

ЭВОЛЮЦИОННЫЙ СТАТУС Ар-ЗВЕЗД HD 110066 И HD 153882

© 2020 г. А. М. Романовская^{1*}, Т. А. Рябчикова¹, Д. В. Шуляк²

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

²Институт исследований Солнечной системы им. Макса Планка, Гейдельберг, Германия

Поступила в редакцию 19.04.2020 г.

После доработки 19.04.2020 г.; принята к публикации 28.04.2020 г.

Представлены результаты определения фундаментальных параметров атмосфер магнитных химически пекулярных Ар звезд HD 110066 (AX CVn) и HD 153882 (V451 Her). Определение параметров атмосфер ($T_{\text{эф}}$, $\lg g$, R/R_{\odot} и L/L_{\odot}) основано на самосогласованном анализе спектров высокого разрешения (ESPaDOnS с $R = 65\,000$) и наблюдаемого распределения потока в широком спектральном диапазоне. Получены значения радиальных компонент магнитного поля $B_r = 4015 \pm 180$ Гс для HD 110066 и $B_r = 3800 \pm 200$ Гс для HD 153882 по наблюдаемому расщеплению линий и магнитному дифференциальному уширению. Проведен анализ химического состава и вертикального распределения (стратификации) Fe и Cг по глубине атмосферы, поскольку линии этих элементов дают наибольший вклад в поглощение, и наличие стратификации влияет на распределение выходящего потока. С учетом аномального химического состава и стратификации построены модели атмосфер и определен эволюционный статус данных звезд. Положение HD 110066 и HD 153882 на диаграмме Герцшпрунга–Рассела подтверждает наблюдаемое уменьшение величины магнитного поля с возрастом звезды для звезд с массами больше $2.5M_{\odot}$.

Ключевые слова: магнитные звезды, атмосферы звезд, спектроскопия.

DOI: 10.31857/S032001082005006X

ВВЕДЕНИЕ

Определение фундаментальных параметров звезд (эффективная температура $T_{\text{эф}}$, ускорение силы тяжести на поверхности $\lg g$, радиус R/R_{\odot} и светимость L/L_{\odot}) — одна из основных задач в астрофизике, поскольку они определяют положение звезд на диаграмме Герцшпрунга–Рассела, т.е. ее эволюционный статус и, следовательно, возраст. Эта проблема очень важна для теории возникновения и дальнейшей эволюции магнитных полей Ар-звезд и аномалий химического состава.

До сих пор эволюция магнитного поля и химических аномалий на протяжении жизни звезды на Главной Последовательности (ГП) остается неопределенной, главным образом, из-за трудностей в определении возраста и/или положения Ар-звезды на ГП. Кочухов и Баньюло (2006) провели статистическое исследование эволюционного статуса 194 магнитных Ар-звезд и пришли к выводу, что усредненная по поверхности величина модуля магнитного поля уменьшается с возрастом звезды. Эффективные температуры и светимости были оценены по калибровкам узкополосной фотометрии и по известным параллаксам. Ландстрит и

др. (2007) исследовали эволюцию магнитных полей Ар-звезд по 81 объекту в рассеянных скоплениях известного возраста, чья принадлежность к скоплению установлена достаточно уверенно. На основании этого исследования был сделан предварительный вывод, что магнитное поле уменьшается с возрастом только для звезд с массами больше $3M_{\odot}$. Для звезд меньших масс зависимость от возраста практически отсутствует. К сожалению, большинство звезд с известными из измерений величинами поверхностных магнитных полей являются звездами поля, возраст которых и положение на диаграмме Г–Р определяются достаточно ненадежно, главным образом, из-за неопределенностей в эффективных температурах и светимостях (радиусов). Прямые измерения радиусов методами интерферометрии в настоящее время сделаны для небольшого количества звезд (см. Романовская и др. (2019) и ссылки в статье). Альтернативно фундаментальные параметры звезд ($T_{\text{эф}}$, $\lg g$, R/R_{\odot}) с известными параллаксами достаточно точно можно определить по анализу спектров высокого разрешения (модель атмосферы) совместно с подгонкой теоретических модельных потоков к наблюдаемым.

Для химически-пекулярных звезд эта задача усложняется наличием глобальных магнитных по-

* Электронный адрес: annarom@inasan.ru

лей и аномального химического состава их атмосфер, которые нужно учитывать при построении адекватной модели атмосферы для правильного описания наблюдаемого распределения потока от звезды (SED — spectral energy distribution). Аномально высокое содержание редкоземельных элементов (PЗЭ/REE — rare earth elements) влияет на SED преимущественно в оптическом диапазоне спектра: чем выше содержание PЗЭ, тем меньше интенсивность выходящего потока при тех же эффективных температурах в диапазоне 3000–5000 Å, который перераспределяется в длинноволновую область спектра (см. рис. 7 в статье Шуляк и др. (2010)). В атмосферах Ар-звезд наблюдаются избытки элементов тяжелее кислорода на 1 порядок для элементов железного пика и на 3–4 порядка выше для PЗЭ, а легкие элементы He, CNO показывают дефицит по отношению к содержанию в солнечной атмосфере (см. обзор Рябчикова (1991)).

Для объяснения аномального содержания элементов в магнитных звездах был предложен механизм создания аномалий (Мишо (1970)), в котором происходит диффузия атомов и ионов химического элемента под совокупным действием сил гравитационного и лучевого давления, направленных к центру и вонне звезды соответственно. Если сила гравитационного давления преобладает, то элементы диффундируют в глубокие слои атмосферы звезды, а в противоположном случае мы имеем направленный поток частиц в верхние слои атмосферы. Скорость диффузии элементов очень мала, $\sim 10^{-3} - 10^{-2}$ см с⁻¹ (Мишо (1970)), поэтому наличие глобальных магнитных полей, которые стабилизируют атмосферу, создает условия для стратификации химических элементов (Бабель (1992), ЛеБлан и др. (2009), Алесьян и Штифт (2010)). Магнитные звезды также вращаются медленнее нормальных звезд тех же температур. В атмосферах нормальных звезд процессу разделения элементов препятствуют конвективные (в звездах с эффективными температурами менее 7000 К) и турбулентные движения (в более горячих атмосферах), а также меридиональная циркуляция при быстром вращении, типичном для звезд спектральных классов А и В.

В представленной работе было проведено детальное исследование двух Ар-звезд HD 110066 и HD 153882 с целью уточнения фундаментальных параметров атмосфер (T_{eff} , $\lg g$, R/R_{\odot} , L/L_{\odot}) путем сравнения наблюдаемых и теоретических распределений энергии в широком диапазоне длин волн. HD 110066 (АХ CVn) и HD 153882 (V451 Her) — магнитные химически-пекулярные звезды спектрального класса А0p SrCrEu, что означает наблюдаемые аномальные содержания элементов

Sr, Cr и Eu, а также некоторых других. В работе были определены содержания химических элементов и исследована стратификация элементов Cr и Fe в атмосфере звезд, что влияет на спектральное распределение энергии. Полученные фундаментальные параметры звездных атмосфер позволили достаточно точно определить положение исследуемых звезд на диаграмме Герцшпрунга–Рассела.

НАБЛЮДЕНИЯ

Спектры высокого разрешения для звезд исследования были получены со спектрополяриметром ESPaDOpS, установленном на канадско-франко-гавайском (CFHT) телескопе, который находится в обсерватории Мауна Кеа, по одной программе наблюдений (Proposal ID 16AC02). Разрешающая сила спектрографа $\lambda/\delta\lambda = R = 65\,000$ во всех длинах волн.

Для построения распределения энергии в спектре были использованы фотометрические наблюдения в различных спектральных диапазонах. Спектрофотометрические наблюдения в УФ-диапазоне 1900–3000 Å для HD 110066 взяты из наблюдений телескопа International Ultraviolet Explorer (IUE)¹, а также для обеих звезд использована УФ-фотометрия со спутника TD1 (European Space Research Organisation (ESRO) satellite) (Томпсон и др. (1978)) с помощью телескопа S2/68, который измерял в ультрафиолетовом диапазоне абсолютные потоки в 4 узких полосах. В оптическом диапазоне были использованы спектрофотометрические наблюдения из каталога Адельмана (Адельман и др. (1989)). В ближнем инфракрасном диапазоне данные взяты из каталога 2MASS (2Micron All-Sky Survey — Кутри и др. (2003)), который содержит обзор всего неба в фильтрах J (1.25 мкм), H (1.65 мкм), и Ks (2.17 мкм). Наблюдения переведены в абсолютные потоки по калибровкам из работы (Коэн и др. (2003)).

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ

Фундаментальные параметры исследуемых звезд были получены различными методами в предыдущих работах (табл. 1). Кочухов и Баньюло (2006) оценивали эффективные температуры и светимости звезд через калибровки Женевской фотометрической системы с использованием параллаксов Hipparcos (ван Лювен (2007)). Радиусы звезд были рассчитаны по формуле Стефана-Больцмана. Нетопил и др. (2008) собрали значения параметров из разных источников, полученные

¹ <http://archive.stsci.edu/iue/>

Таблица 1. Фундаментальные параметры звезд исследования из литературы

HD	T_{eff}	$\lg g$	$\log(L/L_{\odot})$	R/R_{\odot}	Ссылка
HD 110066	8851		1.75(10)	3.20	Кочухов и Баньюло (2006) Нетопил и др. (2008) Адельман и др. (1995) Рябчикова и др. (2004)
	9030(60)				
	9100				
	9000(200)				
HD 153882	9450(580)		1.921(114) 2.00(11)	3.57(52) 3.52	Нетопил и др. (2008) Хубриг и др. (2007) Кочухов и Баньюло (2006) Адельман и Рейли (2000) Рябчикова и др. (2005)
	9250	3.76(11)			
	9730				
	9240	3.80			
	9250(200)	3.85			

Таблица 2. Список линий для измерения магнитного поля и проекции скорости вращения на луч зрения $V \sin i$ в звездах HD 110066 и HD 153882

Ион	$\lambda, \text{Å}$	g_{eff}	HD 110066	HD 153882	Ссылка
			$B_r, \text{Гс}$		
Cr II	5116.048	2.921	4138(58)		K10
Fe II	6149.246	1.351	4118(25)	3670(87)	K13
Fe I	6335.329	1.164	4241(49)		K14
Fe I	6336.823	2.003	3954(47)	3835(770)	K14
Fe II	7342.420	1.367	3763(22)		K13
Fe II	8352.828	1.285	3875(20)	3890(170)	K14
			$\langle B \rangle = 4015(180)$	3800(200)	

Примечание. Приведены элементы, длины волн, эффективный фактор Ланде g_{eff} , величина магнитного поля и соответствующей ошибки, полученные по VINMAG6, и ссылки, откуда взяты значения g_{eff} . В последней строке таблицы приведены значения поля, используемые в дальнейших расчетах. KXX — данные с сайта Куруца (<http://kurucz.harvard.edu/atoms/>), XX — год расчетов.

различными методами. Из таблицы видно, что для HD 110066 разброс в определении температур составляет 200 К, а для HD 153882 разброс существенно больше.

Чтобы рассчитать адекватную модель атмосферы звезды, необходимо знать точную эффективную температуру, логарифм ускорения свободного падения и химический состав звезды, поскольку он влияет на выходящий поток через поглощение в линиях. Также в магнитных химически-пекулярных звездах при анализе химического состава дополнительным параметром является магнитное поле, влияющее на интенсивность спектральных линий. Определение фундаментальных параметров проводилось итерационно в несколько этапов: с построения начальной модели атмосферы, оценки содержания и расчета стратификации элементов и затем расчета теоретического потока для сравнения с наблюдаемым. Итерации проводились до тех пор, пока модельные расчеты не сошлись с наблюдениями (см. подробнее в работах Кочухов и

др. (2009), Шуляк и др. (2009, 2013), Романовская и др. (2019)).

Стартовые модели атмосфер с параметрами 8850g40 (HD 110066) и 9250g40 (HD 153882) были рассчитаны по программе ATLAS9 (Куруц (1993)), в которой поглощение в линиях учитывалось как часть общей непрозрачности при расчете выходящего излучения с использованием метода функции распределения (ODF — Opacity Distribution Function). В дальнейших итерациях модели атмосфер рассчитывались по программе LLmodels (Шуляк и др. (2004)), где учитывается поглощение в каждой линии с учетом индивидуального химического состава и стратификации. Здесь и далее в имени модели указаны эффективная температура и логарифм ускорения свободного падения.

Определение магнитного поля

Мы провели измерения магнитного поля путем сравнения синтетического спектра с наблюдаемым.

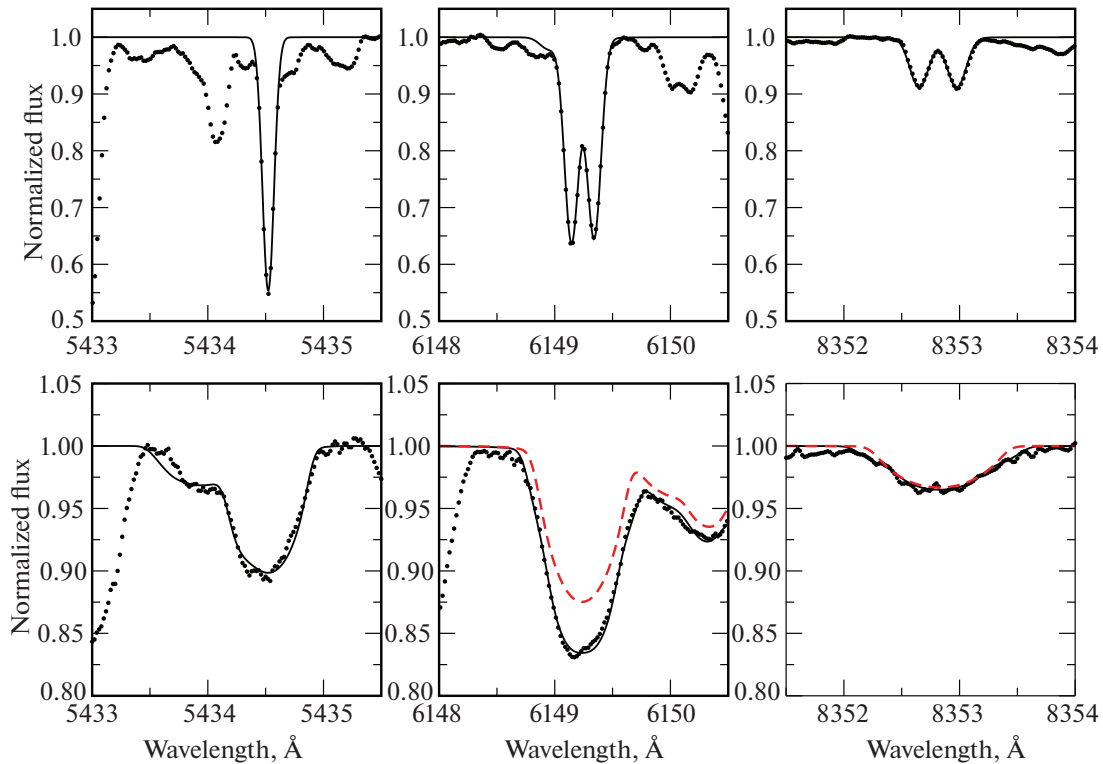


Рис. 1. Оценка магнитного поля в атмосферах звезд HD 110066 (верхний ряд) и HD 153882 (нижний ряд) по линиям Fe I 5434.52 ($g_{\text{eff}} = 0.1$), Fe II 6149.246 ($g_{\text{eff}} = 1.35$) и Fe II 8352.828 ($g_{\text{eff}} = 1.29$). Наилучшее согласие теоретических расчетов с наблюдениями (звездочки) показано сплошной черной линией; расчеты с нулевым полем показаны красной штриховой линией.

Синтетический спектр рассчитывался по программе Synmast (Кочухов (2007)), в которой решается уравнение переноса в присутствии магнитного поля. При подгонке профилей спектральных линий варьировались содержание элемента, модуль вектора напряженности магнитного поля, усредненного по поверхности звезды B_s , и проекция скорости вращения на луч зрения $V \sin i$. Для этого были выбраны несколько чувствительных к магнитному полю линий Fe, Cr (см. табл. 2). Факторы Ланде взяты из базы данных VALD, версия 3 (Рябчикова и др. (2015)). Ссылки на индивидуальные работы даны в табл. 2. Использовалось приближение однородного распределения магнитного поля по поверхности звезды. Вообще говоря, программа Synmast позволяет варьировать три компоненты вектора магнитного поля, радиальную, меридиональную и тангенциальную. Поскольку магнитное расщепление линий в спектре звезды HD 153882 замывается из-за достаточно большой скорости вращения, а магнитное поле оценивалось по дифференциальному магнитному уширению (см. рис. 4, Кочухов и др. (2006)), то мы варьировали только радиальную компоненту поля, т.е. геометрия магнитного поля звезды была представлена однородным радиальным полем. При таком подходе $B_s = B_r$. Такая же модель была использована и для звезды HD 110066, хотя скорость вращения

ее существенно меньше. Стартовая величина проекции скорости вращения оценивалась по линии Fe I 5434.52 Å, которая слабо чувствительна к магнитному полю ($g_{\text{eff}} = 0.1$).

Магнитное поле звезды HD 110066 в работе Матиса (Матис (2017)) оценивалось в среднем как $B_s = 4080$ и определялось по наиболее удобной для таких измерений линии Fe II 6149.246 Å, зеемановское расщепление которой представлено двумя σ - и двумя π - компонентами, расстояние между которыми одинаково. Это означает, что при любой геометрии магнитного поля в неполяризованном свете линия расщепляется на 2 компоненты, расстояние между которыми пропорционально величине модуля вектора поля. Нам удалось найти еще одну линию, Fe II 8352.828 Å, с зеемановским расщеплением такого же типа. Кроме того, мы использовали еще несколько линий в спектре, по которым хорошо видно расщепление на две или три компоненты. Так, мы получили величину модуля вектора напряженности магнитного поля, усредненного по поверхности звезды, $B_s = 4015(180)$ Гс, а $V \sin i = 3.3(3)$ км/с. В скобках приведена стандартная ошибка в последних знаках.

Для звезды HD 153882 в литературе приведены значения для эффективного магнитного поля B_z

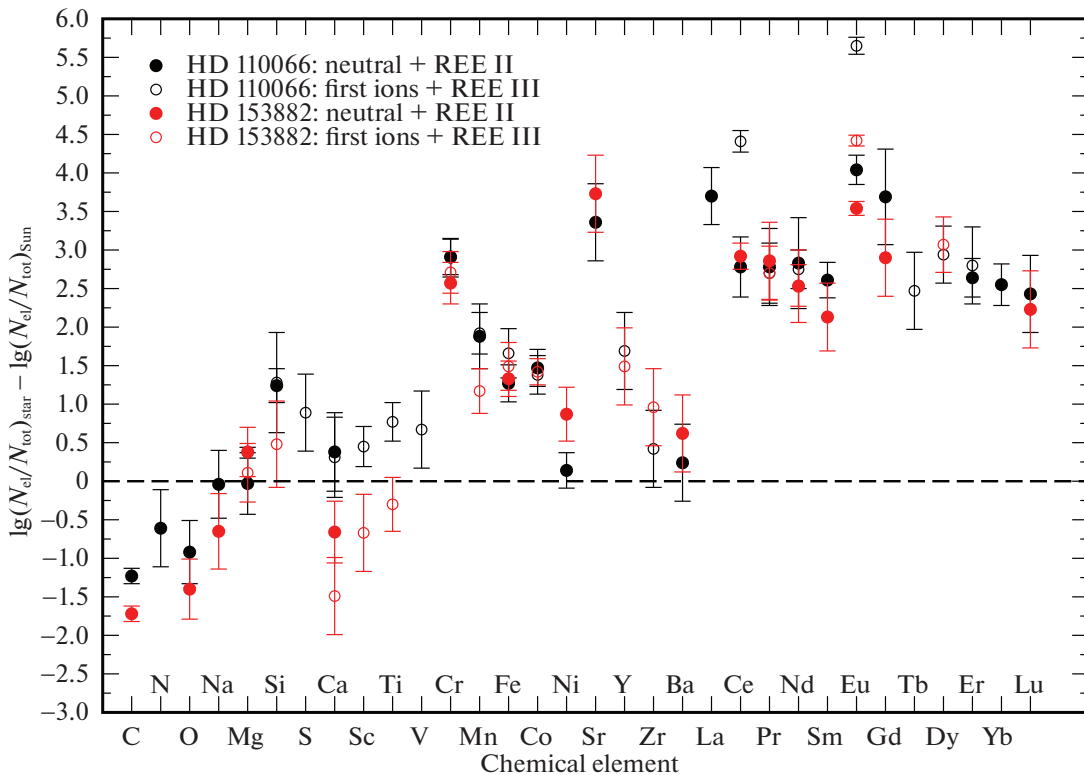


Рис. 2. Содержание химических элементов в HD 110066 (черные точки) и HD 153882 (красные точки) относительно солнечных значений (штриховая линия). Содержания на Солнце взяты из работы Гревес и др. (2015), Скотт и др. (2015а, 2015б). Сплошными кружками показаны содержания, определенные по линиям нейтральных атомов С–Ва и первых ионов РЗЭ; открытыми кружками — то же по линиям первых ионов С–Ва и вторых ионов РЗЭ.

(проекция вектора поля по лучу зрения, см. Матис (1991)). Поле меняется в пределах ± 1600 Гс. Из-за значительной скорости вращения звезды магнитное расщепление профилей не наблюдается даже у линий с большими факторами Ланде, поэтому оценка поля производилась по дополнительному дифференциальному магнитному уширению. Мы получили $B_s = 3800(200)$ Гс, а $V \sin i = 20.0(3)$ км/с.

На рис. 1 показаны примеры оценки магнитного поля в атмосферах звезд исследования. Для сравнения представлены профили линии Fe I 5434.52 Å с практически нулевым фактором Ланде. Для HD 153882 поле оценивалось по магнитному уширению, и поэтому сплошной и штриховой линиями показаны теоретические расчеты с магнитным полем из табл. 2 и с нулевым значением поля соответственно. Скорость вращения оценивалась по магнитно-нечувствительной линии. Синтетические спектры с полем и без поля показаны для содержания Fe, полученного по подгонке с магнитным полем.

Средние значения магнитных полей и полученные скорости вращения были в дальнейшем использованы для расчетов содержания элементов и стратификации.

Оценка содержания химических элементов

Анализ содержания является частью итерационного процесса по самосогласованному анализу спектров и распределения энергии. Синтетический спектр рассчитывался по программе Synmast (Кочухов (2007)). Параметры спектральных линий взяты из базы данных VALD3 (Рябчикова и др. (2015)). Оценка содержания была проведена двумя различными методами. Первый метод (быстрый) позволяет через измеряемые эквивалентные ширины спектральных линий рассчитать содержание элемента по программе WidSyn, учитывающей магнитное расщепление (Шуляк и др. (2013)). Во втором, более точном, методе происходит подгонка синтетического профиля спектральной линии к наблюдаемому. При этом варьируются следующие параметры: скорость вращения по лучу зрения $V \sin i$, лучевая скорость V_r , радиальная B_r и в случае необходимости меридиональная B_m компоненты магнитного поля. Подгонка теоретических профилей линий к наблюдаемым производилась с помощью программы BinMag6 (Кочухов (2018)). Для повышения точности определения по программе WidSyn отбирались неблендированные или наименее блендированные линии, в которых возможные бленды дают незначительный вклад в основную линию. Если разброс по данным, полученным

Таблица 3. Средние значения содержания химических элементов, рассчитанных по эквивалентным ширинам для HD 110066 и HD 153882

Ион	HD 110066	HD 153882	Солнце	Ион	HD 110066	HD 153882	Солнце
C I	-4.84(10)	-5.33(10)	-3.61	Ni I	-5.70(23)	-4.97(35)	-5.84
N I	-4.82:		-4.21	Sr I	-5.85:	-5.48:	-9.21
O I	-4.80(14)	-5.30(30)	-3.35	Y II	-8.14:	-8.34(19)	-9.83
Na I	-5.79(44)	-6.48(49)	-5.83	Zr II	-9.03:	-8.49:	-9.45
Mg I	-4.48(40)	-4.07(32)	-4.45	Ba II	-9.55:	-9.17:	-9.79
Mg II	-4.08(07)	-4.34(38)	-4.45	La II	-7.23(37)		-10.93
Si I	-3.29(22)		-4.53	Ce II	-7.68(39)	-7.54(17)	-10.46
Si II	-3.25(65)	-4.05(56)	-4.53	Ce III	-6.05(14)		-10.46
S II	-4.03:		-4.92	Pr II	-8.54(05)	-8.46:	-11.32
Ca I	-5.34(51)	-6.38(40)	-5.72	Pr III	-8.36(39)	-8.62(35)	-11.32
Ca II	-5.41(52)	-7.21:	-5.72	Nd II	-7.79(59)	-8.09(47)	-10.62
Sc II	-8.43(26)	-9.55:	-8.88	Nd III	-7.87(25)	-8.08(27)	-10.62
Ti II	-6.34(25)	-7.41(35)	-7.11	Sm II	-8.48(23)	-8.96(44)	-11.09
V II	-7.48:		-8.15	Eu II	-7.48(19)	-7.98(09)	-11.52
Cr I	-3.51(23)	-3.85(27)	-6.42	Eu III	-5.87(11)	-7.10(07)	-11.52
Cr II	-3.52(25)	-3.71(27)	-6.42	Gd II	-7.27(62)	-8.06:	-10.96
Mn I	-4.74(42)		-6.62	Tb III	-9.23:		-11.70
Mn II	-4.70(27)	-5.45(29)	-6.62	Dy III	-8.00(37)	-7.87:	-10.94
Fe I	-3.30(24)	-3.24(23)	-4.57	Er II	-8.47(25)		-11.11
Fe II	-2.91(32)	-3.08(31)	-4.57	Er III	-8.31:		-11.11
Co I	-5.64(24)		-7.11	Yb II	-8.64(27)		-11.19
Co II	-5.73(25)	-5.69(17)	-7.11	Lu II	-9.51:	-9.71:	-11.94

Примечание. Содержание, полученное по одной линии, отмечено двоеточием. Стандартные ошибки даны в скобках. Содержание элементов на Солнце представлено в последней колонке.

с программой WidSyn, был значительный, то для большей точности анализ содержания проводился по второму методу.

Для звезды HD 110066 было оценено содержание 32-го химического элемента в разных стадиях ионизации, причем для 12 из них — по двум стадиям. Для HD 153882 содержание элементов получено для 25 элементов, для 7 из них — по двум стадиям ионизации. Содержание кислорода в обеих звездах определялось по линиям инфракрасного триплета O I 7771–7775 Å с учетом отклонения от локального термодинамического равновесия (нелТР). Коэффициенты отклонения населенностей уровней линий O I от равновесных для моделей обеих звезд были рассчитаны методом, изложенным в работе Ситновой и др. (2013), и любезно предоставленных нам Т. Ситновой. Химический состав обеих звезд приведен в табл. 3. Здесь и далее в скобках приведены ошибки измерений в последних знаках. Поскольку анализ химического состава является частью итерационного процесса опреде-

ления фундаментальных параметров, то при каждой итерации проводился перерасчет содержаний с новой моделью атмосферы до полной сходимости процесса. На рис. 2 показано окончательное содержание элементов в атмосферах звезд исследования по отношению к содержаниям элементов в атмосфере Солнца. Солнечные данные взяты из работ Гревесс и др. (2015), Скотт и др. (2015а, 2015б). Химический состав представляет собой типичную картину для звезд данного спектрального типа. Содержания растут от легких элементов к тяжелым в сравнении с солнечными значениями, избыток основных элементов железного пика составляет 1–2 порядка, содержания редкоземельных элементов (REE — La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Er, Yb) превышают солнечные значения на 3–4 порядка.

Определение содержания химических элементов в атмосфере HD 110066 проводилось по эквивалентным ширинам линий. Скорость вращения звезды $V \sin i = 3.3$ км/с. В результате наблюдается дефицит легких элементов CNO, близкие к сол-

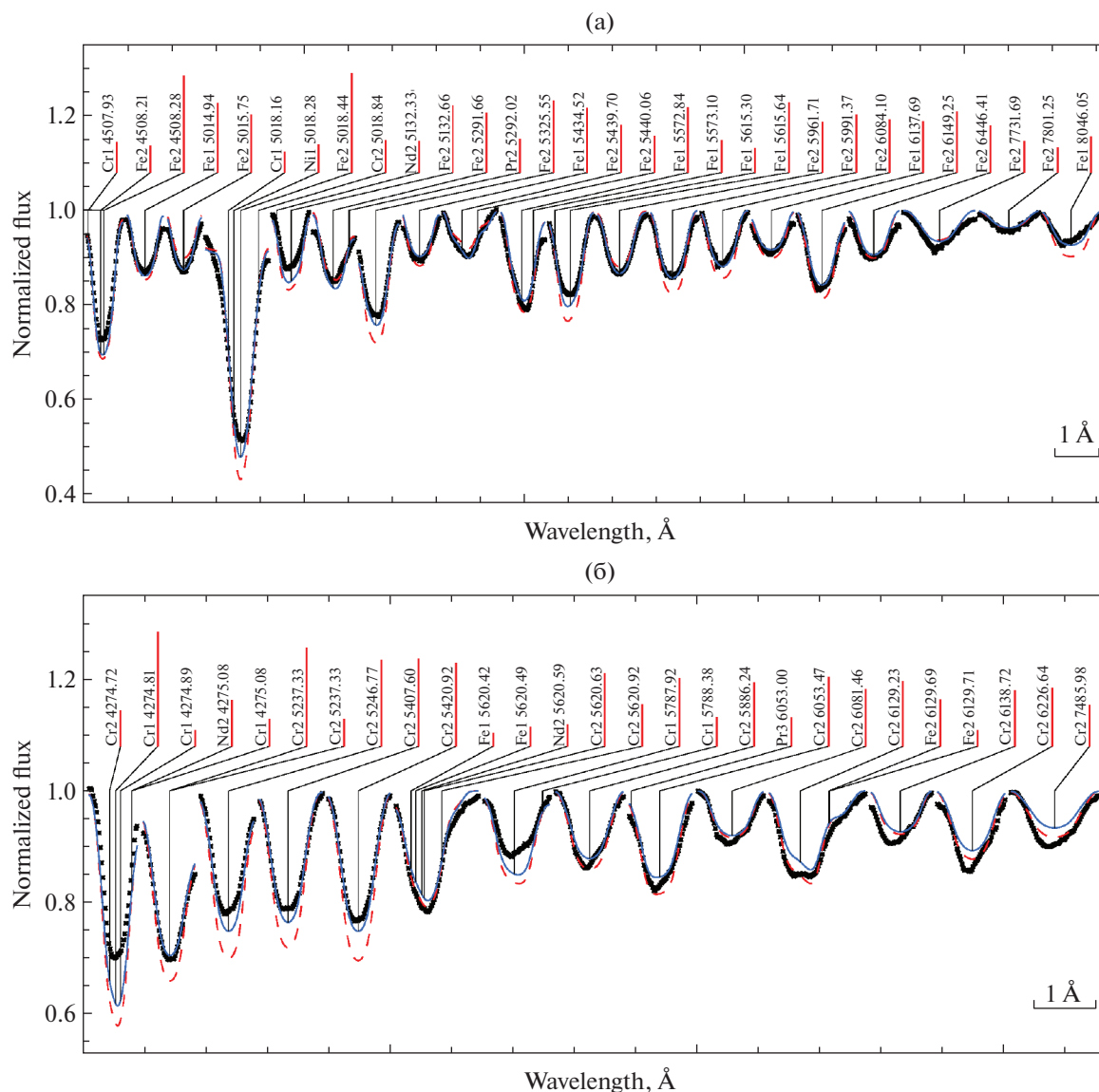


Рис. 3. Сравнение наблюдаемых (точки) и рассчитанных со стратификацией (синяя сплошная линия) профилей спектральных линий Fe (а) и линий Sr (б) для HD 153882. Профили линий с однородным стартовым содержанием элементов показаны штриховой линией.

нечным содержания Na, Mg; содержания S, Ca, Sc, Ti, V завышены на 0.5 dex. Кальций практически не имеет отклонения от ионизационного равновесия. У элементов Ce и Eu наблюдаются значительные аномалии: содержания по линиям в первой и второй стадии ионизации отличаются на 2–3 dex, Ce III и Eu III показывают большее содержание, чем Ce II и Eu II, что полностью подтверждает результаты, полученные для этой звезды ранее (Рябчикова и Романовская (2017)). В то же время Pr, Nd и Er не показывают нарушений ионизационного равновесия.

Содержание элементов в атмосфере HD 153882 определялось двумя методами. Поскольку звезда имеет высокую скорость вращения $V \sin i = 20.0$ км/с, то многие линии размываются и блен-

дируются, следовательно, метод определения содержания по эквивалентным ширинам показывает не совсем точные значения. Метод подгонки синтетических профилей спектральных линий к наблюдаемым показал более точные результаты, и с помощью него были определены содержания для следующих элементов: Ca II, Pr II, Zr II, Sc II, Sr I, Lu II, Sm II, Eu III. Наблюдается дефицит C и O, а также значительный дефицит Na, Ca, Sc, Ti. Содержание кальция определялось по двум линиям в ИК-диапазоне, в других областях линии практически отсутствовали. Содержание Sr, Fe, Co по линиям элементов в первой и второй стадиях ионизации почти не отличается, что может служить свидетельством отсутствия значительных градиентов содержания в области формирования

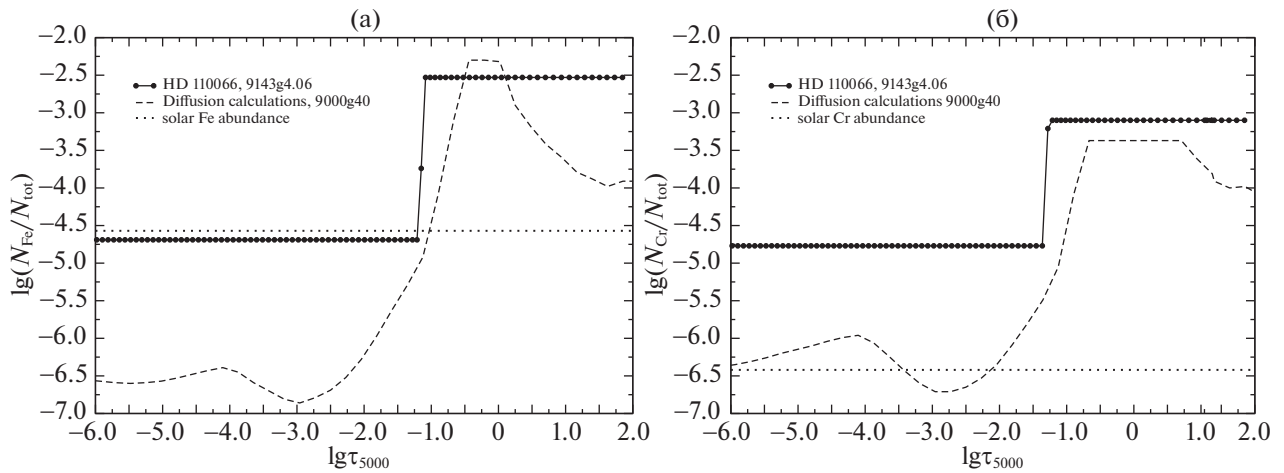


Рис. 4. Стратификация Fe (а) и Cr (б) в атмосфере звезды HD 110066 (9143g4.06). Штриховой линией показано теоретическое распределение Fe и Cr для модели 9000g40 (ЛеБлан и Монин (2005)). Точечная линия показывает содержание данных элементов в атмосфере Солнца.

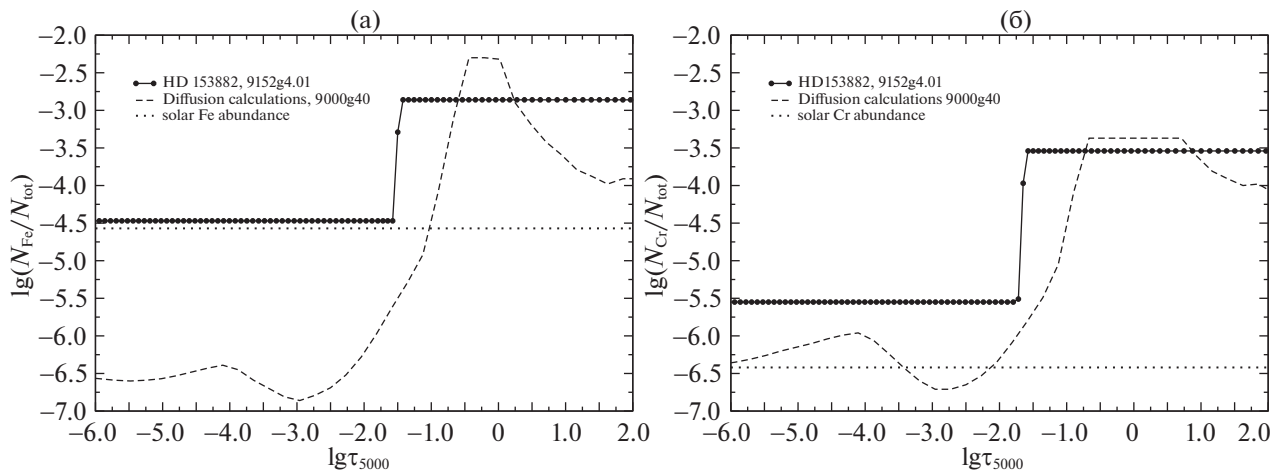


Рис. 5. Стратификация Fe (а) и Cr (б) в атмосфере звезды HD 153882 (9152g4.01). Штриховой линией показано теоретическое распределение Fe и Cr для модели 9000g40 (ЛеБлан и Монин (2005)). Точечная линия показывает содержание данных элементов в атмосфере Солнца.

спектральных линий, использованных для анализа. Для Mn наблюдается отклонение почти на порядок. Содержание Se удалось определить только по линиям Se II. Для Eu содержание по линиям Eu III немного превышает содержание по Eu II. Нет нарушения ионизационного равновесия для Rg и Nd. В целом содержания РЗЭ в атмосферах обеих звезд аналогичны.

Расчеты стратификации

Картина химической стратификации зависит от эффективной температуры T_{eff} и напряженности магнитного поля B_s звезды (ЛеБлан и др. (2009), Алесьян и Штифт (2010)). Теоретические расчеты диффузии некоторых элементов (Бабель (1992)) показали, что в первом приближении профиль

стратификации может быть представлен ступенчатой функцией, что было затем широко использовано при анализе наблюдений (Вейд и др. (2001), Рябчикова и др. (2002), Рябчикова и др. (2005)). Исследования стратификации химических элементов по спектральным наблюдениям показали, что большинство элементов до Ba концентрируются ближе к фотосфере (глубокие слои атмосферы) со скачкообразным уменьшением содержания в верхних слоях. Более тяжелые редкоземельные элементы (РЗЭ), наоборот, концентрируются в верхних слоях атмосферы звезды (Машонкина и др. (2005), Машонкина и др. (2009)).

При расчете модели атмосферы по программе LLmodels учитывались измеренные значения содержания, которые также используются для исследования стратификации элементов Fe и Cr. В стратификационном анализе линии других элемен-

Таблица 4. Параметры стратификации Fe и Cr в атмосферах звезд HD 110066 и HD 153882, полученные в данной работе

HD	Элемент	Параметры стратификации				Параметры атмосферы	
		$\log \left(\frac{N}{N_{tot}} \right)_{up}$	$\log \left(\frac{N}{N_{tot}} \right)_{low}$	$\log \tau_{5000}$ (скачка)	$\Delta \log \tau_{5000}$ (скачка)	T_{eff} , К	$\lg g$
110066	Fe	-4.69(08)	-2.53(02)	-0.89(01)	0.03(06)	9140	4.06
	Cr	-4.77(04)	-3.10(03)	-0.95(02)	0.02(08)		
153882	Fe	-4.46(09)	-2.86(02)	-1.05(04)	0.02(37)	9150	4.01
	Cr	-5.55(20)	-3.54(05)	-1.11(07)	0.04(31)		

Примечание. Приведены параметры ступенчатой функции распределения элементов (содержание в верхних слоях атмосферы, в нижних слоях атмосферы, положение скачка содержания и ширина скачка).

Таблица 5. Фундаментальные параметры звезд исследования, полученные в данной работе

Звезды	T_{eff} , К	$\lg g$	B_s , кГс	$V \sin i$, км/с	R/R_{\odot}	L/L_{\odot}	Параллакс, mas
HD 110066	9140 ± 100	4.06 ± 0.05	4.02 ± 0.18	3.3 ± 0.3	2.68 ± 0.01	1.65 ± 0.03	7.1310^*
HD 153882	9150 ± 100	4.01 ± 0.13	3.80 ± 0.20	20 ± 0.3	3.35 ± 0.03	1.85 ± 0.03	5.9838^*

* GAIA Collaboration (2018).

тов могут влиять на результаты из-за блендирования линий. Стратификация элементов рассчитывалась по программе DDaFit (Рябчикова и др. (2005)). В первом приближении профиль стратификации представляется ступенчатой функцией (Бабель (1992)), где подбираются значения содержаний элемента в верхних и нижних слоях атмосферы, положение центра скачка содержаний в атмосфере звезды и ширина скачка. Для этой процедуры отбираются одиночные или максимально неблендированные линии с различными интенсивностями и потенциалами возбуждения E_i (в диапазоне 0–12 эВ), что предполагает образование линий на разных оптических глубинах. Этот факт дает возможность исследовать различные слои атмосферы звезды. Спектральный синтез проводился по программе Synmast с учетом зеемановского расщепления и возможных вкладов соседних линий.

Для HD 110066 было отобрано 9 линий Fe I, 15 линий Fe II, 6 линий Cr I и 13 линий Cr II. А для HD 153882 — 8 линий Fe I, 12 линий Fe II, 3 линии Cr I и 11 линий Cr II.

На примере линий, использованных для стратификации в звезде HD 153882, видно, что синтетический спектр, рассчитанный с учетом стратификации, описывает наблюдаемые профили спектральных линий лучше, чем спектр с однородным содержанием (рис. 3). Полученное из наблюдений распределение Cr и Fe представлено на рис. 4 (HD 110066) и на рис. 5 (HD 153882). У железа и хрома наблюдается почти одинаковое поведение

стратификации, выражающееся в наличии большей концентрации элементов в нижних слоях атмосферы, резкого падения концентрации в окрестности $\log \tau_{5000} = -1.04$, и малое содержание элементов в верхних слоях атмосферы при $\log \tau_{5000} > -2.6$ (подробнее см. табл. 4). Содержание в верхних слоях атмосферы определяется менее уверенно, поскольку в верхних слоях атмосферы формируются только ядра самых сильных линий. Таких линий наблюдается мало, поэтому содержание элемента в верхних слоях определяется достаточно ненадежно, с точностью не более ± 0.5 dex. В целом стратификация элементов в атмосферах обеих звезд подтверждается теоретическими расчетами с моделью 9000g40, взятыми из работы ЛеБлан и Монин (2005).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕР

Определение параметров атмосфер — итерационный процесс (см. работу Кочухов и др. (2009)), где каждая итерация содержит в себе несколько этапов: расчет модели атмосферы, определение содержания элементов, расчет стратификации и уточнение параметров атмосферы через сравнение наблюдаемого и теоретического потоков (SED) с учетом содержаний химических элементов и стратификации. Если рассчитанный поток в сравнении с наблюдаемыми потоками показывает расхождение, то тогда заново уточняется модель атмосферы и пересчитываются химический состав и стратификация в атмосфере звезды до тех пор, пока не сойдутся модельные расчеты с наблюдениями. Таким

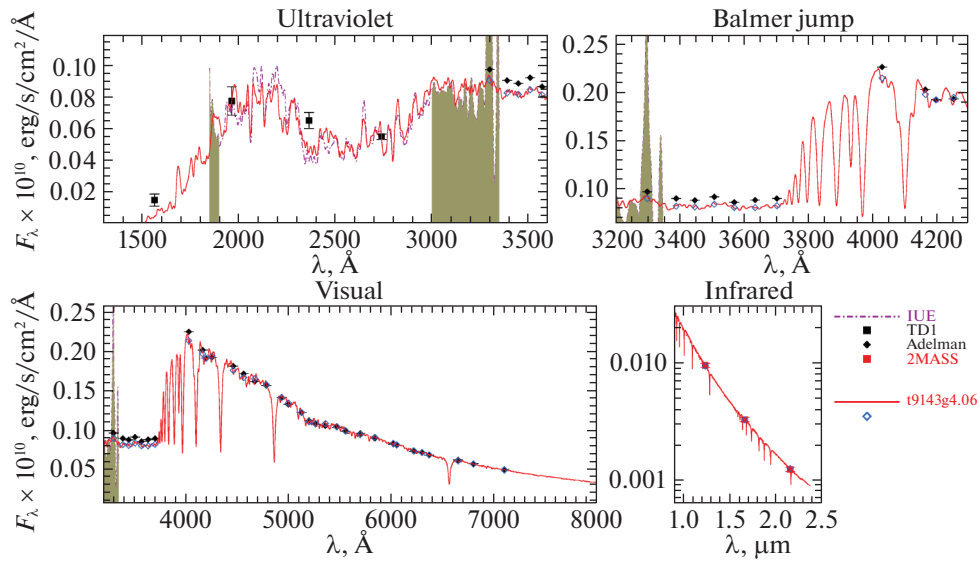


Рис. 6. Сравнение наблюдаемого распределения энергии (заполненные квадраты и ромбы) с рассчитанным программой LLmodels (красная сплошная линия) для модели атмосферы HD 110066 с параметрами 9143g4.06. Здесь и далее открытыми ромбами показаны теоретические потоки после свертки с соответствующими фильтрами. Закрашенные области SED — выключенные из процедуры подгонки.

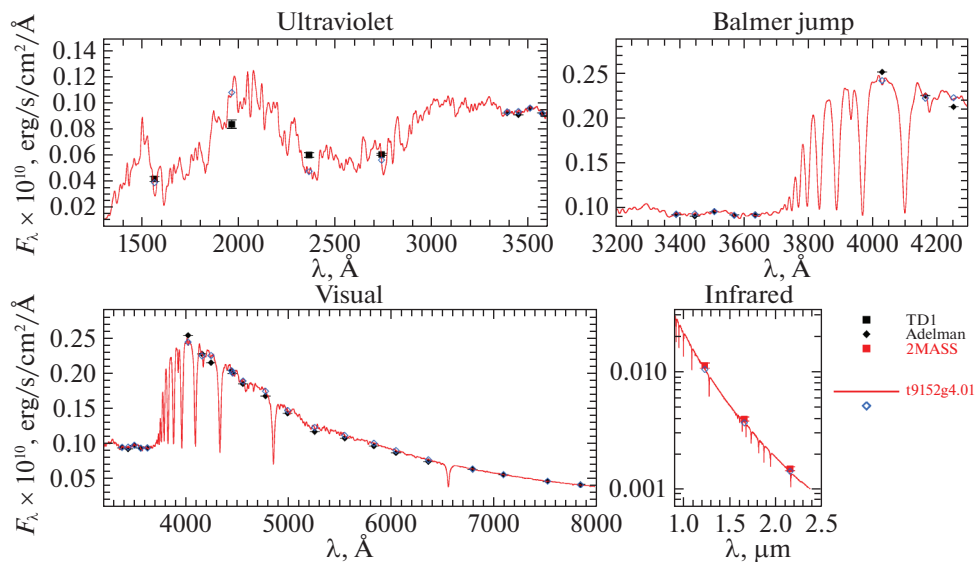


Рис. 7. Сравнение наблюдаемого распределения энергии с рассчитанным программой LLmodels для модели атмосферы HD 153882 с параметрами 9152g4.01.

образом, может проводиться несколько итераций. Для HD 110066 было проведено три итерации, а для HD 153882 — две.

Зная расстояние до звезды, путем сравнения теоретических потоков с наблюдаемыми можно оценить радиус звезды. Расстояние до звезды известно через параллакс, для звезд исследования значения параллаксов взяты из каталога GAIA DR2 (GAIA collaboration (2018)). Следует отметить, что значения параллаксов для обеих звезд практически совпадают: 7.131 ± 0.056 mas и 7.43 ± 0.39 mas из GAIA и Hipparcos (ван Лювен (2007)) соответственно для звезды HD 110066,

и 5.984 ± 0.045 mas и 5.92 ± 0.73 из GAIA и Hipparcos (ESA (1997)) соответственно для HD 153882. Это обстоятельство делает оценки радиусов достаточно надежными. В процедуре сравнения теоретического распределения энергии с наблюдаемым варьируются только параметры атмосферы T_{eff} , $\lg g$ и радиус звезды, а расстояние известно через параллакс. Поправка за межзвездное покраснение была рассчитана по стандартной формуле $A_V = 3.1E(B - V)$, где $E(B - V) = 0.^m022$ (HD 110066) и $E(B - V) = 0.^m011$ (HD 153882) (Аморес и Лепин (2005)).

На рис. 6, 7 показаны сравнения наблюдаемых

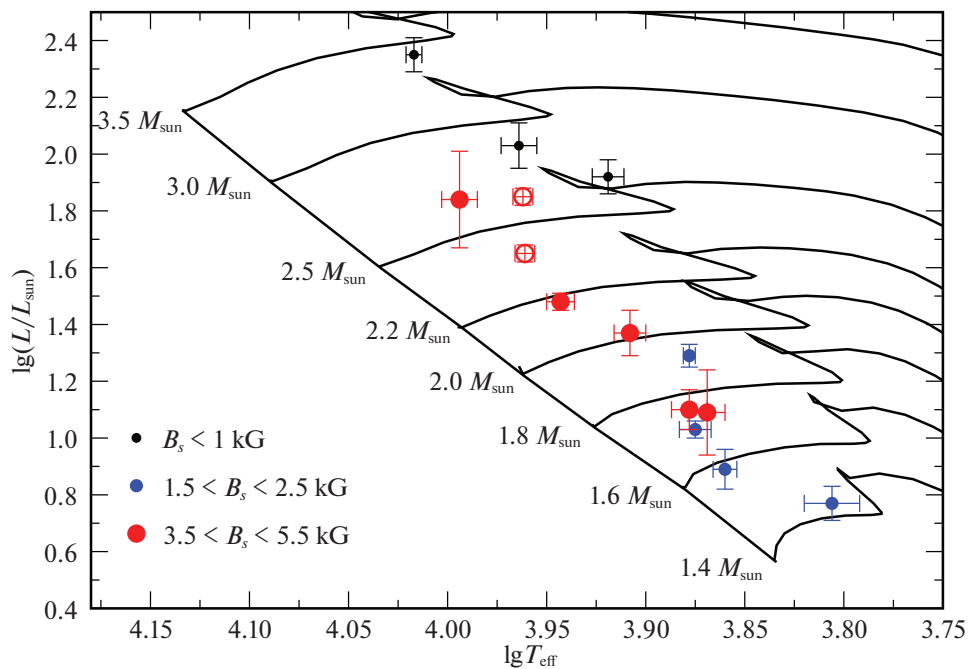


Рис. 8. Положение звезд на диаграмме Герцшпрунга–Рассела. HD 110066 и HD 153882 показаны красными открытыми кружками. Размер и цвет символа соответствуют звездам с различными величинами магнитных полей.

потоков в различных спектральных диапазонах. Для серии моделей звезды HD 110066 наилучшее совпадение наблюдаемого и теоретического потоков получено для модели с $T_{\text{eff}} = 9143$ К, $\lg g = 4.06$ (9143g4.06), а для HD 153882 — для модели 9152g4.01. Результирующие фундаментальные параметры звезд представлены в табл. 5. Светимость звезды рассчитывалась по формуле Стефана-Больцмана по полученным значениям эффективной температуры и радиуса.

Положение на диаграмме Герцшпрунга–Рассела

Зная фундаментальные параметры, можно поместить звезды на диаграмму Герцшпрунга–Рассела. В табл. 6 собраны фундаментальные параметры Ар-звезд, определенные аналогичными методами по детальному спектроскопическому анализу с учетом аномалий химического состава и стратификации элементов в атмосфере. Сравнение фундаментальных параметров, полученных методами спектроскопии, с параметрами, полученными прямыми методами интерферометрии (Романовская и др. (2019)), показали очень хорошее согласие в пределах ошибок, что подтверждает точность спектроскопических определений. На рис. 8 показано положение всех звезд на Г–Р диаграмме, включая звезды данного исследования. Эволюционные треки взяты из работы

Жиранди и др. (2000). Разумеется, количество звезд недостаточно для статистического анализа, однако, результаты подтверждают полученную ранее тенденцию к уменьшению магнитного поля с возрастом звезды для звезд массами больше $2.5 M_{\odot}$ (см. Ландстрит и др. (2007)).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен детальный анализ атмосфер звезд HD 110066 и HD 153882 методом спектроскопии с использованием спектров высокого разрешения и отношения сигнала к шуму. Получены значения радиальных компонент магнитного поля. Определены средние значения содержания химических элементов по глубине атмосфер звезд. Проведен анализ стратификации Fe и Cr. В целом распределение данных элементов, полученное по наблюдениям, соответствует предсказаниям теории диффузии.

С учетом аномалий химического состава и стратификации элементов в результате итерационного процесса определены параметры атмосфер звезд: эффективная температура, ускорение свободного падения, радиус и светимость (см. табл. 5), и определено их положение на диаграмме Герцшпрунга–Рассела (см. рис. 8). Их положение согласуется с наблюдаемой тенденцией к уменьшению магнитного поля с возрастом звезды.

Таблица 6. Фундаментальные параметры Ар-звезд, полученные методами спектроскопии

Звезды, HD	T_{eff} , К	$\lg g$	R/R_{\odot}	L/L_{\odot}	B_s , кГс	Ссылка
24712	7250 ± 100	4.10 ± 0.15	1.77 ± 0.04	0.89 ± 0.07	2.3	Шуляк и др. (2009)
40312	10400 ± 100	3.6 ± 0.1	4.64 ± 0.17	2.35 ± 0.06	0.4	Кочухов и др. (2019)
101065	6400 ± 200	4.20 ± 0.20	1.98 ± 0.03	0.77 ± 0.06	2.3	Шуляк и др. (2010)
111133	9875 ± 200	3.40 ± 0.20	2.92 ± 0.44	1.84 ± 0.17	4.0	Романовская и др. (2019)
112185	9200 ± 200	3.6 ± 0.1	4.08 ± 0.14	2.03 ± 0.08	0.1	Кочухов и др. (2019)
128898	7500 ± 130	4.10 ± 0.15	1.94 ± 0.01	1.03 ± 0.03	2.0	Кочухов и др. (2009)
137909	8100 ± 150	4.00 ± 0.15	2.47 ± 0.07	1.37 ± 0.08	5.4	Шуляк и др. (2013)
137949	7400 ± 150	4.00 ± 0.15	2.13 ± 0.13	1.09 ± 0.15	5.0	Шуляк и др. (2013)
176232	7550 ± 050	3.80 ± 0.10	2.46 ± 0.06	1.29 ± 0.04	1.5	Несвачил и др. (2013)
188041	8770 ± 150	4.20 ± 0.10	2.39 ± 0.07	1.48 ± 0.03	3.6	Романовская и др. (2019)
201601	7550 ± 150	4.00 ± 0.10	2.07 ± 0.05	1.10 ± 0.07	4.0	Шуляк и др. (2013)
204411	8300 ± 150	3.60 ± 0.10	4.42 ± 0.15	1.92 ± 0.06	0.8	Романовская и др. (2019)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90147, работа частично поддержана программой КП19-270 “Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований”. В данной работе использовались базы данных VizieR и VALD. Авторы благодарят Т. Ситнову за предоставленные не-ЛТР расчеты линий нейтрального кислорода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адельман и др. (S.J. Adelman, D.M. Pypser, S.N. Shore, R.E. White, and W.H. Warren), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **81**, 221 (1989).
- Адельман и др. (S.J. Adelman, D.M. Pypser, Z. Lopez-Garcia, and H. Caliskan), *Astron. Astrophys.* **296**, 467 (1995).
- Адельман и Рейли (S.J. Adelman and K.E. Rayle), *Astron. Astrophys.* **355**, 308 (2000).
- Алесьян и Штифт (G. Alecian and M.J. Stift), *Astron. Astrophys.* **516**, A53 (2010).
- Аморес и Лепин (E.B. Amôres and J.R.D. Lépine), *Astron. Astrophys.* **130**, 659 (2005).
- Бабель (J. Babel), *Astron. Astrophys.* **258**, 449 (1992).
- ван Лювен (F. van Leeuwen), *Astron. Astrophys.* **474**, 653 (2007).
- Вейд и др. (G.A. Wade, T.A. Ryabchikova, S. Bagnulo, and N. Piskunov), *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **248**, 373 (2001).
- GAIA Collaboration (Gaia Collaboration, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, A1 (2018).
- Гревесс и др. (N. Grevesse, P. Scott, M. Asplund, and A.J. Sauval), *Astron. Astrophys.* **573**, A27 (2015).
- ESA (The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission), *ESA Special Publication* **1200** (1997).
- Жирарди и др. (L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi), *Astron. Astrophys.* **141**, 371 (2000).
- Кочухов, Баньюло (O. Kochukhov and S. Bagnulo), *Astron. Astrophys.* **450**, 763 (2006).
- Кочухов и др. (O. Kochukhov, V. Tsymbal, T. Ryabchikova, V. Makaganyk, and S. Bagnulo), *Astron. Astrophys.* **460**, 831 (2006).
- Кочухов (O.P. Kochukhov), *Physics of Magnetic Stars* (Ed. I.I. Romanyuk, D.O. Kudryavtsev, O.M. Neizvestnaya, V.M. Shapoval, 109–118, 2007).
- Кочухов и др. (O. Kochukhov, D. Shulyak, and T. Ryabchikova), *Astron. Astrophys.* **499**, 851 (2009).
- Кочухов (O. Kochukhov), BinMag: Widget for comparing stellar observed with theoretical spectra, *Astrophysics Source Code Library (ascl:1805.015)* (2018).
- Кочухов и др. (O. Kochukhov, M. Shultz, and C. Neiner), *Astron. Astrophys.* **621**, A47 (2019).
- Коэн и др. (M. Cohen, W.A. Wheaton, and S.T. Megeath), *Astron. J.* **126**, 1090 (2003).
- Кутри и др. (R.M. Cutri, et al.), 2MASS All Sky Catalog of point sources. The IRSA 2MASS All-Sky Point Source Catalog. (2003).
- Куруц (R. Kurucz), *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **44**, 87 (1993).
- Ландстрит и др. (J.D. Landstreet, S. Bagnulo, V. Andretta, L. Fossati, E. Mason, J. Silaj, and G.A. Wade), *Astron. Astrophys.* **470**, 685 (2007).
- ЛеБлан, Монин (F. Leblanc and D. Monin), *JRACS* **99**, 139 (2005).
- ЛеБлан и др. (F. LeBlanc, D. Monin, A. Hui-Bon-Hoa, and P. H. Hauschildt), *Astron. Astrophys.* **495**, 937 (2009).

25. Матис (G. Mathys), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **89**, 121 (1991).
26. Матис (G. Mathys), *Astron. Astrophys.* **602**, A14 (2017).
27. Машонкина, Рябчикова, Рябцев (L. Mashonkina, T. Ryabchikova, and A. Ryabtsev), *Astron. Astrophys.* **441**, 309 (2005).
28. Машонкина и др. (L. Mashonkina, T. Ryabchikova, A. Ryabtsev, and R. Kildiyarova), *Astron. Astrophys.* **495**, 297 (2009).
29. Мишо (G. Michaud), *Astrophys. J.* **160**, 641 (1970).
30. Несвачил и др. (N. Nesvacil, D. Shulyak, T.A. Ryabchikova, O. Kochukhov, A. Akberov, and W. Weiss), *Astron. Astrophys.* **552**, A28 (2013).
31. Нетопил и др. (M. Netopil, E. Paunzen, H.M. Maitzen, P. North, and S. Hubrig), *Astron. Astrophys.* **491**, 545 (2008).
32. Романовская и др. (A. Romanovskaya, T. Ryabchikova, D. Shulyak, K. Perraut, G. Valyavin, T. Burlakova, and G. Galazutdinov), *MNRAS* **488**, 2343 (2019).
33. Рябчикова (T. Ryabchikova), *IAUS* **145**, 149 (1991).
34. Рябчикова и др. (T. Ryabchikova, N. Piskunov, O. Kochukhov, V. Tsymbal, P. Mittermayer, and W.W. Weiss), *Astron. Astrophys.* **384**, 545 (2002).
35. Рябчикова и др. (T. Ryabchikova, N. Nesvacil, W.W. Weiss, O. Kochukhov, and C. Stütz), *Astron. Astrophys.* **423**, 705 (2004).
36. Рябчикова и др. (T. Ryabchikova, F. Leone, and O. Kochukhov), *Astron. Astrophys.* **438**, 973 (2005).
37. Рябчикова и др. (T. Ryabchikova, N. Piskunov, R.L. Kurucz, H.C. Stempels, U. Heiter, Y. Pakhomov, and P.S. Barklem), *Physica Scripta* **90**, 54005 (2015).
38. Рябчикова Т.А., Романовская А.М., Письма в Астрон. журн. **43**, 286 (2017) [Т.А. Ryabchikova and A.M. Romanovskaya, *Astron. Lett.* **43**, 252 (2017)].
39. Ситнова Т.М., Машонкина Л.И., Рябчикова Т.А., Письма в Астрон. журн. **39**, 146 (2013) [Т.М. Sitnova, et al., *Astron. Lett.* **39**, 126 (2013)].
40. Скотт и др. (P. Scott, N. Grevesse, M. Asplund, A.J. Sauval, K. Lind, Y. Takeda, R. Collet, R. Trampedach, et al.), *Astron. Astrophys.* **573**, A25 (2015a).
41. Скотт и др. (P. Scott, M. Asplund, N. Grevesse, M. Bergemann, and A.J. Sauval), *Astron. Astrophys.* **573**, A26 (2015b).
42. Томпсон и др. (G.I. Thompson, K. Nandy, C. Jamar, A. Monfils, L. Houziaux, D.J. Carnochan, and R. Wilson), *Catalogue of stellar ultraviolet fluxes. A compilation of absolute stellar fluxes measured by the Sky Survey Telescope (S2/68) aboard the ESRO satellite TD-1* (1978).
43. Шуляк и др. (D. Shulyak, V. Tsymbal, T. Ryabchikova, C. Stütz, and W.W. Weiss), *Astron. Astrophys.* **428**, 993 (2004).
44. Шуляк и др. (D. Shulyak, T. Ryabchikova, L. Mashonkina, and O. Kochukhov), *Astron. Astrophys.* **499**, 879 (2009).
45. Шуляк и др. (D. Shulyak, T. Ryabchikova, R. Kildiyarova, and O. Kochukhov), *Astron. Astrophys.* **520**, A88 (2010).
46. Шуляк и др. (D. Shulyak, T. Ryabchikova, and O. Kochukhov), *Astron. Astrophys.* **551**, A14 (2013).
47. Хубриг и др. (S. Hubrig, P. North, and M. Schöller), *Astronomische Nachrichten* **328**, 245 (2007).