

УДК 523.94—36

Б. Т. Бабий, М. М. Ковальчук, Р. Е. Рикалюк

Содержание железа в атмосфере Солнца

Содержание железа в атмосфере Солнца, определяемое по линиям ионов Fe II, не менее чем на 0.14 dex превышает получаемое по линиям атомов Fe I. С увеличением потенциала возбуждения линий Fe I в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР) содержание железа также увеличивается. Исследуются причины обнаруженных эффектов: дополнительное уширение фраунгоферовых линий ионов с четным порядковым номером, недонаселенность нижних уровней вследствие отклонений от ЛТР. Делается вывод о том, что более вероятно значение содержания железа в атмосфере Солнца, равное 7.8 dex.

ABUNDANCE OF IRON IN THE SOLAR ATMOSPHERE, by Babij B. T., Kovalchuk M. M., Rikalyuk R. E.—Abundance of iron in the solar atmosphere calculated from Fe II lines exceeds that calculated from Fe I lines no less than by 0.14 dex. With the increase of excitation potential of Fe I lines iron abundance determined in assumption of LTE also increases. The reasons of the effects discovered are: additional widening of ion lines with the even atomic number, underpopulation of lower levels due to non-LTE effects. A conclusion is made that the value of iron abundance in the Sun of 7.8 dex is more probable.

Недавно А. А. Боярчук и И. С. Саванов [6, 7] пересмотрели опубликованные ранее результаты определения содержания железа в атмосфере Солнца. Предварительно они установили нуль-пункты лабораторных значений абсолютных сил осцилляторов $\lg gf$ линий атомов Fe I и ионов Fe II, подробно исследовав влияние основных видов систематических ошибок. При этом они обратили внимание на то, что содержание железа, определяемое по линиям ионов Fe II, составляет $\lg A_{Fe} = \lg(N_{Fe}/N_H) + 12.0 = 7.78$ —7.88 для модели HOLMU [19] и $\lg A_{Fe} = 7.83$ —7.91 для модели VAL [23], в то время как по линиям Fe I (например, по модели HOLMU) оно равно лишь 7.63. Столь большое различие, как считают авторы [6, 7], нельзя объяснить эффектами отклонений от локального термодинамического равновесия (ЛТР), а также ошибками в выборе микротурбулентной скорости v_m и постоянной затухания γ , поскольку содержание, как правило, определяется интерполяцией к слабым линиям. Так как данное расхождение, по мнению авторов [6, 7], неодинаково для разных моделей солнечной атмосферы, то при уточнении этих моделей его величина должна уменьшиться. Конечно, аналогичный эффект должен проявляться при вычислении содержаний, определенных по линиям других химических элементов в разных стадиях ионизации.

Впервые в [20], затем в [15], а также в [22 и 10] было обращено внимание на зависимость вычисленного содержания химического элемента от потенциала возбуждения EP линии: с ростом EP увеличивается определяемое значение A_{Fe} .

Поскольку во всех отмеченных работах [6, 7, 10, 15, 20, 22] установлен факт различия содержаний, определенных по линиям разной степени возбуждения и ионизации, но не выяснены причины данных различий, цель нашей работы состоит в исследовании этих причин.

В [5] сопоставлены все 22 линии ионов Fe II из списка неблендированных фраунгоферовых линий, составленного в [21] на основе Льежского фотометрического атласа солнечного спектра [17], с линиями атомов Fe I из того же списка с приблизительно одинаковыми длинами волн λ и центральными глубинами d ; сделан вывод о том, что полные полуширины линий Fe II на 10—20 % больше полных полуширин линий Fe I. Такое же дополнительное уширение обнаружено для всех девяти исследуемых линий ионов хрома по сравнению с линиями атомов хрома ($Z=24$), в то время как для семи исследовавшихся линий скандия ($Z=21$) в четырех случаях линии атомов шире линий ионов, а в трех — наоборот [5].

К сожалению, линий других химических элементов, для которых можно было бы сопоставить полуширины их в разных стадиях ионизации, мало, но и их поведение не меняет общей картины: обе линии ионов титана шире соответствующих атомных

($Z=22$), для двух линий ванадия ($Z=23$) полуширины одинаковы. Создается впечатление, что линии ионов с четным порядковым номером, включая железо ($Z=26$), дополнительно уширены некоторым механизмом, имеющим исключительно атомное происхождение, который при традиционном способе определения содержания химических элементов по согласованию наблюдаемых и теоретических эквивалентных ширины не учитывался. Это дополнительное уширение линий четных элементов подтверждает вывод авторов [6, 7], которые считают, что различие содержаний железа, определенных по линиям атомов и ионов, нельзя объяснить причинами чисто солнечного происхождения (такими, как скорость микротурбуленции). Влияние других причин на определение содержания мы рассмотрим несколько подробнее.

По нашему мнению, ничего не даст также усовершенствование модели солнечной атмосферы, так как модель должна одинаково влиять на все фраунгоферовы линии элементов с четным и нечетным порядковым номером.

В [2] установлена зависимость наблюдаемых полуширин h/λ и эквивалентных ширины W/λ (приведенных) линий Fe I с приблизительно одинаковыми глубинами d от их потенциалов возбуждения EP , что также должно учитываться при определении содержаний химических элементов по линиям с разными EP .

В настоящей работе мы попытались сравнить содержания железа в атмосфере Солнца, определенные по линиям разной степени возбуждения и ионизации. Для такого анализа необходимо располагать данными о всех атомных и наблюдаемых характеристиках исследуемых линий, в особенности о значениях их абсолютных сил осцилляторов $\lg gf$ и эквивалентных ширинах W . Мы использовали значения эквивалентных ширины неблендированных линий из [21], сил осцилляторов из [6, 7], редуцированных в шкалу высокоточных оксфордских измерений [13, 14]. Определение содержаний проводилось в приближении ЛТР по программе, описанной в [4, 9], мето-

Таблица 1. Содержание железа, определенное по линиям Fe I

| № п/п | λ , нм | EP , эВ | $\lg gf$ [6] | d [21] | W , пм [21] | $\lg A_{Fe}$ |
|-------|----------------|-----------|--------------|----------|---------------|--------------|
| 1 | 596.957 | 4.28 | -1.88 | 0.040 | 3.81 | 7.36 |
| 2 | 743.054 | 2.59 | -3.37 | 0.119 | 11.72 | 7.38 |
| 3 | 726.099 | 2.73 | -3.64 | 0.155 | 15.24 | 7.42 |
| 4 | 700.062 | 4.14 | -2.12 | 0.157 | 16.52 | 7.43 |
| 5 | 639.254 | 2.28 | -3.90 | 0.171 | 15.16 | 7.38 |
| 6 | 609.438 | 4.65 | -1.97 | 0.188 | 19.63 | 7.52 |
| 7 | 585.508 | 4.61 | -1.65 | 0.222 | 20.44 | 7.60 |
| 8 | 609.365 | 4.61 | -1.55 | 0.299 | 29.50 | 7.61 |
| 9 | 459.353 | 3.94 | -2.14 | 0.339 | 28.00 | 7.59 |
| 10 | 455.693 | 3.25 | -2.74 | 0.328 | 26.40 | 7.55 |
| 11 | 455.165 | 3.94 | -2.14 | 0.352 | 25.01 | 7.58 |
| 12 | 609.667 | 3.98 | -1.92 | 0.357 | 38.73 | 7.66 |
| 13 | 608.957 | 5.02 | -1.05 | 0.350 | 36.86 | 7.65 |
| 14 | 585.609 | 4.29 | -1.58 | 0.340 | 33.85 | 7.64 |
| 15 | 775.111 | 4.99 | -1.01 | 0.335 | 48.68 | 7.69 |
| 16 | 794.109 | 3.27 | -2.63 | 0.345 | 43.34 | 7.61 |
| 17 | 653.394 | 4.56 | -1.49 | 0.337 | 37.69 | 7.64 |
| 18 | 479.877 | 4.19 | -1.62 | 0.498 | 41.79 | 7.76 |
| 19 | 480.815 | 3.25 | -2.75 | 0.334 | 26.30 | 7.66 |
| 20 | 483.587 | 4.10 | -1.56 | 0.555 | 47.26 | 7.71 |
| 21 | 489.286 | 4.22 | -1.30 | 0.546 | 52.43 | 7.72 |
| 22 | 490.514 | 3.93 | -2.05 | 0.346 | 31.16 | 7.68 |
| 23 | 543.629 | 4.39 | -1.58 | 0.417 | 38.93 | 7.69 |
| 24 | 546.628 | 4.14 | -1.70 | 0.407 | 37.28 | 7.67 |
| 25 | 532.111 | 4.43 | -1.49 | 0.436 | 42.95 | 7.71 |
| 26 | 619.895 | 0.96 | -4.70 | 0.440 | 41.77 | 7.52 |
| 27 | 518.791 | 4.12 | -1.38 | 0.564 | 55.85 | 7.77 |
| 28 | 638.075 | 4.19 | -1.36 | 0.472 | 52.22 | 7.73 |
| 29 | 648.188 | 2.28 | -2.98 | 0.572 | 62.91 | 7.44 |
| 30 | 651.832 | 2.83 | -2.67 | 0.509 | 54.59 | 7.33 |
| 31 | 519.606 | 4.26 | -0.63 | 0.690 | 75.63 | 7.77 |
| 32 | 514.174 | 2.22 | -2.33 | 0.768 | 94.43 | 7.77 |
| 33 | 525.021 | 0.12 | -0.12 | 0.709 | 63.41 | 7.47 |

Среднее 7.64 ± 0.09

дом согласования теоретических и наблюдаемых эквивалентных шири с использованием модели атмосферы Солнца VAL-80C [24]. Примененная при расчетах содержания постоянная затухания $\gamma = \alpha T^{\beta} N_H$ подобрана по согласованию крыльев ряда избранных фраунгоферовых линий атомов и ионов железа [1, 3]. Наилучшее согласование крыльев для многих линий получено при параметрах $\alpha = 0.25 \cdot 10^{-8}$ и $\beta = 0.33$, что соответствует $\gamma = (1.0-1.5)\gamma_6$ для линий с высоким EP и $\gamma = 3\gamma_6$ — с низким EP . Расчеты, проведенные нами и другими авторами [10], показывают, что γ мало влияет на содержания элементов, определяемые по слабым линиям. Так, в [10] при определении содержания железа в атмосфере Солнца для всех линий принято $\gamma = 2.5 \gamma_6$, что вполне справедливо. Расчеты проводились с общепринятым в настоящее время значением $v_m = 0.9$ км/с [8, 15, 16]. Отметим также, что мы старались каждой линии иона, как делалось в [5], сопоставить близкую ей по центральной глубине и длине волны линию атома.

Все параметры исследуемых линий Fe I и Fe II и определенные по ним содержания приводятся в таблицах 1 и 2 соответственно. В табл. 3 представлены аналогичные данные для двух групп линий атома железа с глубинами $d \approx 0.14$ и $d \approx 0.57$ соответственно в зависимости от потенциала возбуждения EP .

Таблица 2. Содержание железа, определенное по линиям Fe II

| № п/п | λ , нм | EP , эВ | $\lg gf$ [7] | d [21] | W , пм [21] | $\lg A_{Fe}$ |
|-------|----------------|-----------|--------------|----------|---------------|--------------|
| 1 | 747.970 | 3.89 | -4.08 | 0.067 | 9.10 | 7.80 |
| 2 | 623.994 | 3.89 | -3.88 | 0.109 | 11.41 | 7.77 |
| 3 | 751.583 | 3.90 | -3.88 | 0.111 | 14.16 | 7.83 |
| 4 | 636.946 | 2.89 | -4.56 | 0.171 | 20.09 | 7.86 |
| 5 | 608.411 | 3.20 | -4.15 | 0.202 | 20.24 | 7.75 |
| 6 | 599.136 | 3.15 | -3.89 | 0.293 | 32.40 | 7.76 |
| 7 | 614.925 | 3.89 | -3.05 | 0.352 | 40.25 | 7.77 |
| 8 | 771.173 | 3.90 | -3.00 | 0.345 | 49.79 | 7.82 |
| 9 | 641.692 | 3.89 | -3.02 | 0.357 | 41.81 | 7.76 |
| 10 | 643.268 | 2.89 | -3.93 | 0.363 | 41.15 | 7.74 |
| 11 | 542.525 | 3.20 | -3.20 | 0.425 | 44.61 | 7.86 |
| 12 | 532.555 | 3.22 | -3.54 | 0.446 | 45.02 | 7.80 |
| 13 | 651.609 | 2.89 | -3.67 | 0.455 | 57.54 | 7.79 |
| 14 | 526.480 | 3.22 | -3.31 | 0.484 | 47.57 | 7.73 |
| 15 | 645.639 | 3.90 | -2.52 | 0.523 | 66.07 | 7.74 |

Среднее 7.78 ± 0.06

Таблица 3. Содержание железа в зависимости от потенциала возбуждения (для групп линий Fe I с глубинами $d \approx 0.14$ и $d \approx 0.57$)

| № п/п | λ , нм | EP , эВ | $\lg gf$ [6] | d [21] | W , пм [21] | $\lg A_{Fe}$ |
|------------|----------------|-----------|--------------|----------|---------------|--------------|
| $d = 0.14$ | | | | | | |
| 1 | 662.503 | 1.01 | -5.48 | 0.148 | 13.62 | 7.60 |
| 2 | 671.032 | 1.43 | -4.97 | 0.114 | 13.17 | 7.55 |
| 3 | 479.436 | 2.42 | -3.78 | 0.139 | 10.78 | 7.39 |
| 4 | 505.848 | 3.64 | -2.90 | 0.147 | 10.99 | 7.65 |
| 5 | 583.510 | 4.26 | -2.39 | 0.142 | 12.14 | 7.73 |
| 6 | 590.247 | 4.59 | -1.81 | 0.142 | 12.68 | 7.48 |
| $d = 0.57$ | | | | | | |
| 1 | 444.548 | 0.09 | -5.44 | 0.572 | 36.72 | 7.42 |
| 2 | 648.188 | 2.28 | -2.98 | 0.572 | 62.91 | 7.44 |
| 3 | 758.380 | 3.02 | -2.00 | 0.573 | 97.70 | 7.79 |
| 4 | 597.679 | 3.94 | -1.43 | 0.571 | 65.39 | 7.66 |
| 5 | 588.382 | 3.96 | -1.31 | 0.579 | 69.93 | 7.64 |
| 6 | 496.258 | 4.18 | -1.38 | 0.582 | 56.72 | 7.79 |
| 7 | 713.093 | 4.22 | -0.80 | 0.587 | 91.87 | 7.58 |
| 8 | 571.783 | 4.28 | -1.19 | 0.578 | 67.02 | 7.80 |

Выводы. Содержание железа, определенное по линиям ионов Fe II, превышает содержание, определенное по линиям атомов Fe I на величину не менее 0.14 dex: $\lg A_{Fe} = 7.78 \pm 0.06$ для Fe II и $\lg A_{Fe} = 7.60 \pm 0.12$ для Fe I. Эти значения получены обычным усреднением содержаний, вычисленных по отдельным линиям. Возможно, в случае атомов Fe I содержание, определяемое по пяти слабым линиям, получается несколько заниженным из-за неточности значений сил осцилляторов. Если эти линии не принимать во внимание, то зависимость содержаний A_{Fe} от эквивалентной ширины устраняется. Окончательно по линиям Fe I получим $\lg A_{Fe} = 7.64 \pm 0.09$, хорошо совпадающее со значениями из [6, 10, 21].

Совпадения содержаний, определенных по линиям Fe I и Fe II, можно добиться, приняв в расчетах для линий Fe I величину $v_m \geq 1.5$ км/с, что противоречит современным данным, а также описанному разному поведению линий элементов с четным и нечетным порядковым номером.

Таким образом, нами выявлена из наблюдений причина расхождения $A_{Fe I}$ и $A_{Fe II}$ [5].

Содержание железа, как видно из табл. 3, зависит также от потенциала возбуждения EP , хотя, как и следовало ожидать, не столь заметно. Однако как бы мы ни группировали линии в табл. 3 (на группы от 0 до 3 или 4 эВ и выше 3 или 4 эВ), всегда содержание по линиям с более низким EP получается на величину от 0.05 до 0.15 dex ниже, чем по линиям с высоким EP .

Таким образом, нами не только подтверждены выводы предыдущих авторов [10, 15, 20, 22] о зависимости A_{Fe} от EP , но и выявлено их наблюдательное основание [2]. Поскольку все вычисления проводились нами в приближении ЛТР, то, вероятно, объяснение обнаруженных зависимостей эквивалентных ширин фраунгоферовых линий солнечного спектра от состояния возбуждения и ионизации атомов, приводящее к такой же зависимости для определяемых содержаний, следует искать в неравновесной населенности энергетических уровней железа, включая населенности уровней ионов. Так, в [12] показано, что в верхних слоях солнечной атмосферы низко расположенные уровни атомов Fe I ($0 \leq EP \leq 2.5$ эВ) недонаселены по сравнению со случаем ЛТР. В [18] сделан вывод о том, что отклонение от ЛТР незначительно влияет на определяемые содержания по линиям с высоким EP . Недонаселенность уровней, очевидно, приводит к недооценке содержания, полученного при использовании ионизационного равновесия Саха — Больцмана. В [11] учтены отклонения от ЛТР при расчете слабых линий Fe I с низкими EP и получено при этом увеличение содержания железа в среднем из 0.07 dex. В результате введения такой поправки в данные, полученные в приближении ЛТР, согласно [11], зависимость A_{Fe} от EP исчезает. Как видно, исчезает она и в нашем случае.

Таким образом, содержание A_{Fe} более близко к действительности, если его определять по линиям с высокими EP . Что же касается зависимости A_{Fe} от состояния ионизации, то ответить на вопрос можно будет лишь после установления реальных населенностей уровней ионов Fe II. Это можно осуществить путем совместного решения уравнений переноса и статистического равновесия с использованием модели атома железа, в которой к уровням атома Fe I (в [12] принимается во внимание 15 уровней) следует прибавить соответствующее количество уровней Fe II.

В настоящее время решение такой задачи затруднительно из-за отсутствия соответствующих сечений радиативных и ударных переходов для Fe II. Пока эта задача не решена, мы затрудняемся ответить на вопрос, какому из двух определений содержания железа в атмосфере Солнца следует отдать предпочтение: по линиям атомов или по линиям ионов. Можно лишь утверждать, что содержание железа в атмосфере Солнца находится в промежутке $7.6 \leq \lg A_{Fe} \leq 7.8$, но ближе к более высокому значению.

1. Бабий Б. Т. Совместное определение постоянной затухания и обилия железа в солнечной атмосфере // Пробл. космич. физики.— 1980.— Вып. 15.— С. 23—29.
2. Бабий Б. Т. Обнаружение зависимости наблюдаемых полуширин и эквивалентных ширин фраунгоферовых линий нейтрального железа в солнечном спектре от их потенциалов возбуждения // Письма в Астрон. журн.— 1988.— 14, № 4.— С. 353—356.
3. Бабий Б. Т., Бенько Л. И., Рикалюк Р. Е. Исследование постоянной затухания для профилей линий нейтрального железа в невозмущенной солнечной фотосфере // Астрометрия и астрофизика.— 1983.— Вып. 48.— С. 3—9.

4. *Бабий Б. Т., Кордуба Б. М., Рикалюк Р. Е.* Теоретический расчет фраунгоферовых линий в невозмущенной фотосфере Солнца // *Циркуляр. Львов. астрон. обсерватории.*— 1978.— № 53.— С. 32—41.
5. *Бабий Б. Т., Рикалюк Р. Е.* О полуширинах фраунгоферовых линий атомов и ионов группы железа в спектре Солнца и определении химического содержания по линиям ионов.— Киев, 1987.— 9 с.— Деп. в ВИНТИ 16.11.87, № 8029.
6. *Боярчук А. А., Саванов И. С.* Силы осцилляторов для линий нейтрального железа и его содержание в атмосфере Солнца // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.*— 1985.— 70.— С. 57—128.
7. *Боярчук А. А., Саванов И. С.* Силы осцилляторов для линий ионизованного железа // *Там же.*— 1986.— 74.— С. 49—69.
8. *Костык Р. И.* Постоянная затухания и поле скоростей в фотосфере Солнца.— Киев, 1981.— 46 с.— (Препр. / АН УССР. Ин-т теорет. физики; ИТФ-81-20Р).
9. *Петрова Н. С.* К вопросу методики теоретического расчета фраунгоферовых линий // *Солнеч. данные.*— 1987.— № 4.— С. 37—62.
10. *Шелимова В. А.* Содержание железа на Солнце // *Астрометрия и астрофизика.*— 1983.— Вып. 50.— С. 17—22.
11. *Шелимова В. А., Матвеев Ю. Б.* Влияние эффектов отклонения от ЛТР на слабые линии Fe I // *Там же.*— 1984.— Вып. 53.— С. 19—21.
12. *Athay R. Q., Lites B. W.* Fe I ionization and excitation equilibrium in the solar atmosphere // *Astrophys. J.*— 1972.— 176, N 3.— P. 809—831.
13. *Blackwell D. E., Petford A. D., Simmons G. J.* Measurement of relative oscillator strengths for Fe I: transitions from levels b^3F_{2-4} (2.61 eV—2.56 eV). Use of multipass optical system // *Mon. Notic. Roy Astron. Soc.*— 1982.— 201, N 3.— P. 595—606.
14. *Blackwell D. E., Shallis M.* Precision measurement of relative oscillator strengths — VII // *Ibid.*— 1979.— 186, N 3.— P. 669—672.
15. *Blackwell D. E., Shallis M. J.* Interpretation of the solar spectrum 300—900 nm — II // *Ibid.*— P. 673—684.
16. *Blackwell D. E., Shallis M. J., Simmons G. J.* Note on the interpretation of Fe I lines (2.18—2.49 eV) in the solar spectrum // *Ibid.*— 1982.— 199, N 1.— P. 33—36.
17. *Delbuille L., Neven L., Roland Q.* Photometric atlas of the solar spectrum from 300 to 10 000 Å.— Liege, 1973.
18. *Holweger H.* Microturbulence and effect of departure from LTE on photospheric iron lines // *Solar Phys.*— 1973.— 30, N 119.— P. 39—46.
19. *Holweger H., Müller E. A.* The photospheric barium spectrum: solar abundance and collision broadening of Ba II lines by hydrogen // *Ibid.*— 1974.— 39, N 1.— P. 19—30.
20. *Pecker J.-C.* Écarts à l'équilibre et abondances dans les photosphères solaire et stellaires I.— Le spectre du Titane neutre — Écarts à l' E. T. L. // *Ann. Astrophys.*— 1959.— 22, N 5.— P. 499—526.
21. *Rutten R. J., van der Zalm E. B. J.* Revision of solar equivalent widths, Fe I oscillator strengths and the solar iron abundance // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*— 1984.— 55.— P. 143—161.
22. *Simmons G. J., Blackwell D. E.* Analysis of Fe I lines ($0.00 \text{ eV} < \kappa < 2.6 \text{ eV}$) in the solar spectrum using improved damping constants and accurate oscillator strengths: test of a solar model atmosphere // *Astron. and Astrophys.*— 1982.— 112, N 2.— P. 209—214.
23. *Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R.* Structure of the solar chromosphere. II. The underlying photosphere and temperature-minimum region // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*— 1976.— 30, N 1.— P. 1—10.
24. *Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R.* Structure of the solar atmosphere III: Models of EUV brightness components of the quiet Sun // *Ibid.*— 1981.— 45, N 4.— P. 635—725.