phys.*, 1971, 18, p. 347—365.
12. *Goldberg L., Müller E., Aller L.* The abundance of the elements in the solar atmosphere. — *Astrophys. J. Suppl.*, 1960, 5, N 45, p. 1—138.
13. *Gurtovenko E. A.* The total photospheric motion fields. — *Solar Phys.*, 1975, 45, p. 25—33.
14. *Hauge O., Engvold O.* Compilation of solar abundance data. — Blindern; Oslo, 1977. — 23 p. — (Report / Intern. Theor. Astrophys; N 49).
15. *Holweger H., Müller E.* The photospheric barium spectrum: solar abundance and collision broadening of Ba II lines by hydrogen. — *Solar Phys.*, 1974, 39, p. 19—30.
16. *Kurucz R. L., Peytremann E.* A table of semiempirical gf values. — *Smithson. Astrophys. Observ. Spec. Rep.*, 1975, N 362, p. 1219.
17. *Lambert D. L.* The abundances of the elements in the solar photosphere. I. Carbon, nitrogen and oxygen. — *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 1968, 138, p. 143—179.
18. *Lambert D. L.* The abundances of the elements in the solar photosphere. VII. Revised abundances of carbon, nitrogen and oxygen. — *Ibid.*, 1973, 182, p. 249—272.
19. *Moore C. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J.* The solar spectrum 2935 Å to 8770 Å. — Washington: U. S. Government Print. Off., 1966. — 349 p.
20. *Mount G. H., Linsky J. L.* One and multi-component models of the upper photosphere based on molecular spectra. IV. Non-LTE treatment of CN. — *Solar Phys.*, 1975, 41, p. 17—33.
21. *Mount G. H., Linsky J. L.* A new solar carbon abundance based on non-LTE CN molecular spectra. — *Astrophys. J.*, 1975, 202, L51—L54.
22. *Nicolaidis C. A., Sinanoglu D.* A proposed correction to the solar abundance of carbon and oxygen utilizing new and accurate theoretical forbidden transition probabilities. — *Solar Phys.*, 1973, 29, p. 17—22.

23. *Nikolsky G. M.* The energy distribution in the solar EUV spectrum and abundance of elements in the solar atmosphere. — *Ibid.*, 1969, 6, p. 399—403.
24. *Ross J. E., Aller L.* The chemical composition of the Sun. — *Science*, 1976, 191, N 4233, p. 1223—1229.
25. *Takens R. J.* On the determination of oscillator strengths from free burning arcs. — *Astron. and Astrophys.*, 1970, 5, p. 244—263.
26. *Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R.* Structure of the solar chromosphere. III. Models of EUV brightness components of the quiet Sun. — *Astrophys. J. Suppl.*, 1981, 45, p. 635—725.
27. *Widing K. G., Sandlin G. D.* Analysis of the solar spectrum in the spectral range 33—110 Å. — *Astrophys. J.*, 1968, 152, p. 545—556.
28. *Yang C. Y., Nicholls R. W., Morgan F. J.* Studies of the prominence-corona transition zone from rocket ultraviolet spectra of the March 1970 eclipse. — *Solar Phys.*, 1975, 45, p. 351—362.

Астрон. обсерватория  
Львов. ун-та им. Й. Франко, Львов

Поступила в редакцию  
20.12.84

## Научные конференции

---

### СИМПОЗИУМ № 118 МАС «ПРИБОРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И НАУЧНЫЕ ПРОГРАММЫ МАЛЫХ ТЕЛЕСКОПОВ (INSTRUMENTATION AND RESEARCH PROGRAMS FOR SMALL TELESCOPES)

Симпозиум состоится 2—6 декабря 1985 г. в г. Крайстчерче, Новая Зеландия.

На симпозиуме особое внимание будет уделено непродолжительным наблюдательным программам для небольших телескопов, недорогому оборудованию, доступному для небольших обсерваторий; использованию приемников излучения с высоким квантовым выходом с целью повышения эффективности работы небольших телескопов.

В программу симпозиума включены следующие темы:

- Фотометрия переменных и тесных двойных звезд
- Фотометрия скоплений
- Поляриметрия
- Покрытия звезд планетами
- Звездная спектроскопия с низким, средним и высоким разрешением
- Определение лучевых скоростей
- Новые приборы и детекторы
- Координированные наблюдения кометы Галлея
- Наземное обеспечение космических телескопов

### СИМПОЗИУМ № 119 МАС «КВАЗАРЫ» (QUASARS)

Симпозиум состоится 2—6 декабря 1985 г. в г. Бангалоре, Индия. В программу включены следующие вопросы:

- Свойства квазаров во всех областях спектра (рентгеновской, УФ-, оптической, ИК-, радио-)
- Физические модели квазаров
- Космология и квазары
- Родственные объекты (типа BL Lac, сейфертовские галактики и т. п.)