

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВЕЗД – ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ АНАЛОГОВ СОЛНЦА НА 2-м ТЕЛЕСКОПЕ ОБСЕРВАТОРИИ ТЕРСКОЛ

А. И. Галеев<sup>1</sup>, И. Ф. Бикмаев<sup>1</sup>, Ф. А. Мусаев<sup>2,3</sup>, Г. А. Галазутдинов<sup>2</sup>

© 2003

<sup>1</sup> Казанский университет, кафедра астрономии  
ул. Кремлевская, 18, 420008 Казань, Россия  
e-mail:almaz@ksu.ru

<sup>2</sup> Специальная астрофизическая обсерватория РАН  
пос. Нижний Архыз, 369167 Карачаево-Черкесская Республика, Россия

<sup>3</sup> Международный центр астрономических и медико-экологических исследований

---

На кудэ-эшеле-спектрометре 2-м телескопа обсерватории Терскол в течение 1999–2000 гг. получены высокодисперсионные спектры звезд выборки фотометрических аналогов Солнца. По вычисленным ранее фундаментальным параметрам атмосфер звезд ( $T_{eff}$ ,  $\lg g$ ) с помощью измеренных эквивалентных ширин определены содержания 30 химических элементов от углерода до европия, а также содержания лития по профилям линии Li I 670.8 нм. Измерения лучевых скоростей звезд по спектральным линиям позволили провести анализ кинематических характеристик данных звезд.

STUDY OF PHOTOMETRIC SOLAR-ANALOG STARS FROM THE SPECTRA OBTAINED WITH THE 2-m TELESCOPE AT THE TERSKOL OBSERVATORY, by Galeev A., Bikmaev I., Mусаev F., Galazutdinov G. – We obtained high-resolution spectra of a sample of solar analogs by using a coude-echelle-spectrometer of the 2-m telescope of the Terskol Observatory in 1999–2000. We derived fundamental parameters of the atmospheres ( $T_{eff}$ ,  $\lg g$ ) of these stars and determined abundances of 30 elements from carbon to europium using measured equivalent widths. Moreover, the abundance of lithium was calculated from the Li I 670.8 nm line profiles. We also analyzed kinematic characteristics of these stars based on measured radial velocities.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Среди звезд солнечного типа – обширной группы звезд спектральных классов от поздних F до ранних K, расположенных на главной последовательности диаграммы Герцшпрунга–Рессела или вблизи нее – выделяют так называемые звезды-аналоги Солнца. Параметры их атмосфер заключены в небольших пределах и ненамного отличаются от солнечных значений. Таких объектов немного, к примеру, в своей классической работе 1996 г. Кайрел де Стробель [1], проанализировав звезды каталога HIPPARCOS, выделила лишь 50 звезд, по температуре, светимости и металличности похожих на Солнце.

Аналоги Солнца выделяются по разным критериям – по цветовым индексам или распределению энергии в спектре (фотометрические аналоги), по температуре, по идентичности спектров, по хромосферной активности и т. д. Интересной задачей является проблема существования аналогов Солнца по химическому составу, ведь этот параметр является фундаментальным критерием и мало подвержен селективным эффектам.

Актуальной проблемой остается задача поиска полного аналога, или двойника Солнца. Двойник Солнца – звезда, все физические параметры которой – температура, светимость, масса, радиус, вращение, поле скоростей, возраст, магнито-гидродинамическая структура, химический состав и т. д. – в пределах ошибок наблюдений, измерений, модели атмосферы и пр. совпадают с солнечными. Предполагается, что такие звезды должны иметь различие температур в пределах 100 К, металличность – внутри  $\pm 0.05$  dex, их возраст не должен отличаться от солнечного больше чем на 1 млрд лет и т. д. В 1997 г. Порто де Мелло и да Сильва [2] предложили в качестве наиболее вероятного кандидата в двойники Солнца звезду 18 Скорпиона (HD 146233).

В данной работе мы исследовали выборку фотометрических аналогов Солнца: определили важнейшие параметры атмосфер этих звезд и рассмотрели возможность обнаружения среди них двойника Солнца по спектрам высокого разрешения, которые были получены на кудэ-эшеле-спектрометре, установленном на 2-м телескопе обсерватории Терскол.

## НАБЛЮДЕНИЕ И ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ

Спектры шестнадцати звезд солнечного типа, которые являются фотометрическими аналогами Солнца [3], были получены с помощью кудэ-эшеле-спектрометра [4], установленного на 2-м телескопе Zeiss-2000. В качестве детектора использовалась ПЗС-камера WI 1242×1152, с размером пиксела 22.5 × 22.5 мкм. Спектры экспонированы с разрешением 45 000 и охватывают диапазон длин волн от 350 до 1000 нм. Благодаря хорошей чувствительности камеры отношение сигнал/шум в красной части спектров данных звезд достигает 200.

14 звезд выборки наблюдались в июле–августе 1998 г., а спектры HD 213575 и HD 225239 получены в сентябре и октябре 1999 г. В каждую ночь для калибровки длин волн и отождествления спектральных линий при тех же условиях (положения спектрографа и ПЗС) снимался спектр сумеречного рассеянного солнечного света.

Изображения спектров переведены в одномерный вид, и обработаны (нормировка, калибровка длин волн, измерение эквивалентных ширин и лучевых скоростей) посредством программного пакета DECH20 [5]. В диапазоне длин волн 400–900 нм в спектрах каждой звезды и в одном из спектров Солнца измерены эквивалентные ширины нескольких сотен линий почти 40 атомов и ионов от Li I до Eu II и лучевые скорости около 150 линий сильных неблендированных линий различных элементов. Список исследованных звезд, важнейшие параметры атмосфер, определенные в данной работе, а также измеренные значения эквивалентных ширин ( $EW$ ) линии K I  $\lambda$  769.9 нм и Li I  $\lambda$  670.8 нм, отдельно рассмотренные авторами в работах [6] и [7], и среднее значение лучевой скорости ( $RV$ ) для каждой звезды приведены в таблице. В качестве примера на рис. 1 приведены участки спектров некоторых звезд в области линии K I  $\lambda$  769.9 нм. На рисунке также отмечены соседние теллурические линии O<sub>2</sub>, которые в зависимости от топоцентрической скорости звезды находятся на разном расстоянии от звездной линии.

Эффективные температуры звезд вычислялись по опубликованным фотометрическим индексам с помощью калибровок Алонсо и др. [8], основанных на методе инфракрасных потоков. Точность определения температур не хуже 100 К, и они согласуются с другими данными, к примеру, [9]. Логарифмы ускорений свободного падения найдены с использованием параллаксов, измеренным с помощью спутника “HIPPARCOS”. Содержания железа и 34 других химических элементов (за исключением лития) определялись по эквивалентным ширинам нейтральных или однажды ионизованных атомов посредством программы WIDTH 6 с использованием моделей атмосфер Куруца [10]. При вычислениях использованы значения gf-факторов базы данных VALD [11]. Методом “линия–линия” получены дифференциальные значения содержаний химических элементов относительно Солнца (точнее, содержаний элементов, найденных аналогично по эквивалентным ширинам, которые были измерены в потоковом атласе Куруца).

Список исследованных звезд, их параметры и некоторые измеренные данные

Звезда HD	$T_{eff}$ , К	lg $g$ , dex	[Fe/H], dex	$EW$ (K I 769.9), пм	$EW$ (Li I 670.8), пм	$RV$ , км/с
Sun	5770	4.44	0.0	17.30	0.22	
4307	5780	3.98	-0.17	15.15	6.15	
4915	5660	4.59	-0.24	15.61	0.47	-3.1
6582	5381	4.71	-0.60	16.44	0.23	
10307	5815	4.32	0.05	17.02	2.31	2.9
34411	5800	4.20	0.08	15.85	2.83	67.0
133002	5610	3.45	-0.38	15.89	≤0.2	
141004	5870	4.18	0.05	15.41	1.89	
146233	5710	4.37	-0.01	16.61	1.18	
159222	5805	4.39	0.13	17.54	2.41	
186408	5740	4.24	0.10	17.13	0.43	-27.4
186427	5700	4.34	0.05	17.51	≤0.2	-27.6
187923	5700	4.08	-0.12	16.94	0.40	-21.0
197076	5810	4.46	-0.05	15.56	3.58	-34.9
213575	5630	4.15	0.0	17.65	2.57	21.2
222143	5720	4.41	0.10	16.92	≤0.2	0.9
225239	5650	3.79	-0.39	15.80	2.97	

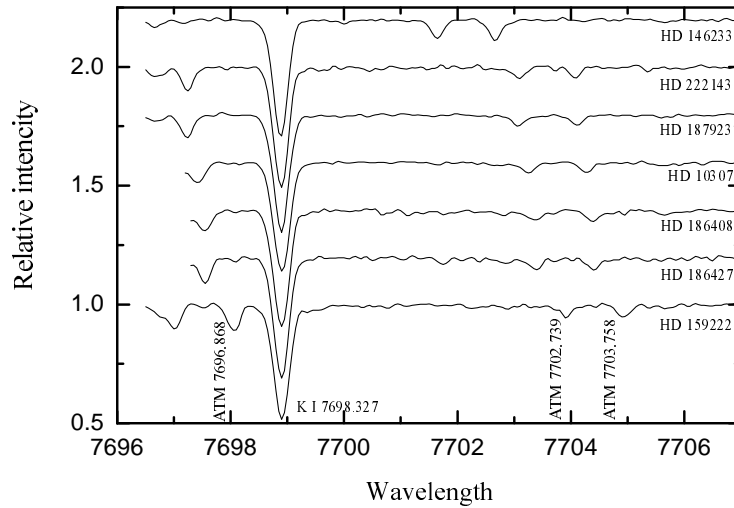


Рис. 1. Участки спектров ряда наблюдавшихся звезд в районе линии К I  $\lambda$  769.9 нм. Спектры имеют последовательный сдвиг вдоль вертикальной оси на 0.2

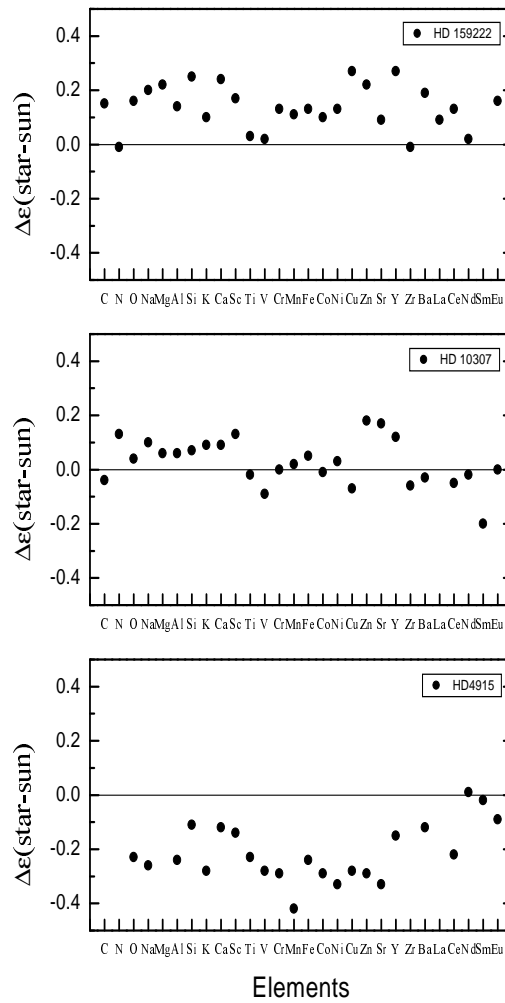


Рис. 2. Содержания химических элементов в атмосферах трех фотометрических аналогов Солнца – звезд с избытком металлов (HD 159222), солнечным химсоставом (HD 10307) и с пониженной металличностью (HD 4915)

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Для шести звезд фундаментальные параметры атмосфер (таблица) получены впервые. Значения параметров других звезд согласуются с данными других исследований [12]. Анализ параметров звезд показывает, что несмотря на фотометрическую схожесть этих объектов с Солнцем, многие из них имеют значения, величины которых далеки от солнечных. Наиболее заметно это в случае известного субкарлика  $\mu$  Cas (HD 6582), а также малоизученных звезд-субгигантов HD 133002 и HD 225239.

2. Оставшиеся 13 звезд по химическому составу разделяются на три группы (рис. 2): три звезды имеют пониженное содержание металлов, четыре звезды показывают повышенное содержание химических элементов относительно Солнца, и лишь шесть фотометрических аналогов Солнца имеют химический состав, близкий к солнечному. Распределение содержаний химических элементов у отдельных звезд имеет неоднородный вид (например, у HD 34411 содержание легких элементов Na, Mg, Al повышено, а содержание тяжелых, таких как Ba, Nd, Eu, совпадает с солнечным значением).

3. По содержанию лития [7] выборка исследованных звезд разбивается на две части – объекты с солнечным содержанием лития и существенно большим.

4. Из рассмотренных звезд только предложенный ранее кандидат в двойники Солнца HD 146233 удовлетворяет критериям полного аналога Солнца – не только фундаментальные параметры, но и химический состав (за исключением избытка лития) этой звезды очень близок к солнечному.

В заключение авторы выражают глубокую признательность сотрудникам МЦ АМЭИ за организацию наблюдений летом 1998 года (А. Бондарю за помощь в наблюдениях). Авторы благодарят РФФИ за финансовую поддержку (грант 02-02-17174), а также за грант МАС 01-02-06068.

- [1] *Cayrel de Strobel G.* Stars resembling the Sun // *Astron. and Astrophys. Rev.*–1996.–**7**.–P. 243–288.
- [2] *Porto de Mello G. F., da Silva L.* HR 6060: The Closest Ever Solar Twin? // *Astrophys. J.*–1997.–**482**.–P. L89–L92.
- [3] *Kharitonov A. V., Mironov A. V.* Selection of Solar analogues on the basis of various color indices // *Solar Analogs: Characteristics and Optimum Candidates* / Ed. J. Holl.–1998.–P. L149–L152.
- [4] *Мусаев Ф. А., Галазутдинов Г. А., Сергеев А. В. и др.* Кудэ-эшеле-спектрометр для 2-м телескопа на пику Терскол // *Кинематика и физика небес.* тел.–1999.–**15**, № 3.–С. 282–287.
- [5] *Галазутдинов Г. А.* // Препринт САО РАН.–1992.–**92**.–P. 1.
- [6] *Шиманский В. В., Бикмаев И. Ф., Галеев А. И. и др.* О механизмах синтеза калия при формировании звезд галактического диска // *Астрон. журн.* (в печати).
- [7] *Галеев А. И., Машонкина Л. И., Бикмаев И. Ф. и др.* Содержание лития в атмосферах звезд-аналогов Солнца // *Астрон. журн.* (в печати).
- [8] *Alonso A., Arribas S., Martinez-Roger C.* Determination of effective temperatures for an extended sample of dwarfs and subdwarfs (F0–K5) // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*–1996.–**117**.–P. 227–254.
- [9] *Fuhrmann K.* Nearby stars of Galactic disk and halo // *Astron. and Astrophys.*–1998.–**338**.–P. 161–184.
- [10] *Kurucz R. L.* Atmospheric models on CD-ROMs.–1993.
- [11] *Kupka F., Piskunov N., Ryabchikova T. A., et al.* VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*–1999.–**138**.–P. 119–133.
- [12] *Cayrel de Strobel G., Soubiran C., Ralite N.* Catalogue of [Fe/H] determinations for FGK stars: 2001 edition // *Astron. and Astrophys.*–2001.–**373**.–P. 159–163.