

УДК 524.3

В. А. Шеминова

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680
e-mail: shem@mao.kiev.ua

Содержание железа в атмосфере Арктур

Определение содержания железа в атмосфере Арктур выполнено с использованием чувствительных к содержанию железа профилей или участков профилей слабых линий. Синтез избранных линий Fe I и Fe II выполнен с применением теоретических моделей атмосферы MARCS. На основе наблюдаемых профилей линий высокого спектрального разрешения из атласа Хинкл и Уоллес (2005) получены значения содержания железа $A = 6.95 \pm 0.03$ и радиально-тангенциальной макротурбулентной скорости 5.6 ± 0.2 км/с для Арктур, а также $A = 7.42 \pm 0.02$ и 3.4 ± 0.3 км/с для Солнца как звезды. Для Арктур дифференциальным методом определено содержание железа относительно солнечного $[Fe/H] = 0.48 \pm 0.02$.

ВМІСТ ЗАЛІЗА В АТМОСФЕРІ АРКТУРА, Шемінова В. А. — Визначення вмісту заліза в атмосфері Арктур виконано з використанням чутливих до вмісту заліза профілів або ділянок профілів слабких ліній. Виконано синтез обраних ліній Fe I і Fe II з використанням теоретичних моделей атмосфери MARCS. На основі спостережуваних профілів з високим спектральним розділенням із атласу Хінкл та Уоллес (2005) отримано вміст заліза $A = 6.95 \pm 0.03$ та значення радіально-тангенційної макротурбулентної швидкості 5.6 ± 0.2 км/с для Арктур, а також $A = 7.42 \pm 0.02$ і 3.4 ± 0.3 км/с для Сонця як зірки. Для Арктур дифференційним методом отримано вміст заліза відносно сонячного $[Fe/H] = 0.48 \pm 0.02$.

IRON ABUNDANCE IN THE ATMOSPHERE OF ARCTURUS, by Sheminova V. A. — Determination of iron abundance in the atmosphere of Arcturus is performed using the profiles or profile portions of the weak lines sen-

sitive to iron abundance. On the basis of the spectral atlas of Hinkle and Wallance (2005) with high spectral resolution and the synthesis of selected Fe I and Fe II lines within the MARCS model atmospheres, we got the iron abundance $A = 6.95 \pm 0.03$ and the radial-tangential macroturbulent velocity 5.6 ± 0.2 km/sec for Arcturus and $A = 7.42 \pm 0.02$ and 3.4 ± 0.3 km/s for the Sun as a star. For Arcturus we obtained the iron abundance relative to the solar abundance $[Fe/H] = -0.48 \pm 0.02$.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно содержание химических элементов в атмосфере звезды определяют по значениям эквивалентных ширин спектральных линий, применяя полностью автоматизированные методы. Такие методы позволяют быстро обработать большое количество линий разных элементов. Они удобны и применяются часто на практике. Например, недавно в работе Скотта и др. [34] по значениям эквивалентных ширин были получены новые оценки содержания всех химических элементов в атмосфере Солнца с высокой точностью. Но для многих звезд такой подход не всегда дает надежные результаты. В тех случаях, когда звездный спектр выглядит как частокол из многих линий, выполняют синтез нужного участка спектра и анализируют не эквивалентные ширины, а профили избранных линий. Такой синтез требует точных данных об атомных параметрах всех линий участка, которые, как правило, далеко не всегда хорошо известны. К тому же слабые линии не все отождествлены. Если в наблюдаемом спектре можно выделить отдельные спектральные линии, то синтез их профилей может дать хорошие результаты в анализе химического состава звезд.

В нашей предыдущей работе [35] было показано, что для определения содержания не обязательно использовать весь профиль линии, можно использовать только наиболее чувствительные к содержанию части профиля. Такой подход особенно актуален в тех случаях, когда одно крыло профиля сильно блендированно, или в случае явного дефицита интенсивности в красном крыле линии, или при большой неопределенности установления континуума из-за поглощения многочисленными слабыми линиями, или при значительном отклонении от ЛТР в ядре линии. Новый подход, предложенный Шеминовой и Каули [35], дает возможность получить содержание точнее в случаях, когда нельзя надежно измерить эквивалентные ширины линий и полный профиль.

В данной работе была поставлена цель определить с высокой точностью содержание железа в атмосфере Арктюра, используя наиболее чувствительные к содержанию участки профилей спектральных линий.

ВЫБОР ЛИНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЖЕЛЕЗА

Для как можно более точного определения содержания путем согласования формы профилей спектральных линий очень важно выбрать необходимые линии из спектра звезды. В работе [35] подчеркивается, что наиболее пригодными для определения содержания являются слабые линии с центральными глубинами $R = 1 - F/F_c \approx 30\%$, где F и F_c — потоки излучения соответственно в линии и в континууме. Хорошо известно, что чем слабее линия поглощения, тем менее чувствителен ее профиль к микротурбулентной скорости v_{mic} . Как правило, этот параметр недостаточно точно определяется, и его неопределенность непосредственно сказывается на оценке содержания. Тестирование показало, что профили слабых линий с R до 10% практически не реагируют на изменение скорости v_{mic} . Они наиболее пригодны для определения содержания. Использование профилей линий с центральными глубинами 10—20% (20—30%) может давать ошибку содержания около 0.01 dex (и 0.02 dex) при изменении v_{mic} на 0.5 км/с. Профили умеренных линий (R от 30 до 60%) наиболее чувствительны к v_{mic} , из-за чего их синтез требует точных значений микротурбулентной скорости для каждой линии. Отметим, что профили слабых линий также менее чувствительны к влиянию эффектов затухания. Поэтому, выбирая линии с $R < 30\%$, можно существенно уменьшить влияние неопределенностей параметров v_{mic} и постоянной затухания.

Значительное влияние на профили слабой линии оказывают такие параметры, как макротурбулентная скорость v_{mac} , скорость вращения звезды $V \sin i$, содержание элемента A и силы осцилляторов $lggf$ конкретной линии. Из этого списка параметров, кроме содержания, наиболее критичным является параметр $lggf$. Силы осцилляторов влияют на профили линий точно так же, как и содержание, и разделить их влияние сложно. Единственный способ получить точное содержание — выбирать линии, для которых этот параметр известен с максимальной точностью. Конечно, желательно, чтобы силы осцилляторов были получены из лабораторных экспериментов.

Очень важно, чтобы используемые для синтеза линии имели хотя бы одно чистое от бленд крыло, или большую часть крыла. Если в крыльях нет явных бленд, но линия сильно асимметрична, вполне возможно, что это влияние очень слабых бленд. Только практика может показать, какие линии пригодны для определения точного значения содержания, а какие нет.

Итак, для выбора линий поглощения Fe I и Fe II мы используем следующие критерии: 1) центральная глубина R линии не должна превышать 0.3; 2) наличие чистых без бленд участков профилей; 3) высокая точность лабораторных значений параметров $lggf$. Для получения как можно более точного значения содержания железа в атмосфере Арктуря относительно солнечного выбирались одни и те же линии в спектрах Арктуря и Солнца. В этом случае точность сил осцилляторов

не будет влиять на относительное содержание. Сначала линии выби-
рались в спектре Арктура по спектральному атласу [26], а затем эти же
линии проверялись в спектре Солнца как звезды. Спектральный атлас
[26] содержит нормализованный спектр потока Арктура и Солнца как
звезды, измеренный с высоким отношением сигнал-шум и высоким
спектральным разрешением (150000 для Арктура и 300000 для Солн-
ца) в видимом диапазоне.

Чтобы получить наиболее точное значение абсолютного содержа-
ния железа для Арктура, данные о силах осцилляторов слабых линий
Fe I были взяты из работы [15], которая содержит исключительно экс-
периментальные данные, разделенные на пять областей по точности
(< 3 , 10, 25, 50 и > 50 %). Мы использовали только данные с точностью
3 % и 10 %. Силы осцилляторов для линий Fe II были взяты из
работы [32] как наиболее надежные в настоящее время.

В спектре Арктура многие слабые линии частично блендированы,
или подвержены эффекту «line haze» значительно сильнее, чем в
спектре Солнца. Чтобы это частично учесть, при синтезе профиля изб-
ранной линии мы рассчитывали все линии, входящие в бленду, список
которых с их атомными параметрами был взят из базы атомных спект-
ральных линий Роберта Куруца (CD-ROM 23, <http://www.pmp.uni-hannover.de/cgi-bin/ssi/test/kurucz/sekur.html>). Тем не менее, не для
всех избранных линий удалось удовлетворительно воспроизвести на-
блюдаемые профили. Использование списка линий из базы данных
VALD [29] также не позволило решить проблему недостающих ли-
ний. По-видимому, это свидетельствует о неполноте списков линий,
или недостаточной точности их атомных параметров. В результате
пригодных слабых линий, которые бы соответствовали перечислен-
ным выше критериям, оказалось не так много.

Табл. 1 представляет список избранных слабых линий для опреде-
ления содержания железа в атмосферах Арктура и Солнца.

СИНТЕЗ СПЕКТРОВ АРКТУРА И СОЛНЦА

Синтез спектральных линий, который лежит в основе анализа хими-
ческого состава звезд, выполнялся с помощью нашего кода SPANSAT
[1]. Локальное термодинамическое равновесие (ЛТР) предполагается
во всех вычислениях. Одномерные (1D) модели атмосферы были по-
строены на основе данных из базы MARCS [25]. Для Арктура приняты
эффективная температура $T_{\text{эф}} = 4286$ К, ускорение свободного паде-
ния $lgg = 1.66$, металличность $[M/H] = -0.33$ и содержание α -элементов
(O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca и Ti) $[\alpha / Fe] = +0.4$ dex, что соответствуют
данным [33]. Надежность этих данных была недавно подтверждена в
нашей работе [3]. Чтобы получить модель атмосферы с этими фунда-
ментальными параметрами, мы использовали шесть соответствую-
щих моделей из базы данных MARCS и выполнили интерполяцию.

Таблица 1. Список избранных слабых линий и полученные значения содержания железа в атмосфере Арктур и Солнца

λ , нм	EP , эВ	$\lg gf$	R	A	$\frac{RT}{v_{mac}}$, км/с	$\frac{v_{mac}^2}{10^{-5}}$	R	A	$\frac{RT}{v_{mac}}$, км/с	$\frac{v_{mac}^2}{10^{-5}}$	[Fe/H]
			Арктур				Солнце				
Fe I											
541.2786	4.35	-1.72	0.19	6.95	5.82	0.2	0.19	7.44	3.35	0.2	-0.49
566.1345	4.28	-1.76	0.30	6.89	5.86	5.4	0.20	7.39	3.13	0.4	-0.50
585.5077	4.61	-1.48	0.25	6.91	5.70	2.9	0.20	7.41	3.21	0.7	-0.52
672.5357	4.10	-2.10	0.23	6.91	5.69	6.1	0.14	7.39	3.32	0.2	-0.48
679.3259	4.08	-2.33	0.10	6.95	5.51	0.5	0.10	7.42	3.32	0.1	-0.47
680.4271	4.58	-1.81	0.15	6.97	5.38	0.1	0.12	7.46	3.23	0.1	-0.49
683.7008	4.59	-1.69	0.18	6.96	5.46	0.9	0.14	7.44	3.11	0.6	-0.48
685.4823	4.59	-1.93	0.10	6.96	5.17	1.2	0.10	7.48	3.16	0.7	-0.52
	Среднее			6.94	5.57	2.2		7.43	3.22	0.4	-0.49
				0.03	0.24	2.4		0.03	0.09	0.3	0.02
Fe II											
472.0149	3.20	-4.48	0.06	6.99	5.26	0.1	0.06	7.42	3.78	0.4	-0.43
608.4111	3.20	-3.79	0.15	6.98	5.62	0.1	0.18	7.43	3.70	0.5	-0.45
611.3322	3.22	-4.14	0.09	6.99	5.26	0.1	0.09	7.44	3.62	0.1	-0.45
636.9462	2.89	-4.11	0.16	6.94	5.77	0.1	0.16	7.42	3.91	0.3	-0.48
638.3722	5.55	-2.24	0.08	6.96	5.69	0.1	0.07	7.44	3.55	0.1	-0.48
643.2680	2.89	-3.57	0.25	6.96	5.67	5.6	0.31	7.42	3.66	0.4	-0.46
651.6080	2.89	-3.31	0.30	6.94	5.82	2.1	0.39	7.42	3.66	0.9	-0.48
751.5832	3.90	-3.39	0.06	6.95	5.76	0.5	0.09	7.39	3.65	0.1	-0.44
	Среднее			6.96	5.60	1.1		7.42	3.69	0.3	-0.46
				0.02	0.22	1.8		0.02	0.11	0.3	0.02
Среднее по всем линиям				6.95	5.59	1.6		7.42	3.46	0.3	-0.48
				0.03	0.22	2.2		0.02	0.26	0.3	0.02

Для Солнца как звезды модель атмосферы также взята из базы MARCS с параметрами $T_{\text{эф}} = 5777$ К, $\lg g = 4.44$ и $[M/H] = 0$. Химический состав атмосферы Солнца соответствует данным [7]. Скорость вращения составляла $V \sin i = 1.5$ км/с [24] для Арктур и 1.85 км/с [13] для Солнца. Постоянная затухания Ван дер Ваальса рассчитывалась согласно методу Ансти — Барклема — О'Мара. Необходимые параметры затухания χ и χ_{eff} были взяты из работ [10, 11].

1D-модели атмосферы Арктур и Солнца требуют введения микро- и макротурбулентных скоростей. Мы исследовали их влияние на профиль линии в звездном спектре. Наиболее оптимальным вариантом есть изотропная модель макротурбулентности и радиально-тангенциальная модель макротурбулентности. При этом и микро-, и макротурбулентные скорости не изменяются с глубиной в атмосфере. Радиально-тангенциальная модель макротурбулентности, предложенная Греем [20], представляет собой сумму двух гауссиан: $G = G(\frac{R}{v_{mac}})S^R + G(\frac{T}{v_{mac}})(1 - S^R)$, где S^R — площадь поверхности на диске звезды, занимаемая радиальной составляющей. Мы приняли

наиболее простой случай, когда $S^R = 0.5$, и радиальная составляющая $\frac{R}{mac}$ равна тангенциальной $\frac{T}{mac}$. В этом случае скорость радиально-тангенциальной макротурбулентности обычно обозначается как $\frac{RT}{mac}$. Точность согласования синтетических и наблюдаемых профилей получается в два раза выше, чем в случае применения изотропной модели макротурбулентности.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЕ ЖЕЛЕЗА

Для определения содержания железа была использована стандартная процедура согласования синтетических и наблюдаемых чистых от бленд профилей (или их частей). Свободными параметрами были только содержание A и макротурбулентная скорость $\frac{RT}{mac}$. Остальные параметры были фиксированными. Для Арктура макротурбулентная скорость составляет $\frac{RT}{mac} = 1.74$ км/с согласно [33], а для Солнца как звезды мы выбрали стандартное значение $\frac{RT}{mac} = 1$ км/с в соответствии с принятым значением в модели солнечной атмосферы MARCS. Доплеровский сдвиг наблюдаемых линий относительно стандартной длины волны определялся для каждой линии. Согласование синтетического (*syn*) и наблюдаемого (*obs*) профилей осуществлялся путем минимизации $\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (R_{k,syn} - R_{k,obs})^2$, где N — число точек профиля,

выбранных для согласования. Минимизация выполнялась в автоматическом режиме с визуальным контролем. Конечный результат (в нашем случае содержание железа и точность минимизации) зависит от выбора начальных значений свободных параметров. Это важный момент, поскольку он влияет на точность определения содержания. Чем ближе начальные значения к предполагаемым реальным значениям, тем выше точность согласования. Поэтому необходимо для каждой линии выполнять поиск оптимальных значений свободных параметров A , $\frac{RT}{mac}$. Отметим, что каждый из этих свободных параметров влияет на профиль линии по-разному. Наш опыт показал, что $\frac{RT}{mac}$ больше влияет на внешние крылья линий, а A — на внутренние. Это позволяет нам предположить, что при удачно подобранных начальных условиях результаты согласования с двумя свободными параметрами будут надежными.

В тех случаях, когда в континууме есть неидентифицированные очень слабые бленды, которые нельзя учесть в синтезе, согласование профилей ограничивается в крыле приблизительно до 5 %. Другой причиной возможных неопределенностей согласования является асимметрия профилей. Иногда нам приходилось выбирать для подгонки только одно (чаще голубое) крыло линии. Наш опыт показал, что голубое крыло меньше искажено фотосферными конвективными движениями, чем красное. Герен и др. [19] также отметили, что красное крыло линий часто имеет дефицит интенсивности (красный дефи-

цит интенсивности). Это можно заметить, если сравнивать наблюдаемые, как правило, асимметричные, профили с симметричными синтетическими профилями, полученными в рамках 1D-моделей атмосфер. Наблюдаемый профиль линии есть результат пространственного и временного усреднения. Можно предположить, что линии, формирующиеся в разных частях диска, с разными температурами и скоростями вдоль луча зрения, будут иметь разные сдвиги, ширины и формы. Поэтому результирующий усредненный по диску профиль будет асимметричным и сдвинутым по длине волны. На форму и сдвиг профиля могут влиять и другие причины, такие как пятна, осцилляции, пульсации. Но основной причиной асимметрии линий поглощения в звездах спектральных классов FGK является проникающая в фотосферу конвекция. Влияния конвективных движений на профиль детально изучалось во многих работах [5, 6, 14], где показано, как и почему возникает асимметрия линий и красный дефицит интенсивности.

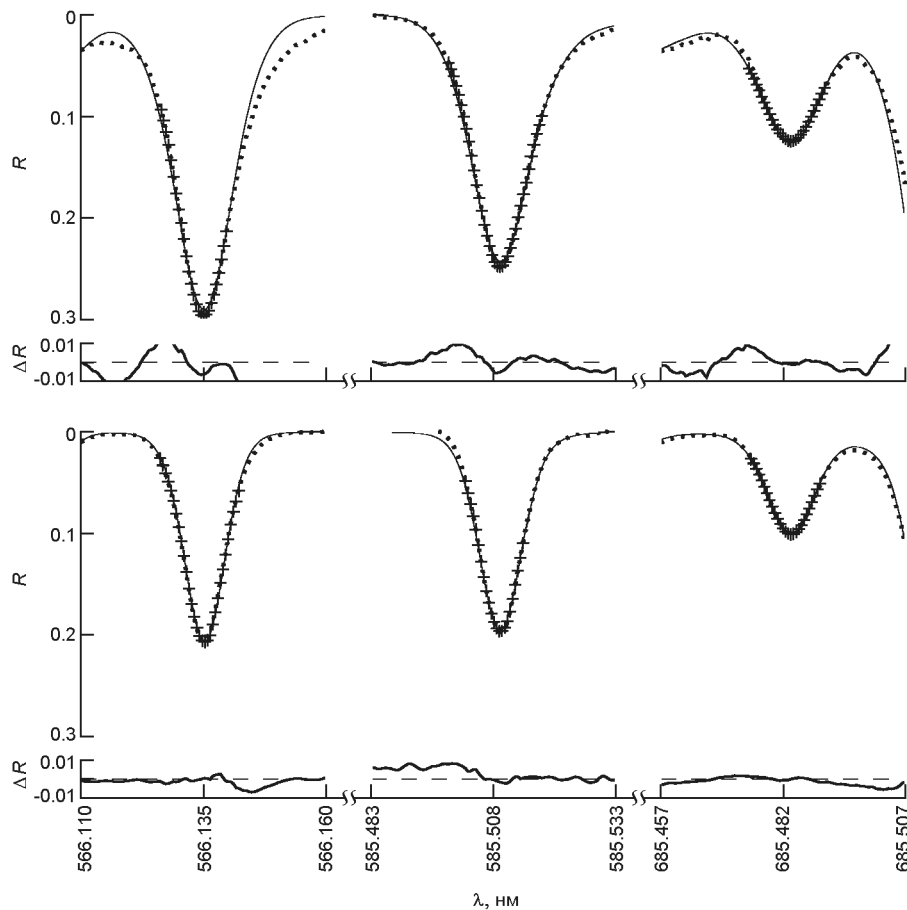


Рис. 1. Примеры наилучшего совпадения синтетических (сплошные линии) и наблюдаемых (пунктирные) профилей R линий Fe I в спектре Арктур (верхний ряд) и Солнца (нижний ряд). Выбранные для согласования участки наблюдаемого профиля отмечены крестиками. Разности $R = R_{syn} - R_{obs}$ между синтетическими и наблюдаемыми профилями показаны в нижних частях рисунков

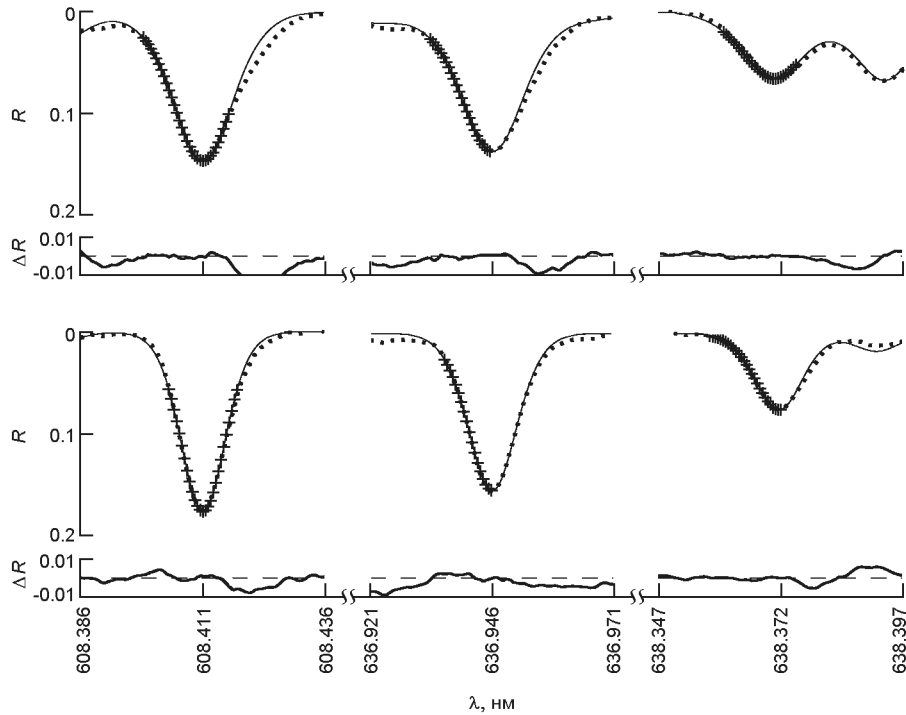


Рис. 2. То же для линий Fe II

Рис. 1, 2 демонстрируют результаты согласования синтетических и наблюдаемых участков профилей для некоторых линий Fe I и Fe II. Как видно, различия между синтетическими и наблюдаемыми профилями не превышают 1 % в участках согласования. В то же время для полного профиля эти различия часто превышают 1 % вследствие неотожествленных очень слабых линий вблизи континуума, или неточных атомных параметров отождествленных бленд, или асимметричности наблюдаемых профилей из-за конвективных движений.

Результаты определения содержания железа в атмосфере Арктур по каждой линии представлены в табл. 1. Мы получили среднее значение содержания железа для Арктур $A = 12 + N_{\text{Fe}} / N_{\text{H}} = 6.94 \pm 0.03$ по линиям Fe I и 6.96 ± 0.02 по линиям Fe II. В среднем точность согласования в чувствительных участках профилей линий Fe I и Fe II составляет $\sigma^2 = 2.2 \cdot 10^{-5}$ и $1.1 \cdot 10^{-5}$ соответственно. Среднее значение относительного содержания железа, полученное по одним и тем же линиям, как разность между содержаниями железа в атмосфере Арктур и Солнца, равно $[\text{Fe}/\text{H}] = A^{\text{star}} - A^{\odot} = -0.49 \pm 0.02$ по линиям Fe I и -0.46 ± 0.02 по линиям Fe II.

На рис. 3, а, в представлены индивидуальные значения содержания железа и металличности для Арктур, полученные по каждой линии. Средние значения содержания железа по всем линиям Fe I и Fe II $A = 6.95 \pm 0.03$ и $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.48 \pm 0.02$ показаны штриховыми линиями.

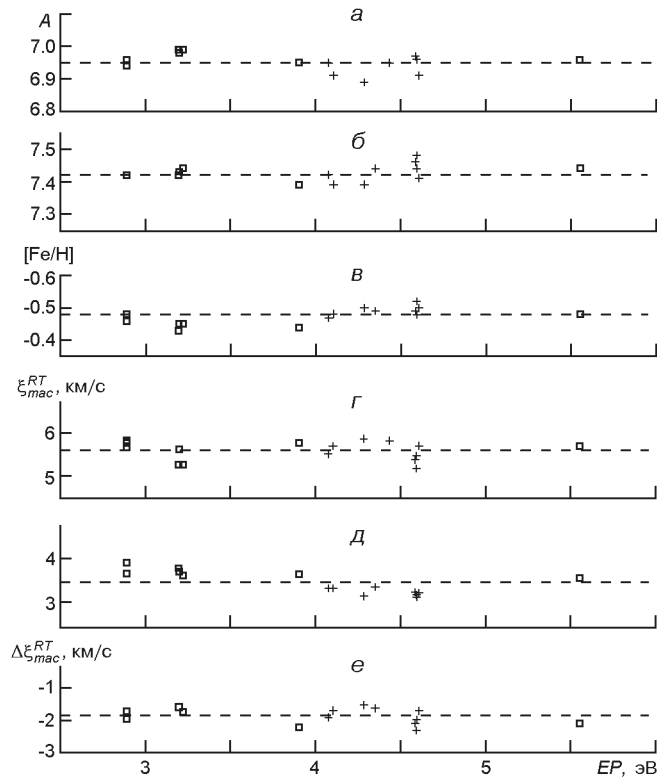


Рис. 3. Индивидуальные значения содержания железа A , полученные по линиям Fe I (крестики) и Fe II (квадратики) в зависимости от потенциала возбуждения EP : a — для Арктура, b — для Солнца, c — содержание $[Fe/H]$ для Арктура относительно Солнца, а также макротурбулентные скорости ξ_{mac}^{RT} , полученные по слабым линиям Fe I (крестики) и Fe II (квадратики): z — для Арктура, d — для Солнца, e — макротурбулентные скорости ξ_{mac}^{RT} для Арктура относительно Солнца. Штриховые линии — среднее по всем данным

Полученные в результате согласования синтетических и наблюдаемых профилей избранных линий значения радиально-тангенциальной макротурбулентной скорости в атмосфере Арктура показаны на рис. 3, z . Штриховой линией показано среднее значение макротурбулентной скорости $\xi_{mac}^{RT} = 5.59 \pm 0.22$ км/с, тогда как по линиям Fe I и Fe II получены значения 5.57 ± 0.24 и 5.60 ± 0.22 соответственно. На рис. 3, e представлены значения скоростей относительно солнечных, т. е. $\xi_{mac}^{star} / \xi_{mac}^{\odot}$.

Для Солнца были выполнены аналогичные вычисления (табл. 1). Средние значения содержания, полученные по линиям Fe I и Fe II, равны $A = 7.43 \pm 0.03$ и 7.42 ± 0.02 , а значения макротурбулентной скорости равны соответственно $\xi_{mac}^{RT} = 3.22 \pm 0.09$ и 3.69 ± 0.11 км/с. В среднем для линий Fe I и Fe II точность согласования в чувствительных участках профилей составляла $\sigma^2 = 0.4 \cdot 10^{-5}$ и $0.3 \cdot 10^{-5}$. Это почти на порядок выше, чем для Арктура, из-за того что спектральное разрешение солнечного спектра в два раза выше. Рис. 3, b показывает индивидуальные значения содержаний, полученных по каждой линии, в зависимости от потенциала возбуждения EP . Индивидуальные значения

макротурбулентной скорости показаны на рис. 3, д. Штриховой линией показано среднее значения макротурбулентной скорости $\frac{RT}{\text{mac}} = 3.46 \pm 0.26$ км/с.

ОБСУЖДЕНИЕ

Оценки, полученные в данной работе, в общем удовлетворительно согласуются с опубликованными в последнее время значениями содержания железа для Арктура и Солнца (табл. 2, 3). Все приведенные в табл. 2 данные для Арктура (кроме наших) получены методами, основанными на согласовании эквивалентных ширин линий Fe I и Fe II в рамках моделей атмосферы из базы данных Куруца с различными модификациями. Значения [Fe/H] получены дифференциальным методом, за исключением работы [17], в которой для Солнца использовано значение $A = 7.45$. Как видно, параметры используемых моделей мало отличаются от нашей модели. Так, например, параметры моделей Рамиреса и др. [33] полностью совпадают с нашими, но их модели отличаются от нашей настолько, насколько отличаются модели Куруца от моделей MARCS. Как известно из работы [25], эти модели практически совпадают между собой. Модели MARCS слегка холоднее, максимум на 80 К для $\tau < 0.01$.

Рамирес и др. получили значение [Fe/H] = 0.52 ± 0.02 по линиям нейтрального железа и 0.40 ± 0.03 — по линиям ионов. Окончательное значение, которое они рекомендуют, составляет 0.52 ± 0.04 . Дополнительно они протестировали свой результат с моделью MARCS (т. е. точно такой, как наша) и получили 0.54 ± 0.05 . Отсюда следует, что различие содержаний, полученных в рамках разных моделей атмосферы Арктура, равно 0.02, тогда как различие с нашим результатом ([Fe/H] = 0.48 ± 0.02) в рамках одной и той же модели существенно больше (0.06). Мы полагаем, что применение метода чувствительных точек по сравнению с методом эквивалентных ширин способствовало, во-первых, понижению τ (среднее квадратичное отклонение от среднего) на 0.03 dex и, во-вторых, повышению относительного значения содержания железа на 0.06.

Таблица 2. Значения содержания железа в атмосфере Арктура, полученные после 2006 г. в рамках ЛТР-анализа линий Fe I и Fe II. $T_{\text{эф}}/lgg/\tau_{\text{mic}}$ — параметры используемых теоретических 1D-моделей атмосферы

[Fe/H] (Fe I)	A (Fe I)	[Fe/H] (Fe II)	A (Fe II)	$T_{\text{эф}}/lgg/\tau_{\text{mic}}$	Литературный источник
-0.50 ± 0.07	6.95 ± 0.07	-0.55 ± 0.05	6.99 ± 0.05	4285/1.55/1.61	[16]
-0.54 ± 0.04	6.91 ± 0.04	-0.45 ± 0.11	7.00 ± 0.11	4285/1.55/1.62	[17]
-0.52 ± 0.02	—	-0.40 ± 0.03	—	4286/1.66/1.74	[33]
-0.49 ± 0.07	—	-0.40 ± 0.04	—	4290/1.60/1.60	[31]
-0.49 ± 0.02	6.94 ± 0.03	-0.46 ± 0.02	6.96 ± 0.02	4286/1.66/1.74	данная работа

Таблица 3. Содержание железа, полученное после 2009 г. из анализа линий Fe I и Fe II для Солнца как звезды [8, 12, 30] и для центра солнечного диска [32, 34]

A (Fe I)	A (Fe II)	Модель атмосферы	Анализ	Литературный источник
—	7.42 0.03	1D MARCS	ЛТР	[32]
7.45 0.06	7.52 0.06	3D CO5BOLD	ЛТР	[8]
7.56 0.09	7.47 0.05	1D MAFAGS-OS	НЛТР	[30]
7.43 0.05	7.45 0.04	1D MARCS	ЛТР	[12]
7.44 0.05	7.44 0.04	1D MARCS	НЛТР	[12]
7.48 0.02	7.43 0.02	1D MAFAGS-OS	НЛТР	[12]
7.45 0.04	7.51 0.04	3D HD	ЛТР	[34]
7.41 0.04	7.42 0.03	1D MARCS	ЛТР	[34]
7.52 0.05	7.46 0.03	1D HM	ЛТР	[34]
7.43 0.02	7.42 0.02	1D MARCS	ЛТР	данная работа

Кроме того, отметим известный факт (особенно для Солнца) несовпадения результатов содержаний железа, полученных по линиям нейтрального и ионизованного железа. Из табл. 3 видно, что согласно данным других работ имеются достаточно большие различия — от 0.05 до 0.12. В нашем случае это различие равно 0.03. Причиной большого различия могут быть как эффекты, связанные с отклонением от ЛТР, так и различия температурного распределения в фотосфере от одной модели к другой. Отметим, что в нашем методе использовались слабые линии, что позволило исключить ошибки из-за ЛТР-приближения.

О надежности наших результатов также свидетельствует тот факт, что индивидуальные значения $[Fe/H]$, полученные по каждой линии, не показывают существенной зависимости от потенциала возбуждения (рис. 3, в). Это говорит о том, что выбрана правильная модель атмосферы и что линии не показывают заметных отклонений от ЛТР, т. е. линии с низкими и с высокими потенциалами возбуждения дают близкие значения. Мы склонны полагать, что полученное нами значение содержания железа для Арктуря относительно Солнца $[Fe/H] = 0.48 \pm 0.02$ не содержит значительных систематических погрешностей в рамках модели атмосферы MARCS.

Нашей задачей было также получить как можно точнее абсолютное значение содержания железа для Арктуря в обычной шкале водорода. В литературе таких данных значительно меньше. За последние годы мы нашли данные об абсолютном содержании железа в работах [16, 17], которые слегка отличаются между собой из-за различия в списке спектральных линий, выбранных для анализа содержания. Как видно из табл. 2, совпадение с нашими данными вполне хорошее в пределах ошибок анализа. Мы получили среднее значение по всем линиям $A = 6.95 \pm 0.03$. При этом значения $A = A(Fe I) - A(Fe II) = 0.02$ и значительно меньше, чем в работах [16, 17]. Это подтверждает надежность наших данных.

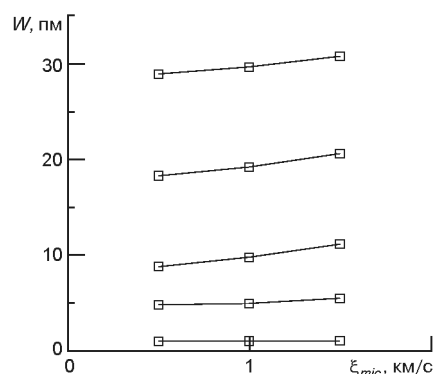
В рамках модели MARCS мы также выполнили анализ содержания железа для Солнца как звезды и получили $A = 7.43 \pm 0.03$ по тем же линиям Fe I и 7.42 ± 0.02 по тем же линиям Fe II, и тем же методом чувствительных точек. Среднее по всем линиям значение содержания составило 7.42 ± 0.02 . Этот анализ был необходим, чтобы получить как можно точнее относительное содержание Арктура [Fe/H] дифференциальным методом, т.е. от линии к линии. Сравнивая наши результаты с другими для Солнца как звезды, можно отметить, что величина содержания железа на Солнце, несмотря на большое количество новых исследований (часть из них см. в табл. 3), все еще значительно колеблется (от 7.41 до 7.56). В общем понятно, что такие результаты связаны с рядом различий в анализах содержания железа, выполненных в разных исследованиях. Основные различия могут возникать из-за следующих причин:

- 1) разные модели атмосферы;
- 2) погрешность gf -значений;
- 3) использование ЛТР- или не-ЛТР-приближений;
- 4) разные базовые списки линий;
- 5) выбор линий атома или иона;
- 6) выбор линий, наблюдаемых в центре диска или для Солнца как звезды;
- 7) точность измерения эквивалентных ширин;
- 8) способ определения значений микро- и макротурбулентных скоростей;
- 9) выбор параметров затухания вследствие столкновений;
- 10) разные компьютерные коды.

Каждая из перечисленных причин возникающих различий вносит свое изменение в результат. Например, по данным [34] (табл. 3) видно, что различие в моделях дает разность между значениями содержания от 0.04 до 0.11 dex. Большой разброс значений A дает неопределенность сил осцилляторов. По данным [30] содержание железа равно 7.41—7.56 в зависимости от сил осцилляторов, т.е. максимальное различие составляет 0.15 dex. Эффекты не-ЛТР понижают содержание на 0.01 dex (данные [12] в табл. 3). В работе Гольцройтера и Соланки [28] показано, что учет влияния эффектов горизонтального переноса излучения в сочетании с ЛТР на линии железа в реалистичных 3D-атмосферах будет приводить к понижению содержания железа приблизительно 0.012 dex. Выбор списка линий может обусловить различие 0.04 dex (данные [16, 17] в табл. 2).

Также из табл. 3 видно, что различие значений содержания железа, полученных из анализа линий Fe I и Fe II, может быть достаточно большим: от 0.01 до 0.09 dex. Оно зависит как от выбора спектральных линий, так и от модели атмосферы. В более холодных фотосферах (например, MARCS) это различие 0.01—0.02 dex, а в более горячих (например, HM) оно достигает 0.05 dex. В нашем случае различие между полученными значениями по линиям Fe I и Fe II минимальное

Рис. 4. Изменение эквивалентной ширины W в зависимости от параметра микротурбулентности ξ_{mic} для фиктивных линий поглощения разной силы, вычисленных для условий Солнца как звезды



(0.01 dex). Содержание железа, полученное по данным наблюдений для центра диска и для Солнца как звезды может отличаться незначительно. Например, из работы [9] следует, что для Солнца как звезды содержание с 3D-моделями на 0.02 dex ниже, чем для центра диска.

Содержание, полученное из эквивалентных ширин и 1D-моделей, зависит от выбора параметра микротурбулентности. Неопределенность значений этого параметра может приводить к различию эквивалентных ширин синтезируемых линий, а значит и к различию значений содержания.

Рис. 4 демонстрирует, как могут различаться эквивалентные ширины синтезируемых линий (слабых, умеренных, сильных), если значение параметра микротурбулентности 1 км/с изменить в пределах 0.5 км/с. Как видно, эквивалентные ширины очень слабых линий почти не изменяются при таком изменении микротурбулентности. Ситуация становится более проблематичной для умеренных линий (частично насыщенные линии). Выбор параметра микротурбулентности для расчета этих линий имеет решающее значение при анализе содержаний. Если, например, для Солнца как звезды в синтезе умеренной линии с эквивалентной шириной $W = 5$ пм использовать 0.7 км/с вместо стандартного значения 1 км/с, то в результате получим содержание выше на 0.09 dex, а для умеренной линии с $W = 10$ пм это различие будет еще большим.

Неопределенность параметра макротурбулентности совместно со скоростью вращения звезды влияет на форму профилей и может внести погрешность в величину содержания, определяемую по профилям линий. Согласно нашим расчетам для слабых линий увеличение макротурбулентной скорости ξ_{mac}^{RT} от 3.0 до 3.5 км/с повышает содержание на 0.02 dex, в то время как увеличение классической постоянной затухания вследствие столкновительных процессов в два раза повышает содержание незначительно, на 0.01 dex. В 3D-моделях атмосфер нет проблем с микро- и макротурбулентными скоростями, но имеются свои проблемы и сложности. Кроме того, 3D-модели не так просто использовать в анализе содержания звездных атмосфер. К тому же, их применение для синтеза спектральных линий требует много времени.

Если мы просуммируем (без знака) перечисленные выше возможные ошибки в определении содержания железа, то получим максимально возможную суммарную ошибку 0.4—0.5 dex. Это очень большая ошибка, которая может быть только в редких случаях неудачного выбора базового списка линий, атомных и атмосферных параметров. В действительности некоторые ошибки компенсируются, и общая ошибка будет меньшей.

Недавно Скотт и др. [34] выполнили новое переопределение химического состава для Солнца с использованием спектра Солнца в центре диска и 3D-моделей с учетом поправки за отклонение от ЛТР. Для железа они получили значение $A = 7.47 \pm 0.04$, которое рекомендуют использовать как наиболее надежное значение для настоящего времени. Они также приводят значение содержания 7.41 ± 0.04 , полученное с моделями MARCS. Фактически и мы, и они получили одинаковое значение содержания железа для 1D-моделей атмосферы MARCS в пределах ошибок анализа. Это подтверждает надежность нашего результата. Кроме того, это позволяет нам оценить поправку за неоднородность атмосферы, которая не учитывается в нашем анализе.

В то же время наш метод анализа содержания исключает систематические ошибки за погрешности в эквивалентных ширинах, за не-ЛТР-эффекты, за неопределенность микро- и макротурбулентных скоростей, постоянной затухания. Введем поправку -0.02 dex в содержание [34] ($A = 7.47$), чтобы получить содержание для Солнца как звезды, и вычтем наше значение содержания 7.42 ± 0.02 . В результате мы находим, что максимально возможная систематическая ошибка за атмосферную неоднородность равна 0.03 dex. Это значит, что содержание железа, определяемое в рамках теоретических моделей атмосфер MARCS, получается заниженным для Солнца как звезды на 0.03 dex вследствие 1D-приближения.

Что касается полученных в данном анализе значений макротурбулентной скорости для Арктура $\frac{RT}{mac} = 5.57 \pm 0.24$ км/с (Fe I) и 5.60 ± 0.2 км/с (Fe II), то они не противоречат ранее полученным из фурье-анализа данным (табл. 4). В работе Грея [22] было получено значение $\frac{RT}{mac} = 5.25$ км/с. Тот факт, что наше значение немного больше, можно объяснить двумя причинами.

Первая — мы использовали более слабые линии. Как известно, в атмосфере Арктура макротурбулентные скорости уменьшаются с высотой, а микротурбулентные увеличиваются в связи с дефрагментацией крупных элементов, поднимающихся вверх. Результаты анализа сильных линий указывают на более низкие скорости $\frac{RT}{mac} = 4.8$ км/с [22] и 4.6 ± 0.3 км/с [4].

Вторая причина — мы использовали новое значение скорости вращения Арктура $V \sin i = 1.5$ км/с [24], тогда как в других исследованиях (см. табл. 4) использовалась более высокая скорость $V \sin i = 2.4$ км/с [23]. Понижение скорости вращения должно отразиться на параметре

Таблица 4. Макротурбулентная скорость в атмосфере Арктура и Солнца как звезды по данным анализа профилей линий Fe I и Fe II

$\frac{RT}{\text{мас}}$, км/с		Литературный источник
Сильные линии	Слабые линии	
Арктур		
4.8 0.2	5.25 0.2	[22]
4.6 0.3	—	[4]
—	5.2 0.2	[24]
5.0	—	[38]
—	5.6 0.2	данная работа
Солнце как звезда		
3.1 0.1	3.8 0.2	[21]
2.6 0.2	—	[4]
2.3 0.4	4.0	[37]
3.2	—	[18]
—	4.0	[19]
2.6	3.8	[30]
—	3.45 0.3	[36]
—	3.5 0.3	данная работа

$\frac{RT}{\text{мас}}$ в процессе согласования спектров, увеличив слегка его значения. Если новое значение скорости вращения является точным, то мы вправе рекомендовать использовать в анализе слабых линий Fe I и Fe II новое значение макротурбулентности $\frac{RT}{\text{мас}} = 5.6$ км/с наряду с новым значением вращения $V \sin i = 1.5$ км/с.

Для Солнца скорость вращения является надежным параметром, поэтому различия между значениями макротурбулентной скорости, полученными разными исследователями, могут быть из-за несоответствия глубин формирования линий, по которым они определяются. В табл. 4 приведены значения $\frac{RT}{\text{мас}}$ из разных работ. Как видно, полученные по сильным линиям значения $\frac{RT}{\text{мас}}$ меньше, чем по слабым линиям. Это известный факт, который отражает понижение $\frac{RT}{\text{мас}}$ с высотой в фотосфере. Мы получили среднее по всем слабым линиям $\frac{RT}{\text{мас}} = 3.5$

0.3 км/с. Грей [21] получил в нижней фотосфере $\frac{RT}{\text{мас}} = 3.8 \pm 0.2$ км/с, а в верхней фотосфере 3.1 ± 0.1 км/с. Понижение $\frac{RT}{\text{мас}}$ с высотой подтверждается также нашими данными, полученными по линиям Fe I (3.22 ± 0.09 км/с) и по линиям Fe II (3.69 ± 0.11 км/с). Мы оценили среднюю высоту формирования для этих линий по данным для центра солнечного диска из таблиц Гуртовенко и Шеминовой [2]. Слабые линии Fe II эффективно формируются в среднем на уровне 146 км, а слабые линии Fe I — на уровне 182 км. Поэтому макротурбулентные скорости, выведенные по линиям Fe I и Fe II, в фотосфере Солнца различаются между собой. Заметим, что для Арктура нет подобного различия значений макротурбулентной скорости, полученных по тем же самым слабым линиям Fe I и Fe II, так как условия формирования этих линий отличаются от солнечных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Арктур часто используется как стандарт в изучении химического состава других подобных звезд-гигантов. К счастью, для Арктура доступен спектр с чрезвычайно высоким качеством от УФ- до ИК-диапазона совместно со спектром Солнца как звезды (атлас Хинкл и Уоллес [26]). Для Арктура, благодаря его близости, известны параметры атмосферы с лучшей точностью, чем для любой другой звезды RGB. Поэтому нам было интересно применить метод чувствительных точек именно для Арктура, чтобы уточнить содержания железа в его атмосфере.

Используя для синтеза слабых спектральных линий Fe I и Fe II модели атмосферы MARCS, мы определили абсолютное значение содержания железа для Арктура ($A = 6.95 \pm 0.03$) и для Солнца как звезды ($A = 7.42 \pm 0.02$) в обычной шкале относительно водорода. Мы также применили дифференциальный метод для определения содержания железа относительно Солнца и получили в среднем $[Fe/H] = -0.48 \pm 0.02$.

Абсолютное содержание железа, полученное с высокой точностью, особенно важно знать, при применении дифференциального метода в анализе содержания других звезд. Как отмечают Фулбрайт и др. [16], преимуществом дифференциального анализа является не только компенсация ошибок сил осцилляторов. С помощью этого метода систематические ошибки из-за различных неучтенных эффектов в моделях атмосфер таких, как 3D-гидродинамика, грануляция, не-ЛТР, магнитные поля, хромосферные проявления и т. д., могут в первом приближении компенсировать друг друга, когда анализ выполняется относительно подобных звезд, параметры атмосферы которых достаточно близки. Таким образом, можно получить дифференциальные содержания для многих звезд надежнее, чем абсолютные содержания, основанные на моделях атмосфер.

Для Арктура мы рекомендуем использовать абсолютное значение содержания железа $A = 6.95 \pm 0.03$. Также мы рекомендуем использовать чувствительные точки профилей желательных слабых линий вместо полного профиля, особенно в тех случаях, когда стандартный метод эквивалентных ширин не может быть применен.

Автор благодарит Чарльза Каули за идею использовать чувствительные точки профилей для определения содержания, которую мы применили в данной работе. Также автор благодарит рецензента за полезные замечания.

1. Гадун А. С., Шеминова В. А. SPANSAT: Программа расчета профилей спектральных линий поглощения в звездных атмосферах в ЛТР приближении. — Киев, 1988.—37 с.—(Препринт / АН УССР. Ин-т теорет. физики; ИТФ-88-87Р).
2. Гуртовенко Э. А., Шеминова В. А. Глубины образования фраунгоферовых линий. — Киев, 1997.—35 с.—(Препринт / НАН Украины. ГАО; ГАО-97-1Р).

3. *Шеминова В. А.* Температурная стратификация атмосферы Арктуря // Кинематика и физика небес. тел.—2013.—**29**, № 4.—С. 176—194.
4. *Шеминова В. А., Гадун А. С.* Фурье анализ линий Fe I в спектрах Солнца, Центавра, Проциона, Арктуря и Канопуса // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—**14**, № 3.—С. 219—233.
5. *Шеминова В. А., Гадун А. С.* Конвективные сдвиги линий железа в фотосфере Солнца // Кинематика и физика небес. тел.—2002.—**18**, № 1.—С. 18—32.
6. *Allende Prieto C., Asplund M., Garcia Lopez R. J., Lambert D. L.* Signatures of convection in the spectrum of Procyon: Fundamental parameters and iron abundance // *Astrophys. J.*—2002.—**567**.—P. 544—565.
7. *Asplund M., Grevesse N., Sauval A. J., Scott P.* The chemical composition of the Sun // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—2009—**47**.—P. 481—522.
8. *Caffau E., Ludwig H.-G., Steffen M.* Solar abundances and granulation effects // *Mem. della Soc. Astron. Ital.*—2009.—**80**.—P. 643—647.
9. *Caffau E., Ludwig H.-G., Steffen M., et al.* Solar Chemical Abundances Determined with a CO5BOLD 3D Model Atmosphere // *Solar Phys.*—2011.—**268**.—P. 255—269.
10. *Barklem P. S., Aspelund-Johansson J.* The broadening of Fe II lines by neutral hydrogen collisions // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**435**.—P. 373—377.
11. *Barklem P. S., Piskunov N., O'Mara B. J.* A list of data for the broadening of metallic lines by neutral hydrogen collisions // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—2000.—**142**.—P. 467—473.
12. *Bergemann M., Lind K., Collet R., et al.* Non-LTE line formation of Fe in late-type stars - I. Standard stars with 1D and 3D model atmospheres // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2012.—**427**.—P. 27—49.
13. *Bruning D. H.* The applicability of the Fourier convolution theorem to the analysis of late-type stellar spectra // *Astrophys. J.*—1984.—**281**.—P. 830—838.
14. *Dravins D., Lindgren L., Nordlund A.* Solar granulation — Influence of convection on spectral line asymmetries and wavelength shifts // *Astron. and Astrophys.*—1981.—**96**.—P. 345—364.
15. *Fuhr J. R., Wiese W. L.* A critical compilation of atomic transition probabilities for neutral and singly ionized iron // *J. Phys. and Chem. Ref. Data.*—2006.—**35**.—P. 1669—1809.
16. *Fulbright J. P., McWilliam A., Rich R. M.* Abundances of Baade's window giants from Keck HIRES Spectra. I. Stellar parameters and [Fe/H] values // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**636**.—P. 821—841.
17. *Fulbright J. P., McWilliam A., Rich R. M.* Abundances of Baade's window giants from Keck HIRES Spectra. II. The alpha and light odd elements // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**661**.—P. 1152—1179.
18. *Gehren T., Butler K., Mashonkina L., et al.* Kinetic equilibrium of iron in the atmospheres of cool dwarf stars. I. The solar strong line spectrum // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**366**.—P. 981—1002.
19. *Gehren T., Korn A. J., Shi J.* Kinetic equilibrium of iron in the atmospheres of cool dwarf stars. II. Weak Fe I lines in the solar spectrum // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**380**.—P. 645—664.
20. *Gray D. F.* Atmospheric turbulence measured in stars above the main sequence // *Astrophys. J.*—1975.—**202**.—P. 148—164.
21. *Gray D. F.* A test of the micro-macroturbulence model on the solar flux spectrum // *Astrophys. J.*—1977.—**218**.—P. 530—538.
22. *Gray D. F.* An analysis of the spectral line broadening of Arcturus // *Astrophys. J.*—1981.—**245**.—P. 992—997.

23. *Gray D. F.* The temperature dependence of rotation and turbulence in giant stars // *Astrophys. J.*— 1982.—**262**, N 2.—P. 682—699.
24. *Gray D. F., Brown K. I. T.* The rotation of Arcturus and active longitudes on giant stars // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—2006.—**118**.—P. 1112—1118.
25. *Gustafsson B., Edvardsson B., Eriksson K., et al.* A grid of MARCS model atmospheres for late-type stars. I. Methods and general properties // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**486**.—P. 951—970.
26. *Hinkle K., Wallace L.* The spectrum of Arcturus from the infrared through the ultraviolet // *Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser.*—2005.—N 336.—P. 321.—(Cosmic abundances as records of stellar evolution and nucleosynthesis / Eds T. G. Barnes, F. N. Bash).
27. *Holwegger H., Mueller E. A.* The photospheric barium spectrum - Solar abundance and collision broadening of Ba II lines by hydrogen // *Solar Phys.*—1974.—**39**.—P. 19—30.
28. *Holzreuter R., Solanki S. K.* Three-dimensional non-LTE radiative transfer effects in Fe I lines. II. Line formation in 3D radiation hydrodynamic simulations // *Astron. and Astrophys.*—2013.—**558**.—id.A20.—14 p.
29. *Kupka F., Piskunov N., Ryabchikova T. A., et al.* VALD-2: Progress of the vienna atomic line data base // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1999.—**138**.—P. 119—133.
30. *Mashonkina L., Gehren T., Shi J.-R., et al.* A non-LTE study of neutral and singly-ionized iron line spectra in 1D models of the Sun and selected late-type stars // *Astron. and Astrophys.*—2011.—**528**.—P. A87.
31. *McWilliam A., Wallerstein G., Mottini M.* Chemistry of the sagittarius dwarf Galaxy: A top-light initial mass function, outflows, and the R-process // *Astrophys. J.*—2013.—778:149.—27 p.
32. *Melendez J., Barbuy B.* Both accurate and precise gf-values for Fe II lines // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**497**.—P. 611—617.
33. *Ramirez I., Allende Prieto C.* Fundamental parameters and chemical composition of arcturus // *Astrophys. J.*—2011.—**743**, N 2.—P. 135—149.
34. *Scott P., Asplund M., Grevesse N., et al.* The elemental composition of the Sun. II. The iron group elements Sc to Ni // *Astron. and Astrophys.*—2015.—**537**.—id. A26.—33 p.
35. *Sheminova V. A., Cowley C. R.* Abundance sensitive points of line profiles in the stellar spectra // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2014.—**443**.—P. 1967—1972.
36. *Steffen M., Caffau E., Ludwig H.-G.* Micro- and macroturbulence predictions from CO5BOLD 3D stellar atmospheres // *Mem. della Soc. Astron. Ital. Suppl.*—2013.—**24**.—P. 37—52.
37. *Takeda Y.* Analyses of line profiles in the solar flux spectrum for determining rotation and micro/macro turbulence // *Publ. Astron. Soc. Jap.*—1995.—**47**.—P. 337—354.
38. *Tsuji T.* The K giant star Arcturus: the hybrid nature of its infrared spectrum // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**504**.—P. 543—559.

Статья поступила в редакцию 26.02.2015