

УДК 524.384-852/36;524.384-54

## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ АТМОСФЕРЫ И ЭВОЛЮЦИОННЫЙ СТАТУС СПЕКТРАЛЬНОЙ И СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ 12 PERSEI

© 2012 Ю. Ю. Балегга<sup>1\*</sup>, В. В. Леушин<sup>1,2</sup>, М. К. Кузнецов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup> Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 334006 Россия

<sup>3</sup> Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

Поступила в редакцию 24 мая 2012 года; принята в печать 25 июня 2012 года

Система 12 Per является спектральной и спекл-интерферометрической двойной с компонентами близких спектральных классов. Параметры ее орбиты за почти век наблюдений определены достаточно надежно. Для уточнения химического состава атмосфер компонентов и их эволюционного статуса нами получены спектры звезды в области 3500–9600 Å на эшелле-спектрометрах 6-м телескопа БТА и 2-м телескопа Zeiss-2000 на пике Терскол. По светимостям ( $L_1 = 3.02L_\odot$ ,  $L_2 = 1.86L_\odot$ ) и эффективным температурам ( $T_{\text{eff}1} = 6195$  К и  $T_{\text{eff}2} = 6000$  К) оценен эволюционный статус компонентов системы. Возраст системы составляет 1.12 миллиардов лет, компоненты находятся на стадии выгорания водорода вблизи начальной главной последовательности. Полученные содержания элементов в атмосферах компонентов 12 Per указывают на повышенную металличность звезд системы:  $[\text{Fe}/\text{H}] \geq 0.35$ . Мы рассматриваем сценарий, по которому первоначально круговая короткопериодическая орбита пары вследствие передачи вращательного момента компонентам моменту орбитального движения за 1 млрд лет может превратиться в вытянутую орбиту с большим периодом.

Ключевые слова: звезды: химический состав—звезды: двойные: спектральные—звезды: эволюция—звезды: индивидуальные: 12 Per

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование двойных систем с большими эксцентриситетами ( $e > 0.6$ – $0.7$ ) орбит является актуальным в проблеме исследования формирования и эволюции кратных звезд. Эволюционный статус компонентов и системы в целом может быть получен при условии точного знания параметров звезд, составляющих систему, включая химический состав их атмосфер. Последнее важно для звезд с особенностями химического состава, к которым относится 12 Per (HD 16739 = HR 788 = HIP 12623), поскольку у ее компонентов отмечается повышенная металличность [1, 2].

Спектральная двойственность 12 Per была обнаружена Кемпбеллом по фотопластинкам, полученным на призменном спектрографе Ликской обсерватории в 1900 г. [3]. Автор сообщал, что в спектре видны линии обоих компонентов. Орбитальные элементы по материалам этой же обсерватории определил Колачевич [4, 5], который отметил, что отношение интенсивностей линий в

спектре соответствует разности блеска  $\Delta m \sim 0.3$ . Дюкеннуа и Майор [6] по 13 измерениям со спектрографом CORAVEL уточнили параметры орбиты:  $P = 330^{\text{d}}.9$ ,  $e = 0.657$ . Поскольку звезда находится на небольшом удалении от нас ( $d \approx 25$  пк), в 1973 году К. Линдсу удалось разделить ее на компоненты в ходе первых спекл-интерферометрических экспериментов на 4-м телескопе обсерватории Китт Пик. Первую комбинированную трехмерную орбиту вычислил Макалистер [7] по результатам 6 интерферометрических наблюдений и имевшимся спектроскопическим данным. Барлоу и др. [1] использовали 35 спектральных наблюдений с куде-спектрометром 1.22-м телескопа Доминионской астрофизической обсерватории, 15 опубликованных наблюдений с других обсерваторий, а также 38 опубликованных к 1991 году спекл-интерферометрических измерений для уточнения орбитального параллакса и индивидуальных масс компонентов. Ими отмечено, что псевдосинхронизированный период осевого вращения составляет 51.6 дней, что приводит к скорости вращения 1.2 и 1.5 км/с, соответственно

\*E-mail: ballega@sao.ru

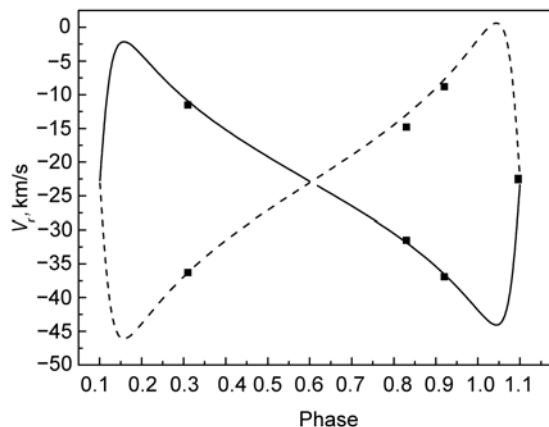
для первого и второго компонентов. Наблюдаемые скорости вращения звезд  $v \sin i = 6.9$  км/с и  $5.4$  км/с для первого и второго компонентов хорошо совпадают с псевдосинхронизированными величинами, что неожиданно для системы с таким большим периодом. Авторы указали также на избыток железа в спектре 12 Per,  $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.1$  и на то, что массы и светимости компонентов больше, чем у звезд главной последовательности. В работе Гардинера и др. [2] сообщается о более высокой металличности звезды:  $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.3$ . Смолли и др. [8] по профилям бальмеровских линий определили температуры компонентов системы:  $T_{\text{eff}1} = 6371 \pm 176$  К,  $T_{\text{eff}2} = 6000 \pm 143$  К.

Все имевшиеся орбитальные характеристики и параметры компонентов были суммированы Пурбо [9] спустя сто лет после открытия пары. Наконец характеристики видимой орбиты были уточнены с помощью наблюдений в  $K'$ -диапазоне ( $\lambda = 2.13$  мкм) на 6-элементном длинноволновом интерферометре CHARA обсерватории Маунт Вильсон [10]. В этой работе оценена и разность блеска между компонентами в  $K'$ -полосе:  $\Delta K' = 0.409 \pm 0.013$  величины. В Табл. 1 приведены основные параметры системы по определениям разных авторов.

Подытоживая сказанное, заметим, что достигнутая в работе [10] точность масс компонентов ( $\pm 1.4\%$ ) может быть улучшена только за счет новых высокоточных измерений лучевых скоростей, так как параметры видимой орбиты хорошо определены. Что касается характеристик атмосфер компонентов и их эволюционного статуса, то они установлены недостаточно надежно. Для уточнения химического состава атмосфер мы провели спектроскопические наблюдения звезды с высоким разрешением на 6-м телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории и 2-м телескопе Zeiss-2000 обсерватории на пике Терскол в широком спектральном диапазоне от  $3500 \text{ \AA}$  до  $9600 \text{ \AA}$ .

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Три спектра 12 Per получены в 2005–2007 гг. на эшелюном спектрографе в фокусе куде 2-м телескопа ТФ ИНАСАН на пике Терскол [11]. В качестве светоприемника использовалась ПЗС-камера  $1242 \times 1152$  элемента фирмы Write (Великобритания). Спектры получены в диапазоне  $3500\text{--}8000 \text{ \AA}$  со спектральным разрешением  $R = 45000$ . Один спектр в диапазоне  $4470\text{--}5940 \text{ \AA}$  получен в 2006 г. с разрешением  $R = 75000$  на эшелюном спектрографе НЭС [12] 6-м телескопа БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН с использованием матрицы Ford-Loral  $2048 \times 2048$  элементов.



**Рис. 1.** Теоретические кривые лучевых скоростей для каждого из компонентов 12 Per, рассчитанные по параметрам из работы Багнуоло и др. [10]. Точками представлены наши измерения лучевых скоростей. Сплошная кривая — компонент 1, штриховая — компонент 2. Измерение, соответствующее фазе 0.06 ( $V_{r1} = V_{r2} = -22.4$  км/с), получено на БТА. Остальные три измерения выполнены на телескопе Zeiss-2000.

В Табл. 2 приведен список полученных спектров. Для вычисления фаз использовались элементы орбиты из [10]. В каждую из трех ночей на 2-м телескопе были получены по две экспозиции объекта. После суммирования спектров, полученных в одну ночь, было достигнуто отношение сигнал/шум около 200. На БТА за одну ночь были просуммированы три спектра, обеспечившие отношение сигнал/шум 300. Обработка спектров выполнялась с помощью пакета программ DECH20 [13]. В последних столбцах приводятся лучевые скорости  $V_{r1}$  и  $V_{r2}$ , измеренные по нашим спектрам.

На Рис. 1 приведены рассчитанные нами по параметрам из [10] кривые лучевых скоростей для компонентов 12 Per. Там же точками представлены наши новые измерения лучевых скоростей, которые хорошо согласуются с эфемеридными значениями скоростей.

На Рис. 2 приведен участок спектра вблизи водородной линии  $H_\alpha$  для фазы 0.82 и рассчитанный синтетический спектр для той же фазы. Хорошо видно, что линии металлов полностью разделяются, что позволяет исследовать атмосферу каждого из компонентов отдельно. Однако относительные радиальные скорости компонентов для фазы 0.82, как и для других фаз, недостаточны, чтобы существенно деформировать профили линий водорода.

**Таблица 1.** Параметры 12 Per

	Барлоу и др. [1]	Макалистер [7]	Пурбо [9]	Багнуоло и др. [10]
Параллакс $\pi$ , mas	$42.24 \pm 0.56$	$46 \pm 2$	$41.7 \pm 0.89$	$41.19 \pm 0.21$
Большая полуось $a$ , arcsec	$0.05338 \pm 0.00052$	$0.057 \pm 0.003$	$0.0531 \pm 0.00066$	$0.05318 \pm 0.00015$
Эксцентриситет $e$	$0.6574 \pm 0.0024$	$0.67 \pm 0.15$	$0.663 \pm 0.0021$	0.658199
Период $P$ , d	$330.9821 \pm 0.0125$	$331.0 \pm 0.1$	$330.9968 \pm 0.0044$	330.98199
$M_1/M_\odot, M_2/M_\odot$	1.306, 1.172	1.25, 1.08	1.34, 1.18	1.382, 1.240
Sp(1), Sp(2)	F9V, G2V	F8V, G2V	F9V	F8V, G1.5V

**Таблица 2.** Список спектров и лучевые скорости компонентов 12 Per

Дата	Телескоп	JD	Фаза	$V_{r1}$ , км/с	$V_{r2}$ , км/с
13/14.10.2005	2-м	2453657.0	0.73	-31.5	-14.8
06/07.10.2006	2-м	2454015.5	0.82	-36.9	-8.8
12/13.02.2007	2-м	2454144.0	0.21	-11.5	-36.3
06/07.12.2006	БТА	2454076.2	0.06	-22.4	-22.4

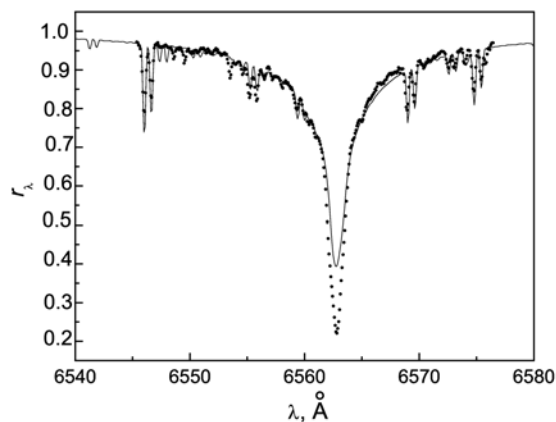
### 3. ОБЩИЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПОНЕНТОВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ АТМОСФЕР

#### 3.1. Эффективные температуры компонентов

Эффективные температуры звезд системы, определенные Барлоу и др. [1], равны  $6125 \pm 80$  K и  $5800 \pm 70$  K и соответствуют спектральным классам F8V и G2V. Оценки температуры по фотометрическим величинам, взятые из астрономической базы SIMBAD, подтверждают эти значения, хотя и характеризуют температуру системы

в целом. В Табл. 3 приведены фотометрические индексы и соответствующие величины температур, полученные по зависимостям из работы Алонси и др. [14].

Изучение водородных линий и полных потоков излучения в работе [8] приводит к температурам компонентов:  $T_{\text{eff1}} = 6371 \pm 176$  K,  $T_{\text{eff2}} = 6000 \pm 143$  K. Наши расчеты водородных линий и ионизационного равновесия для железа показывают примерно такие же значения температур:  $T_{\text{eff1}} = 6195 \pm 200$  K,  $T_{\text{eff2}} = 6000 \pm 200$  K.



**Рис. 2.** Участок спектра вблизи линии  $H_\alpha$ , полученный на 2-м телескопе 06/07.10.2006. Точки — наблюдения, сплошные линии — теоретический расчет.

#### 3.2. Светимость и ускорение силы тяжести на поверхности

Светимость каждого из компонентов и всей системы в целом определяется по величине параллакса  $\pi$ . Наиболее точное значение параллакса 12 Per определено в работе Багнуоло и др. [10] по данным интерферометрии с большой базой:  $\pi = 41.19 \pm 0.21$  mas. Это значение несколько меньше, чем в уточненном каталоге Hipparcos [15],  $\pi_{\text{Hip}} = 41.34 \pm 0.43$  mas, однако мы предпочитаем измерения с наземным интерферометром, так как на результаты астрометрии Hipparcos могло повлиять относительное движение компонентов двойной системы. Приняв визуальную звездную величину  $m_V = 4.90$  из астрономической базы SIMBAD и болометрическую поправку для F9V, равную 0.04 [16], получаем для данного значения  $\pi$  общую светимость системы  $L/L_\odot = 5.15$ .

Таблица 3. Фотометрические индексы и соответствующие величины температур

	$V$	$B - V$	$U - B$	$\beta$	$b - y$	$m_1$	$c_1$	[Fe/H]
	4.91	0.59	0.56	0.14	2.633	0.368	0.198	0.400
$T_{\text{eff}}$		5915	6030		6153	5955		+0.10
$T_{\text{eff}}$		6018	6135		6083	6000		+0.33
$T_{\text{eff}}$		6076	6195		6044	6027		+0.45

Таблица 4. Начальный химический состав для моделей и содержание элементов в атмосфере Солнца

	C	N	O	Ne	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe
$\log N_*$	8.43	7.88	8.56	7.75	6.29	7.24	6.13	7.21	6.84	6.02	3.06	4.95	3.96	5.63	5.05	7.63
$\log N_{\odot}$	8.39	7.78	8.66	7.84	6.17	7.53	6.37	7.51	7.14	6.31	3.05	4.90	4.00	5.64	5.39	7.45

В качестве оценки разности блеска  $\Delta m$  мы также используем значение, полученное по данным интерферометрии,  $\Delta m_V = 0.51$  [10]. К сожалению, оно определено не непосредственно по контрасту интерференционных полос в видимом диапазоне, а пересчетом измерений на длине волны 2.13 мкм с учетом спектральных классов компонентов. Ошибка такой оценки может достигать 0.05 величины. При такой разности блеска получаем:  $L_1/L_{\odot} = 3.17$  и  $L_2/L_{\odot} = 1.98$ . Эти светимости и эффективные температуры компонентов позволяют оценить радиусы звезд:  $R_1 = 1.55 R_{\odot}$  и  $R_2 = 1.31 R_{\odot}$ , что достаточно близко к ранее найденным значениям [1, 10]. Радиусы и массы компонентов,  $M_1 = 1.382 \pm 0.019 M_{\odot}$  и  $M_2 = 1.240 \pm 0.017 M_{\odot}$  [10], дают величины ускорений силы тяжести на поверхностях:  $\log g_1 = 4.20 \pm 0.10$  и  $\log g_2 = 4.30 \pm 0.10$ .

#### 4. МОДЕЛИ АТМОСФЕР И СОДЕРЖАНИЕ ЖЕЛЕЗА В АТМОСФЕРАХ КОМПОНЕНТОВ 12 PER

##### 4.1. Модели атмосфер

Модели атмосфер компонентов 12 Per рассчитывались для температур от  $T_{\text{eff}} = 6371$  К до  $T_{\text{eff}} = 6000$  К. Для каждой температуры, исходя из принятых выше значений светимости и массы, определялось свое значение ускорения силы тяжести на поверхности. Для 6195 К и 6000 К  $\log g$  равен 4.20 и 4.30 соответственно. Начальный химический состав для моделей приведен в Табл. 4. Расчеты проводились по программе *LLmodels* [17] с учетом всех линий поглощения.

Эти модели использовались для расчетов профилей водородных линий по программе *SintVA* [18]. Затем профили для первого и второго компонентов

суммировались и сравнивались с наблюдаемыми. Параметры модели с лучшим совпадением теоретических и наблюдаемых спектров приводятся в Табл. 5.

##### 4.2. Содержание железа и микротурбулентная скорость

Для определения содержания железа в атмосферах компонентов мы измерили эквивалентные ширины разделенных линий Fe I и Fe II в суммарном спектре системы. Интенсивности линий в спектрах компонентов при полном разделении и соответствующие эквивалентные ширины определяются из наблюдаемых эквивалентных ширин:

$$W_{\lambda 1} = W_{\lambda \text{obs } 1}(1 + 1/n) \text{ и } W_{\lambda 2} = W_{\lambda \text{obs } 2}(1 + n),$$

где  $W_{\lambda 1}$  и  $W_{\lambda 2}$  — эквивалентные ширины линий поглощения в спектрах первого и второго компонентов,  $W_{\lambda \text{obs } 1}$  и  $W_{\lambda \text{obs } 2}$  — наблюдаемые эквивалентные ширины,  $n = L_1/L_2$  — отношение светимостей компонентов. Для  $\Delta g = 0.51$  отношение  $n = 1.6$ . Найденные нами содержания железа по линиям Fe I и Fe II приведены в Табл. 6. Параметры линий брались из базы данных VALD [19]. Расчеты проводились с использованием программы *KONTUR* [20].

Определения содержания железа  $\log N(\text{Fe})$  проводились для различных значений микротурбулентной скорости  $V_t$ . Для оценки ее

Таблица 5. Параметры моделей атмосфер компонентов

Комп.	$T_{\text{eff}}$ , К	$\log g$	$L_1/L_2$	$V_t$ , км/с	$v \sin i$ , км/с
1	6195	4.20	1.6	1.6	8.0
2	6000	4.30		2.3	8.0

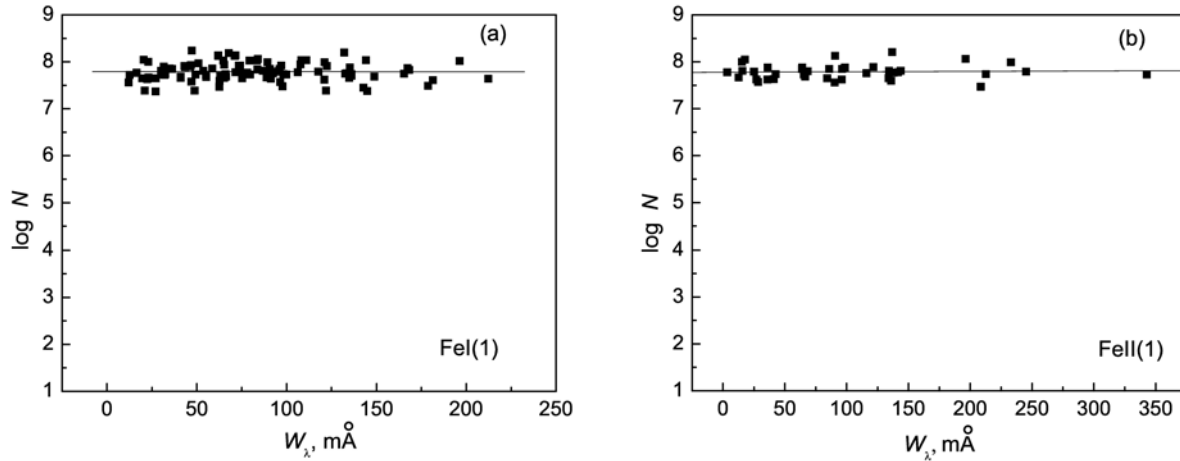


Рис. 3. Зависимости  $\log N(\text{Fe})-W_\lambda$  для линий Fe I (a) и Fe II (b) при  $V_{t1} = 1.60$  км/с для первого компонента (1).

величины строились линейные регрессии  $\log N(\text{Fe}) = \log N(\text{Fe})_0 + kW_\lambda$ , которые позволяют выбрать реальное значение  $V_t$  в атмосфере звезды. Соответствующие регрессии для Fe I и Fe II для первого компонента при  $V_t = 1.60$  км/с представлены на Рис. 3. В Табл. 7 представлены коэффициенты соответствующих регрессий, посчитанных для разных значений микротурбулентных скоростей в атмосферах каждого из компонентов 12 Per.

Полученные коэффициенты показывают, что микротурбулентные скорости в атмосферах компонентов 12 Per равны  $V_{\text{turb1}} = 1.60$  км/с и  $V_{\text{turb2}} = 2.30$  км/с для первого и второго компонентов соответственно. Величины содержания железа в Табл. 6 получены при этих значениях скоростей. В Табл. 8 приводятся величины содержаний железа, найденные по линиям Fe I и Fe II для моделей атмосфер при изменении  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$  и  $V_t$ . Первые четыре строки дают величины параметров атмосфер и содержания железа для первого компонента, следующие — для второго.

Данные, представленные в Табл. 8, показывают, что параметры атмосфер компонентов, выбран-

Таблица 6. Содержание железа, измеренное по эквивалентным ширинам линий

Элемент	Количество линий	log N	
		Комп. 1	Комп. 2
Fe I	116	7.79	7.73
Fe II	42	7.79	7.78

ные выше (Табл. 5), дают результаты, наилучшим образом удовлетворяющие ионизационному равновесию для ионов железа, и ошибка определения содержания железа не превышает величины  $\pm 0.15$  dex.

На Рис. 4 построены зависимости величин  $\log N(\text{Fe})$  от длины волны. Как видно из рисунков, содержание железа постоянно при изменении  $\lambda$ , что подтверждает корректность перехода от наблюдаемых значений  $W_{\lambda \text{ obs}}$  к эквивалентным ширинам  $W_\lambda$  в спектре каждого из компонентов.

Таблица 7. Коэффициенты зависимости относительного содержания железа от эквивалентной ширины линии при разных значениях турбулентной скорости для обоих компонентов

$V_t$ , км/с	Fe I		Fe II	
	$k$	$\log N(\text{Fe})_0$	$k$	$\log N(\text{Fe})_0$
Компонент 1				
1.50	+0.00013	7.795	+0.00027	7.769
1.60	-0.00004	7.794	+0.00004	7.735
1.80	-0.00041	7.773	-0.00011	7.730
Компонент 2				
2.20	+0.00006	7.752	+0.00011	7.765
2.30	-0.000001	7.733	+0.00008	7.760
2.50	-0.00012	7.700	-0.00095	7.750

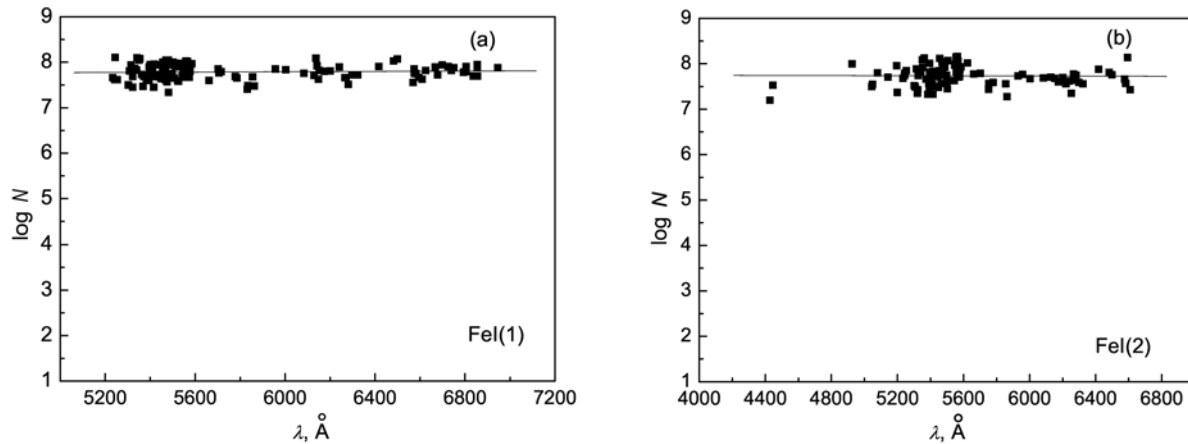


Рис. 4. Зависимости величин  $\log N(\text{Fe})$  от длины волны линии, по которой определялось содержание для первого (а) и второго (б) компонентов.

#### 4.3. Профили линий железа

На Рис. 5 и 6 показано сравнение некоторых теоретических и наблюдаемых участков спектра. Синтетические профили были построены для трех разных содержаний элементов (среднее значение интенсивности спектральных линий на рисунках соответствует содержанию элементов из Табл. 6, уменьшенное значение интенсивности линий соответствует уменьшению содержания элементов на  $-0.5$  dex, и наибольшая интенсивность линий соответствует увеличению содержания на  $+0.5$  dex). Расчеты проводились для двух фаз (0.82 (а) и 0.21 (б)) с разностью лучевых скоростей компонентов ( $V_{r2} - V_{r1}$ ) в 28.1 и  $-24.8$  км/с соответственно (см. Табл. 2). Параметры линий были выбраны из списка VALD [19]. Механиз-

мы уширения спектральных линий учитывались в соответствии с работой [21]. В моделях были приняты турбулентные скорости  $V_{t1} = 1.60$  км/с и  $V_{t2} = 2.30$  км/с. Скорость вращения обоих компонентов  $V_{\text{rot}} = 8.0$  км/с. Синтетический спектр был построен с помощью программы KONTUR [20].

В Табл. 9 приведены параметры линий, которые учитывались при расчетах участков синтетических спектров в окрестностях некоторых линий железа. Здесь же даны и величины содержаний соответствующих элементов, найденные по этим линиям.

Анализ профилей спектральных линий Fe I и Fe II показывает существенный избыток железа в атмосферах компонентов по сравнению с солнечным содержанием. Это подтверждает результаты, полученные по эквивалентным ширинам.

Таблица 8. Содержание железа по разным моделям

$T_{\text{eff}}$	$\log g$	$V_t$	$\log N(\text{Fe})$	
			по Fe I	по Fe II
6547	4.16	1.8	8.00	7.76
6371	4.16	1.8	7.95	7.85
6195	4.16	1.8	7.76	7.79
6195	4.22	1.6	7.79	7.79
6143	4.24	2	7.94	7.88
6000	4.24	2	7.91	7.92
5857	4.24	2	7.76	7.95
6000	4.32	2.3	7.73	7.78

#### 4.4. Содержание C и O

Определение содержаний углерода и кислорода в атмосферах проводилось методом расчетов синтетических спектров в окрестностях линий C I и O I. Методика расчета синтетического спектра аналогична методике расчета синтетических спектров в окрестностях линий железа. Параметры линий для расчета синтетических спектров приведены в Табл. 10. На Рис. 7 представлено сопоставление наблюдаемых и рассчитанных профилей для кислорода.

Содержания элементов при расчетах бралось в виде  $\log N = \log N_0 + \Delta \log N$ , где  $\log N_0$  — значение из Табл. 4, а  $\Delta \log N = -0.3, 0, +0.3$ , то есть в два раза меньше, равно и в два раза

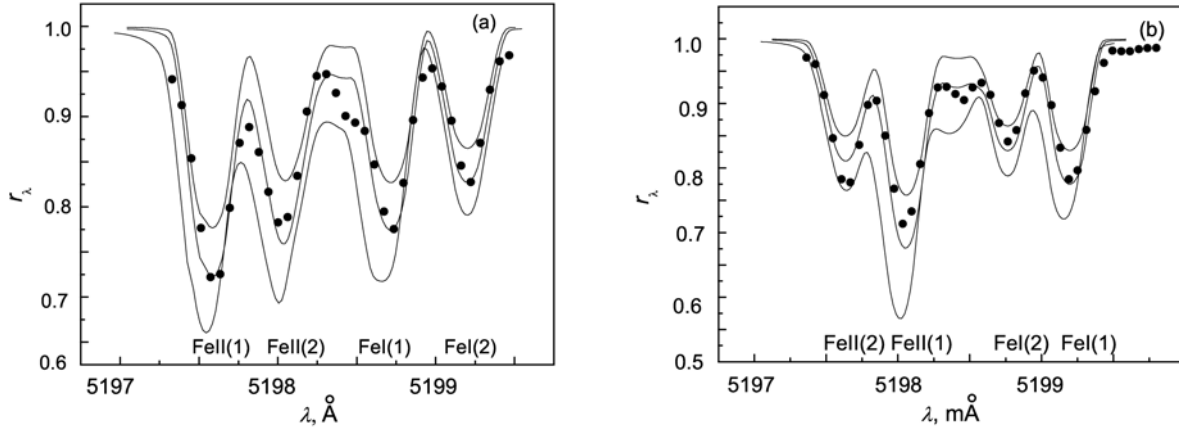


Рис. 5. Сравнение теоретических (линии) и наблюдаемых (точки) участков спектра в окрестностях линии Fe II 5197.6 Å для двух фаз: (a) — фаза 0.82, (b) — фаза 0.21.

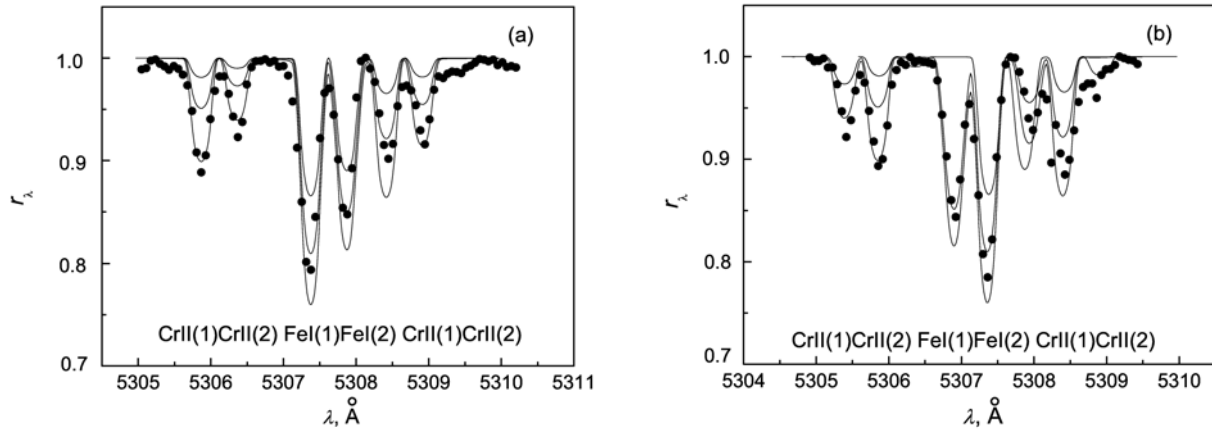


Рис. 6. То же, что и на Рис. 5, для линии Fe I 5307.4 Å.

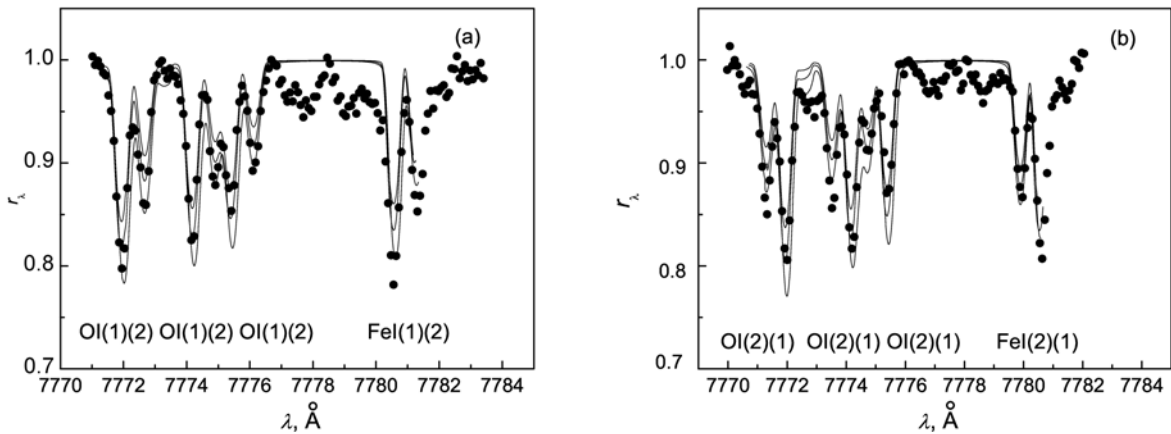
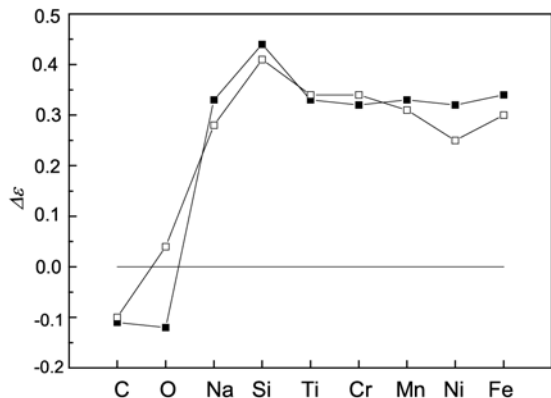
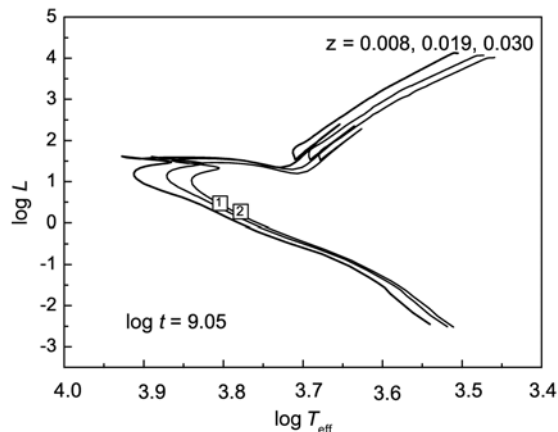


Рис. 7. То же, что и на Рис. 5, для линий O I 7771–7775 Å.



**Рис. 8.** Сопоставление содержаний элементов в атмосферах компонентов 12 Peg с солнечными значениями,  $\Delta\varepsilon = \log N_* - \log N_\odot$ . Темные значки — компонент 1, светлые — компонент 2.



**Рис. 9.** Положение компонентов 12 Peg на изохронах эволюционных треков для  $t = 1.12$  млрд лет и разных значений содержаний металлов  $z$ .

больше содержания, принятого для модели атмосферы. Рассчитанные профили линий достаточно хорошо представляют наблюдения и позволяют оценить содержание каждого из элементов. Средние содержания углерода и кислорода для компонентов 1 и 2 составляют:

$$\log N(\text{C})_1 = 8.28, \quad \log N(\text{C})_2 = 8.29,$$

$$\log N(\text{O})_1 = 8.54, \quad \log N(\text{O})_2 = 8.70.$$

#### 4.5. Содержание некоторых металлов в атмосферах компонентов

Для оценки содержаний натрия, кремния, титана, хрома, марганца и никеля были использованы как расчеты профилей спектральных линий (Табл. 9, Рис. 5–7), так и измерения их эквивалентных ширин. Значения содержаний, полученные по эквивалентным ширинам, приведены в Табл. 11.

Практически все элементы в атмосферах компонентов имеют повышенное содержание, что видно на Рис. 8, где сравнивается содержание элементов в атмосферах компонентов 12 Peg и Солнца.

### 5. ЭВОЛЮЦИОННЫЙ СТАТУС КОМПОНЕНТОВ

С учетом светимостей компонентов,  $L_1 = 3.17 \pm 0.10 L_\odot$  и  $L_2 = 1.98 \pm 0.10 L_\odot$ , их положение на эволюционных изохронах [22] с  $\log t = 9.05$  ( $t$  — время эволюции в годах) для звезд с металличностями  $z = 0.008, 0.019$  и  $0.030$  представлено на Рис. 9. Значения температур ( $T_{\text{eff}1} = 6195 \pm 200$  К,  $T_{\text{eff}2} = 6000 \pm 200$  К) и масс ( $M_1 = 1.38 \pm 0.15 M_\odot$  и  $M_2 = 1.24 \pm 0.15 M_\odot$ )

уверенно указывают возраст системы  $t = 1.12$  млрд лет и повышенную металличность ( $z = 0.035$ ). За прошедшие 1.12 млрд лет компоненты прошли около трети своей эволюции на главной последовательности и увеличили свои радиусы от  $R_1 = 1.29 R_\odot$  до  $R_1 = 1.55 R_\odot$  для первого компонента и от  $R_2 = 1.19 R_\odot$  до  $R_2 = 1.31 R_\odot$  для второго.

### 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компоненты системы имеют близкие массы слегка больше солнечных. Возраст компонентов близок к стадии полного выгорания водорода в CNO цикле. По химическому составу компоненты системы можно отнести к сверхметаллическим звездам.

Полученные данные для содержания железа в атмосферах каждого из компонентов системы показывают полное выполнение ионизационного равновесия в атмосферах, что с одной стороны свидетельствует о точности найденных параметров атмосфер, а с другой подтверждает точность определения содержаний. Кроме того, эти же данные позволяют утверждать о верности найденных величин микротурбулентных скоростей в атмосферах и наличии достоверного различия этих величин для компонентов системы. Содержание других элементов, представленное на Рис. 8, показывает увеличенное вдвое, по сравнению с солнечным, содержание всех элементов, кроме азота и кислорода. И если различие в содержаниях кислорода на 0.15 dex в атмосферах компонентов можно отнести к ошибкам определения, то совпадение  $\log N(\text{C})$  с дефицитом в 0.1 dex может быть следствием работы CNO цикла и перемешивания вещества в звездах системы.



**Таблица 9.** Параметры линий и содержания элементов для участков синтетического спектра в окрестностях линии железа

Ион	$\lambda, \text{\AA}$	$\log gf$	$\varepsilon_i, \text{eV}$	$\log N$	
				Комп. 1	Комп. 2
<b>Fe II 5197.6 \AA</b>					
Cr I	5197.098	-2.69	3.847	5.63	5.63
<b>Fe II</b>	5197.577	-2.1	3.23	7.63	7.63
Fe I	5197.938	-1.64	4.301	7.63	7.63
Ti I	5198.12	-3.178	3.399	4.95	4.95
Co I	5198.125	-3.847	4.395	4.88	4.88
VI	5198.131	-4.754	2.575	3.96	3.96
Cr I	5198.398	-1.383	4.447	5.63	5.63
Cr II	5198.531	-4.61	6.805	5.63	5.63
<b>Fe I</b>	5198.711	-2.135	2.223	7.63	7.63
<b>Fe I 5242.5 \AA</b>					
Cr I	5240.104	-6.048	3.101	5.63	5.63
Ti I	5242.096	-2.346	3.691	4.95	4.95
<b>Fe I</b>	5242.491	-0.967	3.634	8.10	8.10
Cr I	5242.569	-4.429	3.122	5.63	5.63
VI	5242.973	-2.668	3.827	3.96	3.96
Cr I	5243.364	-0.567	3.395	5.63	5.63
Ti I	5243.466	-3.243	2.305	4.95	4.95
<b>Fe I</b>	5243.777	-1.15	4.256	8.10	8.10
Ni I	5243.798	-2.452	3.706	6.21	6.21
Ni I	5244.936	-2.921	4.419	6.21	6.21
<b>Fe I 5307.4 \AA</b>					
Cr I	5305.014	-6.385	3.125	5.63	5.63
<b>Cr II</b>	5305.853	-2.357	3.827	6.15	6.15
Cr I	5306.847	-3.602	3.011	5.63	5.63
Mn II	5307.351	-2.072	7.053	5.35	5.35
<b>Fe I</b>	5307.361	-2.987	1.608	7.90	7.90
<b>Cr II</b>	5308.408	-1.846	4.071	5.80	5.80
<b>Ti I</b>	5308.428	-3.777	0.826	5.10	5.10
Cr II	5308.904	-3.04	6.282	5.63	5.63

**Таблица 9.** (Продолжение)

Ион	$\lambda, \text{\AA}$	$\log gf$	$\varepsilon_i, \text{eV}$	$\log N$	
				Комп. 1	Комп. 2
Mn I	5308.921	0.302	5.405	5.35	5.35
<b>Fe I 5434.5 \AA</b>					
Ti I	5432.793	-3.003	3.727	4.95	4.95
<b>Ti I</b>	5432.889	-3.086	2.495	5.45	5.45
<b>Fe I</b>	5434.524	-2.122	1.011	7.55	7.55
Co I	5434.566	-1.62	4.175	4.88	4.88
VI	5434.59	-4.51	2.316	3.96	3.96
<b>Fe I 5525.5 \AA</b>					
Ti I	5524.1	-3.29	3.44	4.95	4.95
Co I	5524.98	-0.53	4.11	4.88	4.88
<b>Fe II</b>	5525.12	-3.95	3.26	7.65	7.70
V II	5525.42	-4.42	2.38	3.96	3.96
<b>Fe I</b>	5525.47	-2.86	4.21	7.65	7.80
<b>Fe I</b>	5525.54	-1.08	4.23	7.65	7.80
Co I	5525.66	-2.37	3.53	4.88	4.88
Y I	5526.1	-0.65	2.63	2.20	2.20
<b>Sc II</b>	5526.79	1.06	1.77	3.56	3.56
<b>Fe I 6065.5 \AA</b>					
Ti I	6064.63	-1.94	1.05	4.95	4.95
VI	6064.66	-4.02	3.23	3.96	3.96
<b>Fe I</b>	6065.48	-1.53	2.61	7.63	7.60
Ti I	6066.48	-3.69	3.15	4.95	4.95
<b>Fe I 6420.0 \AA</b>					
VI	6418.73	-2.06	2.12	3.96	3.96
Ti I	6419.09	-1.66	2.17	4.95	4.95
<b>Fe I</b>	6419.95	-0.24	4.73	8.10	8.10
VI	6420.16	-1.31	2.68	3.96	3.96
Ti I	6420.25	-2.21	3.2	4.95	4.95
<b>Fe I</b>	6421.35	-2.03	2.28	7.90	7.90
Ni I	6421.5	-1.19	4.16	6.45	6.45

**Таблица 10.** Параметры линий для расчета синтетических спектров в области линий C I и O I

Ион	$\lambda, \text{\AA}$	$\log gf$	$\varepsilon_i, \text{eV}$	$\log N$	
				Комп. 1	Комп. 2
<b>C I 5039.1 \AA</b>					
Ti I	5038.40	1.03	1.43	4.90	4.90
Ni I	5038.59	-0.22	3.83	6.41	6.21
C I	5039.06	-1.79	7.95	8.33	8.33
Cr I	5039.08	-1.99	3.01	5.73	5.83
C I	5039.10	-2.25	7.95	8.33	8.33
Fe I	5039.18	-2.33	4.28	7.70	7.80
Fe I	5039.25	-1.57	3.37	7.75	7.85
Ni I	5039.37	-1.15	3.63	6.36	6.43
C I	5040.13	-2.30	7.95	8.23	8.25
<b>C I 5380.3 \AA</b>					
Fe I	5379.57	-1.51	3.69	7.63	7.63
C I	5380.34	-1.84	7.69	8.25	8.25
Ti II	5381.01	-1.97	1.57	5.05	5.05
Co I	5381.77	-0.03	4.14	5.08	5.08
<b>O I 7771–7775 \AA</b>					
O I	7771.94	0.37	9.15	8.56	8.70
Fe I	7772.60	-2.03	5.07	7.93	7.93
O I	7774.16	0.22	9.15	8.61	8.74
O I	7775.39	0.00	9.15	8.46	8.66
Fe I	7780.55	-0.45	4.47	7.88	7.83

**Таблица 11.** Содержание некоторых элементов, измененное по эквивалентным ширинам линий

Элемент	Количество линий	$\log N$	
		Комп. 1	Комп. 2
Na I	4	6.50	6.45
Si I	11	7.95	7.92
Ti I	19	5.26	5.21
Ti II	11	5.15	5.21
Cr I	13	5.96	6.01
Mn I	4	5.72	5.70
Ni I	29	6.55	6.48

Скорости вращения компонентов системы на экваторе (при  $v \sin i = 8 \text{ км/с}$  и  $i = 126^\circ 77'$ ) имеют величину в  $10 \text{ км/с}$ , что дает периоды вращения вокруг оси  $7^{\text{d}} 89$  ( $R_1 = 1.55 R_\odot$ ) для первого компонента и  $6^{\text{d}} 66$  ( $R_2 = 1.31 R_\odot$ ) — для второго, что существенно меньше периода обращения по орбите ( $331^{\text{d}}$ ). Вращение компонентов системы вокруг своих осей в настоящий момент существенно быстрее, чем угловое движение их по орбите. Можно предположить в качестве одной из возможностей, что в начальный период эволюции скорость вращения компонентов системы вокруг своих осей была существенно больше, чем теперь, и в момент рождения была близка к скорости, определяемой условием устойчивости ( $V_{\text{rot}} = (GM/R)^{1/2}$ ), что для звезды с  $M = 1.3 M_\odot$  составляет  $439 \text{ км/с}$ .

Допустим, что в начальный период система имела близкую к круговой орбиту с радиусом, равным  $r = a(1 - e) = 66 \times 10^6 \text{ км}$  (современное значение большой полуоси орбиты  $a = 193 \times 10^6 \text{ км}$ ), и компоненты со скоростями вращения существенно выше теперешних. Через приливные балджи часть вращательной энергии компонентов передается орбитальному моменту, что ведет к увеличению периода и большой полуоси орбиты (подобно тому, как часть вращательного момента Земли передается орбитальному моменту Луны, что вызывает ежегодное увеличение расстояния Земля–Луна на  $38 \text{ мм}$  и замедление вращения Земли на  $23 \text{ мкс}$  в год). Такой механизм передачи энергии обсуждался в работах Струве и др. [23] и Шапрон и др. [24]. При высоких эксцентриситетах может иметь место псевдосинхронизация орбитального движения, когда в момент прохождения периастра компоненты повернуты друг к другу одной и той же стороной. (Такой эффект наблюдается, в частности, в системе  $41 \text{ Drg}$  с эксцентриситетом  $e = 0.975$  [25].)

Для  $12 \text{ Per}$  величины орбитальных энергий ( $E_{\text{orb}} = -GM_1 M_2 / 2a$ ) в начальный момент и сейчас, соответственно равны  $-0.34 \times 10^{47} \text{ эрг}$  и  $-0.12 \times 10^{47} \text{ эрг}$ , следовательно,  $\Delta E_{\text{orb}} = 0.22 \times 10^{47} \text{ эрг}$ . Если это увеличение орбитальной энергии обусловлено передачей части вращательной энергии компонентов через приливное взаимодействие в энергию движения по орбите, то можно оценить начальную энергию вращения компонентов ( $E_{\text{rot}} = 0.2MR^2\omega^2$ ). Тогда  $E_{\text{rot}} = 10^{47} \text{ эрг}$  для каждого из компонентов, что дает для них скорость вращения  $V_{\text{rot}} \approx 130 \text{ км/с}$ . Такая скорость вращения не является экстраординарной для звезд  $F8-G2$ ; она существенно ниже скорости, определяемой пределом устойчивости. При принятых условиях периоды вращения компонентов в эпоху формирования системы составляли  $0^{\text{d}} 46$  и  $0^{\text{d}} 42$

для первого и второго компонента соответственно, а орбитальный период был равен  $51^d.4$ . За 1.12 млрд. лет жизни системы на главной последовательности период ее первоначально круговой орбиты увеличился в шесть раз, а полуось — в три раза.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки России (грант НШ-5473.2010.2, госконтракты 16.552.11.7028, 16.518.11.7073) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 10-02-01167-а). В работе использовалась астрономическая база данных SIMBAD, поддерживаемая центром CDS в Страсбурге, Франция.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. J. Barlow, C. D. Scarfe, and F. S. Fekel, *Astronom. J.* **115**, 2555 (1998).
2. R. B. Gardiner, F. Kupka, and B. Smalley, *Astronom. and Astrophys.* **347**, 876 (1999).
3. W. W. Campbell and W. H. Wright, *Astrophys. J.* **12**, 254 (1900).
4. A. Colacevich, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **47**, 284 (1935).
5. A. Colacevich, *Oss. Mem. Oss. Astrofis. Arcetri* **59**, 15 (1941).
6. A. Duquennoy and M. Mayor, *Astronom. and Astrophys.* **248**, 485 (1991).
7. H. A. McAlister, *Astrophys. J.* **223**, 526 (1978).
8. B. Smalley, R. B. Gardiner, F. Kupka, and M. S. Bessell, *Astronom. and Astrophys.* **395**, 601 (2002).
9. D. Pourbaix, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **145**, 215 (2000).
10. W. G. Bagnuolo, J. S. F. Taylor, H. A. McAlister, et al., *Astronom. J.* **131**, 2695 (2006).
11. Ф. А. Мусаев, Г. А. Галазутдинов, А. В. Сергеев и др., *Кинематика и физика неб. тел* **15**, 282 (1999).
12. V. E. Panchuk, I. D. Najdenov, V. G. Klochkova, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 127 (1998).
13. Г. А. Галазутдинов, *Препринт САО РАН* **92**, (1992).
14. A. Alonso, S. Arribas, and C. Martinez-Roger, *Astronom. and Astrophys.* **313**, 873 (1996).
15. F. van Leeuwen, *Astronom. and Astrophys.* **474**, 653 (2007).
16. В. Страйжис, *Звезды с дефицитом металлов* (Моклас, Вильнюс, 1982).
17. D. Shulyak, V. Tsymbal, T. Ryabchikova, et al., *Astronom. and Astrophys.* **428**, 993 (2004).
18. В. В. Цимбал (частное сообщение).
19. F. Kupka, N. E. Piskunov, T. A. Ryabchikova, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **138**, 119 (1999).
20. V. V. Leushin, G. P. Topil'skaya, *Astrophysics* **22**, 74 (1985).
21. Yu. Yu. Balega, V. V. Leushin, G. Weigelt, *Astron. Rep.* **49**, 217 (2005).
22. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **141**, 371 (2000).
23. O. Struve, B. Lynds, and H. Pillans, *Elementary Astronomy* (Oxford Univ. Press, N.Y., 1959).
24. J. Chapront and M. Chapront-Touze, *Celestial Mech. and Dynamical Astron.* **66**, 31 (1996).
25. A. Tokovinin, Yu. Yu. Balega, E. A. Pluzhnik, et al., *Astronom. and Astrophys.* **409**, 245 (2003).

## Chemical Composition of the Atmosphere and Evolutionary Status of the Spectroscopic and Speckle-Interferometric Binary 12 Persei

Yu.Yu. Balega, V.V. Leushin, M.K. Kuznetsov

The system 12 Per is a spectroscopic and speckle-interferometric binary with the components of similar spectral classes. The parameters of its orbit were determined quite accurately over nearly a century of observations. To refine the atmospheric abundances of its components and their evolutionary status, we obtained the spectra of the star in the 3500–9600 Å spectral region using the echelle spectrometers of the 6-m BTA telescope of the SAO RAS and 2-m Zeiss-2000 telescope at Terskol Peak. Based on the luminosities ( $L_1 = 3.02 L_\odot$ ,  $L_2 = 1.86 L_\odot$ ) and effective temperatures ( $T_{\text{eff}1} = 6195$  K and  $T_{\text{eff}2} = 6000$  K) we have estimated the evolutionary status of the system's components. The age of the system is 12.1 Byr, the components are at the stage of hydrogen burning near the zero-age main sequence. The resulting element abundances in the atmospheres of 12 Per components indicate enhanced metallicity of both stars:  $[\text{Fe}/\text{H}] \geq 0.35$ . We consider a scenario in which the initially circular short-period orbit of the pair turns into an eccentric large-period orbit due to the transfer of angular momentum of the components to the angular momentum of orbital motion over one billion years.

Keywords: *stars: abundances—stars: binaries: spectroscopic—stars: evolution—stars: individual: 12 Per*