

УДК 523.942

## Определение содержания железа в атмосфере Солнца по профилям слабых линий поглощения ионов

Б. Т. Бабий, Р. Е. Рикалюк

На основании анализа профилей 27 линий поглощения ионов получено обилие железа в солнечной атмосфере:  $7.56 \pm 0.06$  в системе сил осцилляторов Д. Блеквелла с применением моделей Вернацца и др., Гарвардско-Смитсоновской и модели Холвегера-Мюллер. Исследуется влияние на определенное значение модели атмосферы, постоянной затухания, поля скоростей, а также принятой систем сил осцилляторов.

*DETERMINATION OF IRON ABUNDANCE IN THE SOLAR ATMOSPHERE BY PROFILES OF ION ABSORPTION LINES, by Babij B. T., Rikalyuk R. E.— Using 27 Fe II absorption line profiles and Vernazza et al., HSRA, and Holweger-Müller model atmospheres the abundance of iron in the solar atmosphere is obtained:  $7.56 \pm 0.06$  in the Blackwell oscillator strength system. Effect of the model atmosphere, damping constant, velocity field and the oscillator strength system on the abundance derived is studied.*

В многочисленных исследованиях последнего времени исследованию содержания железа по профилям фраунгоферовых линий ионов уделяется гораздо меньше внимания, чем аналогичным исследованиям атомных линий. В то же время следует указать, что в условиях солнечной атмосферы лишь 5 % атомов железа находится в нейтральном состоянии, т. е. в основном железо ионизировано. Отчасти это обстоятельство можно было объяснить отсутствием либо ненадежностью имеющих значений сил осцилляторов линий ионов. В настоящее время благодаря появлению работ Д. Блеквелла [10], Р. Куруча [15] и М. Филлипса [17] вопрос значительно прояснился.

Данная работа посвящена определению содержания железа по профилям 27 линий ионов Fe и анализу влияния на полученное значение содержания модели солнечной атмосферы, постоянной затухания, поля турбулентных скоростей, а также избранной системы абсолютных сил осцилляторов.

**Наблюдательный материал и методика определения содержания.** Для исследования использованы 7 линий FeII из работы [13] с известными центральными остаточными интенсивностями и эквивалентными ширинами, а также 20 линий из работы [10], для которых приводятся лишь значения эквивалентных ширин. Параметры исследуемых фраунгоферовых линий FeII помещены в табл. 1. Определение содержания основывалось на согласовании теоретически вычисленных профилей линий поглощения с наблюдаемыми [6]. Для линий, помещенных в [6], мы подбирали параметр постоянной затухания и величину микротурбулентной скорости, усредняли их и с этими усредненными параметрами рассчитывали профили остальных спектральных линий. Более подробно методика расчета профилей описана в работе [3] с дополнениями в работе [1].

Постоянная затухания  $\gamma$  подобрана эмпирически по согласованию крыльев наблюдаемых и теоретически вычисленных профилей линий. В обозначениях работы [3] усредненные значения параметров оказались равны:  $\alpha = 0.25 \cdot 10^{-8}$ ,  $\beta = 0.3$ . Все расчеты проводились по трем общепринятым в настоящее время моделям солнечной атмосферы:

Гарвардско-Смитсоновской (HSRA) [12], Холвегера-Мюллер (HOLMU) [14], Вернацца и др. (VAL) [19].

В данной работе исследовались три системы сил осцилляторов: Д. Блеквелла и др. [10], полученная из солнечного спектра, а также теоретически рассчитанные из работ М. Филлипса [17] и Р. Куруча [15]. Значения сил осцилляторов из работы [15] приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры фраунгоферовых линий Fe II и содержание железа, определенное по ним

$\lambda$ , нм	$EP$ , эВ	$W$ , пм	$\lg gf$ [15]	$\lg A_{Fe}$ ( $\lg N_H=12.0$ ), определенное для моделей атмосферы		
				HSRA	VAL	HOLMU
408.73*	2.58	1.36	-4.93	7.78	7.83	7.84
463.53	5.95	1.88	-1.67	7.55	7.59	7.57
472.01*	3.20	0.45	-4.64	7.50	7.53	7.55
482.57*	2.63	0.70	-5.05	7.59	7.63	7.64
483.32*	2.65	1.10	-4.80	7.51	7.55	7.63
500.07*	2.77	1.02	-4.68	7.53	7.56	7.58
510.07*	2.79	1.92	-4.30	7.47	7.51	7.52
513.27*	2.79	2.55	-4.11	7.44	7.46	7.48
513.68*	2.83	1.48	-4.45	7.53	7.56	7.57
525.69*	2.88	2.00	-4.43	7.69	7.73	7.74
527.24	5.95	0.92	-2.03	7.56	7.58	7.58
541.41*	3.21	2.60	-3.96	7.67	7.69	7.70
562.75*	3.37	0.76	-4.39	7.64	7.63	7.65
581.37	5.57	0.42	-2.90	7.77	7.66	7.76
582.32	5.57	0.20	-3.23	7.75	7.75	7.76
599.14*	3.14	3.00	-3.78	7.49	7.50	7.55
608.41*	3.19	2.10	-4.03	7.59	7.60	7.62
611.33*	3.21	1.15	-4.40	7.67	7.68	7.70
612.97*	3.20	0.54	-4.39	7.30	7.31	7.33
617.94	5.57	0.38	-2.73	7.54	7.53	7.55
623.99*	3.89	1.24	-3.61	7.52	7.52	7.54
636.94*	2.88	1.90	-4.43	7.64	7.66	7.66
644.64	6.20	0.50	-2.21	7.68	7.68	7.62
722.45*	3.87	1.93	-3.48	7.56	7.55	7.58
730.17	3.87	0.89	-3.67	7.37	7.36	7.38
747.97*	3.87	0.90	-3.69	7.39	7.38	7.40
751.59*	3.89	1.30	-3.64	7.53	7.52	7.54

Примечание: \* отмечены линии, для которых известны силы осцилляторов М. Филлипса [17].

В табл. 1 помещены соответственно длины волн  $\lambda$ , потенциалы возбуждения  $EP$  и эквивалентные ширины  $W$  исследуемых линий. Там же приведены значения содержаний, определенных по эквивалентным ширинам для каждой из трех моделей соответственно.

Полуширины линий описываются удовлетворительно, если в качестве микротурбулентной скорости выбрать радиальную составляющую общего поля скоростей, полученного в работе [4]. Для слабых фраунгоферовых линий такое использование общего поля скоростей допустимо, так как для них действие микро- и макротурбулентных составляющих почти одинаково. Поэтому при определении содержания железа в данной работе использованы эти значения турбулентных скоростей. Учитывая, что используемые линии слабые или умеренной интенсивности, все расчеты выполнены в предположении ЛТР.

**Анализ полученных результатов.** Нами исследовались системы абсолютных сил осцилляторов из работ [10, 15, 17] на предмет зависимости содержания, определенного по ним, от атомных и других параметров линий. Не обнаружено зависимости значения содержаний от эквивалентных ширин, потенциала возбуждения линий, а также от

самих значений сил осцилляторов. Следовательно, эти системы сил осцилляторов одинаково пригодны для определения содержания железа. При вычислении среднего значения содержания независимо от модели атмосферы и количества исследуемых линий предпочтение следует отдать системе сил осцилляторов Д. Блеквелла, так как средняя квадратичная ошибка определения среднего значения содержания в этой системе примерно в четыре раза меньше по сравнению с системой сил осцилляторов М. Филлипса и вдвое меньше по сравнению с системой Р. Куруча (табл. 2).

Таблица 2. Средние значения содержания для различных систем сил осцилляторов и трех моделей солнечной атмосферы

Система сил осцилляторов	Количество исследований	Средние значения содержания железа		
		HSRA	VAL	HOLMU
Блеквелл [10]	15	7.55±0.06	7.56±0.06	7.57±0.04
Куруч [15]	15	7.55±0.10	7.56±0.10	7.57±0.09
Куруч [15]	27	7.57±0.12	7.58±0.12	7.59±0.11
Филлипс [17]	20	7.49±0.27	7.51±0.26	7.57±0.19

Примечание: спектральные линии, для которых известны силы осцилляторов Д. Блеквелла [10], помещены в табл. 3. Для этих же линий вычислено среднее значение содержания железа в системе сил осцилляторов Р. Куруча [15] ( $n=15$ ). Линии, для которых известны силы осцилляторов М. Филлипса [17], отмечены в табл. 1 звездочками.

Таблица 3. Значения содержаний Fe для модели HOLMU в зависимости от принятых полей скоростей

$\lambda$ , нм	Поле скоростей из [4]		$v_{\text{микро}}=0.95$ км/с	
	lg gf [10]	lg gf [15]	lg gf [10]	lg gf [15]
500.07	7.64	7.58	7.66	7.60
510.07	7.59	7.52	7.64	7.57
513.27	7.55	7.48	7.63	7.56
513.68	7.61	7.57	7.65	7.61
541.41	7.53	7.70	7.63	7.80
562.75	7.62	7.65	7.64	7.67
599.14	7.51	7.55	7.61	7.65
608.41	7.57	7.62	7.63	7.68
611.33	7.61	7.70	7.64	7.73
636.94	7.59	7.66	7.64	7.71
644.64	7.57	7.62	7.58	7.63
722.45	7.50	7.58	7.55	7.63
730.17	7.59	7.38	7.62	7.41
747.97	7.59	7.40	7.62	7.43
751.59	7.50	7.54	7.62	7.58
Средние значения	7.57±0.04	7.57±0.09	7.62±0.03	7.62±0.10

В зависимости от избранной системы сил осцилляторов в табл. 2 помещены полученные средние значения содержаний  $\lg A_{\text{Fe}}$  для каждой из трех моделей атмосферы с использованием в качестве  $v_{\text{микро}}$  радиальной составляющей общего поля скоростей [4].

Как показали расчеты, выбор параметров постоянной затухания в данном случае не критичен, так как изменение величины  $\alpha$  в больших пределах не вызывает значительного изменения содержания. Например, для линии с длиной волны  $\lambda=644.64$  нм при увеличении  $\alpha$  вдвое величина содержания, определенная по согласованию эквивалентных ширин, отклоняется на 0.0006 (в единицах десятичных логарифмов).

С целью исследования влияния принятой турбулентной скорости на определяемое значение содержания Fe выполнен расчет содержания со значением  $v_{\text{микро}}=0.95$  км/с, определенной для модели HOLMU в работе [10]. Как видно из табл. 3, независимо от избранной системы сил осцилляторов при использовании постоянной по глубине микротурбулентной скорости  $v_{\text{микро}}=0.95$  км/с среднее значение содержания Fe возрастает по сравнению с аналогичным, определенным с общим полем скоростей. Расчет выполнен лишь для тех линий, для которых известны значения сил осцилляторов Д. Блеквелла. Разность средних значений содержаний порядка  $\Delta \lg A_{\text{Fe}}=0.05$ , т. е. находится в пределах ошибок вычисления среднего значения ( $\sigma=0.03 \div 0.1$ ). Попытка определить содержание железа при  $v_{\text{микро}}=0.95$  км/с по центральным глубинам без учета влияния макротурбулентных движений приводит, как и следовало ожидать, к понижению среднего значения на  $0.2 \div 0.3$ , поэтому все расчеты содержания выполнены только по согласованию эквивалентных ширин линий. При использовании в качестве  $v_{\text{микро}}$  общего поля скоростей разность в определяемых содержаниях по центральным глубинам и эквивалентным ширинам не превышает 0.01.

**Заключение.** Как показал проведенный нами в работе [2] обзор работ по определению содержания Fe, имеются существенные расхождения в получаемых значениях. В данной работе на основании расчета и анализа линий FeII предпринята попытка выяснить причины этих расхождений и указать пути их уменьшения. В частности, сделаны следующие выводы: 1) получаемые значения содержаний по линиям FeII (табл. 2) почти не зависят от выбора модели атмосферы (наибольшая разность средних значений  $\lg A_{\text{Fe}}$  не превышает 0.02); 2) при определении содержания по слабым фраунгоферовым линиям методом согласования эквивалентных ширин с использованием общего поля скоростей [4] и значения  $v_{\text{микро}}=0.95$  км/с [10] разность средних значений содержаний  $\Delta \lg A_{\text{Fe}}=0.05$ , причем большее значение соответствует  $v_{\text{микро}}=0.95$  км/с; 3) получаемые значения содержаний зависят от принятой системы сил осцилляторов, причем наибольшей точностью из рассматриваемых нами систем обладает система Д. Блеквелла [10] ( $\sigma \leq 0.06$ ); 4) изменение величины постоянной затухания незначительно влияет на определяемые значения содержаний (изменение параметра  $\alpha$  вдвое приводит к изменению  $\lg A_{\text{Fe}}$  на величину  $\leq 0.001$ ); 5) различия между значениями содержаний, определяемых по линиям FeI и FeII, существует, вероятно, потому, что для линии нейтрального железа имеются достаточно хорошо установленные самосогласованные системы экспериментальных сил осцилляторов [5, 8, 16] для большого числа линий FeI. В то же время для линий FeII существуют значения сил осцилляторов для гораздо меньшего числа линий [10, 15]; 6) в качестве основного результата нашей работы можно принять, что наиболее реальные значения содержания железа находятся в пределах  $7.55 \leq \lg A_{\text{Fe}} \leq 7.59$  (табл. 2). Поскольку в настоящее время нет оснований отдавать предпочтение какой-либо из моделей, предлагаем как наиболее вероятное значение содержания считать усредненное по моделям HSRA, VAL и HOLMU с использованием сил осцилляторов Д. Блеквелла  $\lg A_{\text{Fe}}=7.56 \pm 0.06$ .

Эта величина лишь незначительно отличается от аналогично усредненного с использованием сил осцилляторов Р. Куруча  $\lg A_{\text{Fe}}=7.58 \pm 0.12$ , а также от найденного в работе [5] по линиям нейтрального железа значения  $\lg A_{\text{Fe}}=7.57 \pm 0.01$ . Что же касается того обстоятельства, что получаемые нами значения содержаний Fe несколько ниже полученных в последнее время Д. Блеквеллом [10], а также А. Симмонсом и Д. Блеквеллом [18] при расчетах по одной и той же модели атмосферы, то здесь требуются тщательные исследования, включая сравнение методики численных расчетов профилей линий.

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. космич. физ., 1982, 17, с. 70—75.
2. *Бабий Б. Т., Козак М. М., Рикалюк Р. Е.* Исследование обилия железа в невозмущенной солнечной фотосфере. II. Определение обилия Fe.—Пробл. космич. физ., 1982, 17, с. 75—80.
3. *Бабий Б. Т., Кордуба Б. М., Рикалюк Р. Е.* Теоретический расчет фраунгоферовых линий в невозмущенной фотосфере.—Циркуляр Львов. астрон. обсерватории, 1978, № 53, с. 32—41.
4. *Гуртовенко Э. А.* Изучение амплитуды фотосферного поля скоростей по слабым фраунгоферовым линиям металлов.—Астрон. журн., 1975, 52, с. 804—810.
5. *Гуртовенко Э. А., Костык Р. И.* Построение фундаментальных систем сил осцилляторов и содержание химических элементов в фотосфере Солнца. Fe I.—Киев, 1980.—45 с.—(Препринт /Ин-т теорет. физики; ИТФ-79-138 P).
6. *Гуртовенко Э. А., Костык Р. И., Орлова Т. В. и др.* Профили избранных фраунгоферовых линий для разных положений центр-край на диске Солнца.—Киев: Наук. думка, 1975.—222 с.
7. *Костык Р. И.* Постоянная затухания и поле скоростей в фотосфере Солнца.—Киев, 1982.—46 с. (Препринт /Ин-т теорет. физики; ИТФ-81-20 P).
8. *Костык Р. И.* Силы осцилляторов линий титана, хрома, железа, никеля.—Киев, 1982.—36 с. (Препринт /Ин-т теорет. физики; ИТФ-82-33 P).
9. *Blackwell D. E., Petford A. D., Shallis M.* Precision measurement of relative oscillator strengths. IV.—Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 1979, 186, p. 657—668.
10. *Blackwell D. E., Shallis M. I., Simmons G. J.* Oscillator strengths for Fe II lines derived from the solar spectrum.—Astron. and Astroph., 1980, 81, p. 340—343.
11. *Biemont E.* Abundances of singly-ionized elements of the iron-group in the Sun.—Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 1978, 184, p. 683—694.
12. *Gingerich O., Noyes R., Kalkofen W. et al.* The Harvard-Smithsonian reference atmosphere.—Solar Phys., 1971, 18, p. 347—365.
13. *Holweger H.* Ein empirisches Modell der Sonnenatmosphäre mit lokalen thermodynamischen Gleichgewicht.—Z. f. Astroph., 1967, 65, S. 365—417.
14. *Holweger H., Muller E.* The photospheric barium spectrum: Solar abundance and collision broadening of Ba II lines by hydrogen.—Solar Phys., 1974, 39, p. 19—30.
15. *Kurucz R.* Semiempirical calculation of gf-values. IV. Fe II.—Spec. Rept. Smithsonian Astrophys. Obser., 1981, 390, p. 314.
16. *May M., Richter J., Wichelmann J.* Experimental oscillator strengths of weak Fe I lines.—Astron. and Astroph., 1974, 18, p. 405—426.
17. *Phillips M. M.* A compilation of oscillator strengths for selected Fe II transition.—Astroph. J. Suppl. Ser., 1979, 39, p. 377—387.
18. *Simmons A. J., Blackwell D. E.* Analysis of Fe I lines ( $0.00\text{ eV} < \kappa < 7.6\text{ eV}$ ) in the Solar spectrum using improved damping constants and accurate oscillator strengths: test of Solar model atmosphere.—Astron. and Astroph., 1982, 112, p. 209—214.
19. *Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R.* Structure of the solar chromosphere. III. Models of the EUV brightness components of the quiet Sun.—Astroph. J. Suppl. Ser., 1981, 45, p. 635—725.

Львовский государственный ун-т им. И. Франко,  
Львов

Поступила в редакцию  
16.07.1984

## РЕФЕРАТ ПРЕПРИНТА

УДК 530.12

Силич С. А., Фомин П. И.

### К ВОПРОСУ О ПРИРОДЕ ГИГАНТСКИХ РЕНТГЕНОВСКИХ ПОЛОСТЕЙ ТИПА ИСТОЧНИКА В ЛЕБЕДЕ.

(Препринт ИТФ-84-65Р)

Предложен наблюдательный критерий выбора модели (взрыв одиночной сверхновой или каскад вспышек сверхновых) образования гигантских рентгеновских полостей типа источника в Лебеде, основанный на качественном различии распределения рентгеновской яркости вдоль радиуса источника в обоих указанных случаях.