

УДК 524.316.7, 535.34

**Я. В. Павленко<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03143

<sup>2</sup>Центр астрофизических исследований, Хартфордширский университет  
Хатфилд, Великобритания  
ур@mao.kiev.ua

### **Определение содержания элементов в атмосферах звезд-карликов спектральных классов F, G, K**

*Описана реализация алгоритма определения химического состава звезд спектральных классов F, G, K на основе воспроизведения профилей спектральных линий или выбранных деталей блендированных линий. Методика позволяет при заданной эффективной температуре звезды определить основные параметры атмосферы: ускорение свободного падения, микротурбулентную скорость, скорость вращения звезды, а также содержание элементов. На каждом этапе итерационного поиска лучшего решения модель атмосферы рассчитывается для нового набора входных данных. Приведены результаты применения методики для анализа спектра Солнца (G2 V) и HD 101348 (G3 V).*

*ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ЕЛЕМЕНТІВ В АТМОСФЕРАХ ЗІР-КАРЛИКІВ СПЕКТРАЛЬНИХ КЛАСІВ F, G, K, Павленко Я. В. — Описано реалізацію алгоритму визначення хімічного складу зірок спектральних класів F, G, K на основі відтворення профілів спектральних ліній або обраних деталей блендованих ліній. Методика дозволяє при заданій ефективній температурі зорі визначити основні параметри атмосфери: прискорення вільного падіння, микротурбулентну швидкість, швидкість обертання зорі, а також вміст елементів. На кожному етапі ітераційного пошуку кращого розв'язку модель атмосфери розраховується для нового набору вхідних даних. Наведено результати застосування методики для аналізу спектру Сонця (G2 V) і HD 101348 (G3 V).*

*DETERMINATION OF ABUNDANCES IN ATMOSPHERES OF F-, G-K-DWARFS, by Pavlenko Ya. V. — Algorithm of the determination of the chemical composition of stars of spectral classes F, G, K using fits to the*

*observed lines or selected parts the blended lines. The technique allows us to determine the parameters atmosphere, i.e. acceleration of gravity, microscopic turbulence speed, the rotation speed of the star, and the content of elements for a given effective temperature of the star. At each stage of the iterative iterative process the atmosphere model calculated for the new set of input data. The results of the application of the procedure for the analysis of the spectra of the Sun (G2 V) and HD 101348 (G3 V) are discussed.*

## **ВВЕДЕНИЕ**

В последние годы благодаря технологической революции в области наблюдательной астрофизики созданы базы данных спектров высокого разрешения звезд солнечного типа, полученных, в частности, в рамках программ по поиску экзопланет (см. [7, 20, 35]). Целью этих работ было обнаружение и изучение особенностей химического состава центральных звезд с экзопланетными системами и сравнения их с одиночными звездами Галактики. В процессе уже первых подобных исследований был выявлен ряд интересных особенностей. В частности, вероятность обнаружения планетных систем у центральных звезд с повышенной металличностью оказалась выше [10, 30]. Этот наблюдательный феномен объясняется особенностями процессов фрагментации газовых дисков в процессе формирования планетных систем. Кроме того, в атмосферах звезд с планетными системами, вероятно, имеются и другие особенности химического состава по сравнению с одиночными звездами (например, аномалии содержания Si и Ni). Эти аномалии объясняются или будут объяснены в рамках различных сценариев формирования планет [13, 17] вследствие проявления эффектов фрагментации и сепарации элементов в процессе эволюции массивных газопылевых дисков вокруг них.

С другой стороны, массовое определение химического состава звезд солнечного типа имеет самостоятельное значение для понимания эволюционных процессов в нашей Галактике в целом. Действительно, в определенном смысле долгоживущие G-карлики являются ключевыми объектами для понимания многих деталей эволюции нашей Галактики. Наблюдения показывают слишком мало металлодефицитных G-карликов («проблема G-карликов») по отношению к предсказаниям простой модели химической эволюции Галактики [11, 31], а также других галактик с балджем или галактик с доминированием диска [8, 36].

Заметим, что в настоящее время для анализа химического состава звезд применяются несколько методик. Большую популярность приобрели программы LINES и MOOG [18, 34]. Первая из них предполагает использование эквивалентных ширин линий для определения содержания элементов, во второй предполагается воспроизведение

наблюдаемых профилей линий поглощения в наблюдаемых спектрах. Подобным образом работают программы SPANSAT [1] и WIDTH [9]. В последнее время широко используется программа SME [35]. Все эти программы используют приблизительно одинаковые принципы работы и предполагают определение основных параметров звезд для изучения химического состава их атмосфер на основе использования известных сеток моделей атмосфер.

По сути в этой работе представлена модификация процедуры массового определения химического состава звезд солнечного типа, которая описана в работе [24]. Термин «звезды солнечного типа» будет использоваться здесь для выборки карликов спектральных типов F7 V — K0 V, т. е. звезд главной последовательности с эффективными температурами  $T_{\text{эф}} = 5200 \dots 6300$  К [27]. Спектры этих звезд весьма подобны, в них линии нейтральных атомов доминируют, при этом число линий ионов металлов первой стадии ионизации увеличивается при увеличении  $T_{\text{эф}}$ . Нашей целью была разработка методики определения содержаний элементов и других физических характеристик при минимальном числе таких известных параметров атмосфер звезд. В последнее время эта тематика является весьма актуальной, а применяемые здесь методы зачастую весьма нетривиальны, несмотря на кажущуюся простоту решаемых задач [29].

В этой работе приведены результаты применения методики для анализа спектров Солнца и звезд солнечного типа. Описывается наша методика расчетов синтетических спектров и определения искомым параметров, приводятся результаты анализа спектров Солнца и звезды солнечного типа HD 101348.

## МЕТОДИКА

**Наблюдаемые спектры.** Использованный в этой работе спектр звезды солнечного типа HD 101348 подробно описан в работах [14, 15]. Для полноты изложения отметим здесь, что этот спектр был получен в рамках программы CHEPS (Calan-Hertfordshire Exosolar Planet Search) на спектрографе HARPS, установленном на 3.6-м телескопе ESO (Чили). По качеству этот спектр сравним со спектром Солнца как звезды [16], который также использован в нашей работе в качестве спектра звезды с хорошо изученными характеристиками. Номинальное разрешение в этих спектрах составляет  $70000$  на  $\lambda = 600$  нм; эта величина определяется в основном проявлением макротурбулентных движений в атмосферах звезд с амплитудой  $2 \dots 4$  км/с.

**Моделирование наблюдаемых линий поглощения.** Моделирование наблюдаемых спектров и определение содержаний элементов производились по программе AbE18 [22] (текущая версия 0.1.4), в которой расчеты синтетических спектров производились с помощью подпрограмм WITA6 [21] в рамках приближения локального термодинамического равновесия (ЛТР) для моделей атмосфер, рассчитанных

по программе SAM12 [23]. Стандартная система использованных источников непрозрачности в континууме описана в работах [23, 25]; в более поздних версиях программы включены новые источники непрозрачности [3]. Расчеты синтетических спектров в оптическом диапазоне в этой работе производились с учетом поглощения атомными линиями из списков VALD3 [28] с шагом по длине волны 2 пм, микротурбулентная скорость  $V_t$  подбиралась в процессе работы программы поиска лучшего решения (см. ниже). Уширение спектральных линий было учтено посредством свертки рассчитанных синтетических спектров гауссианой с параметрами, соответствующими суммарному эффекту инструментального уширения и макротурбулентности, а также профилем вращения по методике [2].

Есть ряд факторов, которые создают серьезные проблемы при количественном анализе звездных спектров:

— точность и корректность определения основных параметров звездных атмосфер: эффективных температур, ускорения свободного падения и металличности. Зачастую эти параметры допускают неоднозначную интерпретацию. Так, вместо болометрической эффективной температуры используются значения, найденные из спектроскопических или фотометрических данных, а параметр металличности в общем случае не описывает всей совокупности содержаний элементов в атмосферах звезд. Действительно, содержание C, N, O и группы  $\alpha$ -элементов изменялось в процессе эволюции Галактики не так, как содержание элементов группы железа [26]. Более того, обогащение Галактики различными элементами на разных временных промежутках и расстояниях от центра Галактики различается из-за различных вкладов в обогащение элементами от различных источников производства (сверхновые разных типов, массивные звезды, звезды АВГ и пр.);

— корректный учет блендирования. Следует учитывать, что большинство спектральных деталей в наблюдаемых спектрах F-K-звезд суть бленды. И степень блендирования естественным образом увеличивается при увеличении металличности звезды (см. рис. 1);

— микротурбулентная скорость  $V_t$  является важным параметром процедуры количественного анализа звездных спектров. Некоторые исследователи просто используют фиксированное значение  $V_t$  [6];

— макротурбулентная скорость и наличие вращения во многом определяют фактическое разрешение для наблюдаемых спектров, которое для звезд солнечного типа ниже, чем то, которое определяется инструментальным разрешением. Так, для Солнца солнечный атлас Куруца был получен с очень высоким разрешением  $R > 100\,000$ , но реальное спектральное разрешение на  $\lambda = 600$  нм равно  $R = 70\,000$ ; эта величина определяется наличием макротурбулентных движений в атмосфере Солнца с амплитудами 2...4 км/с.

В этой работе под эффективной температурой звезды будет подразумеваться параметр  $T_{\text{эф}}$  модели атмосферы, при которой оказываются

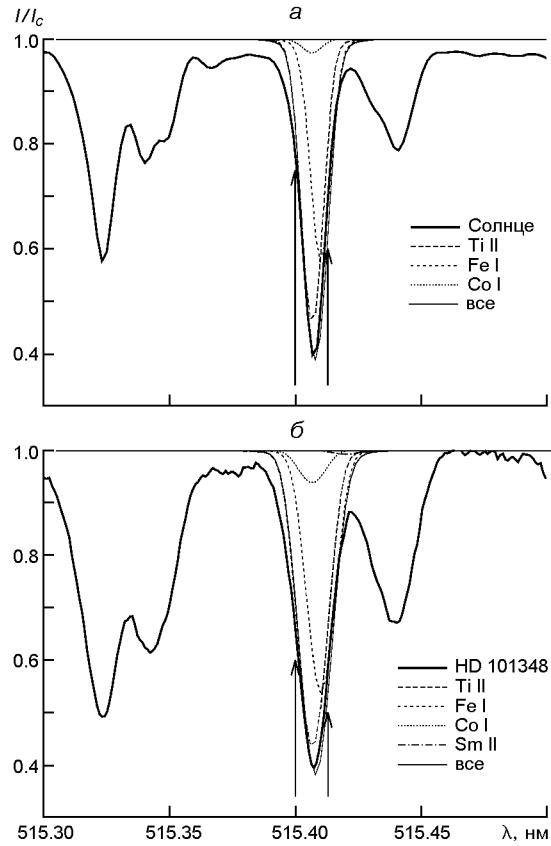


Рис. 1. Линии поглощения, формирующие blend на  $\lambda_0 = 515.42$  нм в спектре Солнца (а) и HD 101348 (б)

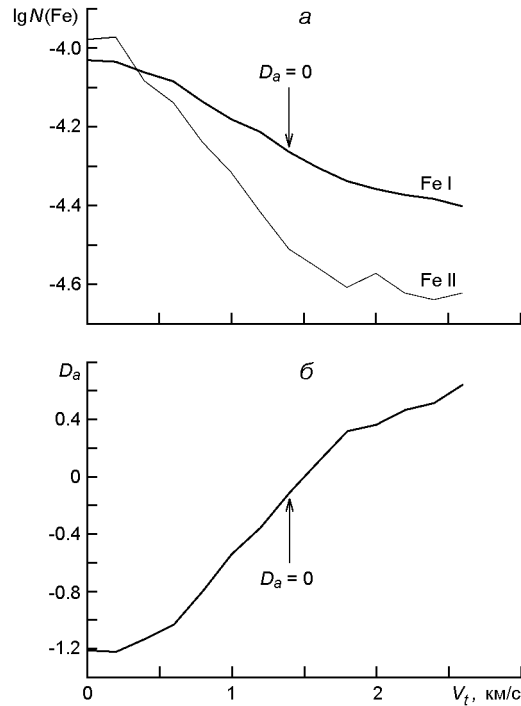
равны содержания железа, определяемые при воспроизведении линий поглощения Fe I и Fe II. Используется следующий алгоритм поиска решения.

1. В качестве нулевого приближения задаются значения параметров  $T_{\text{эф}}$ ,  $\lg g$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}]$ , полученные независимым способом, например из анализа фотометрических данных (см. [15]).

2. Для заданных значений входных параметров определяется содержание железа по выбранным линиям Fe I и Fe II для набора микротурбулентных скоростей. В нашем случае значения  $V_t$  задавались в интервале 0...2.5 км/с.

3. Микротурбулентная скорость в атмосфере звезды определялась из условия независимости содержания элемента от остаточного потока  $r_0$  в центре моделируемой спектральной линии поглощения, по которой мы и определяем это содержание. Такая зависимость может быть охарактеризована наклоном  $D_a = \lg N(\text{Fe I}) / r_0$  для набора содержаний Fe I, определяемых по линиям с разными значениями  $r_0$  (рис. 2, б). Микротурбулентная скорость  $V_t$  определялась из условия  $D_a = 0$  для линий поглощения Fe I, поскольку они в спектрах звезд

**Рис. 2.** Зависимости от микротурбулентной скорости: *a* — содержания железа в атмосфере HD 101348, определенного по линиям Fe I и Fe II, *б* — величины  $D_a$ . Начальная модель атмосферы 5620/3.65/0.4



солнечного типа более многочисленны и хорошо изучены. Подобная методика определения  $V_t$  использовалась Куруцем в программах WIDTH [9], только в том случае использовались эквивалентные ширины, а не  $r_0$ . Хороший пример определения  $V_t$  в спектре Солнца и звезд солнечного типа с использованием эквивалентных ширин можно найти в работе [6].

4. Поскольку в нашем случае воспроизводились профили линий поглощения, это дало возможность определить и скорость вращения звезды  $V \sin i$ . При этом, естественно, на точности определения  $V \sin i$  сказывалась погрешность определения макротурбулентной скорости в атмосфере звезды. Заметим, что информация о распределении макротурбулентной скорости в звездных атмосферах пока весьма скудна, поэтому мы использовали предположение о схожести  $V_{\text{macro}}$  в атмосферах звезд солнечного типа. Строго говоря, использование этого предположения накладывает ограничение на точность определения  $V \sin i$ . Этот параметр, особенно при малых значениях  $V \sin i$ , может трактоваться как параметр задачи, позволяющий улучшить решение (adjusting parameter).

5. Посредством варьирования параметра  $\lg g$  мы добивались равенства содержаний Fe I и Fe II при микротурбулентной скорости на  $D_a = 0$ , при этом модель атмосферы пересчитывалась для текущих значений содержаний элементов и  $\lg g$ .

6. Итерационный процесс продолжался от п. 2 до достижения сходимости.

Таким образом, в процессе поиска решения неизменным остается только один параметр  $T_{\text{эф}}$ . Впрочем, в отдельных случаях, если и этот

параметр известен недостаточно уверенно, возможен поиск его значения с применением более сложного алгоритма, включающего в себя использование «внешнего» итерационного цикла для определения  $T_{\text{эф}}$ . В этой работе использованы значения  $T_{\text{эф}}$  двух звезд, определенные с достаточной точностью, так что проблема сведена к определению  $\lg g$ ,  $V_t$ ,  $V \sin i$  и содержаний элементов в рамках самосогласованного подхода, когда на каждой итерации используется модель атмосферы, рассчитанная для «текущих» значений этих параметров. Результаты использования этой методики для количественного анализа Солнца и звезды солнечного типа HD 101348 изложены ниже. Здесь мы ограничимся в основном результатами определения содержания железа, поскольку при этом определяются также значения всех важных входных параметров задачи, использующихся при оценивании содержания других элементов. Детальный анализ полученных содержаний 11 других элементов приводится в работе [14], см. также табл. 2.

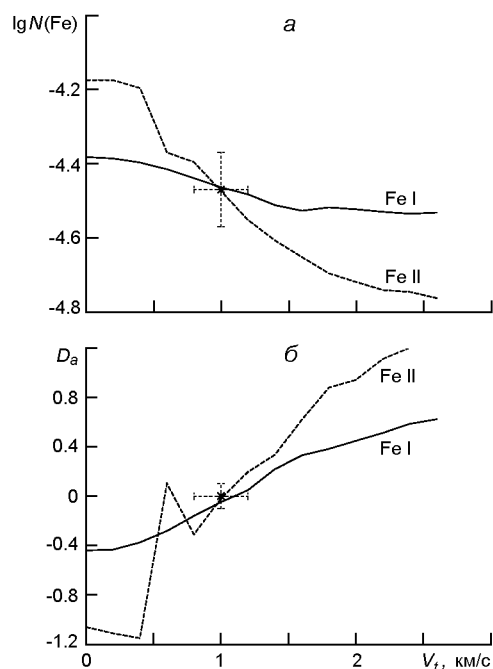
## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Солнце.** Значения содержания железа в солнечной атмосфере для модели атмосферы с параметрами 5777/4.44/0, полученные по линиям Fe I и Fe II, составили  $\lg N(\text{Fe I}) = -4.45 \pm 0.020$  и  $\lg N(\text{Fe II}) = -4.56 \pm 0.03$ , эти значения соответствуют  $D_a = 0$  (см. рис. 3, б, где представлены результаты расчетов  $D_a$  для линий Fe I и Fe II). Как уже отмечалось выше, для определения  $V_t$  использование линий поглощения Fe I явно предпочтительнее, поскольку этих линий в спектре больше, и решение в целом представляется более устойчивым.

В случае атмосферы Солнца все входные параметры хорошо известны. Строгое объяснение различия 0.1 dex значений содержания железа, определяемых по линиям нейтрального и ионизованного железа, находится в рамках более рафинированного анализа с применением 3D-моделей атмосфер, с учетом локальных магнитных полей, эффектов отклонения от условий локального термодинамического равновесия [32, 33]. Здесь же отметим, что наши результаты воспроизводят оценки других известных исследований, выполненных в рамках стандартного анализа для 1D-моделей атмосфер [6].

Впрочем, в рамках нашего подхода эта разница в 0.1 dex содержания железа, полученными из анализа линий Fe I и Fe II, может быть устранена также посредством изменения параметра  $\lg g$ . Действительно, в рамках модели атмосферы Солнца 5777/4.62/0 мы получили значения  $\lg N(\text{Fe I}) = \lg N(\text{Fe II}) = -4.46 \pm 0.03$  при  $V_t = 1$  км/с (рис. 3). Заметим, что скорость вращения Солнца в этом случае составляет  $V \sin i = 1.57 \pm 0.06$  и  $2.11 \pm 0.20$  км/с по линиям Fe I и Fe II соответственно. Эти значения находятся во вполне допустимых пределах. Точность их определения в нашем случае ограничена ограничениями 1D-модели-

**Рис. 3.** Зависимость от микротурбулентной скорости: *a* — содержания железа в атмосфере Солнца, определенного по линиям Fe I и Fe II, *б* — величины  $D_a$



рования, принятыми параметрами макротурбулентности, эффектами блендирования и др.

**HD 101348.** Спектр HD 101348 исследовался в работе [14]. Там же приведены оценки содержания элементов и основные физические характеристики атмосферы. Наш интерес к этой звезде определяется тем, что скорость вращения у нее выше, чем у Солнца. Процесс определения «равновесного по ионизационному балансу Fe I/Fe II» содержания железа по линиям поглощения обоих ионов представлен на рис. 4 и в табл. 1.

В этом случае первое приближение ( $\lg g = 3.65$ ) было выбрано достаточно далеко от найденного в процессе решения ( $\lg g = 4.14$ ), однако и в этом случае мы получили достаточно хорошую сходимость. Решение было найдено в результате четырех итераций. Различия в содержаниях Fe I и Fe II меньше 0.05 dex — именно такой шаг по сетке содержаний использовался при их определении. Заметим, что в работе [15] для HD 101348 получена оценка  $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.28$  для модели атмосферы 5620/3.87/0.28, что хорошо согласуется с нашим значением  $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.27$ .

Таким образом, на первом этапе анализа линий железа Fe I в спектре звезды определяется его содержание, а также основные физические параметры атмосферы. Содержания других элементов мы определяем с использованием этих параметров. Значения содержания элементов в атмосфере, определенные для модели атмосферы 5620/4.14/0.28, микротурбулентной скорости  $V_t = 1.4$  км/с и  $V \sin i = 4.1$  км/с приведены в табл. 2. Здесь содержание цинка было определено только по одной линии поглощения, поэтому погрешность этого определения велика; больше информации см. в работе [14].



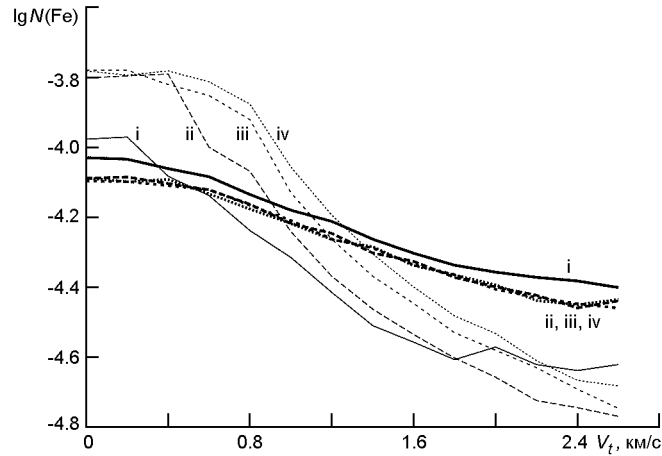


Рис. 4. Отклик содержаний Fe I и Fe II (толстые и тонкие линии соответственно) на изменение параметра ускорения свободного падения в атмосфере HD 101348 (итерации i—iv)

Таблица 1. Сходимость итерационного процесса определения содержания железа в атмосфере по линиям Fe I и Fe II ( $T_{\text{эф}} = 5620$ ,  $V_t = 1.4$  при  $D_a = 0$ )

lgg	lgN(Fe I)	lgN(Fe II)	$V \sin i$ , км/с
3.65	-4.263	-4.510	4.28
3.90	-4.302	-4.460	4.17
4.06	-4.288	-4.369	4.10
4.14	-4.284	-4.305	4.10

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленная в этой работе методика отличается от использованной в работе [24]. По сути наше усовершенствование методики количественного анализа звездных спектров состоит в следующем:

— микротурбулентная скорость определяется здесь из условия отсутствия наклона зависимости  $\lg N(\text{Fe})$  от  $V_t$ .

— величина ускорения свободного падения определяется из условия равенства содержаний Fe I и Fe II.

Определение микротурбулентной скорости в нашем случае производилось из анализа линий поглощения Fe I. В целом линии Fe I представлены в большем количестве в спектрах звезд солнечного типа, при этом они показывают меньшую чувствительность к изменениям параметра lgg. Для случая звезд с меньшими  $T_{\text{эф}}$  вполне могут подойти линии поглощения Ti и Ti II, поскольку у нейтрального титана потенциал ионизации меньше, чем у Fe I [26].

Применение нашей методики для количественного анализа линий железа в атмосфере Солнца с рассчитанной по программе SAM12 1D-моделью атмосферы 5777/4.44/0 воспроизвело с точностью до 0.1 dex

**Таблица 2.** Содержания элементов в атмосфере HD 101348, измеренные по отношению к Солнцу [4]

Элемент	[lgN]	Элемент	[lgN]
Fe I	0.09 0.02	Ti I	0.04 0.04
Fe II	0.07 0.03	Ti II	0.07 0.06
Na I	0.26 0.04	Cr I	0.01 0.04
Mg I	0.29 0.14	Mn I	0.42 0.08
Al I	0.12 0.02	Ni I	0.23 0.02
Si I	0.35 0.03	Cu I	0.29 0.29
Ca I	0.10 0.03	Zn I	0.68 (одна линия)

известные оценки:  $\lg N(\text{Fe}) = -4.45 \pm 0.02$  и  $-4.56 \pm 0.03$  для линий Fe I и Fe II соответственно. При этом условие  $\lg N(\text{Fe I}) = \lg N(\text{Fe II})$  достигается на  $\lg g = 4.61 \pm 0.03$ . Полученные при этом величины микротурбулентности ( $V_t = 1 \pm 0.2$  км/с) и скорости вращения Солнца ( $V \sin i = 1.6 \pm 0.1$  км/с) близки к известным для Солнца значениям. Заметим, что приведенные выше оценки точности характеризуют больше формальную точность определения  $V \sin i$  и  $V_t$ . В нашем случае точность ограничена тем, что мы анализируем спектр Солнца как звезды, т. е. спектр, усредненный по диску. Для последовательного учета дифференциального вращения, а также учетов эффектов изменения поля скоростей микро- и макротурбулентности с высотой требуется применение более рафинированных моделей.

В определенном смысле наши расчеты для Солнца определили и оценку точности определения ускорения свободного падения  $0.17$  dex в атмосфере звезды при помощи нашей методики.

Звезда HD 101348, спектр которой анализировался в нашей работе, имеет большую скорость вращения, чем Солнце. Однако и в этом случае наша методика позволяет определить не только скорость вращения, но и другие параметры. Действительно, наши расчеты дали возможность определить содержания элементов совместно с микротурбулентной скоростью, а также скорость вращения и ускорение свободного падения в атмосфере.

Заметим, что в нашем случае эффективная температура звезды считается известной, т. е. определенной независимыми методами, например посредством анализа фотометрических данных. Современные методы позволяют определять эффективные температуры с погрешностью в несколько десятков градусов [15]. Однако при этом всякая погрешность определения эффективной температуры сказывается на достоверности определения всех других параметров. С другой стороны, наш анализ реализован в рамках приближения локального термодинамического равновесия и в предположении подобия поля макротурбулентных скоростей в атмосферах звезд солнечного типа. И если в отношении величины НЛТР-эффектов многочисленные расчеты дают поправки к содержанию железа порядка  $0.1$  dex [19], то сведения о поле макротурбулентных движений в атмосферах звезд разной метал-

личности весьма скудны. Возможным решением было бы использование для количественного анализа 3D-моделей, однако в случае массового определения содержаний элементов и других физических параметров это пока не представляется возможным.

Именно для анализа больших массивов наблюдаемых спектров звезд солнечного типа и предназначена описанная выше методика. Естественно, полученные с ее применением результаты могут быть уточнены при использовании более совершенных методик [32, 33].

По большому счету наш анализ, как и другие подобные работы [6, 20] позволяет определить содержания элементов в атмосферах звезд по отношению к Солнцу. Действительно, мы в процессе работы производили отбор линий, тестировали все этапы методики на примере воспроизведения спектра Солнца как звезды. В целом это налагает и определенные ограничения на выборку исследуемых звезд-карликов. Наличие сильного магнитного поля или существенные отклонения содержания элементов от солнечного требуют адекватной модификации как деталей самой методики, так и пересмотра массивов входных данных, см. пример анализа спектра звезды гало в работе [26].

Автор благодарит О. Иванюка, И. Кушнирук, Джеймса Дженкинса, Хью Джонса за сотрудничество при создании и тестировании этой методики, группу создателей и поддержки VALD3, Р. Куруца за создание массива астрофизических данных и программ, которые использовались в нашей работе. Специальная благодарность анонимным рецензентам за внимание к работе и ценные комментарии.

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. *Грей Д. Ф.* Наблюдения и анализ звездных фотосфер. — М.: Мир, 1980.—248 с.
3. *Павленко Я. В.* Индуцированное столкновениями поглощение излучения в атмосферах звезд поздних спектральных классов // *Астрон. журн.*—2016.—**93**.—С. 1—8.
4. *Anders E., Grevesse N.* Abundances of the elements - Meteoritic and solar // *Geochim. et cosmochim. acta.*—1989.—**53**.—P. 197—214.
5. *Asplund M., Grevesse N., Sauval A. J.* The chemical composition of the Sun // *ASP Conf. Ser.*—2005.—**336**.—P. 25—57.—(Proceedings of a symposium held 17—19 June, 2004 in Austin., Texas / Eds T. G. Barnes III, F. N. Bash. — San Francisco: Astronomical Society of the Pacific).
6. *Bensby T., Feltzing S., Oey M. S.* Chemical abundances of solar neighbourhood dwarfs // *Astron. and Astrophys.*—2014.—**562**.—P. 71.
7. *Bond J. C., Launetta D. S., Tinney C. G., et al.* Beyond the iron peak: r- and s-process elemental abundances in stars with planets // *Astrophys. J.*—2008.—**682**.—P. 1234.
8. *Caimmi R.* A simple multistage closed-(box+reservoir) model of chemical evolution // *Astron. J.*—2011.—**183**.—P. 37.
9. *Castelli F.* Kurucz's WIDTH code and INPWIDTH // *MemSAI Suppl.*—2005.—**8**.—P. 44—60.
10. *Gonzalez G.* The stellar metallicity — giant planet connection // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1997.—**285**.—P. 403.

11. *Haywood M.* A revision of the solar neighbourhood metallicity distribution // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2001.—**325**.—P. 1365.
12. *Holweber H., Heise C., Kock M.* The abundance of iron determined from photospheric Fe II lines // *Astron. and Astrophys.*—1990.—**232**.—P. 510—515.
13. *Ida S., Lin D. N. C.* Toward a deterministic model of planetary formation. V. Accumulation near the ice line and super-Earths // *Astrophys. J.*—2008.—**685**.—P. 584—595.
14. *Ivanyuk O. M., Jenkins J. S., Pavlenko Ya. V., et al.* The metal rich abundance pattern — spectroscopic properties and abundances for 107 main-sequence stars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2017.
15. *Jenkins J. S., Jones H. R. A., Pavlenko Y., et al.* Metallicities and activities of southern stars // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**485**.—P. 571—584.
16. *Kurucz R., Furenlid I., Brault J., Testerman L.* Solar flux atlas from 296 to 1300 nm, National Solar Observatory Atlas, Sunspot, New Mexico: National Solar Observatory, 1984, 1-344.
17. *Livio M., Pringle J. E.* Metallicity, planetary formation and migration // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2003.—**346**.—P. 42—44.
18. *Martin J. C.* The origins and evolutionary status of B stars found far from the Galactic plane. I. Composition and spectral features // *Astron. J.*—2004.—**128**.—P. 2474—2500.
19. *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**.—id.: A87.—17 p.
20. *Neves V., Santos N. C., Sousa S. G., et al.* Chemical abundances of 451 stars from the HARPS GTO planet search program. Thin disc, thick disc, and planets // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**497**.—P. 563.
21. *Pavlenko Y. V.* A Lithium test and modeling of Lithium lines in late-type M dwarfs: Teide1 // *Astron. Rept.*—1997.—**41**.—P. 537—548.
22. *Pavlenko Ya. V.* Synthetic spectra and abundances of elements in the atmospheres of F-K stars // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.*—2002.—**18**, N 1.—P. 32—35.
23. *Pavlenko Ya. V.* Model atmospheres of red giants // *Astron. Rept.*—2003.—**47**.—P. 59—67.
24. *Pavlenko Ya. V., Jenkins J. S., Jones H. R. A., et al.* Effective temperatures, rotational velocities, microturbulent velocities and abundances in the atmospheres of the Sun, HD 1835 and HD 10700 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2012.—**422**.—P. 542—552.
25. *Pavlenko Y., Zapatero Osorio M. R., Rebolo R.* On the interpretation of the optical spectra of L-type dwarfs // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**355**.—P. 245—255.
26. *Pavlenko Y., Zhang Z. H., Galvez-Ortiz M. C., et al.* Probing M subdwarf metallicity with an esdK5+esdM5.5 binary // *Astron. and Astrophys.*—2015.—**582**.—id.: A52.—10 p.
27. *Pecaut M. J., Mamajek T. E.* Intrinsic colors, temperatures, and bolometric corrections of pre-main-sequence stars // *Astrophys. J. Suppl.*—2013.—**208**.—id.: 9.—22 p.
28. *Ryabchikova T., Piskunov N., Kurucz R. L., et al.* A major upgrade of the VALD database // *Phys. Scripta.*—2015.—id.: 054005.
29. *Ryabchikova T., Piskunov N., Pakhomov Yu., et al.* Accuracy of atmospheric parameters of FGK dwarfs determined by spectrum fitting // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2016.—**456**.—P. 1221—1234.

30. Santos N. C., Udry S., Bouchy F., et al. ELODIE metallicity-biased search for transiting Hot Jupiters. V. An intermediate-period Jovian planet orbiting HD 45652 // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**487**.—P. 369—372.
31. Searle L., Sargent W. L. W. Inferences from the composition of two dwarf blue galaxies // *Astrophys. J.*—1972.—**173**.—P. 25—33.
32. Shchukina N., Sukhorukov A., Trujillo Bueno J. Impact of surface dynamo magnetic fields on the solar abundance of the CNO elements // *Astron. and Astrophys.* — 2016.—**586**.—id.: A145.—9 p.
33. Shchukina N., Trujillo Bueno J. The impact of surface dynamo magnetic fields on the solar iron abundance // *Astron. and Astrophys.*— 2015.—**579**.—id.: A112.—13 p.
34. Sneden C. The nitrogen abundance of the very metal-poor star HD 122563 // *Astrophys. J.*—1973.—**184**.—P. 839—849.
35. Valenti J. F., Fischer D. A. Spectroscopic Properties of Cool Stars (SPOCS). I. 1040 F, G, and K dwarfs from Keck, Lick, and AAT planet search programs // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2005.—**159**.—P. 141—166.
36. Worthey G., Dorman B., Jones L. A. The G dwarf problem exists in other galaxies // *Astrophys. J.*—1996.—**112**.—P. 948—953.

Статья поступила в редакцию 07.04.16