

УДК 523.9-355+52-334.7

Н. Г. Щукина, И. Э. ВасильеваГлавная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680**Силы осцилляторов избранных линий Fe II
в диапазоне 300–400 нм**

Выполнен обзор литературы, касающейся определения сил осцилляторов линий ионизованного железа Fe II. Особое внимание уделено линиям в ультрафиолетовой области спектра. Вычислены силы осцилляторов для 33 линий Fe II, наблюдаемых в спектре Солнца между 300 и 400 нм. Результаты получены путем подгонки к солнечным эквивалентным ширинам.

СИЛИ ОСЦИЛЯТОРІВ ОБРАНИХ ЛІНІЙ Fe II В ДІАПАЗОНІ 300–400 НМ, Щукіна Н. Г., Васильєва І. Е. — Виконано огляд літератури, що стосується визначення сил осциляторів ліній іонізованого заліза Fe II. Особливу увагу приділено лініям в ультрафіолетовій області спектра. Вирахувані сили осциляторів для 33 ліній Fe II, які спостерігаються в спектрі Сонця між 300 і 400 нм. Результати отримані за допомогою підгонки до сонячних еквівалентних ширин.

OSCILLATOR STRENGTHS OF SELECTED Fe II LINES IN THE RANGE 300–400 NM, by Shchukina N. G., Vasilyeva I. E. — We review the literature on the determination of oscillator strengths for ionized iron Fe II lines. Particular attention is given to the lines of the ultraviolet region. The oscillator strengths are calculated for selected 33 Fe II lines observed in the solar spectrum between 300 and 400 nm. The results were obtained by fitting to the solar equivalent widths.

ВВЕДЕНИЕ

Надежные данные о силах осцилляторов линий нейтрального и ионизованного железа необходимы для решения множества астрофизических задач. В первую очередь это касается определения содержания железа на Солнце в связи с ведущимися дискуссиями, насколько эта величина меньше содержания $A_{\text{Fe}}(\text{meteor}) = 7.50 \pm 0.02$ в углистых метеоритах типа CI (т. н. хондритах CI), рекомендованного в работах [4,

22, 42]. Данное значение хорошо согласуется с солнечным содержанием $A_{\text{Fe}}(\text{Sun}) = 7.50 \pm 0.05$, найденным Гревесом и Саувалом [23] на основе эмпирической одномерной модели, и с содержанием $A_{\text{Fe}}(\text{Sun}) = 7.50 \pm 0.1$, полученным Н. Г. Щукиной и Трухильо Буэно [71] по линиям Fe I с учетом неоднородной структуры атмосферы Солнца (иными словами, с учетом 3D-эффектов) и эффектов отклонения от локального термодинамического равновесия. Сравнение последнего значения с солнечным содержанием кремния, являющегося репером при определении содержания химических элементов в хондритных метеоритах, приводит к новым противоречиям. Согласно Асплунду [6] учет 3D-эффектов вызывает понижение солнечного и метеоритного содержания кремния на 0.04 dex, при этом величина ЛТР-содержания кремния на Солнце становится равной $A_{\text{Si}}^{\text{ЛТР}}(\text{Sun}) = 7.51 \pm 0.04$. Такое понижение влечет за собой соответствующий сдвиг всей метеоритной шкалы содержаний. Как следствие, метеоритное содержание железа становится равным $A_{\text{Fe}}(\text{meteor}) = 7.46 \pm 0.01$, что приводит к его расхождению с фотосферным содержанием $A_{\text{Fe}}(\text{Sun}) = 7.50 \pm 0.1$. Разрешить указанное противоречие можно было бы, определив содержание железа на Солнце по линиям Fe II. Одним из преимуществ использования этих линий является малая чувствительность к НЛТР-эффектам.

К другому классу задач, при решении которых необходимо знать силы осцилляторов линий Fe II, относятся исследования по определению металличности, ускорения силы тяжести и эффективной температуры F-G-K звезд и звезд с экзопланетами [33, 46, 62, 72]. Наконец, линии Fe II играют важную роль при изучении физики, динамики и структуры звезд, активных галактик, областей H II, межзвездной среды, протозвездных дисков, остатков сверхновых, квазаров и т. п.

Как правило, для решения такого рода задач используют линии Fe II из оптического диапазона спектра. Поскольку список таких линий весьма ограничен, статистическая достоверность получаемых результатов оказывается невысокой. Кроме того, значительная часть используемых для этих целей линий Fe II являются слабыми или запрещенными, что приводит к большим погрешностям при определении их сил осцилляторов и, как следствие, — к нежелательному разбросу значений A_{Fe} , очень часто превышающими 0.1 dex. Привлечение многочисленных сильных линий Fe II из ближней УФ-области могло бы позволить получать существенно более важные результаты при условии, что силы осцилляторов линий будут достаточно надежными.

Цель работы — систематизировать данные о силах осцилляторов линий Fe II, уделив особое внимание линиям из УФ-области. Будут представлены результаты наших собственных вычислений «солнечных» сил осцилляторов линий Fe II, наблюдаемых в ультрафиолетовой области спектра $\lambda = 300\text{—}400$ нм. Результаты данной работы мы намерены использовать в дальнейших исследованиях по определению химического состава, металличности, ускорения силы тяжести и эффективной температуры звезд, в первую очередь звезд с экзопланетами и звезд с низкой металличностью.

ОБЗОР ОПУБЛИКОВАННЫХ ДАННЫХ О СИЛАХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ Fe II

Экспериментальные силы осцилляторов f_{lu} , считаются, как правило, более надежными, чем теоретические. Известно [45], что значения f_{lu} можно определить с помощью радиационного времени жизни τ_u возбужденного состояния атома и коэффициента ветвления BF_{lu} (branching fraction):

$$f_{lu} = 1.499 \cdot 10^{-7} (g_u / g_l) (BF_{lu} / \tau_u)^2, \quad (1)$$

где τ_u измеряется в наносекундах, а длина волны перехода λ_{lu} — в ангстремах, l и u относятся к нижнему и верхнему уровням соответственно, g_l и g_u — их статистические веса. Далее под термином «сила осциллятора» мы будем подразумевать взвешенную силу осциллятора, представляющую собой произведение статистического веса g_l нижнего уровня и силы осциллятора f_{lu} линии, или ее логарифмическое значение $\lg gf$.

При первых массовых измерениях сил осцилляторов линий Fe II, выполненных в 1962 г. Корлисом и Бозманом [14] и в 1967 г. Уорнером [84], использовались теоретические значения времени жизни верхнего уровня τ_u , рассчитанные на основании простого кулоновского приближения. В последующие годы главным источником значений τ_u стали экспериментальные измерения [29, 36] с помощью метода крюков или методов лазерной флуоресценции [10, 28], известных как методы быстродействующего лазерного пучка (fast beam-laser technique) и лазерно-индуцированной флуоресценции (laser-induced fluorescence).

Более совершенные методы импульсной лазерно-индуцированной флуоресценции (time-resolved laser-induced fluorescence, или сокращенно TRLIF) позволяют снизить погрешности измерения значений f_{lu} линий Fe II за счет возбуждения атомов лазерными импульсами, продолжительность которых существенно меньше времени жизни возбужденного уровня. К числу последних относятся измерения, выполненные в 1999—2004 гг. Шнабелем и др. [69, 70], Сикстромом и др. [74]. Согласно данным [69] погрешности определения радиационного времени жизни τ_u с помощью TRLIF-методов составляют около 6 % для сильных линий и 26 % для слабых.

Коэффициент ветвления BF_{lu} , входящий в формулу (1) для определения экспериментальных сил осцилляторов линий Fe II, представляет собой нормализованные относительные интенсивности линий с общим верхним уровнем. Для его измерения используют разнообразные источники света, такие как каскадная дуга [14, 29, 36], искровой разряд [84], газоразрядная лампа Пеннинга [58], дуговой разряд [50] и т. п. Основные трудности измерения относительных интенсивностей спектральных линий, излучаемых указанными источниками света, связаны с реабсорбцией спектральных линий, нестабильностью разряда во времени и пространстве и неоднородным характером источника

света. Серьезные погрешности вносит температурная неоднородность дугового столба. В целом погрешности определения коэффициента ветвления BF_{lu} могут достигать 25 % и выше.

Другой подход при определении коэффициентов ветвления BF_{lu} состоит в использовании теоретических сил осцилляторов. Примером может служить работа Бьемона и др. [10], в которой относительные интенсивности линий Fe II нормализовались на основе полуэмпирических сил осцилляторов, рассчитанных Куруцем и Пейтреманом [41] и Куруцем [38], а время жизни τ_u измерялось с помощью метода лазерной флуоресценции.

Табл. 1 содержит сведения об основных опубликованных экспериментальных работах. Как видим, значительная часть из них посвящена определению сил осцилляторов линий Fe II в оптической области спектра. Число УФ-линий Fe II из интересующего нас спектрального диапазона $\lambda = 300\text{--}400$ нм существенно меньше. На рис. 1, а мы приводим силы осцилляторов линий Fe II, полученные для данного диапазона спектра в разных исследованиях. Обращает на себя внимание, что разброс значений $\lg gf$ для отдельных линий может достигать более 1 dex. При этом силы осцилляторов [84] оказываются систематически выше значений других исследований, что легко объяснить, если принять во внимание большие погрешности времен жизни τ_u , вызванные использованием кулоновского приближения.

Теоретические силы осцилляторов. Как известно [2], теоретический подход при определении сил осцилляторов дает достаточно надежные результаты лишь для атома водорода и водородоподобных атомов и ионов. Расчет значений gf для линий неводородоподобных атомов и ионов представляет серьезную проблему, поскольку исполь-

Таблица 1. Основные экспериментальные работы по определению сил осцилляторов линий Fe II в УФ-диапазоне

λ , нм	Количество линий Fe II	Количество линий Fe II в диапазоне $\lambda = 300\text{--}400$ нм	Литературный источник
233—295	81	1	[14], 1962
423—542	17	—	[63], 1962
230—474	590	142	[84], 1967
319—329	12	12	[21], 1969
450—530	18	—	[9], 1970
430—670	12	—	[85], 1971
250—280	13	—	[32], 1974
250—530	494	119	[50], 1983
224—533	124	17	[36], 1987
225—752	26	4	[56], 1990
430—780	20	—	[29], 1990
2—262	24	—	[10], 1991
457—772	15	—	[28], 1992
316—771	19	4	[69], 1999
160—350	81	18	[58], 2001
220—780	140	16	[70], 2004

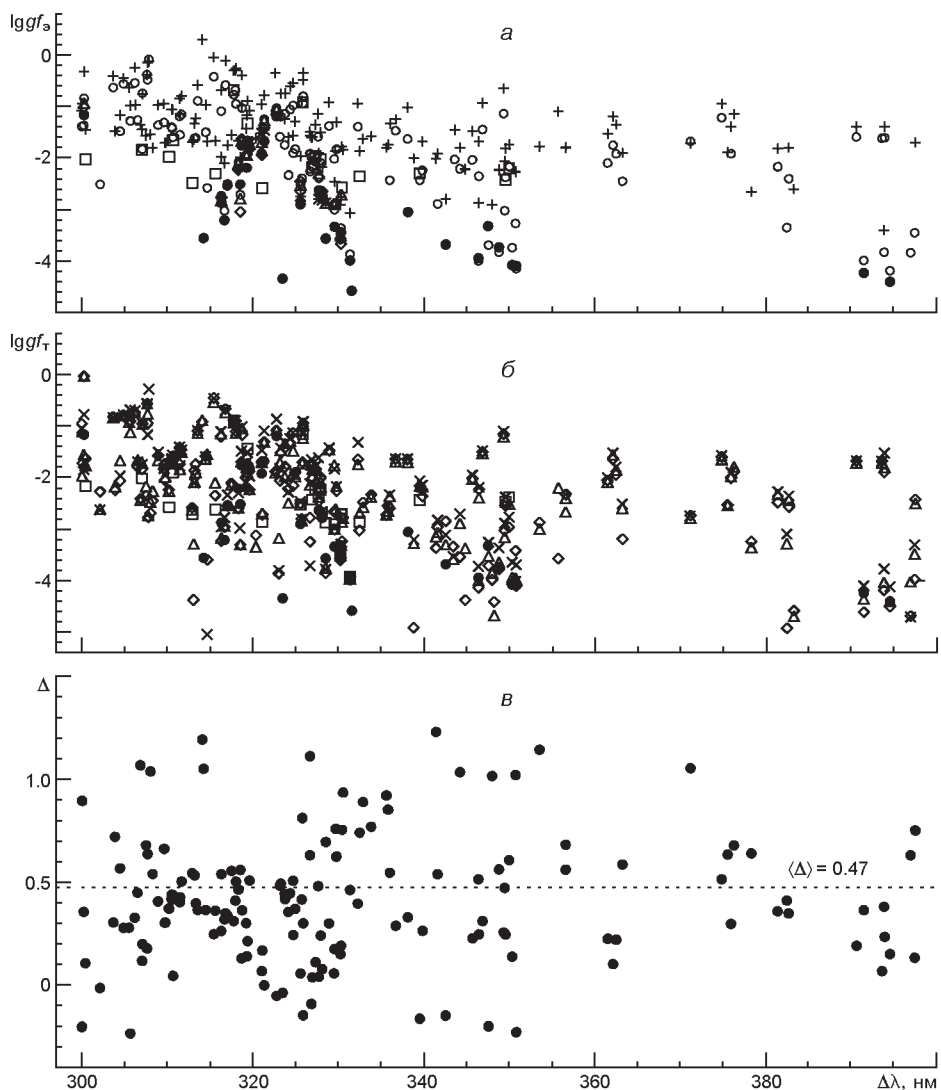


Рис. 1. Значения сил осцилляторов и их разностей для общих УФ-линий Fe II: *a* — наблюдаемые значения $\lg gf_s$ (точки — наши данные, крестики — [84], звездочки — [21], кружки — [50], треугольники — [36], квадратики — [58], ромбики — [70]); *б* — теоретические значения $\lg gf_r$ (точки — наши данные, ромбики — [41], треугольники — [81], косые крестики — [39], квадратики — [60]); *в* — разности $\lg gf_s - \lg gf_r$

зубые для этих целей волновые функции можно найти лишь с помощью приближенных методов. В первую очередь среди них следует упомянуть различные вариационные методы (в частности, метод Хартри — Фока). Примеры таких расчетов для линий Fe II можно встретить в статьях Нусбауэра и др. [54, 55] и работах, выполненных в рамках проекта IRON [59]. Следует отметить, что вследствие осцилляции приближенных волновых функций теоретические силы осцилляторов весьма сильно зависят от применяемых допущений, так что их расчет для одного и того же электронного перехода разными методами может приводить к отклонениям в десятки раз. Поэтому данные

теоретических расчетов, обычно весьма трудоемких, до сих пор следует рассматривать в большинстве случаев как ориентировочные.

К числу других теоретических методов относятся так называемые полуэмпирические методы, которые основаны на использовании экспериментальных значений энергии уровней и эффективных главных квантовых чисел. Одной из наиболее известных работ такого рода является публикация в 1975 г. Куруцем и Пейтреманом [41] сил осцилляторов для около двух миллионов линий разных химических элементов. В дальнейшем они несколько раз уточнялись [13, 38, 39] (см. также сайт <http://kurucz.harvard.edu>). Как видно из рис. 1, б, значения $\lg gf$ для одних и тех же линий Fe II, полученные в разное время, могут отличаться на 0.1—1 dex. В 1995 г. Нахар [52], используя значения энергии наблюдаемых уровней тонкой структуры, рассчитала силы осцилляторов для 21589 разрешенных дипольных переходов между уровнями Fe II. Оказалось, что теоретические времена жизни для всех уровней Fe II согласуются с наблюдениями лучше, чем данные Куруца. В 1998 г. Раасен и Уйлингс [60] опубликовали полуэмпирические силы осцилляторов для 117 УФ-линий Fe II в области 224—332 нм.

Сравнение экспериментальных сил осцилляторов линий Fe II с теоретическими, выполненное в нескольких работах, показывает, что различия для отдельных линий могут составлять от ± 0.4 dex [36] до 5 dex (в случае запрещенных линий согласно [57]). На рис. 1, в мы показываем результаты такого сравнения для 159 линий Fe II из диапазона $\lambda = 300$ —400 нм. Видно, что экспериментальные значения оказываются на 0.47 dex выше полуэмпирических. При этом разности $\lg gf = \lg gf_s - \lg gf_t$ лежат в пределах от -0.3 до $+1.3$ dex.

Другим недостатком полуэмпирических сил осцилляторов является большой разброс значений содержаний разных химических элементов, найденных на их основе. Так, согласно работам [26, 73] этот разброс при определении солнечного содержания железа и кремния может превышать 1 dex.

«Солнечные» силы осцилляторов. Определение так называемых «солнечных» сил осцилляторов основано на использовании в качестве высокотемпературного газового источника света фотосферы. Суть метода состоит в подгонке теоретических профилей спектральных линий или их эквивалентных ширин и центральных глубин к наблюдаемому в солнечном спектре. Иногда при определении значений gf спектральных линий привлекают звездные спектры.

Дискуссию о преимуществах и недостатках такого метода можно найти в работах Э. А. Гуртовенко и Р. И. Костыка [3], А. А. Боярчука и И. С. Саванова [1] и Уолгрена [83]. Среди основных преимуществ упомянем следующие. Во-первых, температура атмосфер Солнца и звезд намного выше температуры лабораторных источников, используемых для измерения экспериментальных значений gf , что дает возможность определять силы осцилляторов линий нейтральных элементов с высокими потенциалами возбуждения и ряда линий ионов. Во-вторых, солнечный и звездные спектры содержат большое число линий, что по-

зволяет построить массовую систему сил осцилляторов линий, представляющих астрофизический интерес.

Основным недостатком «солнечных» и «звездных» сил осцилляторов является их зависимость от ряда свободных параметров, таких как постоянная затухания, микро- и макротурбулентные скорости (V_{mi} и V_{ma}). Профили линий, используемые при определении сил осцилляторов, могут оказаться чувствительными к неоднородной структуре атмосфер Солнца и звезд, магнитному полю и эффектам отклонения от локального термодинамического равновесия. Еще один источник ошибок — погрешности измерения наблюдаемых профилей линий. В случае использования звездных спектров дополнительную погрешность вносят неопределенности, связанные с выбором эффективной температуры, ускорения свободного падения и металличности. Кроме того, абсолютная точность результатов определения значений gf зависит от точности принятого в расчетах содержания A соответствующих химических элементов. Этот недостаток можно устранить лишь путем привязки к реперным линиям, силы осцилляторов которых известны с высокой точностью в абсолютных единицах.

В настоящее время накопилось достаточно большое количество данных о «солнечных» силах осцилляторов линий Fe II. В зависимости от используемых при этом моделей атмосфер ее можно разделить на две группы. Работы [3, 11, 57, 78—80] основаны на полуэмпирических моделях HSRA [19], HOLMUL [31], MACKKL [43] и VAL [82], хорошо воспроизводящих наблюдения солнечного непрерывного излучения и сильных спектральных линий. Ко второй группе относятся исследования [34, 53, 62, 65—67, 76, 77], в которых для определения значений gf прибегают к помощи теоретических моделей Густафсона и др. [27], ATLAS5 [37], ATLAS9 [40], MAFAGS [18], MARCS [7] и так далее. Применение феноменологической теории пути перемешивания для описания конвективного переноса энергии, различные методы учета непрозрачности, вызванной частоклоном линий, и приближение ЛТР могут приводить к существенным ошибкам при расчете температурной структуры и сил осцилляторов.

Среди перечисленных работ особое место занимает монография Э. А. Гуртовенко и Р. И. Костыка [3], в которой система сил осцилляторов основана на полуэмпирической модели HOLMUL [31] и высокоточных спектральных наблюдениях, выполненных на монохроматорах двойной дифракции Главной астрономической обсерватории Украины [3] и обсерватории Юнгфрауйох [15] с высоким спектральным разрешением ($R = 500000$ и 10000000 соответственно). Фюр и др. [16], Тевенин [79] и Борреро и др. [12] рассматривают «солнечную» шкалу сил осцилляторов [3] как одну из самых надежных, полученную с очень высокой внутренней точностью. Несомненным достоинством этой работы является обширный список линий Fe II (62 линии) разной интенсивности для большого диапазона длин волн ($\lambda = 408—785$ нм) и потенциалов возбуждения нижнего уровня (2.58—6.22 эВ).

К сожалению, в монографии [3], как и почти во всех работах по определению «солнечных» и «звездных» сил осцилляторов, отсутствуют линии Fe II с длинами волн $\lambda < 400$ нм. Единственное исключение — работа [25], хотя к полученным значениям gf следует относиться с большой осторожностью, поскольку при их определении для описания атмосферы гиганта τ_{Sun} использовалось приближение серой атмосферы.

Компилятивные работы образуют отдельную группу среди исследований, посвященных определению сил осцилляторов спектральных линий. Их цель — систематизировать разные данные о силах осцилляторов, оценить их точность и по возможности внести в них необходимые поправки. Среди работ, в которых проанализированы значения gf для линий Fe II (включая собственные «солнечные» определения), следует прежде всего упомянуть работу [57]. Анализ около 400 линий Fe II с длинами волн между 224 и 895 нм позволил оценить смещение полуэмпирической шкалы сил осцилляторов [41] относительно экспериментальных шкал [9, 21, 32, 84, 85], собственной «солнечной» шкалы и «звездной» шкалы Грота [25]. При этом для большинства линий Fe II из диапазона $\lambda = 300\text{—}400$ нм Филипс [57] рекомендовал использовать силы осцилляторов [41].

Отметим, что ранее сравнение полуэмпирической шкалы [41] и экспериментальной шкалы [84] было выполнено Смитом [75]. Позднее эти шкалы анализировались Милоне и др. [48, 49]. Саванов [68] привязал экспериментальные силы осцилляторов линий Fe II, опубликованные до 1990 г., к полуэмпирическим данным [41].

В 1995 г. Гириджар и Арелано Ферро [20] выполнили обзор работ по определению экспериментальных [11, 36, 50, 56] и солнечных сил осцилляторов [79, 80], опубликованных между 1980 и 1993 гг. Список рассмотренных линий Fe II включал 848 линии в спектральном диапазоне $\lambda = 105\text{—}785$ нм. Из других компилятивных работ, опубликованных в 1995 г., следует упомянуть работу Хираты и Хорагучи [30]. В последние 20 лет широкую известность получила база данных NIST [44, 61], являющаяся обобщением большого количества литературных источников, в том числе таких известных компилятивных работ, как публикации [16] и [17]. Указанная база данных содержит 538 линий Fe II из области $\lambda = 300\text{—}1200$ нм. К сожалению, пользование ею может приводить к большому разбросу значений содержания, получаемых из отдельных линий рассматриваемого химического элемента (см. [73]).

Особую группу работ представляют исследования, в которых новая шкала сил осцилляторов линий Fe II создается путем комбинации уже известных экспериментальных, теоретических и солнечных данных. В качестве примера можно привести работу [45], содержащую силы осцилляторов для 142 линий Fe II из области $\lambda = 408\text{—}772$ нм. В ней отношение сил осцилляторов линий Fe II внутри каждого мультиплета находилось с помощью полуэмпирических значений $\lg gf$, приведенных в работах [60] и [<http://kurucz.harvard.edu>], а абсолютные

вероятности переходов самого мультиплета из собственных определений «солнечных сил» осцилляторов или из экспериментальных данных [10, 69, 70] о времени жизни верхнего уровня и коэффициенте ветвления [29, 36, 56].

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ «СОЛНЕЧНЫХ» СИЛ ОСЦИЛЛЯТОРОВ ЛИНИЙ Fe II В ДИАПАЗОНЕ 300—400 НМ

Выполненный нами обзор литературных источников показывает, что на сегодняшний день ситуация с определением сил осцилляторов УФ-линий Fe II остается неудовлетворительной. На рис. 2 мы приводим средние значения $lggf$ и их среднее квадратичное отклонение у для 161 линии Fe II из ближней УФ-области спектра 300—400 нм, полученные путем усреднения теоретических [39, 41, 60], экспериментальных [36, 50, 84] и компилятивных данных [17, 20, 30, 57, 61]. Как видим, погрешности для отдельных линий колеблются между 0.05 и 0.9 dex, при этом средняя погрешность составляет 0.33 dex. Столь большие погрешности делают весьма проблематичным использование вышеупомянутых УФ-линий Fe II для надежного определения таких параметров звезд, как металличность, ускорение свободного падения, эффективная температура и содержание железа. Для решения данной проблемы мы предприняли попытку вычислить значения $lggf$ линий Fe II с длинами волн между $\lambda = 300$ и 400 нм, используя солнечную атмосферу как естественный источник света. Мы измерили «солнечные» силы осцилляторов для 33 умеренных и сильных линий Fe II, чьи эквивалентные ширины превышают 4 пм. Список этих линий, потенциалы возбуждения нижнего EPL и верхнего EPU уровней, их статистические веса g_l , g_u и термы, в переходах между которыми они образуются, приведены в табл. 2. Как видим, все линии являются низковозбужденными, при этом они распадаются на две подгруппы. Первая из них содержит линии, нижние уровни которых относятся к терму a^4D с $EPL = 1$ эВ. Линии второй группы, образующиеся в переходах с уровнем терма a^4P , имеют более высокий потенциал возбуждения $EPL = 1.7$ эВ.

Метод и используемые параметры. Определение сил осцилляторов проводилось путем подгонки эквивалентных ширин W линий, наблюдаемых в центре солнечного диска, к теоретическим значениям. Расчет теоретических значений W проводился в рамках одномерной (1D) полуэмпирической модели солнечной атмосферы HOLMUL [31]. При этом мы использовали значение содержания железа $A_{Fe} = 7.50$, полученное Н. Г. Щукиной и Трухильо Буэно [71] по линиям Fe I с учетом 3D- и НЛТР-эффектов. Согласно работе [64] температурная структура этой модели маскирует эффекты отклонения от ЛТР в линиях Fe I и Fe II, что позволяет проводить расчеты профилей данных линий путем формального решения уравнения переноса с функцией источника, равной функции Планка.

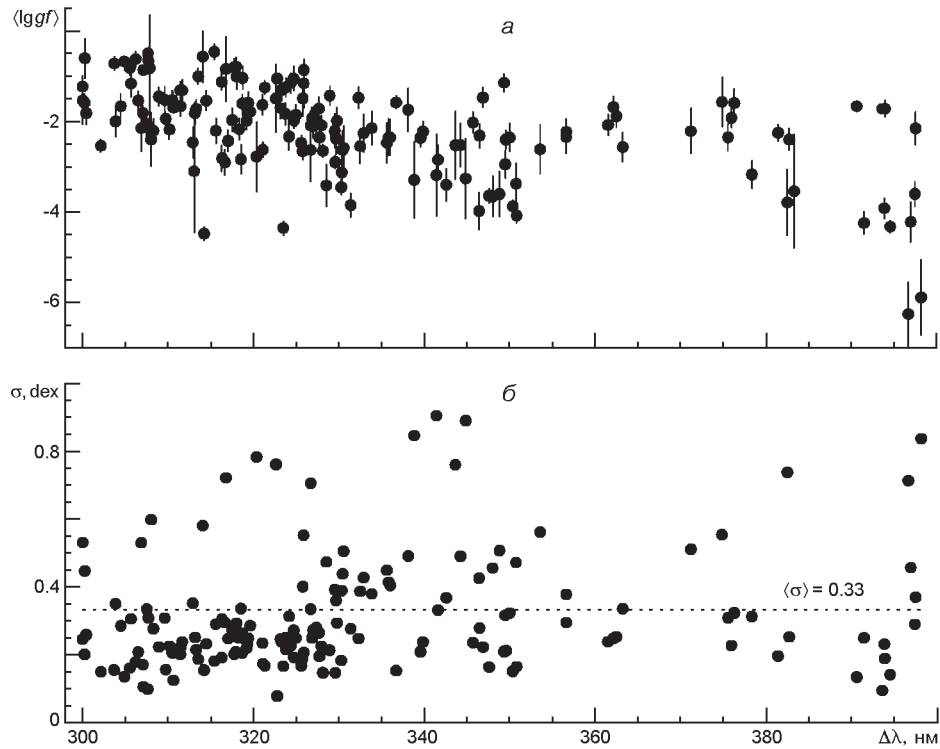


Рис. 2. Средние значения $\lg gf$ (а) и их среднее квадратичное отклонение (б) для линий Fe II из ближней УФ-области спектра, полученные путем усреднения теоретических, экспериментальных и компилятивных данных

В качестве основных механизмов, вызывающих уширение линий Fe II, были рассмотрены ван-дер-ваальсовское взаимодействие с атомами водорода, затухание излучения и квадратичный эффект Штарка. Для расчета уширения, обусловленного затуханием вследствие излучения, использовалась классическая постоянная затухания γ_{rad} [47]. Штарковское уширение γ_4 вычислялось по формуле Грима [24]. Ван-дер-ваальсовская постоянная затухания γ_6 находилось на основании классической формулы Унзольда [81] с поправочным множителем $E = 1.5$, рекомендованным Гуртовенко и Костыком [3] для случая модели HOLMUL.

При расчете профилей линий мы приняли во внимание также уширение, вызванное микротурбулентным полем скоростей. Мы рассчитали силы осцилляторов линий Fe II, используя значение микротурбулентной скорости $V_{\text{mi}} = 1$ км/с.

Наблюдаемые эквивалентные ширины W линий Fe II определялись по Льежскому атласу [15], полученному на монохроматоре двойной обсерватории Юнгфрауйох с высоким спектральным разрешением ($R = 10000000$). Мы приводим их значения в табл. 2. Поскольку рассматриваемая в данной работе область спектра $\lambda = 300\text{—}400$ нм сильно блендирована, мы вынуждены были проводить разложение («де-

Таблица 2. Список линий Fe II, использованных для определения сил осцилляторов

λ , нм	Номер мультиплета [51]	EPL , эВ	EPU , эВ	g_l	g_u	W , пм	Переход
300.2645	8	1.70	5.79	4	6	26.879	$a^4P - z^4P^o$
314.2220	7	1.67	5.62	6	4	6.362	$a^4P - z^4F^o$
316.3091	6	1.70	5.60	4	2	9.239	$a^4P - z^4D^o$
316.6670	1	0.99	4.82	8	6	7.714	$a^4D - z^6D^o$
317.0337	1	1.08	4.85	4	2	11.054	$a^4D - z^6D^o$
318.3115	5	1.67	5.41	6	4	14.557	$a^4P - z^6P^o$
318.5315	5	1.70	5.36	4	6	11.337	$a^4P - z^6P^o$
318.6741	7	1.67	5.59	6	6	21.819	$a^4P - z^4F^o$
319.2917	6	1.67	5.58	6	4	15.088	$a^4P - z^4D^o$
319.3809	7	1.70	5.59	4	6	21.252	$a^4P - z^4F^o$
319.6076	7	1.72	5.62	2	4	21.127	$a^4P - z^4F^o$
321.0449	6	1.70	5.58	4	4	18.538	$a^4P - z^4D^o$
321.3310	6	1.67	5.55	6	6	23.656	$a^4P - z^4D^o$
322.7732	6	1.72	5.60	2	2	38.143	$a^4P - z^4D^o$
323.4923	7	1.67	5.55	6	8	6.205	$a^4P - z^4F^o$
325.5884	6	1.72	5.58	2	4	14.464	$a^4P - z^4D^o$
327.7347	6	1.70	5.55	4	6	18.302	$a^4P - z^4D^o$
328.1293	6	1.67	5.51	6	8	15.398	$a^4P - z^4D^o$
328.5417	1	0.99	4.79	8	8	8.681	$a^4D - z^6D^o$
329.5814	1	0.99	4.77	8	10	10.098	$a^4D - z^6D^o$
330.2861	1	1.04	4.82	6	6	9.001	$a^4D - z^6D^o$
330.3466	1	1.08	4.84	4	4	9.405	$a^4D - z^6D^o$
331.3996	1	1.04	4.79	6	8	7.139	$a^4D - z^6D^o$
331.6175	1	1.10	4.85	2	2	3.244	$a^4D - z^6D^o$
338.1361	1	1.10	4.84	2	4	8.200	$a^4D - z^6D^o$
342.5582	5	1.67	5.29	6	8	6.512	$a^4P - z^6P^o$
346.3974	4	1.67	5.25	6	6	5.714	$a^4P - z^6F^o$
347.5254	4	1.67	5.24	6	8	7.823	$a^4P - z^6F^o$
348.7990	4	1.70	5.25	4	6	6.315	$a^4P - z^6F^o$
350.3474	4	1.72	5.26	2	2	5.172	$a^4P - z^6F^o$
350.8213	4	1.72	5.26	2	4	5.112	$a^4P - z^6F^o$
391.4480	3	1.67	4.84	6	4	5.537	$a^4P - z^6D^o$
394.5210	3	1.70	4.84	4	4	4.865	$a^4P - z^6D^o$

синтез») спектра на составляющие. Пример такого десинтеза показан на рис. 3. В его основе лежит предположение, что профиль каждой линии, входящей в блендированный участок спектра, можно представить в виде гауссианы. В нашей работе ширина десинтезируемого участка спектра, в центре которого находилась интересующая нас линия Fe II, составляла 50 пм. При этом математическое ожидание гауссианы, описывающей данную линию, приравнивалось нулю, а его значения для остальных линий находились из их смещения относительно линии Fe II. Дисперсия каждой из гауссиан подбиралась таким образом, чтобы разность между наблюдаемым спектром и спектром, полученным в результате свертки гауссовских профилей, не превышала 8 %. Далее мы доводили эту разность практически до нуля, слегка корректируя крылья и центральную часть гауссовского профиля рассмат-

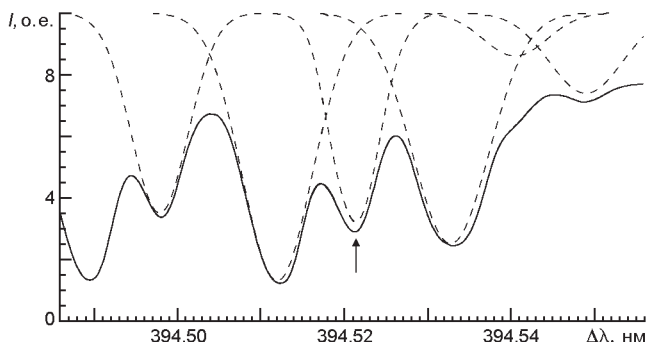


Рис. 3. Пример разложения («десинтеза») УФ-участка спектра Солнца на составляющие. Стрелкой показана линия Fe II 394.521 нм, для которой находилась «солнечная» сила осциллятора. Сплошная линия — наблюдаемый спектр

риваемой нами линии Fe II. Исправленный таким образом профиль и использовался для нахождения наблюдаемого значения W .

«Солнечные» силы осцилляторов 33 линий Fe II, полученные в данной работе, приведены в табл. 3. Здесь же для сравнения представлены экспериментальные [36, 50, 70, 84], полуэмпирические [39, 41] и компилятивные данные [17, 20, 30, 57, 61]. Средние значения разности $\lg gf$ между нашими данными и данными других исследований (смещение «солнечной» шкалы сил осцилляторов относительно других шкал) приведены в предпоследней строке табл. 3. Последняя строка содержит среднее квадратичное отклонение ($\lg gf$) разностей для индивидуальных линий Fe II от среднего значения $\lg gf$.

Как видим, «солнечная» шкала ближе всего к компилятивной шкале Хираты и Хорагучи [30]. В частности, ее смещение относительно этой шкалы составляет -0.02 dex. Отметим, что среднее квадратичное отклонение «солнечных» сил осцилляторов от сил осцилляторов Хираты и Хорагучи (± 0.39 dex) существенно превышает сами смещения.

Хуже всего наша шкала согласуется с экспериментальной шкалой Уорнера [84], что связано в первую очередь с большими погрешностями последней шкалы. Согласно работе [75] средняя поправка к силам осцилляторов [84] для линий Fe II составляет -0.1 dex. С учетом данной поправки смещение нашей шкалы сил осцилляторов относительно экспериментальных шкал лежит в пределах от -0.1 до -0.24 dex. Интересно, что при этом разброс «солнечных» значений $\lg gf$ индивидуальных линий Fe II относительно экспериментальных данных [61] оказывается наименьшим.

Сравнение «солнечных» и полуэмпирических сил осцилляторов из табл. 3 подтверждает высказанное выше мнение, что к шкале [41] следует относиться с большой осторожностью. При смещении этой шкалы, сопоставимом со смещением для случая экспериментальных шкал, среднее квадратичное отклонение разностей ($\lg gf$) для индивидуальных линий Fe II оказывается в четыре раза больше самого смещения. Интересно, что уточненная полуэмпирическая шкала Куруча [39] дает меньшее значение, однако при этом смещение $\lg gf$ увеличивается до $\lg gf = -0.24$ dex.

Обращает на себя внимание, что значения $\lg gf$ из табл. 3, полученные из сравнения «солнечных» сил осцилляторов с эксперимен-

Таблица 3. Результаты определения «солнечных» сил осцилляторов линий Fe II в диапазоне $\lambda = 300\text{—}400$ нм

λ , нм	Данная работа	Эксперимент				Теория				Компиляции		
		[84]	[50]	[36]	[70]	[41]	[39]	[30]	[61]	[57]	[20]	[17]
3002.645	-1.16	-0.32	-0.84	-0.93	-1.015	-1.03	-0.77	-0.93		-1.03	-0.93	-0.838
3142.22	-3.56					-4.65		-4.362		-4.33		
3163.091	-2.87	-1.98	-2.73	-2.82	-2.764	-3.22	-2.95	-2.82	-2.82	-2.90	-2.82	-2.76
3166.67	-3.20	-2.11	-3.02			-2.95		-3.08	-3.07	-2.95		-3.08
3170.337	-2.53	-1.76	-2.50			-2.54	-2.33	-2.49	-2.56	-2.54	-2.44	-2.61
3183.115	-2.21	-1.67	-2.09	-2.10	-2.225	-2.59	-2.29	-2.04	-2.04	-2.27	-2.10	-2.049
3185.315	-2.51	-1.99	-2.71	-2.78	-3.040	-3.30	-2.98	-2.78	-2.78	-2.89	-2.78	-2.74
3186.741	-1.76	-0.98	-1.67	-1.67	-1.630	-1.69	-1.48	-1.71	-1.71	-1.69	-1.67	-1.63
3192.917	-2.19	-1.17	-1.93	-1.95	-1.935	-1.89	-1.70	-1.92	-1.96	-1.89	-1.95	-1.93
3193.809	-1.78	-0.89	-1.66			-1.73	-1.51	-1.75	-1.72	-1.73	-1.66	-1.78
3196.076	-1.82	-1.08	-1.77	-1.73	-1.829	-2.23	-1.96	-1.66	-1.66	-1.91	-1.73	-1.7
3210.449	-1.92	-0.96	-1.63	-1.69	-1.949	-1.69	-1.47	-1.79	-1.79	-1.69	-1.69	-1.649
3213.310	-1.68	-0.78	-1.26	-1.27	-1.420	-1.31	-1.09	-1.31	-1.23	-1.31	-1.27	-1.245
3227.732	-1.19		-1.03	-1.06	-1.081	-1.08	-0.86	-1.13	-1.13	-1.08	-1.06	-0.96
3234.923	-4.34					-4.48		-4.315		-4.48		
3255.884	-2.90	-1.97	-2.51	-2.52	-2.452	-2.50	-2.46	-2.50	-2.50	-2.50	-2.52	-2.451
3277.347	-2.62	-1.91	-2.39	-2.30	-2.370	-2.45	-2.36	-2.47	-2.19	-2.45	-2.30	-2.273
3281.293	-2.78	-2.18	-2.68	-2.69	-2.651	-2.69	-2.65	-2.69	-2.69	-2.69	-2.69	-2.65
3285.417	-3.56		-3.55	-2.87		-3.85	-3.78	-2.87		-3.85	-2.87	-3.84
3295.814	-3.34	-2.46	-3.00	-2.90	-2.876	-3.00	-2.96	-2.90	-2.91	-3.00	-2.90	-2.88
3302.861	-3.57	-2.91	-3.47	-3.51	-3.564	-3.60	-3.49	-3.51	-3.50	-3.60	-3.51	-3.439
3303.466	-3.44	-2.75	-3.36	-2.70	-3.671	-3.34	-3.29	-2.70	-2.70	-3.34	-2.70	-3.67
3313.996	-3.99					-3.93	-3.91	-3.93	-3.93	-3.93	-3.92	-4.03
3316.175	-4.58					-4.93		-5.476		-5.64		
3381.361	-3.05					-3.35		-3.683		-4.06		
3425.582	-3.68	-2.79	-3.67			-2.84	-3.11	-3.73	-3.74	-3.55	-3.72	-3.52
3463.974	-3.94	-2.87	-2.04			-4.14	-3.72	-4.28	-4.28	-4.14	-4.27	-4.09
3475.254	-3.32					-4.74		-4.319		-4.74		
3487.99	-3.74	-2.83	-3.83			-3.78	-3.36	-3.89	-3.88	-3.78	-3.87	-3.74
3503.474	-4.08		-3.74			-4.06	-3.64	-3.80	-3.80	-4.06	-3.79	-4.01
3508.213	-4.10		-4.15			-4.10	-3.69	-4.21	-4.21	-4.10	-4.20	-4.06
3914.48	-4.24		-3.99			-4.61	-4.10	-4.05	-4.05	-4.61	-4.04	-4.37
3945.21	-4.40		-4.19			-4.50	-4.12	-4.25	-4.25	-4.50	-4.24	-4.44
$\langle I_{ggf} \rangle$		-0.82	-0.13	-0.24	-0.09	0.08	-0.22	-0.02	-0.13	0.10	-0.16	-0.10
(I _{ggf})		± 0.16	± 0.17	± 0.25	± 0.24	± 0.43	± 0.25	± 0.39	± 0.23	± 0.42	± 0.24	± 0.20

тальными и полуэмпирическими данными, как правило, меньше нуля. Исключение составляют лишь шкала [41] и полученная на ее основе компилятивная шкала Филиппа [57]. Иными словами, наши значения I_{ggf} оказываются систематически ниже данных других исследователей. Очевидно, что причины этого кроются прежде всего в недостатках самого метода определения «солнечных» сил осцилляторов.

Ошибки определения сил осцилляторов линий Fe II. Как мы уже говорили выше, значения «солнечных» сил осцилляторов чувствительны к погрешностям ряда параметров, в первую очередь микротурбулентной скорости V_{mi} , постоянной затухания γ_0 и эквивалентной ширины линии.

Вопрос о величине микротурбулентной скорости в фотосфере Солнца неоднократно обсуждался (см. [3]). Мы оценили ошибки определения сил осцилляторов линий Fe II, вызванные погрешностями данного параметра, исходя из того, что типичные значения V_{mi} в области фотосферы, где формируются данные линии, заключены в пределах 0.8—1.0 км/с.

Для оценки влияния погрешностей δ мы сравнили результаты расчетов сил осцилляторов для двух значений поправочного множителя $E = 1.5$ и $E = 2$. Отметим, что при $E = 2$ формула Унзоляда [81] дает значения δ , близкие к полуклассической теории Ансти, Барклема и О’Мары [5, 8].

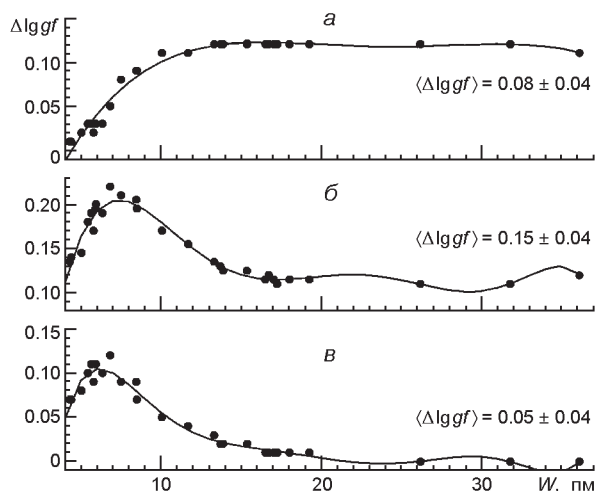
При оценке влияния ошибок измерения эквивалентных ширин W мы руководствовались сведениями, приведенными в работах [3] и [35]. Согласно этим данным ошибки измерения эквивалентных ширин солнечных линий в оптическом диапазоне спектра составляют около 3 %. В УФ-области максимальная ошибка может достигать 10 %, что связано с неопределенностями проведения уровня континуума и с проблемами описанного выше десинтеза блендированного участка спектра. Это максимальное значение мы и использовали для исследования чувствительности значений $\lg gf$ к погрешностям W .

Ошибки определения «солнечных» сил осцилляторов, вызванные погрешностями δ , W , V_{mi} , и их средние значения $\langle \lg gf \rangle$ для 33 линий Fe II из диапазона 300—400 нм показаны на рис. 4. Видно, что наибольшие ошибки вносят эквивалентные ширины. При этом особенно чувствительными к ошибкам их измерения оказываются линии со значениями $W \approx 8$ пм. Данные линии Fe II характеризуются также повышенной чувствительностью к используемым при расчете $\lg gf$ значениям V_{mi} , однако в среднем ошибка $\langle \lg gf(V_{mi}) \rangle$ в несколько раз меньше, чем ошибка $\langle \lg gf(W) \rangle$. В отличие от погрешностей W и V_{mi} , погрешности δ , связанные с выбором поправочного множителя E , создают максимальный эффект порядка 0.1 dex для сильных линий с $W > 10$ пм. В целом суммарная средняя квадратичная ошибка наших «солнечных» сил осцилляторов, вызванная совместным действием погрешностей δ , W и V_{mi} , равна

$$\sqrt{\langle \lg gf(E) \rangle^2 + \langle \lg gf(W) \rangle^2 + \langle \lg gf(V_{mi}) \rangle^2}. \quad (2)$$

Эта ошибка близка к средней величине смещения «солнечной» шкалы сил осцилляторов относительно других шкал. Поскольку главный вклад в нее вносят погрешности измерения наблюдаемых эквивалентных ширин, можно сделать вывод, что именно их недооценка и является основной причиной заниженных значений $\lg gf$, полученных в данной работе. Очевидно, что существенно уменьшить ошибку наших «солнечных» сил осцилляторов путем дальнейшего уточнения значений W вряд ли возможно, так как спектральная область, в которой наблюдаются представленные в табл. 4 линии Fe II, сильно блендирована. Тем не менее, эту ошибку можно было бы не-

Рис. 4. Ошибки $\lg gf$ определения «солнечных» сил осцилляторов для 33 линий Fe II из диапазона $\lambda = 300\text{—}400$ нм: *a* — изменение сил осцилляторов при увеличении поправочного множителя E к ван-дер-ваальсовской постоянной затухания γ_6 с 1.5 до 2; *б* — изменение сил осцилляторов при увеличении наблюдаемой эквивалентной ширины на 10%; *в* — изменение сил осцилляторов при увеличении микротурбулентной скорости V_{mi} от 0.8 до 1 км/с; W — наблюдаемая эквивалентная ширина. Модель атмосферы — HOLMUL



много уменьшить, во-первых, за счет использования при расчете постоянной затухания γ_6 более надежной теории, и во-вторых — за счет моделирования линий Fe II в трехмерной модели атмосферы, при котором отпадает необходимость описывать поле скоростей с помощью такого свободного параметра, как микротурбулентция.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты нашего исследования сводятся к следующему.

Выполнен обзор литературы, касающейся определения сил осцилляторов линий ионизованного железа Fe II, в том числе в УФ-области спектра.

Измерены «солнечные» силы осцилляторов $\lg gf$ для 33 умеренных и сильных линий Fe II с потенциалами возбуждения меньше 2 эВ, наблюдаемых в участке спектра Солнца $\lambda = 300\text{—}400$ нм.

Оценены ошибки определения $\lg gf$, обусловленные погрешностями микротурбулентной скорости, ван-дер-ваальсовской постоянной затухания и эквивалентной ширины линии.

Показано, что основной причиной более низких значений наших «солнечных» сил осцилляторов по сравнению с экспериментальными и полуэмпирическими данными других исследований является недооценка наблюдаемых эквивалентных ширин, связанная с сильным блендированием УФ-области спектра.

Результаты данной работы мы планируем использовать в наших исследованиях по определению химического состава, металличности, ускорения свободного падения и эффективной температуры звезд.

1. Боярчук А. А., Саванов И. С. Силы осцилляторов для линий ионизованного железа // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 1986. — 74. — Р. 49—69.
2. Вакарчук І. О. Теорія зоряних спектрів: Підручник. — Львів: Львівський нац. ун-т ім. Івана Франка, 2002. — 359 с.

3. *Гуртовенко Э. А., Костык Р. И.* Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наук. думка, 1989.—200 с.
4. *Anders E., Grevesse N.* Abundances of the elements — Meteoritic and solar // *Geochim. Cosmochim. Acta.*—1989.—**53**.—P. 197—214.
5. *Anstee S. D., O'Mara B. J.* Width cross-sections for collisional broadening of s-p and p-s transitions by atomic hydrogen // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1995.—**276**, N 3.—P. 859—866.
6. *Asplund M.* Line formation in solar granulation. III. The photospheric Si and meteoritic Fe abundances // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**359**.—P. 755—758.
7. *Asplund M., Gustafsson B., Kiskelman D., Eriksson K.* Line-blanketed model atmospheres for R Coronae Borealis stars and hydrogen-deficient carbon stars // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**318**.—P. 521—534.
8. *Barklem P. S., O'Mara B. J., Ross J. E.* The broadening of d-f and f-d transitions by collisions with neutral hydrogen atoms // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1998.—**296**, N 4.—P. 1057—1060.
9. *Baschek B., Garz T., Holweger H., Richter J.* Experimental oscillator strengths of Fe II lines and the solar iron abundance // *Astron. and Astrophys.*—1970.—**4**.—P. 229—233.
10. *Biemont E., Baudoux M., Kurucz R. L., et al.* The solar abundance of iron: A “final” word // *Astron. and Astrophys.*—1991.—**249**.—P. 539—544.
11. *Blackwell D. E., Shallis M. J., Simmons G. J.* Oscillator strengths of Fe II lines derived from the solar spectrum. Choice of solar model atmosphere // *Astron. and Astrophys.*—1980.—**81**.—P. 340—343.
12. *Borrero J. M., Bellot Rubio L. R., Barklem P. S., del Toro Iniesta J. C.* Accurate atomic parameters for near-infrared spectral lines // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**404**.—P. 749—762.
13. *Castelli F., Kurucz R. L.* New Fe II energy levels from stellar spectra // *Astron. and Astrophys.*—2010.—**520**.—P. A57—A87.
14. *Corliss C. H., Bozman W. R.* Experimental transition probabilities for spectral lines of seventy elements; derived from the NBS Tables of spectral-line intensities // *NBS Monograph N 53*. Washington: US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1962.—562 p.
15. *Delbouille L., Roland G., Neven L.* Atlas photométrique du spectre solaire de 3000 to 10000 Å. — Liège: L'Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège, 1973.
16. *Fuhr J. R., Martin G. A., Wiese W. L.* Atomic transition probabilities. Iron through Nickel // *J. Phys. and Chem. Ref. Data.*—1988.—**17**, N 4.—504 p.
17. *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**, N 4.—P. 1669—1809.
18. *Fuhrmann K., Pfeiffer M., Frank C., et al.* The surface gravities of cool dwarf stars revisited // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**323**.—P. 909—922.
19. *Gingerich O., Noyes R. W., Kalkofen W., Cuny Y.* The Harvard-Smithsonian reference atmosphere // *Solar Phys.*—1971.—**18**.—P. 347—365.
20. *Giridhar S., Arellano Ferro A.* A critical compilation of oscillator strengths for Fe II lines // *Rev. mex. astron. y astrofis.*—1995.—**31**.—P. 23—37.
21. *Grasdalen G. L., Huber M., Parkinson W. H.* Absolute gf-values for Fe I and Fe II lines // *Astrophys. J.*—1969.—**156**.—P. 1153—1173.
22. *Grevesse N., Sauval A. J.* Standard solar composition // *Space Sci. Revs.*—1998.—**85**, N 1/2.—P. 161—174.—(Solar Composition and Its Evolution — from Core to Corona / Eds C. Frölich, M. C. E. Huber, S. K. Solanki).
23. *Grevesse N., Sauval A. J.* The solar abundance of iron and the photospheric model // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**347**.—P. 348—354.
24. *Griem H. R.* Spectral line broadening by plasmas. — New York: Academic Press, Inc., 1974.—421 p.—(Pure and Applied Physics, Vol. 39).

25. *Groth H.-G.* Die Atmosphäre des A2-Übergiganten Cygni. II. Teil. Quantitative Analyse // *Z. Astrophys.*—1961.—**51**.—P. 231—285.
26. *Gurtovenko E. A., Kostik R. I.* On the establishment of internally consistent solar scales of oscillator strengths and abundances of chemical elements. Part Two. On the errors of the oscillator strengths of Fe I lines in the Kurucz — Peytremann *gf*-scale // *Astron. and Astrophys.*—1981.—**101**.—P. 132—133.
27. *Gustafsson B., Bell R. A., Eriksson K., Nordlund A.* A grid of model atmospheres for metal-deficient giant stars. I // *Astron. and Astrophys.*—1975.—**42**, N 3.—P. 407—432.
28. *Hannaford P., Lowe R. M., Grevesse N., Noels A.* Lifetimes in Fe II and the solar abundance of iron // *Astron. and Astrophys.*—1992.—**259**.—P. 301—306.
29. *Heise C., Kock M.* Oscillator strengths some weak Fe II lines of astrophysical interest // *Astron. and Astrophys.*—1990.—**230**.—P. 244—247.
30. *Hirata R., Horaguchi T.* Atomic spectral line list. — 1995.— <ftp://cdsarc.u-strasbg.fr/pub/cats/VI/69>.
31. *Holweger H., Müller E. A.* The photospheric barium spectrum: Solar abundance and collision broadening of Ba II lines by hydrogen // *Solar Phys.*—1974.—**39**.—P. 19—30.
32. *Huber M. C. E.* Hook-Method Measurements of *gf*-values for Ultraviolet Fe I and Fe II Lines on a Shock Tube // *Astrophys. J.*—1974.—**190**.—P. 237—242.
33. *Israelian G., Rebolo R., Lopez R. G., et al.* Oxygen in the very early Galaxy // *Astrophys. J.*—2001.—**551**.—P. 833—851.
34. *Korn A. J., Shi J., Gehren T.* Kinetic equilibrium of iron in the atmospheres of cool stars. III. The ionization equilibrium of selected reference stars // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**407**.—P. 691—703.
35. *Kostik R. I., Shchukina N. G., Rutten R. J.* The solar iron abundance: not the last word // *Astron. and Astrophys.*—1996.—**305**.—P. 325—342.
36. *Kroll S., Kock M.* Fe II oscillator strengths // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1987.—**67**.—P. 225—235.
37. *Kurucz R. L.* Model atmospheres for G, F, A, B, and O stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1979.—**40**.—P. 1—340.
38. *Kurucz R. L.* Semiempirical Calculation of *gf* Values. IV: Fe II // *SAO Special Report*.—1981.—N 390.—P. 1—314.
39. *Kurucz R. L.* Semiempirical calculation of *gf* values for the iron group // *Transactions of the International Astronomical Union / Ed. M. McNally.* Dordrecht: Kluwer, 1988. Vol. XXB. P. 168—172.
40. *Kurucz R. L.* ATLAS9 stellar atmospheres programs and 2 km/s grid. — Cambridge: Smithsonian Astrophys. Obs., 1993.—CD-ROM N 13.
41. *Kurucz R. L., Peytremann E.* A table of semiempirical *gf* values. Part 1: Wavelengths: 5.2682 to 272.3380 nm // *SAO Special Report*.—1975.—N 362.—P. 1—1219.
42. *Lodders K.* Solar system abundances and condensation temperatures of the elements // *Astrophys. J.*—2003.—**591**, N 2.—P. 1220—1247.
43. *Maltby P., Avrett E. H., Carlsson M., et al.* New sunspot umbral model and its variation with the solar cycle // *Astrophys. J.*—1986.—**306**, N 1.—P. 284—303.
44. *Martin W. C., Sugar J., Musgrove A., et al.* NIST database for atomic spectroscopy, ver. 1.0, NIST Standard Reference Database 61. — 1995.
45. *Melendez J., Barbay B.* Both accurate and precise *gf*-values for Fe II lines // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**497**, N 2.—P. 611—617.
46. *Melendez J., Shchukina N. G., Vasiljeva I. E., Ramirez I.* Permitted oxygen abundances and the temperature scale of metal-poor turn-off stars // *Astrophys. J.*—2006.—**642**.—P. 1082—1097.
47. *Mihalas D.* *Stellar atmospheres: Second ed.* — San Francisco: W. H. Freeman and Co, 1978.—650 p.
48. *Milone L. A., Milone A. A. E.* Log (*gf*) for singly-ionized elements of the iron group //

- Astrophys. and Space Sci.—1984.—**107**.—P. 303—312.
49. *Milone L. A., Milone A. A. E.* Log (gf) for singly-ionized elements of the iron group. II // *Astrophys. and Space Sci.*—1985.—**115**.—P. 61—70.
50. *Moity J.* Arc measurements of Fe II transition probabilities // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1983.—**52**.—P. 37—62.
51. *Moore C. E.* A Multiplet table of astrophysical interest, Revised Edition. Part I. Table of multiplets. Part II. Finding list of all lines in the table of multiplets // *Nat. Standard Ref. Data Ser.*—1972.—**40**.—261 p.
52. *Nahar S. N.* Atomic data from the Iron Project. VII. Radiative dipole transition probabilities for Fe II // *Astron. and Astrophys.*—1995.—**293**.—P. 967—977.
53. *Nissen P. E., Chen Y. Q., Asplund M., Pettini M.* Sulphur and zinc abundances in Galactic stars and damped Ly systems // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**415**.—P. 993—1007.
54. *Nussbaumer H., Pettini M., Storey P. J.* Sextet transitions in Fe II // *Astron. and Astrophys.*—1981.—**102**, N 3.—P. 351—358.
55. *Nussbaumer H., Storey P. J.* Atomic Data for Fe II // *Astron. and Astrophys.*—1980.—**89**.—P. 308—313.
56. *Pauls U., Grevesse N., Huber M. C. E.* Fe II transition probabilities and the solar iron abundance // *Astron. and Astrophys.*—1990.—**231**.—P. 536—542.
57. *Phillips M. M.* A compilation of oscillator strengths for selected Fe II transition // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1979.—**39**.—P. 377—387.
58. *Pickering J. C., Johansson S., Smith P. L.* The FERRUM project: Branching ratios and atomic transition probabilities of Fe II transitions from the $3d^6(a^3F)4p$ subconfiguration in the visible to VUV spectral region // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**377**.—P. 361—367.
59. *Quinet P., Le Dourneuf M., Zeippen C. J.* Atomic data from the IRON Project. XIX. Radiative transition probabilities for forbidden line in Fe II // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1996.—**120**.—P. 361—371.
60. *Raassen A. J. J., Uylings P. H. M.* On the determination of the solar iron abundance using Fe II lines // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**340**.—P. 300—304.
61. *Ralchenko Yu., Kramida A. E., Reader J., and NIST ASD Team (2011).* NIST Atomic Spectra Database (ver. 4.1.0), [Online]. — 2011. — National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg. Available: <http://physics.nist.gov/asd3>
62. *Reddy B. E., Tomkin J., Lambert D. L., Allende Prieto C.* The chemical compositions of Galactic disc F and G dwarfs // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2003.—**340**, N 1.—P. 304—340.
63. *Roder O.* Messung absoluter Oszillatorenstärken einiger Fe I- und Fe II-Linien // *Z. Astrophys.*—1962.—**55**.—P. 38—45.
64. *Rutten R. J., Kostik R. I.* Empirical NLTE analyses of solar spectral lines. III — Iron lines versus LTE models of the photosphere // *Astron. and Astrophys.*—1982.—**115**.—P. 104—114.
65. *Ryabchikova T. A., Hill G. M., Landstreet J. D., et al.* Astrophysical determination of optical oscillator strengths for Ti II // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1994.—**267**, N 3.—P. 697—710.
66. *Sadakane K., Ohnishi T., Ohkubo M., Takeda Y.* Metallicities in four planet-harboring K-Type giants: HD 47536, HD 59686, HD 137759, and HD 219449 // *Publ. Astron. Soc. Jap.*—2005.—**57**, N 1.—P. 127—133.
67. *Santos N. C., Israelian G., Mayor M.* Spectroscopic [Fe/H] for 98 extra-solar planet-host stars. Exploring the probability of planet formation // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**415**.—P. 1153—1166.
68. *Savanov I. S.* Oscillator strengths catalogues for iron and titanium lines // *Proceedings of the 3rd International Colloquium of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences (Amsterdam, August 28—31, 1989) / Ed. J. E. Hansen. Amsterdam: North-Holland, 1990. P. 165—171.*

69. Schnabel R., Kock M., Holweger H. Selected Fe II lifetimes and f-values suitable for a solar abundance study // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**342**.—P. 610—613.
70. Schnabel R., Schultz-Johanning M., Kock M. Fe II lifetimes and transition probabilities // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**414**.—P. 1169—1176.
71. Shchukina N., Trujillo Bueno J. The iron line formation problem in three-dimensional hydrodynamic models of solar-like photospheres // *Astrophys. J.*—2001.—**550**, N 2.—P. 970—990.
72. Shchukina N., Trujillo Bueno J., Asplund M. The impact of non-LTE effects and granulation inhomogeneities on the derived iron and oxygen abundances in metal-poor halo stars // *Astrophys. J.*—2005.—**618**, N 2.—P. 939—952.
73. Shi J. R., Gehren T., Butler K., Mashonkina L. I., Zhao G. Statistical equilibrium of silicon in the solar atmosphere // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**486**.—P. 303—310.
74. Sikström C. M., Schultz-Johanning M., Kock M., et al. The FERRUM project: experimental lifetimes of highly excited Fe II 3d64p levels and transition probabilities // *J. Phys. B: Atom. and Mol. Opt. Phys.*—1999.—**32**, N 24.—P. 5687—5698.
75. Smith P. L. Absolute oscillator strengths for the iron group: a correction to the data of Warner for the second spectra and a comment on some of the semiempirical results of Kurucz and Peytremann // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1976.—**177**.—P. 275—289.
76. Sousa S. G., Santos N. C., Israelian G., et al. A new code for automatic determination of equivalent widths: Automatic Routine for line Equivalent widths in stellar Spectra (ARES) // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**469**, N 2.—P. 783—791.
77. Sousa S. G., Santos N. C., Mayor M., et al. Spectroscopic parameters for 451 stars in the HARPS GTO planet search program. Stellar [Fe/H] and the frequency of exo-Neptunes // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**487**, N 1.—P. 373—381.
78. Stalin C. S., Sinha K., Sanwal B. B. Solar log gf values for the spectral lines in the range 6209—6273 Å // *Bull. Astron. Soc. India.*—1997.—**25**.—P. 117—132.
79. Thevenin F. Oscillator strengths from the solar spectrum // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1989.—**77**, N 1.—P. 137—154.
80. Thevenin F. Oscillator strengths from the solar spectrum. II // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1990.—**82**, N 1.—P. 179—188.
81. Unsöld A. Physik der Sternatmosphären: Second ed. — Berlin: Springer, 1955.—866 p.
82. 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**.—P. 1—60.
83. Wahlgren G. M. Oscillator strengths and their uncertainties // *EAS Publ. Ser.*—2010.—**43**.—P. 91—114.—(Non-LTE Line Formation for Trace Elements in Stellar Atmospheres / Eds R. Monier, B. Smalley, G. Wahlgren, Ph. Stee).
84. Warner B. Absolute oscillator strengths for once-ionized elements of the iron group // *Mem. Roy. Astron. Soc.*—1967.—**70**.—P. 165—253.
85. Wolnik S. J., Berthel R. O., Wares G. W. Measurements of oscillator strengths for Fe I and Fe II // *Astrophys. J.*—1971.—**166**, N 1.—P. L31—L33.

Статья поступила в редакцию 19.03.12