

АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА АТМОСФЕР ЗВЕЗД С ДЕБРИС ДИСКАМИ И ПЛАНЕТНЫМИ СИСТЕМАМИ

М. РОХАС¹, Н. А. ДРАКЕ^{1,2}, К. ЧАВЕРО³, К. Б. ПЕРЕЙРА³,
А. Ф. ХОЛТЫГИН¹, Д. И. СОЛОВЬЕВ⁴

Поступила 10 июля 2013

Принята к печати 14 августа 2013

Представлены результаты спектроскопических исследований семи маломассивных звезд спектральных классов F, G и K. Четыре из программных звезд (HD 1581, HD 10700, HD 17925 и HD 22484) являются звездами с дебрис дисками, а у двух звезд (HD 22049 и HD 222582(A+B)) обнаружены планеты. У одной из программных звезд, HD 20766, не обнаружены ни дебрис диски, ни планеты. Наблюдения программных звезд с высоким спектральным разрешением были выполнены в 2008г. на 2.2-м телескопе Европейской Южной обсерватории (ESO) со спектрографом FEROS ($R = 48000$, спектральный интервал 3800–9200 Å). Определены фундаментальные параметры звезд: эффективная температура, ускорение силы тяжести на поверхности звезды, микротурбулентная скорость, металличность, а также содержание летучих и тугоплавких элементов в их атмосферах. Показаны положения всех рассматриваемых звезд на диаграмме Гершпрунга-Рессела.

Ключевые слова: *Звезды промежуточных и малых масс: звезды солнечного типа: звезды с планетами: звезды с дебрис дисками - химический состав*

1. *Введение.* Определение содержания химических элементов на поверхности звезд с планетными системами является весьма актуальной задачей, так как считается, что содержание многих элементов у таких звезд и у звезд, не обладающих планетными системами, существенно различается. При этом содержание элементов у объектов одного типа, определяемое разными авторами, зачастую сильно различается. Например, авторы работ [1–3] обнаружили пониженное содержание лития у звезд с экзопланетами по сравнению со средним содержанием лития у обычных звезд, что интерпретируется как результат усиления процессов перемешивания и/или увеличения глубины конвективной зоны. В то же время Melendez et al. [4] сделали вывод, что содержание лития одинаково у обеих групп звезд. Подобные расхождения характерны и для других элементов. Так, авторы работ [5,6] считают, что в атмосферах звезд с планетными системами повышено содержание кислорода, тогда как в работах [7,8] этот вывод не подтверждается.

В работе [9] сравнивается содержание элементов у звезд с планетными системами и без таковых. На основании анализа большой выборки звезд

сделан вывод, что звезды с планетными системами в среднем больше обогащены элементами группы железа. Это позволяет предположить связь между избыточной металличностью и присутствием планет [10].

Для объяснения повышенной металличности звезд, имеющих планетные системы, были предложены две гипотезы. В первой (см., например, [9]), предполагается, что звезды с планетными системами образуются преимущественно из молекулярных облаков с высоким содержанием металлов. Во второй - гипотезе самообогащения [10] считается, что обнаруженный избыток железа связан с загрязнением атмосферы звезды при падении на звезду преимущественно скалистых планетозималей (протопланет) из вещества формирующейся планетной системы. Такие планетозимали состоят в значительной степени из тяжелых элементов, тогда как легкие элементы либо выносятся из планетной системы давлением излучения звезды, либо участвуют в формировании планет гигантов и не попадают в атмосферу звезды.

В последние годы предположение, что звезды, имеющие планеты, более богаты металлами, подвергается сомнению. Новые исследования позволяют сделать вывод, что может быть верна и альтернативная гипотеза, что формирование планет приводит к тому, что родительские звезды оказываются менее богатыми металлами, чем они были бы, если бы планетные системы не были образованы [11-14].

Авторами указанных работ установлено, что Солнце оказалось весьма обедненным тугоплавкими металлами (температуры конденсации $T_c > 1000$ К), по сравнению с летучими элементами с низкими значениями $T_c < 1000$ К. Высказано предположение, что этот недостаток тугоплавких элементов связан с тем, что они были аккумулярованы планетами. Сделан вывод, что формирование планет земной группы является возможной причиной дефицита тугоплавких элементов на Солнце.

Свидетельством образования у звезд планет земной группы является наличие у них осколочных дебрис дисков (Debris disks) [15-18]. Одной из первых звезд, у которых был оптически обнаружен околозвездный дебрис диск, стала Бета Живописца [19,20]. По современным представлениям такие диски являются результатом разрушения малых тел (например, планетозималей, комет, астероидов, планет) в планетной системе [21] в результате их столкновений.

Звезды с дебрис дисками - это маломассивные звезды ($0.5 M_{\odot} - 1.5 M_{\odot}$) с возрастом $t = 10^7 - 10^9$ лет. Дебрис диски состоят главным образом из пылевых частиц. В ряде случаев в дебрис дисках выделяют заметные пылевые кольца. Даже если общая масса частиц пыли в дебрис дисках меньше массы Земли, они могут занимать достаточно большую площадь и затмевать родительскую звезду в ИК диапазоне. Присутствие пылевых частиц, образовавшихся в результате столкновений планетозималей, опреде-

ляется по ИК избыткам в спектре родительской звезды [22]. Эти избытки вызваны поглощением излучения звезды диском и последующим переизлучением его в ИК диапазоне.

Согласно [23] примерно у 16% звезд солнечного типа в ближайших окрестностях Солнца обнаружены ИК избытки, связанные с наличием у них пылевых дебрис дисков, причем у части из них обнаружены также экзопланеты. Таким образом, можно заключить, что звезды с дебрис дисками являются подходящими объектами для изучения деталей формирования планетных систем. Спектральные исследования таких звезд позволят также исследовать процесс разрушения планетозималей в формирующихся планетных системах.

Настоящая работа является первой из серии статей, посвященных анализу спектральных наблюдений звезд с дебрис дисками и/или планетами по программе, предложенной в работе [24]. В данной статье мы проанализировали наблюдения 6 ярких звезд указанного типа спектральных классов от F9 до K2 с фундаментальными параметрами, близкими к тем, которые характерны для Солнца. К списку программных объектов мы добавили для сравнения двойную звезду HD 20766, у которой предполагалось ранее наличие дебрис диска, однако до настоящего времени свидетельств присутствия такого диска не найдено [23]. Для этих звезд нами получены спектры высокого разрешения и с высоким отношением сигнал/шум.

В разделе 2 статьи описаны наблюдения звезд и процедура обработки их спектров. Третий раздел посвящен описанию методики определения фундаментальных параметров звезд. В разделе 4 описывается методика определения содержания элементов в их атмосферах. Анализ относительного содержания летучих и тугоплавких элементов в атмосферах программных звезд выполнен в разделе 5. Положение программных звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рессела обсуждается в разделе 6. В последнем разделе представлены заключение и выводы, сделанные из проведенного нами анализа.

2. Наблюдения и обработка спектров. Спектральные наблюдения были проведены на 2.2-м телескопе ESO в Чили в 2008г. Все наблюдения выполнены с использованием спектрографа FEROS, имеющего спектральное разрешение $R=48000$. Эшельные спектры программных звезд охватывают область 3700-9200 Å с высоким отношением сигнал/шум ($S/N \geq 100$). Предварительная обработка спектров была выполнена нами с использованием пакета IRAF. Уровень непрерывного спектра также определялся с помощью пакета IRAF по заранее выбранным точкам, где континуум менее всего искажен спектральными линиями.

По нормированным на континуум спектрам были определены лучевые скорости звезд. Для этой цели использовались неблендированные спектральные линии с хорошо известными длинами волн. Результаты определения лучевых скоростей v_{rad} даны в верхней части табл.1. В этой же таблице

указано, что звезда является системой с дебрис диском (DD) или у нее обнаружена экзопланета (P). Звезда HD 22049 является гибридной системой (DD+P), у которой были найдены и дебрис диск и планетная система [25]. Из проанализированных нами программных звезд 4 являются системами с дебрис дисками, у одной обнаружена планета и не найден дебрис диск, одна является гибридной системой.

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ ПРОГРАММНЫХ ЗВЕЗД

Звезда:	m_v	v_{rad} (км/с)	Спект. класс	T_{eff} (K)	$\log g$ (км/с ²)	ξ (км/с)	[Fe/H] (dex)	Тип
HD 1581	4.20	+9.7	F9.5V	5910	4.39	0.95	-0.26	DD
HD 10700	3.50	-16.43	G8.5V	5270	4.29	0.00	-0.60	DD
HD 17925	6.00	+17.72	K1V	5040	4.30	1.21	-0.10	DD
HD 20766	5.54	+12.66	G4V	5650	4.39	0.69	-0.25	-
HD 22049	3.73	+16.20	K2V _k	4900	4.20	0.95	-0.30	DD+P
HD 22484	4.30	+28.17	F8V	5900	3.90	1.40	-0.23	DD
HD 222582(A+B)	7.69	+11.99	G5	5757	4.20	0.54	-0.02	P

Звезда:	π (мсек)	r (пк)	В.С.	M_v	M_{bol}	L (L_{\odot})	M (M_{\odot})	R (R_{\odot})
HD 1581	116.46±0.16	8.59±0.01	-0.08	4.53	4.45	1.31	1.05	1.05
HD 10700	273.96±0.17	3.65±0.00	-0.20	5.69	5.49	0.50	0.83	0.81
HD 17925	96.00±0.40	10.42±0.04	-0.25	5.91	5.66	0.43	0.72	0.82
HD 20766	83.28±0.20	12.01±0.03	-0.12	5.14	5.02	0.77	0.98	0.88
HD 22049	310.00±0.16	3.23±0.00	-0.30	6.19	5.89	0.35	0.71	0.78
HD 22484	71.62±0.54	13.96±0.10	-0.08	3.58	3.49	3.16	1.22	1.63
HD 222582(A+B)	23.95±0.74	41.75±1.25	-0.09	4.59	4.49	1.26	0.90	1.05

3. *Модели атмосфер и фундаментальные параметры.* В настоящей работе были использованы модели атмосфер [26], рассчитанные на основе предположения о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР). В спектрах исследуемых звезд наблюдается много линий поглощения нейтрального (Fe I) и ионизованного (Fe II) железа, которые имеют различные эквивалентные ширины и наиболее подходят для определения физических параметров звезд. Для измерения эквивалентных ширин линий в спектрах звезд были отобраны неблендированные линии (в основном мы ограничивались линиями с эквивалентными ширинами $W_{\lambda} \leq 150 \text{ m\AA}$).

Значения сил осцилляторов и другие параметры линий Fe I и Fe II были взяты из работы [27]. Для определения параметров атмосфер исследуемых звезд использовалась текущая версия (2002г.) пакета MOOG [28].

Определение параметров атмосфер звезд проводилось итеративно на основании анализа линий поглощения железа. Параметры определялись таким образом, чтобы при их принятии не было бы зависимости содержания железа, полученного по индивидуальным линиям Fe I и Fe II, от эквива-

лентных ширин и потенциалов возбуждения линий. Детали используемого метода описаны в нашей предыдущей статье [29].

В качестве начального приближения использовались параметры атмосферы, основанные на фотометрических данных или на данных из литературы, в частности данных [9]. Полученные нами значения параметров атмосфер исследуемых звезд приведены в верхней части табл.1.

В первом столбце таблицы дано название звезды, во втором - ее видимая звездная величина, в третьем и четвертом - определенная нами лучевая скорость звезды v_{rad} и взятый из [30] ее спектральный класс. В столбцах 5-8 приведены соответственно: эффективная температура звезды T_{eff} , логарифм ускорения силы тяжести на ее поверхности $\log g$, микротурбулентная скорость ξ и металличность $[Fe/H]$. Тип звезды указан в последнем столбце таблицы. Отметим, что все рассматриваемые нами звезды имеют пониженную, по сравнению с солнечной, металличность. Для двойных звезд HD 20766 и HD 22582 полученные параметры относятся к главному компоненту А двойной системы.

Анализ полученных данных показал, что ошибки в T_{eff} не превосходят 120 К, тогда как ошибки в величинах $\log g$ и ξ не превышают 0.2 dex и 0.2 км/с, соответственно. Рассчитанные нами значения параметров программных звезд совпадают на уровне одного-двух стандартных отклонений с параметрами, приведенными в работе [9], как видно из данных табл.2.

Таблица 2

СРАВНЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И МАСС ПРОГРАММНЫХ ЗВЕЗД, ПОЛУЧЕННЫХ В НАСТОЯЩЕЙ РАБОТЕ (Наст. раб.) И В СТАТЬЕ [9]

Звезда	T_{eff} (К)		$\log g$		ξ (км/с)		M/M_{\odot}	
	Наст. раб.	[9]	Наст. раб.	[9]	Наст. раб.	[9]	Наст. раб.	[9]
HD 1581	5910	5940	4.39	4.44	0.97	1.13	1.05	0.99
HD 10700	5270	5370	4.29	4.70	0.00	1.01	0.83	0.68
HD 17925	5040	5220	4.30	4.60	1.21	1.44	0.72	0.92
HD 20766	5650	5770	4.39	4.68	0.69	1.24	0.98	0.97
HD 22049	4900	5135	4.20	4.70	0.95	1.14	0.71	0.85
HD 22484	5900	-	3.90	-	1.40	-	1.22	-
HD 222582(A+B)	5757	5735	4.20	4.26	0.54	0.95	0.99	0.95

4. *Определение содержания элементов.* Для определения содержания элементов использовались эквивалентные ширины линий ионов Na I, Si I, Ca I, Sc I, Ti I, Cr I, Ni I, Y I, Zr II, Ba II, La II и Ce II. Атомные данные для линий, используемых при анализе химического состава программных звезд, взяты из работ [29-45]. Нами определено содержание всех указанных элементов в атмосферах программных звезд.

В табл.3 приведены для иллюстрации результаты определения химического состава фотосферы звезды HD 10700 и погрешности определенного содержания элементов. Метод оценки ошибок определения содержания элементов описан в статье [29].

Таблица 3

СОДЕРЖАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ В ФОТОСФЕРЕ ЗВЕЗДЫ HD 10700
И ПОГРЕШНОСТИ ЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Элем.	n	log ϵ	[X/H]	[X/Fe]	$\sigma_{\Delta T_{eff}}$	$\sigma_{\Delta \log g}$	$\sigma_{\Delta \xi}$	$\sigma_{\Delta W_{\lambda}}$	σ_{NH}
					+120 K	+0.2	+0.2 км/с	+ 0.3 mÅ	
FeI	50	6.92±0.08	-0.60	...	+0.07	-0.03	-0.01	+0.05	0.09
FeII	14	6.92±0.07	-0.60	...	-0.05	+0.07	-0.01	+0.09	0.12
NaI	4	5.72±0.06	-0.61	-0.01	+0.07	-0.03	-0.00	+0.04	0.09
AlI	2	6.00±0.08	-0.47	0.13	+0.05	-0.02	-0.00	+0.05	0.07
SiI	4	7.20±0.08	-0.35	0.25	+0.00	+0.01	-0.00	+0.05	0.05
CaI	4	6.05±0.06	-0.31	0.29	+0.09	-0.05	-0.00	+0.05	0.11
ScII	3	2.84±0.08	-0.26	0.34	+0.00	+0.07	-0.00	+0.08	0.11
TiI	2	4.68±0.00	-0.31	0.29	+0.11	+0.00	-0.00	+0.08	0.14
CrI	3	5.27±0.08	-0.40	0.20	+0.12	-0.04	-0.01	+0.06	0.14
NiI	4	5.82±0.08	-0.43	0.17	+0.06	-0.02	-0.00	+0.06	0.09
YII	2	1.73±0.10	-0.51	0.09	+0.01	+0.07	-0.01	+0.10	0.12
CeII	2	1.11±0.05	-0.44	0.16	+0.02	+0.08	-0.01	+0.13	0.15

В первой колонке таблицы дано обозначение иона, по линиям которого определялось содержание элемента. Во второй - количество используемых для определения содержания линий. В колонке 3 для каждого элемента дано усредненное содержание в логарифмической шкале ($\log \epsilon(X) = \log(N(X)/N(H)) + 12$), где $N(X)$ - полное количество атомов элемента X в фотосфере, а в колонке 4 - отклонения содержания химических элементов относительно соответствующего содержания данных элементов на Солнце: $[X/H] = \log \epsilon(X)_* - \log \epsilon(X)_{\odot}$, где индексы * и \odot указывают, что содержание относится к звезде или Солнцу, соответственно. В колонке 5 - содержание элементов на поверхности звезд относительно содержания железа $[X/Fe]$, в колонках 6-9 - вариации относительного содержания $[X/Fe]$ (в dex) при изменении фундаментальных параметров звезды (T_{eff} , $\log g$, ξ) и измеряемой эквивалентной ширины линии W_{λ} на величину ошибки в измеряемых параметрах (одно стандартное отклонение): соответственно ΔT_{eff} , $\Delta \log g$, $\Delta \xi$ и ΔW_{λ} . То есть величина $\sigma_{\Delta T_{eff}}$ равна изменению относительного содержания $[X/Fe]$ при добавлении к эффективной температуре звезды величины ΔT_{eff} , равной для нашей выборки звезд 120 K.

Аналогичным образом определяются величины $\sigma_{\Delta \log g}$, $\sigma_{\Delta \xi}$ и $\sigma_{\Delta W_{\lambda}}$. При этом соответствующие средние ошибки равны: $\Delta \log g = 0.2$ dex,

$\Delta\xi = 0.2$ км/с и $\Delta W_\lambda = 3$ мÅ.

Величина σ_{tot} в последней колонке - результирующая ошибка:

$$\sigma_{tot} = \sqrt{(\sigma_{\Delta T_{eff}})^2 + (\sigma_{\Delta \log g})^2 + (\sigma_{\Delta \xi})^2 + (\sigma_{\Delta W_\lambda})^2} \quad (1)$$

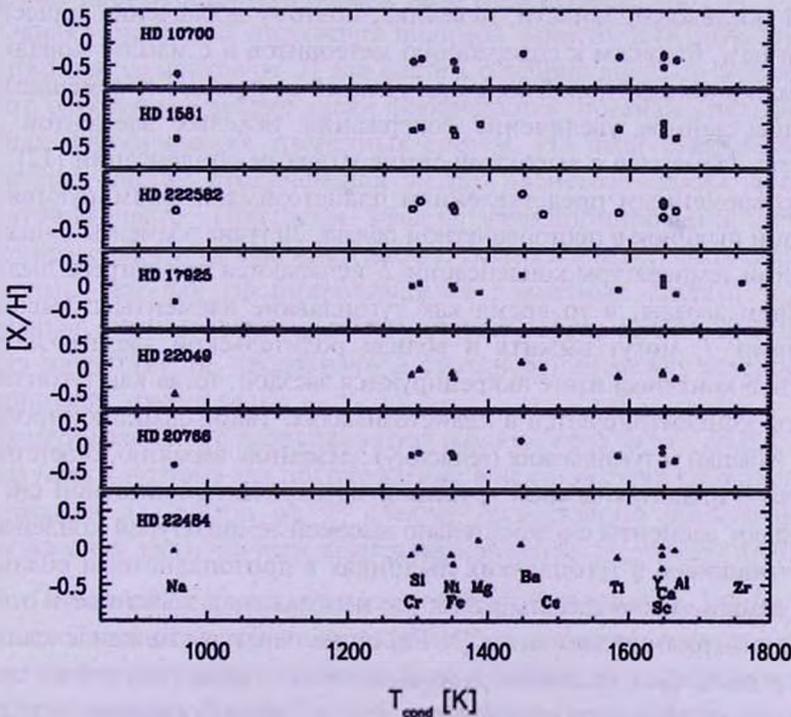
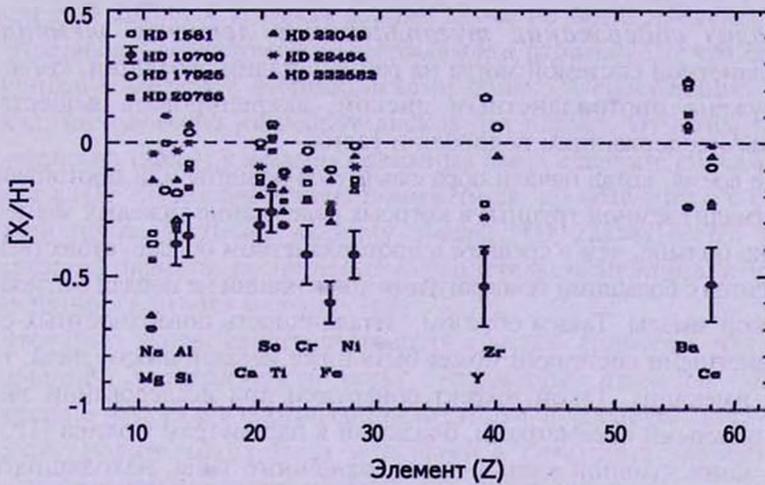


Рис.1. Вверху: Относительное содержание элементов $[X/H]$ в атмосферах программных звезд. Внизу: Относительное содержание $[X/H]$ летучих и тугоплавких элементов в зависимости от их температуры конденсации T_{cond} .

Зависимости содержания химических элементов относительно содержания железа для каждой из исследованных звезд в функции атомного номера показаны на рис. 1 (вверху). Ошибки определения содержания элементов показаны для звезды HD 10700, для остальных программных звезд значения ошибок близки к полученным для HD 10700.

5. *Анализ содержания тугоплавких и летучих элементов.* Звезда с планетной системой могла на ранней стадии эволюции, когда она была окружена протопланетным диском, аккрецировать вещество с пониженным содержанием водорода и гелия.

В то же время, когда начали образовываться планеты или протопланеты (планетозимали) земной группы, в которых содержание тяжелых элементов значительно больше, чем в среднем в протопланетном облаке, существенная часть элементов с большими температурами конденсации не попали в атмосферу родительской звезды. Таким образом, металличность поверхностных слоев звезд с планетными системами может быть ниже металличности звезд, таких систем не имеющих. Такой эффект обнаружен при исследовании звезд с фундаментальными параметрами, близкими к параметрам Солнца [11,12].

Масса конвективной зоны у звезд солнечного типа, находящихся на Главной последовательности, невелика, поэтому добавление вещества с содержанием, близким к содержанию метеоритов и с массой порядка 10 масс Земли к конвективной зоне при условии ее полного перемешивания, дает существенное увеличение содержания тяжелых элементов и, в частности, элементов с высокими температурами конденсации [12].

По современным представлениям планетозимали формируются при коагуляции пылинок в протопланетном облаке. Летучие элементы с низкими значениями температуры конденсации T_c испаряются при нагреве пылинок излучением звезды, в то время как тугоплавкие элементы с высокими значениями T_c могут выжить и вблизи родительской звезды. Летучие элементы в конечном итоге аккрецируются звездой, тогда как тугоплавкие элементы концентрируются в планетозималиях. Такое фракционирование летучих (volatile) и тугоплавких (refractory) элементов, вероятно, ответственно за то, что в планетах земной группы и метеоритах в солнечной системе преобладают элементы с относительно высокой температурой конденсации T_c , содержащиеся в тугоплавких пылинках в протопланетном облаке.

Тем самым можно сделать вывод, что исследования зависимости относительного содержания элементов $[X/Fe]$ от температуры их конденсации T_c могут пролить свет на детали формирования у звезд планетных систем и, в частности, выяснить, происходит или нет самообогащение тяжелыми элементами атмосфер звезд с планетными системами [48,49].

Мы определили относительное содержание тугоплавких и летучих элементов для всех программных звезд. Зависимость определенного содержания от

температур конденсации, взятых из [50], показана на рис.1 (внизу). Из рисунка видно, что зависимость относительного содержания элементов $[X/Fe]$ от T_c у звезд с дебрис дисками и у гибридной (DD+P) системы практически отсутствует. Следует также отметить, что относительное содержание элементов в атмосферах звезд с дебрис дисками близко к полученному для звезды HD 20766, у которой дебрис диска не было найдено.

Этот вывод согласуется с утверждением работы [23], что содержание элементов в звездах с дебрис дисками близко к содержанию элементов у звезд, не имеющих ни дебрис дисков, ни планет. Отметим также, что, как видно из табл.1, у всех программных звезд с дебрис дисками, а также у звезды HD 20766 обнаружена пониженная, по сравнению с солнечной, металличность. В то же время у звезды HD 222582(A+B), у которой обнаружена планета, но не найдено свидетельств наличия дебрис диска, металличность близка к солнечной.

Этот факт может свидетельствовать в пользу гипотезы, что причиной увеличенной металличности звезд с планетами является повышенное содержание металлов в протопланетном облаке, а механизм самообогащения атмосфер родительских звезд металлами в результате аккреции на них вещества протопланетного облака мало эффективен [51].

Однако причиной отсутствия видимой зависимости относительного содержания элементов от T_c для систем с дебрис дисками может быть и то, что осколочные дебрис диски формируются, по-видимому, на ранних стадиях формирования планетных систем. На этой стадии эволюции планетных систем столкновения между планетозималями происходят достаточно часто. При этом эффект фракционирования летучих и тугоплавких элементов еще недостаточно сказался и может быть значительно меньшим, чем для сформировавшихся планетных систем, таких как Солнечная система, в которых отсутствуют дебрис диски, столкновения между планетами не происходят, а столкновения между астероидами и метеоритами крайне редки.

Отметим также, что рассматриваемая нами выборка звезд с дебрис дисками весьма мала и поэтому для подтверждения вывода об отсутствии зависимости содержания элементов от T_c следует существенно увеличить число анализируемых звезд, что предлагается нами сделать в следующих публикациях.

6. *Положение программных звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рессела.* Для анализа эволюционного статуса исследуемых звезд определим их положение на диаграмме Герцшпрунга-Рессела. Светимости и радиусы звезд вычислялась по формулам, приведенным в нашей предыдущей статье [29]. Для определения светимостей использовались их видимые звездные величины и расстояния до Солнца, которые были найдены по параллаксам звезд, приведенным в базе данных [30]. Болومترические

поправки (В.С.) к абсолютным звездным величинам для получения болометрической звездной величины определялись интерполированием зависимости В.С. от $T_{\text{эф}}$ приведенным в работе [52]. При оценке светимостей звезд нами не учитывалось межзвездное поглощение, так как все исследуемые звезды являются близкими, и расположены от нас не далее, чем на расстоянии 42 пк.

Положения исследуемых звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рессела показаны на рис.2. Эволюционные треки звезд с массами $0.6-1.5 M_{\odot}$ взяты из работы [53]. В нижней части табл.1 показаны определенные нами параметры программных звезд. Массы звезд определялись исходя из их

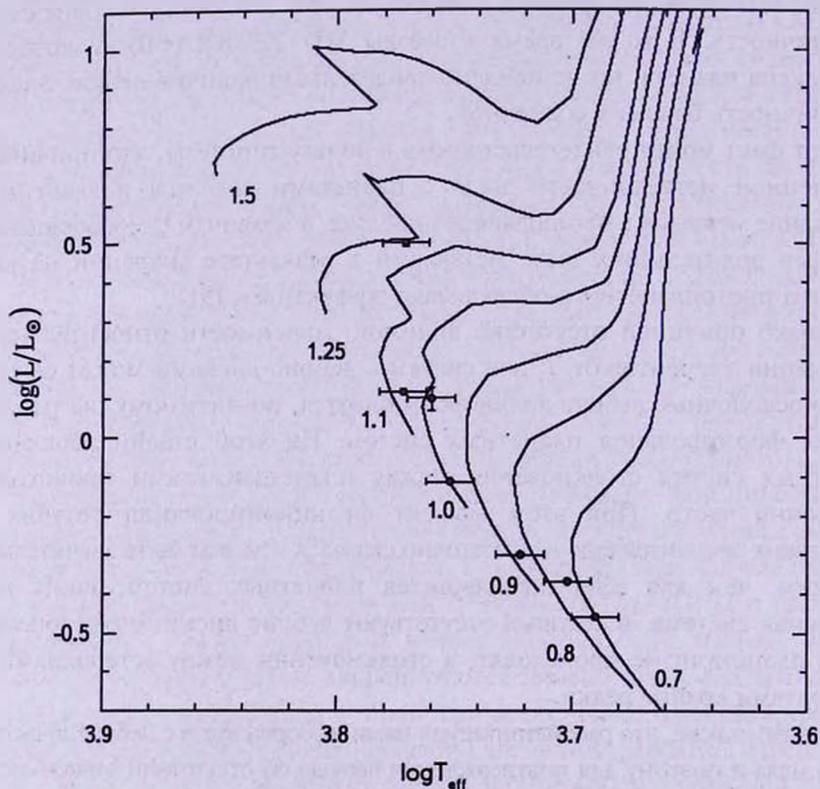


Рис.2. Положения программных звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рессела.

положения на диаграмме Герцшпрунга-Рессела относительно эволюционных треков для звезд разных масс, что дает достаточно точные результаты. Как видно из диаграммы, все исследуемые нами звезды попадают на эволюционные треки маломассивных звезд.

7. Заключение и выводы. На основе исследования полученных нами спектров высокого разрешения определены параметры и содержание

элементов в атмосферах четырех звезд с дебрис дисками: HD 1581, HD 10700, HD 17925 и HD 22484, двух звезд HD 22049 и HD 222582 с планетами и звезды сравнения HD 20766, не имеющей ни дебрис дика, ни планетной системы. Определены содержания 17 элементов, в том числе тугоплавких и летучих элементов: (Fe I, Fe II, Na I, Mg I, Al I, Si I, Ca I, Sc II, Ti I, Cr I, Ni I, Y II, Zr I, Ba, La II, Nd II и Ce II) в атмосферах всех исследуемых звезд.

Из анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) Все исследованные звезды с дебрис дисками и/или с планетами являются маломассивными и имеют пониженную, по сравнению с солнечной, металличность.

2) Не обнаружено зависимости относительного содержания элементов в атмосферах программных звезд от температуры конденсации.

3) Сделан предварительный вывод, что у звездных систем с дебрис дисками эффект фракционирования летучих и тугоплавких элементов незначителен по сравнению со звездами с сформировавшимися планетными системами.

¹ Математико-механический факультет и Астрономический институт им. В.В.Соболева Санкт-Петербургского государственного университета, Россия, e-mail: madelainerojas28@gmail.com

² Национальная Астрономическая обсерватория Бразилии, Рио-де-Жанейро, Бразилия

³ Астрономическая обсерватория Кордобы, Кордоба, Аргентина

⁴ Санкт-Петербургский филиал CAO РАН

ANALYSIS OF THE CHEMICAL ABUNDANCE OF STARS WITH DEBRIS DISKS AND PLANETARY SYSTEMS

M.ROJAS¹, N.A.DRAKE^{1,2}, C.CHAVERO³, C.B.PEREIRA³,
A.F.KHOLTYGIN¹, D.I.SOLOVYOV⁴

This paper presents the results of spectroscopic investigations of seven stars of the F, G and K spectral classes. Four of the stars (HD 1581, HD 10700, HD 17925 and HD 22484) are stars with debris disks, and two ones (HD 22049 and HD 222582(A+B)) have planets. One of the program stars, HD 20766 have not nor debris disk nor any planets. These stars were observed with high spectral resolution in 2008 using the 2.2-m ground-based telescope at the

European Southern Observatory (ESO) with FEROS spectrograph ($R=48000$, wavelength coverage of 3800-9200 Å). The fundamental parameters of the stars were determined: effective temperature, surface gravity, microturbulence velocity and metallicity as well as abundances of volatile and refractory elements in their atmospheres. The positions of all stars in the HR diagram are shown.

Key words: *stars of intermediate and small masses: solar-type stars: stars with planets: stars with debris disks - chemical abundances*

ЛИТЕРАТУРА

1. G.Israelian, M.E.Delgado, N.C.Santos et al., Nature, **462**, 189, 2009.
2. Y.Q.Chen, G.Zhao, Astrophys. J., **131**, 1816, 2006.
3. G.Gonzalez, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **386**, 928, 2008.
4. J.Melendez, I.Ramirez, L.Casagrande et al., Astrophys. Space Science, **328**, 193, 2010.
5. S.E.Robinson, G.Laughlin, P.Bodenheimer et al., Astrophys. J., **643**, 484, 2006.
6. A.Ecuvillon, G.Israelian, N.C.Santos et al., Astron. Astrophys., **445**, 663, 2006.
7. G.Gonzalez, C.Laws, Astron. J., **119**, 390, 2008.
8. J.C.Bond, D.S.Lauretta, C.G.Tinney et al., Astrophys. J., **682**, 1234, 2008.
9. N.C.Santos, G.Israelian, M.Mayor, Astron. Astrophys., **373**, 1019, 2001.
10. G.Gonzalez, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **285**, 403, 1997.
11. J.Melendez, M.Asplund, B.Gustafsson et al., Astrophys. J. L., **704**, L66, 2009.
12. I.Ramirez, J.Melendez, M.Asplund, Astron. Astrophys., **508**, L17, 2009.
13. I.Ramirez, M.Asplund, P.Baumann et al., Astron. Astrophys., **521**, A33, 2010.
14. I.Ramirez, J.Melendez, D.Cornejo et al., Astrophys. J., **740**, 76, 2011.
15. S.N.Raymond, P.J.Armitage, A.Moro-Martín, Astron. Astrophys., **530**, A33, 2011.
16. Y.K.Okamoto, H.Kataza, M.Honda et al., Nature, **431**, 660, 2004.
17. F.Freistetter, A.V.Krivov, T.Lehne, Astron. Astrophys., **466**, 389, 2007.
18. F.Galland, A.M.Lagrange, S.Udry et al., Astron. Astrophys., **447**, 355, 2006.
19. B.A.Smith, R.J.Terrile, Science, **226**, 1421, 1984.
20. Z.Wahhaj, D.W.Koerner, M.E.Ressler et al., Astrophys. J., **584**, L27, 2003.
21. H.H.Aumann, C.A.Beichman, F.C.Gillert et al., Astrophys. J., **278**, L23, 1984.
22. D.A.Golimowski, D.R.Ardila, J.E.Krist et al., Astron. J., **131**, 3109, 2006.
23. J.Maldonado, C.Eiroa, E.Villaver, B.Montesinos, A.Mora, Astron. Astrophys., **541**, A40, 2012.
24. R. de la Reza, C.Chavero, C.Neiner et al., in Proc. "The CoRoT Mission Pre-Launch Status-Stellar Seismology and Planet Finding" (ESA SP-1306). Eds: M.Fridlund, A.Baglin, J.Lochar, L.Conroy, p.97, 2006.
25. S.Ertel, S.Wolf, J.Rodmann, Astron. Astrophys., **544**, id.A61, 2012.
26. R.L.Kurucz, CD-ROM 13, Atlas 9 Stellar Atmosphere Programs, 1993.

27. *D.L.Lambert, J.E.Heath, M.Lemke et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **103**, 183, 1996.
28. *C.Snedden*, *Astrophys. J.*, **184**, 839, 1986.
29. *М.Рохас, Н.А.Драке, К.Б.Перейра, А.Ф.Халтыгин*, *Астрофизика*, **56**, 69, 2013.
30. SIMBAD Astronomical Database, <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>
31. *G.W.Preston, C.Snedden*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **122**, 1545, 2001.
32. *B.Edvardsson, J.Andersen, B.Gustafsson et al.*, *Astron. Astrophys.*, **275**, 101, 1993.
33. *W.L.Wiese, M.W.Smith, B.M.Miles*, NSRDS-NBS, 1969.
34. *B.E.Reddy, J.Tomkin, D.L.Lambert et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **340**, 304, 2003.
35. *R.E.Luck, H.E.Bond*, *Astrophys. J.*, **292**, 559, 1982.
36. *E.Depagne, V.Hill, M.Spite et al.*, *Astron. Astrophys.*, **390**, 187, 2002.
37. *J.J.Drake, G.Smith*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **250**, 89, 1991.
38. *G.Smith, B.Edvardsson, U.Frisk*, *Astron. Astrophys.*, **165**, 126, 1986.
39. *G.A.Martin, J.R.Fuhr, W.L.Wiese*, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **17**, 4, 1988.
40. *N.H.Youssef, M.A.Amer*, *Astron. Astrophys.*, **220**, 281, 1989.
41. *R.G.Gratton, C.Snedden*, *Astron. Astrophys.*, **287**, 927, 1994.
42. *C.Snedden, A.McWilliam, G.W.Preston et al.*, *Astrophys. J.*, **467**, 819, 1996.
43. *H. van Winckel, M.Reyniers*, *Astron. Astrophys.*, **354**, 135, 2000.
44. *P.Hannaford, R.M.Lowe, N.Grevesse et al.*, *Astrophys. J.*, **261**, 736, 1982.
45. *R.G.Gratton, C.Snedden*, *Astron. Astrophys.*, **204**, 193, 1988.
46. *V.V.Smith, K.Cunha, A.Jorissen et al.*, *Astron. Astrophys.*, **315**, 179, 1996.
47. *J.Reader, C.H.Corliss, W.L.Wiese et al.*, NSRDS-NBS, vol.68, 1980.
48. *G.Gonzalez*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **367**, L37, 2006.
49. *V.V.Smith, K.Cunha, D.Lazzaro*, *Astron. J.*, **121**, 3207, 2001.
50. *K.Lodders*, *Astrophys. J.*, **591**, 1220, 2003.
51. *C.Chavero, R. de La Reza, R.C.Domingos et al.*, *Astron. Astrophys.*, **517**, A40, 2010.
52. *A.Alonso, S.Arribas, C.Martinez-Roger*, *Astron. Astrophys.*, **140**, 261, 1999.
53. *L.Girardi, A.Bressan, G.Bertelli, C.Chiosi*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **141**, 371, 2000.

