

УДК 524.316.2-325.4

## КИНЕМАТИКА И ВОЗРАСТ ПЯТНАДЦАТИ ЗВЕЗД — ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ АНАЛОГОВ СОЛНЦА

© 2008 А. И. Галеев<sup>1,2</sup>, В. В. Шиманский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный университет, Казань, Россия

<sup>2</sup>Татарский государственный гуманитарно-педагогический университет, Казань, Россия

Поступила в редакцию 6 ноября 2007 г.; принята в печать 25 ноября 2007 г.

Для 15-ти звезд, принадлежащих к группе фотометрических аналогов Солнца, определены лучевые и пространственные скорости. Компоненты пространственной скорости ( $U$ ,  $V$ ,  $W$ ) большинства рассмотренных звезд заключены в пределах 10–60 км/с. Звезда HD 225239, в наших предыдущих работах отмеченная как субгигант, имеет пространственную скорость, превышающую 100 км/с, и является звездой толстого диска. По найденным нами фундаментальным параметрам атмосфер аналогов Солнца и опубликованным эволюционным трекам оценены массы и возрасты этих звезд. Проведено сравнение кинематики фотометрических аналогов с данными для большой группы звезд солнечного типа.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение звезд солнечного типа, проводимое с использованием различных методов, является одной из важных задач современной астрофизики звезд, так как дает много серьезной информации об их физических характеристиках, состоянии и эволюции. В последние годы реальность выполнения многоплановых и детальных исследований близких холодных звезд Главной последовательности обусловливается резким увеличением качества получаемых наблюдательных данных и точности расчетов теоретических моделей звезд и их атмосфер. Поэтому на новый уровень рассмотрения вышли проблемы места Солнца среди других звезд, его уникальности и необычности некоторых его параметров, выделения звезд, являющихся солнечными аналогами, а также поиска его двойников. Это позволяет внимательно рассмотреть стандартность нашего Солнца и возможность использования его в качестве шаблона в современных теориях строения и эволюции звезд.

Недавно мы провели работу по определению параметров атмосфер и анализу химического состава 15-ти звезд из выборки фотометрических аналогов Солнца. Наблюдательной базой исследования стали высокодисперсионные спектры этих звезд, полученные авторами на кудэ-эшелле-спектрометре 2-м телескопа обсерватории Терскол. В статьях [1] и [2] опубликованы основные результаты этой работы.

Однако представленная в них картина будет неполной, если для сравнения с солнечными значениями не исследовать главные физические ха-

рактеристики звезд — массы и возрасты, а также если не проанализировать кинематику этих довольно близких звезд. В данной статье мы завершаем подробное исследование звезд выборки из 15-ти фотометрических аналогов Солнца (глава 2) и представляем результаты оценки возраста и массы этих звезд (глава 3), а также определения их кинематических характеристик (глава 4), чтобы рассмотреть их связь с параметрами атмосфер этих звезд и еще раз проверить выводы об аналогичности их Солнцу.

### 2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Спектры пятнадцати звезд солнечного типа, которые предложены в качестве фотометрических аналогов Солнца Харитоновым и Мироновым [3], были получены с помощью кудэ-эшелле-спектрометра МАЭСТРО [4], установленного на 2-м телескопе Zeiss-2000 обсерватории в Терсколе. В качестве детектора использовалась ПЗС-камера WI 1242 × 1152 с размером пиксела 22.5 × 22.5 мкм. Спектры охватывают диапазон длин волн от 3500 до 10000 Å и имеют разрешение 45000. Благодаря хорошей чувствительности камеры отношение сигнал/шум в красной части спектров данных звезд достигает 200.

Тринадцать объектов выборки наблюдались в июле-августе 1998 года, а спектры звезд HD 213575 и HD 225239 получены в сентябре и октябре 1999 года. В каждую ночь для калибровки

длин волн и отождествления спектральных полу-  
чался спектр рассеянного сумеречного солнечного  
света. Одномерные записи спектров обработаны  
(нормировка, калибровка длин волн, измерение  
эквивалентных ширин и лучевых скоростей) по-  
средством программного пакета DECH20 [5].

Эффективные температуры звезд определялись  
по опубликованным в литературе фотометрическим  
индексам с помощью калибровок Алонсо и др.  
[6], основанных на методе инфракрасных потоков.  
Точность определения температур не хуже 100 К  
и они согласуются с результатами, полученными  
другими авторами. Ускорение силы тяжести най-  
дено с использованием параллакса, измеренных с  
помощью спутника HIPPARCOS [7]. Содержания  
железа и 32-х других химических элементов опре-  
делялись по эквивалентным ширинам нейтральных  
или однажды ионизованных атомов посредством  
программы WIDTH6 с использованием моделей  
атмосфер Куруца [8]. При вычислениях использо-  
ваны gf-факторы из базы данных VALD [9]. Методом  
"линия—линия" получены разницы содержаний  
химических элементов относительно Солнца (точ-  
нее, содержаний элементов, найденных аналогично  
по эквивалентным ширинам, которые были измере-  
ны по потоковому атласу Куруца).

Список исследованных звезд, важнейшие па-  
раметры атмосфер, определенные в работе [1], а  
также представленные в данной статье их массы и  
возрасты вместе с оценками других авторов при-  
ведены в табл. 1. В ее последних двух строчках  
даны средние значения и среднеквадратичные от-  
клонения величин этих параметров для 13-ти звезд  
— аналогов Солнца (из усреднения исключены  
выделенные курсивом две звезды — субгиганты).

### 3. МАССЫ И ВОЗРАСТЫ

Масса и возраст являются важнейшими пара-  
метрами, характеризующими физическое состоя-  
ние звезды и ее эволюционный статус. В совре-  
менной астрофизике для определения масс и воз-  
растов звезд преимущественно используют метод  
их оценки по положению звезды на эволюционных  
треках теоретической диаграммы "температура-  
светимость". Температуры и логарифмы ускоре-  
ния силы тяжести получены из наблюдений. При  
определении массы звезд более предпочтительно  
использование двойных звезд, однако не все ис-  
следуемые звезды входят в состав двойных систем.  
К примеру, в рассматриваемой выборке из 15-  
ти фотометрических аналогов Солнца точно из-  
вестна двойственность только HD 10307, а еще у  
двух объектов (HD 34411 и HD 159222) статус  
двойной звезды пока не подтвержден. Независи-  
мым методом оценки возраста является изучение  
хромосферной активности этих звезд по сильным

резонансным линиям ионизованного кальция. Так-  
же косвенно возраст звезд можно оценить по их  
кинематическим характеристикам.

Для определения этих физических характери-  
стик звезд — аналогов Солнца — мы использовали  
эволюционные треки и изохроны для звезд малых  
и промежуточных масс, рассчитанные в работе  
Джирарди и др. [16]. В ней представлена сетка  
эволюционных моделей для звезд в диапазоне от  
0.15 до 7  $M_{\odot}$  с различным исходным содержанием  
химических элементов ( $Z=0.0004-0.03$ ).

Массы рассматриваемых звезд определялись  
по эволюционным трекам теоретической диаграм-  
мы Герцшпрунга-Рессела в координатах  $\lg T_{eff}$  —  
 $\lg g$ . Для большинства звезд начальное содержа-  
ние тяжелых элементов бралось равным солнечно-  
му ( $Z=0.019$ ). Для трех звезд (HD 4915, HD 133002  
и HD 225239), металличности которых более чем  
в два раза ниже содержания железа на Солн-  
це, была использована сетка моделей с  $Z=0.008$ .  
Распределение звезд на этой диаграмме приведено  
на рис. 1, где заполненными кружками показаны  
звезды с солнечным химсоставом, а открытыми  
— три отклоняющиеся звезды (стрелки указывают  
их реальное расположение с учетом пониженной  
металличности). Звезды HD 225239 и HD 133002  
попадают в область субгигантов. Солнце на этом  
рисунке находится на кривой, соответствующей  
1  $M_{\odot}$ . Ближайшими к нему звездами оказались  
HD 197076 с массой 1.05  $M_{\odot}$ , HD 222143 (0.95  
 $M_{\odot}$ ) и HD 159222, имеющая  $M=1.00 M_{\odot}$ .

Как видно из 5-ой и 6-ой колонок табл. 1,  
только четыре изучаемые звезды имеют солнечную  
массу. Если учесть, что точность определения в на-  
стоящее время составляет 0.05–0.1  $M_{\odot}$ , то оказы-  
вается, что масса лишь одной звезды (HD 133002)  
явно отличается от солнечной — 1.6  $M_{\odot}$ . Сравне-  
ние этих результатов с расчетами других авторов  
показывает, что различия менее 0.1  $M_{\odot}$ , причем  
по опубликованным в литературе данным в рас-  
сматриваемой группе звезд — аналогов Солнца  
— массы ранее были определены у десяти более  
ярких звезд (не считая нашей работы [12]). Почти  
во всех случаях этот важный параметр был найден  
с помощью эволюционных треков.

На точность оценок звездной массы в первую  
очередь оказывают влияние ошибки в определении  
фундаментальных параметров звезд. К примеру, у  
HD 225239 большое отличие от опубликованной  
ранее массы (0.2  $M_{\odot}$ ) в первую очередь обусловле-  
но большой разницей в температуре (почти 200 К).  
Необходимо отметить звезду HD 10307 с массой  
1.06  $M_{\odot}$ , которая входит в состав двойной системы  
с орбитальным периодом 19.5 лет, и спутником на  
6 звездных величин слабее [17]. Двойственность  
позволяет определить ее массу, что выполнено в

**Таблица 1.** Параметры атмосфер, а также возрасты, массы исследованных звезд по результатам настоящей работы (н. р.) и сравнение их с литературными данными (л. д.), отмеченными ссылками

Звезда	Параметры атмосфер			Масса в $M_{\odot}$		Возраст, $10^9$ лет			$\log R_{HK}$
	HD	$T_{eff}$	$\lg g$	[Fe/H]	н. р.	л. д.	н. р.	л. д.	[20]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
159222	5805	4.39	0.13	1.00	1.08 [10]	6.0		3.8	-4.90
186408	5740	4.24	0.10	1.00	1.04 [11]	9.4		7.9	-5.10
222143	5720	4.41	0.10	0.95	1.03 [12]	10.4	—	—	—
34411	5800	4.20	0.08	1.00	1.00	9.2	9.0 [13]	6.8	-5.05
10307	5815	4.32	0.05	1.00	0.99	7.7	9.1 [14]	—	—
141004	5870	4.18	0.05	1.05	1.04	8.3	8.4 [14]	5.0	-4.97
186427	5700	4.34	0.05	0.95	1.01 [11]	9.4		7.4	-5.08
213575	5630	4.15	0.05	0.95	0.98 [12]	10.3	—	7.6	-5.09
Солнце	5770	4.44	0.0		1.00		4.5	4.9	-4.96
146233	5710	4.37	-0.01	0.95	0.99 [10]	4.6		4.6	-4.95
197076	5810	4.46	-0.05	1.05	1.05 [12]	5.2	—	4.2	-4.92
187923	5700	4.08	-0.12	1.02	1.01 [10]	10.4		7.6	-5.03
4307	5780	3.98	-0.17	1.10	1.15	7.2	6.1 [15]	7.8	-5.10
4915	5660	4.59	-0.24	0.90	0.83 [12]	12.8	—	3.4	-4.86
133002	5610	3.45	-0.38	1.60	1.53 [12]	1.7	—	—	—
225239	5650	3.79	-0.39	1.10	1.30	5.8	12.8 [15]	—	—
Среднее	5750	4.28	0.0	1.00	—	8.5	—	6.0	5.00
Дисперсия	$\pm 70$	$\pm 0.10$	$\pm 0.11$	$\pm 0.05$	—	$\pm 2.3$	—	$\pm 1.8$	$\pm 0.08$

работе Мартина и др. [18]. Для первичной компоненты получена величина  $0.795 M_{\odot}$ , для вторичной —  $0.136 M_{\odot}$ , а для всей системы —  $0.931 M_{\odot}$ .

По полученным значениям масс с использованием температур и логарифмов ускорений силы тяжести по тем же эволюционным моделям [16] оценены возрасты данных фотометрических аналогов Солнца. Для этого на диаграмме " $\lg T_{eff} - \lg g$ " были построены линии одинакового возраста (изохроны). Из-за неточностей в параметрах атмосфер полученные возрасты могут отличаться от реальных на 2–4 миллиарда лет и имеют оценочный характер; их достоверность также связана с качеством эволюционных моделей, использованных нами.

Итоговые величины возрастов изучаемых звезд даны в 7-м столбце табл. 1. Видно, что они довольно сильно различаются: среди звезд выборки встречаются как достаточно молодые объекты (HD 133002), так и довольно старые — HD 4915.

Если исключить звезды пониженной металличности, то средний возраст 13-ти солнечных аналогов составляет 8.5 млрд. лет, что больше возраста Солнца. К нему наиболее близка по возрасту звезда HD 146233 (18 Скорпиона), ранее отмеченная как вероятный кандидат в двойники Солнца [19], [1].

В восьмой колонке табл. 1 содержатся взятые из литературы оценки возрастов для некоторых звезд. Все они получены с помощью метода изохроны, правда, разными авторами использовались разные модели. Видно, что в большинстве случаев различия между возрастными звездами, полученными в данной работе и другими авторами, не превышают 1.5 млрд. лет.

Одним из важнейших критериев оценки возраста звезд является их хромосферная активность, которая фиксируется обычно по профилям сильных резонансных линий Ca II H и K.

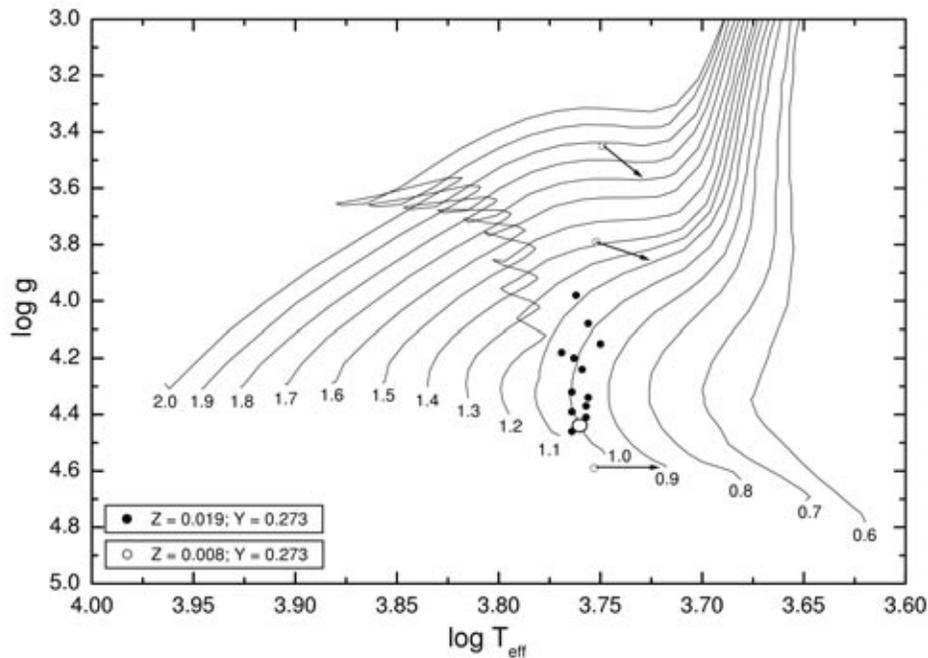


Рис. 1. Положения фотометрических аналогов Солнца на эволюционных треках Джирарди [16] (большим кружком отмечено положение Солнца).

Сильные резонансные линии Ca II H и K с длинами волн 3933 и 3968 Å в спектрах, полученных при наблюдениях на обсерватории Терскол, расположены в эшелле-порядках 12 и 11 соответственно. Эти линии мы исследовали дополнительно на предмет выявления эмиссионных деталей, которые обычно указывают на более высокую активность хромосферы, а значит, и на сравнительно меньший возраст объекта. Таким образом можно проверить достоверность оценок, сделанных по изохронам.

В двух последних столбцах табл. 1 приведены значения индикатора хромосферной активности  $R_{HK}$  и возраста рассматриваемых звезд, опубликованные в статье [20]. Для всех звезд, за исключением HD 4915, разность возрастов, полученных по изохронам и по хромосферной активности, заключена в пределах 3 млрд. лет. Какой-либо четкой зависимости от металличности или температуры для “хромосферного” возраста не обнаруживается, вероятно, ввиду небольшого количества звезд выборки и небольшого диапазона их параметров.

Сравнение рассмотренных здесь данных с солнечными значениями показывает, что известный по прежним работам кандидат в двойники Солнца — звезда HD 146233 — демонстрирует удивительное совпадение обеих оценок возрастов и параметра

$R_{HK}$ . В предыдущей работе [1] мы отметили близость этой звезды к Солнцу по фундаментальным характеристикам атмосферы и химическому составу, поэтому полученные здесь величины возраста и массы — дополнительный аргумент к утверждению, что данная звезда является полным солнечным аналогом.

Из всех пятнадцати звезд выборки только у двух наблюдаются хорошо заметные эмиссионные ядра в линиях кальция. На рис. 2 представлены ненормированные спектры четырех фотометрических аналогов Солнца в области 3920–3980 Å. Две из них, HD 133002 и HD 222143, демонстрируют эмиссии в ядрах линий Ca II, а у двух других (HD 4915 и HD 146233) такие детали не наблюдаются. Отсутствие явных эмиссионных деталей в спектре HD 4915, несмотря на самое высокое значение  $R_{HK}$ , возможно, объясняется недостаточным качеством наблюдательных данных (это самая слабая звезда выборки), также это может быть связано с процессами, происходящими на звезде (более низкий уровень активности в момент наблюдений), по этой же вероятной причине (возможная вспышка) наблюдается сильная эмиссия у немолодой звезды HD 222143. Таким образом, аномалии, вызванные несоответствием возраста и

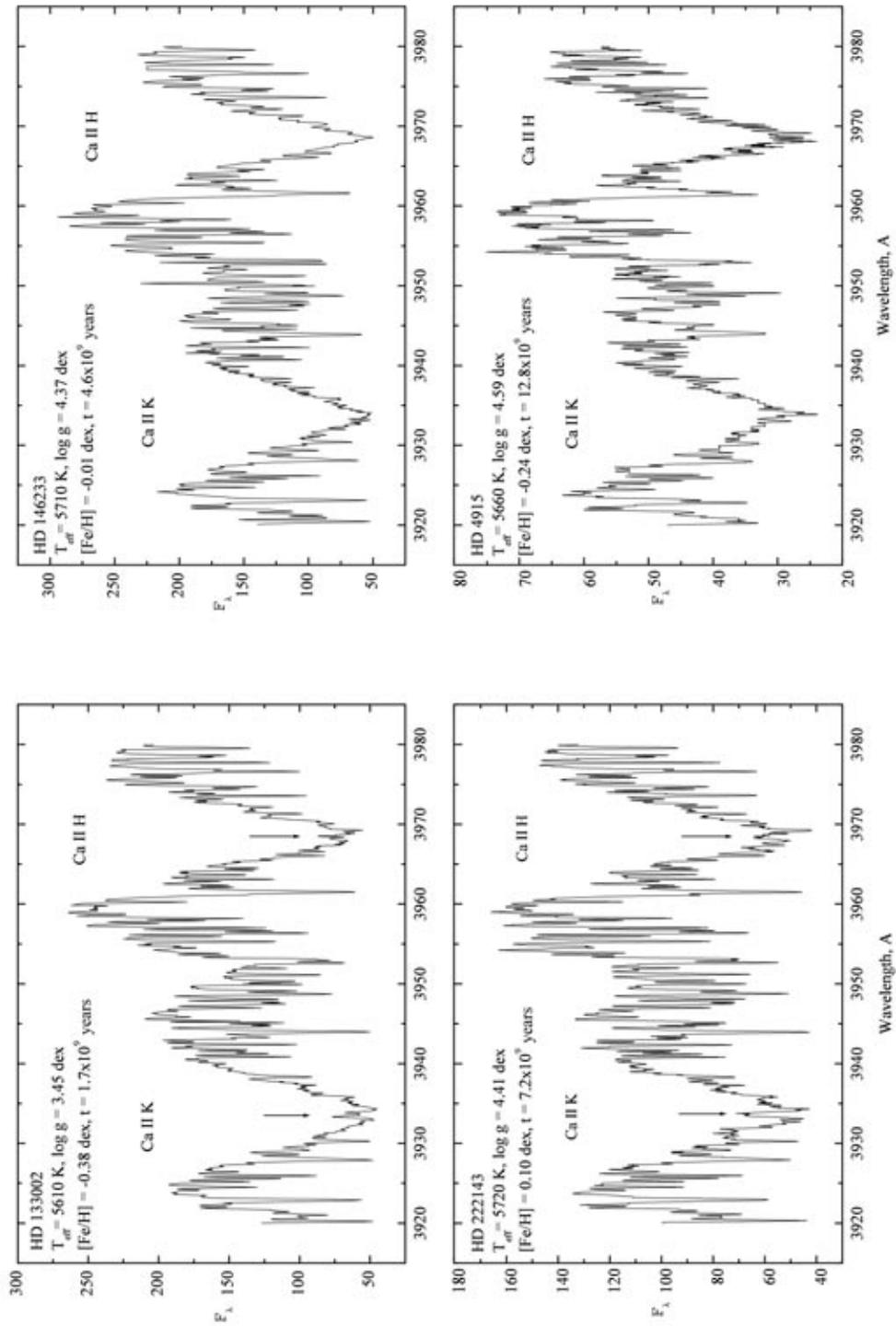
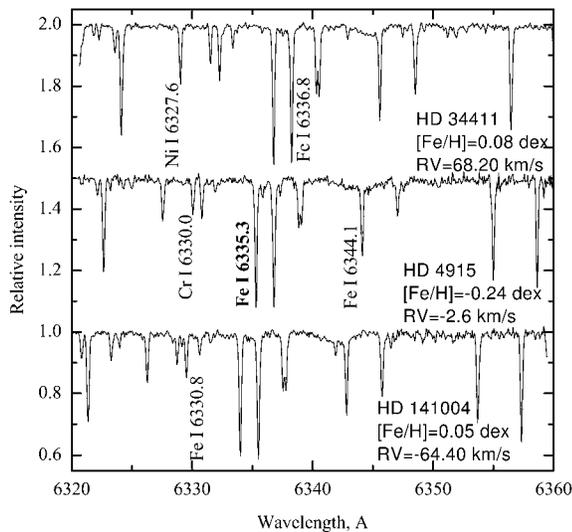


Рис. 2. Изображения спектров HD 4915, HD 133002, HD 146233 и HD 222143 в области линий резонансного дублета ионизованного кальция.



**Рис. 3.** Характерные участки нормированных спектров 3-х звезд выборки, имеющих разные лучевые скорости (для наглядности они раздвинуты друг от друга на 0.5 по оси ординат).

активности у HD 4915 и HD 222143, требуют более долговременных наблюдений этих объектов.

#### 4. КИНЕМАТИКА АНАЛОГОВ СОЛНЦА

Важной характеристикой любой звезды является ее движение в Галактике. Эта характеристика задается пространственной скоростью ( $V_{space}$ ) и ее компонентами  $U$ ,  $V$ ,  $W$ , которые вычисляются по лучевой скорости звезды ( $RV$ ) и собственному движению.

Посредством программы DECH20 [5] в диапазоне длин волн 4000–9000 Å в спектрах всех рассмотренных фотометрических аналогов Солнца измерены лучевые скорости ( $RV$ ) по 120–140 сильным неблендированным линиям различных элементов. В качестве примера на рис. 3 приведены участки нормированных спектров в диапазоне 6320–6360 Å для трех звезд с разными величинами лучевой скорости. Отмечены некоторые сильные линии, использованные в измерениях  $RV$ . На примере линии Fe II 6335 хорошо заметны относительные сдвиги спектров, вызванные различием в  $RV$  звезд.

При определении  $RV$  были учтены гелиоцентрическая поправка  $V_a$ , а также инструментальная поправка, необходимость учета которой вызвана, например, гнутием телескопа, различием оптических путей для спектра исследуемого объекта и спектра сравнения и т. д. Возможность вычисления инструментальной поправки реализована в новой модифицированной программе DECH20T.

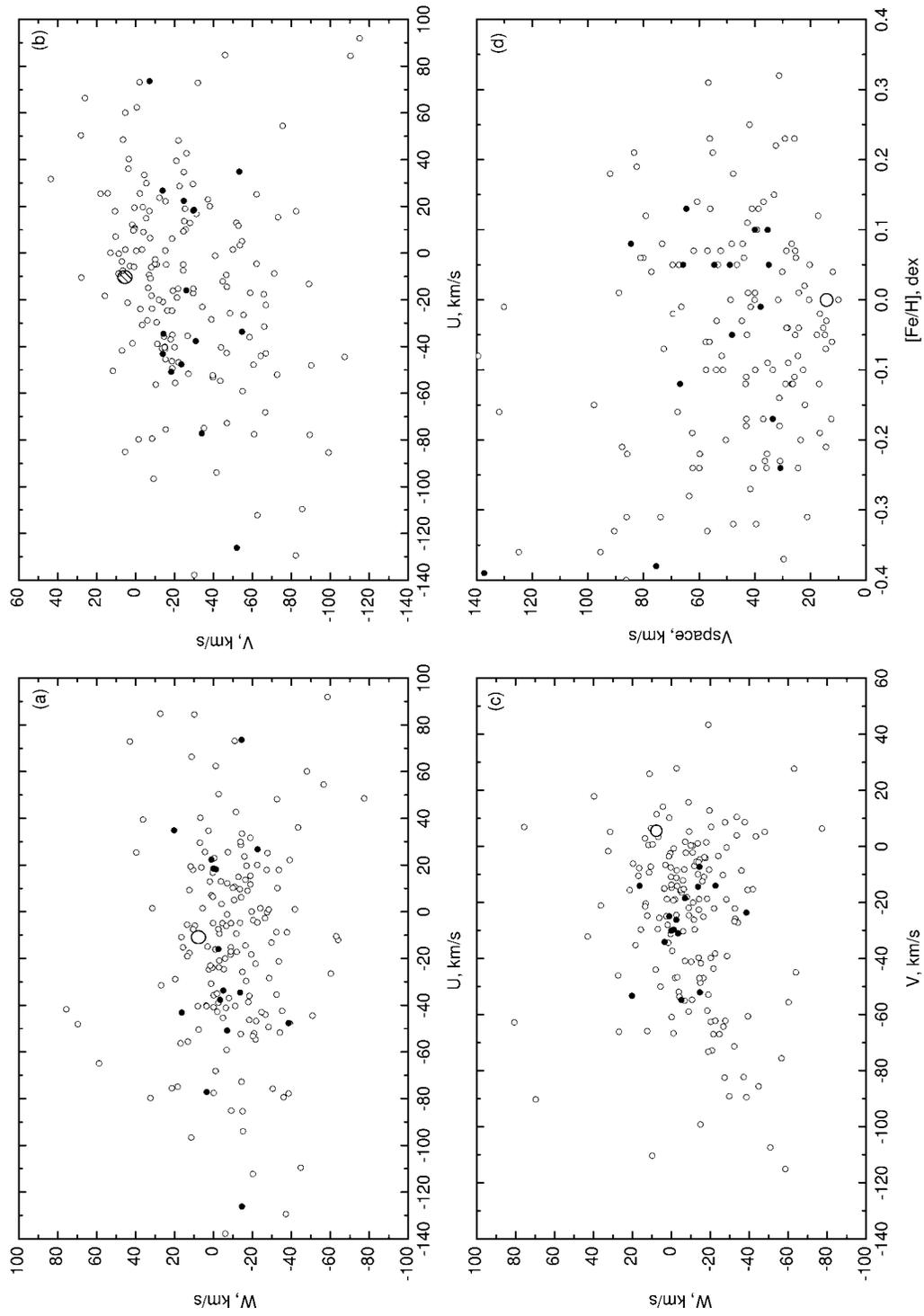
Определялась данная поправка посредством изменения сдвига исследуемого спектра относительно спектра-образца, в качестве которого был взят участок теллурического спектра в диапазоне длин волн 7620–7660 Å. У исследованных нами звезд инструментальная поправка составляет от  $-0.3$  до  $1.3$  км/с, то есть ее влияние можно считать “тонким” эффектом, который обычно не принимают в расчет. Видно, что наши данные хорошо согласуются с литературными (в пределах 2 км/с), за исключением HD 159222, изменения лучевой скорости которой, возможно, связаны с принадлежностью ее к двойной системе [23].

Точность единичного измерения лучевой скорости ( $\sim 0.35$  км/с) в данной работе близка к аналогичным измерениям других авторов,  $\sim 0.3$  км/с [22].

В статье [24] опубликованы лучевые скорости HD 4915 ( $-3.77 \pm 0.42$  км/с) и HD 222143 ( $-0.02 \pm 0.45$  км/с). В недавней работе Гуллберга и Линдгrena [25] для HD 197076 получена  $RV = -35.215 \pm 0.021$  км/с.

В табл. 2 представлены величины гелиоцентрической поправки и лучевой скорости (с ошибками измерений), полученные в данной работе, а также лучевые скорости, опубликованные в Каталоге WEB (Вильсона-Эванса-Баттона) [21] и в недавней статье Нидевер и др. [22]. Различия в величинах скоростей объясняются разным качеством данных. К примеру, в каталоге WEB собраны измерения  $RV$ , базирующиеся в основном на фотографических данных. Результаты, представленные в работе [22], получены на эшелле-спектрометрах 10-м телескопа Кека и телескопов Ликской обсерватории с использованием современных приемников излучения. В качестве калибровочного спектра использовался спектр молекулы йода в диапазоне длин волн 5000–6000 Å.

Исследованные звезды достаточно близки к Солнцу, самая далекая — HD 133002 — находится на расстоянии 43 пк. Но с момента рождения они перемещаются по Галактике, и нынешнее положение звезд непосредственно связано с их движением. Поэтому мы проанализировали значения пространственной скорости и ее проекций. Для каждой звезды они вычислены по стандартным формулам [26] на основе измерений собственного движения этих звезд, сделанных с помощью спутника HIPPARCOS [7], а также наших величин их лучевых скоростей и представлены в правой части табл. 2. Отметим, что для HD 4915, HD 213575 и HD 222143 эти значения получены впервые. Эти результаты для 9-ти общих звезд прекрасно согласуются с величинами компонент пространственной скорости, которые получены по измерениям  $RV$  на спектрографе ELODIE (см. работу [27]).



**Рис. 4.** Диаграммы  $U-V$ ,  $U-W$ ,  $V-W$  и зависимость пространственной скорости  $V_{space}$  от металличности для аналогов Солнца (заполненные кружки) и выборки звезд поля (открытые кружки). Большой кружок — Солнце.

Таблица 2. Лучевые и пространственные скорости исследованных звезд

Звезда HD	Число линий	$V_a$ , км/с	$RV \pm \sigma_{RV}$ , км/с	RV[21], км/с	RV[22], км/с	U, км/с	V, км/с	W, км/с	$V_{space}$ , км/с
159222	136	-10.10	$-58.07 \pm 0.31$	-52.1	-51.605	-33.7	-54.8	-5.2	64.5
186408	136	0.75	$-26.95 \pm 0.39$	-25.6	-27.377	18.5	-30.0	0.0	35.3
222143	133	16.90	$1.78 \pm 0.33$	-0.6	-0.169	-34.6	-14.4	-13.7	39.9
34411	133	22.63	$68.20 \pm 0.37$	65.7	66.511	-77.2	-34.1	3.4	84.5
Среднее						-31.7	-33.3	-3.9	56.0
Дисперсия						$\pm 39.2$	$\pm 16.6$	$\pm 7.5$	$\pm 22.9$
10307	137	25.38	$3.72 \pm 0.33$	4.0	—	-37.6	-31.0	-3.5	48.9
141004	128	-26.62	$-64.39 \pm 0.35$	-66.4	-66.416	-47.6	-23.6	-38.6	65.7
186427	137	0.68	$-27.00 \pm 0.33$	-27.1	-27.871	18.2	-29.7	-1.4	34.9
213575	158	-13.77	$-21.02 \pm 0.48$	—	-21.544	-50.8	-18.4	-7.0	54.5
146233	124	-27.71	$11.22 \pm 0.37$	10.6	11.748	26.8	-14.0	-22.8	37.8
197076	122	-2.30	$-34.50 \pm 0.39$	-37.0	-35.409	-43.1	-14.1	16.2	48.2
Среднее						-22.4	-21.8	-9.5	48.3
Дисперсия						$\pm 35.1$	$\pm 7.5$	$\pm 18.9$	$\pm 11.2$
187923	138	-3.92	$-21.35 \pm 0.34$	-16.7	-20.611	34.9	-53.3	20.1	66.8
4307	134	18.46	$-8.97 \pm 0.52$	-12.8	-10.349	22.4	-24.9	1.0	33.5
4915	134	21.86	$-2.60 \pm 0.38$	—	-3.742	-15.9	-26.2	-2.6	30.7
133002	130	4.41	$-42.63 \pm 0.40$	-43.0	—	73.6	-7.3	-14.5	75.4
225239	136	31.04	$6.20 \pm 0.63$	4.4	—	-126.1	-52.0	-14.7	137.2
Среднее*						28.7	-27.9	1.0	51.6
Дисперсия						$\pm 36.9$	$\pm 19.0$	$\pm 14.4$	$\pm 22.8$

\* Величины усредненных значений к U, V, W,  $V_{space}$  и их дисперсий для звезд третьей группы рассчитаны без HD 225239.

В табл. 1 и табл. 2 все пятнадцать звезд разделены на три группы по металличности, и для каждой группы вычислены средние величины компонент пространственных скоростей U, V, W и их дисперсия. Эти величины для звезд всех трех групп достаточно близки. По приведенным в работах [27], [28], [29], формальным критериям однозначно можно утверждать их сходное происхождение этих звезд и их принадлежность к объектам тонкого диска. Главным исключением в рассмотренной выборке аналогов Солнца является звезда-субгигант HD 225239. Набор ее кинематических характеристик (величины U и  $V_{space}$  больше 100 км/с по модулю) и очень низкая металличность  $[Fe/H] = -0.39$  dex указывают, что она является объектом

толстого диска. Из-за очень больших по модулю величин компоненты U пространственные скорости звезд HD 34411 и HD 133002 близки к граничной минимальной скорости для звезд толстого диска. Однако в упомянутой работе Фурмана [29] отмечены примеры звезд тонкого диска с кинематикой, соответствующей толстому диску.

На рис. 4 представлены зависимости U–W, U–V, V–W, а также распределение пространственной скорости звезды от ее металличности для исследованных нами аналогов Солнца (темные кружки) и объектов однородной выборки 164-х FGK-карликов поля (открытые кружки) из работы [27]. Большим кружком нанесены обозначения положения Солнца ( $U_{\odot} = -10.0$  км/с,  $V_{\odot} = 5.2$  км/с,

$W_{\odot}=7.2$  км/с и  $V_{\text{space}\odot}=13.37$  км/с [30]). Оно не занимает центральные позиции среди звезд поля и выделяется относительно своих аналогов заметно большими положительными значениями компонент  $V$  и  $W$ , а его пространственная скорость  $V_{\text{space}}$  оказывается достаточно низкой. Таким образом, величины компонент  $V$  для всех 15-ти звезд и  $W$  для всех, кроме HD 187923 и HD 197076, солнечных аналогов отрицательные, что хорошо заметно на диаграмме  $V-W$  (рис. 4с), где рассмотренные звезды расположены левее и ниже Солнца.

Оказалось, что пространственные скорости у известного солнечного двойника HD 146233 отличаются от  $U_{\odot}$ ,  $V_{\odot}$ ,  $W_{\odot}$  и  $V_{\text{space}\odot}$ . В предыдущих работах мы показали, что параметры атмосфер и химический состав этой звезды удовлетворяют критериям солнечного двойника. Результаты нашей работы также подтверждают эти выводы относительно массы и возраста данного уникального объекта, но его движение отличается от солнечного.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе определены масса, возраст и кинематические характеристики (пространственная скорость и ее компоненты) однородной выборки из 15-ти звезд — фотометрических аналогов Солнца, для которых ранее были определены фундаментальные параметры атмосфер и химический состав. В пределах ошибок определения эти величины близки к найденным другими авторами.

Как и в случае атмосферных параметров, в данной выборке массы и возрасты некоторых звезд заметно отличаются от солнечных (к примеру, HD 131003). Оценки возрастов звезд лежат в широком диапазоне — от 1.7 до 12.8 миллиардов лет, но в среднем солнечные аналоги старше самого Солнца. Оценки возрастов, сделанные по эволюционным трекам, в целом, согласуются с возрастными, оцененными по хромосферной активности.

Измерения лучевых скоростей звезд по высокодисперсионным спектрам и вычисленные величины компонент пространственной скорости движения их в Галактике также согласуются с результатами других исследователей. Найдено, что две звезды — HD 133002 и HD 225239 — по кинематическим параметрам, вероятно, не принадлежат к объектам тонкого диска. Положение остальных звезд на диаграммах  $U-W$ ,  $V-W$  и  $U-V$  не выделяется на фоне звезд поля, но несколько отличается от положения Солнца на этих диаграммах.

Наконец, главная идея исследования 15-ти фотометрических солнечных аналогов состояла в том,

чтобы рассмотреть соответствие параметров исследованных звезд (табл. 1) критериям аналогичности Солнцу, которые были предложены нами ([1], табл. 1), и таким образом проверить наличие в нашей выборке звезд-аналогов и кандидатов в двойники Солнца.

Итог сравнения подведен в табл. 3, в разных столбцах которой даны разности между важнейшими звездными характеристиками (абсолютной звездной величиной, температурой, ускорением силы тяжести, металличностью, массой, возрастом и химическим составом) изученных звезд и Солнца по результатам данного исследования (см. также работу [1]). Звезды расположены по мере убывания количества сходных с солнечными параметрами, причем жирным шрифтом отмечены значения, соответствующие критериям двойника Солнца, а курсивом — не подходящие под определение даже солнечного аналога.

Сравнение полученных данных для конкретных звезд показывает, что две не раз отмеченные звезды (HD 133002 и HD 225239) вообще не являются солнечными аналогами, так как большинство их параметров не соответствует этому понятию. Удовлетворяет сразу нескольким критериям аналога Солнца лишь половина из всей выборки его фотометрических аналогов. Наконец, известный по прежним работам кандидат в солнечные двойники — звезда HD 146233 — имеет близкие к солнечным фундаментальные характеристики атмосферы ( $T_{\text{eff}}$ ,  $\lg g$ ,  $[Fe/H]$ ) и химический состав, одинаковый возраст и параметр  $R_{HK}$ . Таким образом, результаты нашего исследования выборки из 15-ти фотометрических аналогов Солнца указывают на целесообразность использования для поиска солнечных аналогов и двойников не одного-двух параметров, а совокупности из нескольких (7–8) основных характеристик, определяющих статус звезды, и еще раз подтверждают выводы о полной аналогичности Солнцу звезды 18 Скорпиона.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку исследований по этому проекту — гранты No. 05–02–17744, No. 01–02–06068 (А. Галеев). Необходимое финансирование работ осуществляется также за счет средств программы “Ведущие научные школы России” (НШ — 784.2006.2) и Академии наук республики Татарстан. Мы очень признательны доценту кафедры астрономии КГУ И. Ф. Бикмаеву за идею и обсуждение различных этапов работы, а также сотрудникам обсерватории Терскол за содействие при проведении наблюдений.

Таблица 3. Разности между значениями основных параметров исследованных звезд и Солнца

Звезда	$\Delta M_V$	$\Delta T_{eff}, K$	$\Delta \lg g$	$\Delta M/M_\odot$	$\Delta t, 10^9$ лет	[Fe/H]	Хим. состав
HD 146233	-0.11	-60	-0.07	-0.05	0.1	-0.01	Идент.
HD 197076	0.04	40	0.02	0.05	-1.5	-0.05	Близ.
HD 10307	-0.33	45	-0.12	0	3.2	0.05	Идент.
HD 222143	-0.02	-50	-0.03	-0.05	2.7	0.10	Близ.
HD 159222	-0.13	35	-0.05	0	1.5	0.13	Др.
HD 186427	-0.18	-70	-0.1	-0.05	4.9	0.05	Аналог.
HD 141004	-0.71	100	-0.26	0.05	2.1	0.05	Идент.
HD 34411	-0.6	30	-0.24	0	2.8	0.08	Аналог.
HD 186408	-0.46	-30	-0.2	0	4.9	0.10	Аналог.
HD 213575	-0.61	-140	-0.29	-0.05	6.1	0.05	Близ.
HD 4307	-1.15	10	-0.46	0.1	2.7	-0.17	Др.
HD 187923	-0.83	-70	-0.36	0.02	5.1	-0.12	Близ.
HD 4915	0.48	-110	0.15	-0.1	8.3	-0.24	Др.
HD 225239	-1.52	-120	-0.65	0.1	1.3	-0.39	Др.
HD 133002	-2.33	-160	-0.99	0.6	-2.8	-0.38	Др.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. И. Галеев, И. Ф. Бикмаев, Ф. А. Мусаев, Г. А. Галазутдинов, Астрон. журн. **81**, 541 (2004).
2. А. И. Галеев, И. Ф. Бикмаев, Л. И. Машонкина и др., Астрон. журн. **81**, 561 (2004).
3. А. В. Миронов, А. В. Харитонов, Труды ГАИШ **71**, 94 (1999).
4. Ф. А. Мусаев, Г. А. Галазутдинов, А. В. Сергеев и др. Кинематика и физика небесных тел **13**, 282, (1999).
5. Г. А. Галазутдинов, Препринт САО No. 92 (Нижний Архыз, 1992).
6. A. Alonso, S. Arribas, and C. Martinez-Roger, Astron. Astrophys. **313**, 873 (1996).
7. *The HIPPARCOS Catalogue* (ESA SP-1200, ESTEC, Noordwijk, 1997).
8. R. L. Kurucz, ATLAS9 Stellar Atmospheres Programs and 2 km/s Grid, Cambridge (1993).
9. F. Kupka, N. Piskunov, T. A. Ryabchikova et al. Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **138**, 119 (1999).
10. K. Fuhrmann (2000), <http://www.xray.mpe.mpg.de/fuhrmann/>
11. K. Fuhrmann Astron. Astrophys. **338** 161 (1998).
12. В. В. Шиманский, И. Ф. Бикмаев, А. И. Галеев и др., Астрон. журн. **80**, 816 (2003).
13. S. V. Mallik, M. Parthasarathy, and A. K. Pati, Astron. Astrophys. **409**, 251 (2003).
14. Y. Q. Chen, P. E. Nissen, T. Benoni, and G. Zhao, Astron. Astrophys. **371**, 943 (2001).
15. H. M. Qiu, G. Zhao, and Z. W. Li, Astrophysics and Space Science **277**, 565 (2001).
16. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **141**, 371 (2000).
17. Soderhjelm, Astron. Astrophys. **341**, 121 (1999).
18. C. Martin, F. Mignard, W. I. Hartkopf, and H. A. McAlister, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **133**, 149 (1998).
19. G. F. Porto de Mello, and L. da Silva, Astrophys. J. Letters **482**, 89 (1997).
20. J. T. Wright, G. W. Marcy, R. P. Butler, and S. S. Vogt, Astrophys. J. Suppl. Ser. **152**, 261 (2004).
21. M. Duflot, P. Figon, and N. Meyssonnier, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **114**, 269 (1995) 1995.
22. D. L. Nidever, G. W. Marcy, R. P. Butler, et al., Astrophys. J. Suppl. Ser. **141**, 503 (2002).
23. J. L. Halbwachs, M. Mayor, S. Udry, and F. Arenou, Astron. Astrophys. **397**, 159 (2003).
24. D. W. Latham, R. P. Stefanik, G. Torres, et al., Astron. J. **124**, 1144 (2002).
25. D. Gullberg and L. Lindegren, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **390**, 383 (2002).
26. П. Г. Куликовский, *Звездная астрономия* Наука, Москва, 1985).
27. T. V. Mishenina, C. Soubiran, V. V. Kovtyukh, and S. A. Korotin, Astron. Astrophys. **418**, 551 (2004).
28. A. Ibukiyama and N. Arimoto, Astron. Astrophys. **394**, 927 (2002).
29. K. Fuhrmann, Astron. Nachr. **325** 3 (2004).
30. B. E. Reddy, J. Tomkin, D. L. Lambert, and C. Allende Prieto, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **340**, 304 (2002).

**KINEMATICS AND AGE OF 15 STARS — PHOTOMETRIC SOLAR ANALOGS****A. I. Galeev, V. V. Shimanskii**

The line-of-sight and space velocities are inferred for 15 stars that are photometric analogs of the Sun. The space velocity components ( $U$ ,  $V$ ,  $W$ ) of most of these stars lie within the 10–60 km/s interval. The star HD 225239, which in our previous papers we classified as a subgiant, has a space velocity exceeding 100 km/s, and belongs to the thick disk. The inferred fundamental parameters of the atmospheres of solar analogs are combined with published evolutionary tracks to estimate the masses and ages of the stars studied. The kinematics of photometric analogs is compared to the data for a large group of solar-type stars.