

УДК 524.35-327

## ЗВЕЗДЫ С РАЗЛИЧАЮЩИМИСЯ ВЕЛИЧИНАМИ $v \sin i$ , ОПРЕДЕЛЕННЫМИ ПО ЛИНИЯМ Ca II $\lambda 3933 \text{ \AA}$ и Mg II $\lambda 4481 \text{ \AA}$ . V. HD 182255 и HD 214923 — SPB-ЗВЕЗДЫ В ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ<sup>1</sup>

© 2016 Ю. Зверко<sup>1</sup>, И. Романюк<sup>2</sup>, И. Илиев<sup>3</sup>, Д. Кудрявцев<sup>2</sup>, И. Статева<sup>3</sup>, Е. Семенко<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт астрономии, Татранска Ломница, 05960 Словакия<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>3</sup>Национальная астрономическая обсерватория «Рожен», София, 1784 Болгария

Поступила в редакцию 02 Ноября 2015 года; принята в печать 14 Марта 2016 года

Осевое вращение звезды играет важную роль в ее эволюции, влияет на физические условия в ее атмосфере и на вид ее спектра. Мы проанализировали ПЗС-спектры двух звезд, у которых проекции скорости вращения, полученные по линиям Ca II  $\lambda 3933 \text{ \AA}$  и Mg II  $\lambda 4481 \text{ \AA}$ , значительно отличаются. Мы оценили проекцию скорости вращения HD 182255 как  $15.5 \text{ км с}^{-1}$ , хотя ширины линий в разных спектрах этой звезды могут соответствовать значениям до  $28.5 \text{ км с}^{-1}$ . Мы нашли, что линия He I  $\lambda 4471.498 \text{ \AA}$  смещена в длинноволновую область спектра на  $0.046 \text{ \AA}$ , указывая таким образом на присутствие изотопа  $^3\text{He}$  в атмосфере этой звезды с отношением  $^3\text{He} : ^4\text{He}$  от 0.2 до 0.6. Мы также обнаружили абсорбционную особенность в месте расположения запрещенной линии He I  $\lambda 4470.02 \text{ \AA}$ . Линии Mg II и C II, возникающие на более высоких возбужденных уровнях, отсутствуют в спектрах HD 182255. Для HD 214923 мы определили значение проекции скорости вращения  $v \sin i = 165 \text{ км с}^{-1}$  по профилям линий металлов и Ca II  $\lambda 3933 \text{ \AA}$ , тогда как для линий гелия больше подходит значение  $v \sin i \approx 130 \text{ км с}^{-1}$ . По результатам анализа лучевых скоростей мы получили три длинных периода порядка 105, 34 и 15 дней, а также короткий период, составляющий около 22 часов, что близко к значению пульсационного периода, приведенного ранее в литературе.

Ключевые слова: *звезды: химически пекулярные — звезды: вращение — звезды: индивидуальные: HD 182255, HD 214923*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В данной серии работ мы исследуем спектры звезд классов светимости III–V, для которых значения проекций скоростей вращения сильно отличаются в зависимости от того, какие спектральные линии использовались для их определения. В четырех предыдущих статьях мы проанализировали 14 из 24 звезд B7–A0 в списке. В работе [1] мы исследовали двойную звезду HD 2913 (ADS 449A) и впервые выявили спектральные линии ее вторичного компонента. В работе [2] мы изучили HD 90569, у которой исторические значения лучевых скоростей говорят о том, что звезда является очень долгопериодической двойной; мы

также подтвердили ее статус химически пекулярной звезды. В работе [3] мы исследовали звезды, у которых значения  $v \sin i$ , измеренные по линии Ca II-K, в целом меньше, чем те, что измерены по линии Mg II. Низкое значение проекции скорости вращения, полученной по Ca II-K, было связано с присутствием в линии межзвездной компоненты. В работе [4] мы проанализировали спектры трех звезд. У первой звезды, HD 8837, присутствуют линии оболочки, которые ответственны за низкое значение  $v \sin i$ ; две другие звезды, HD 47964 и HD 183986, являются двойными. В случае двойных звезд различие значений  $v \sin i$  связано, в основном, с наложением спектров компонентов.

### 2. НАБЛЮДЕНИЯ

ПЗС-спектры были получены в Национальной астрономической обсерватории (НАО) в Рожене, Болгария, и в Специальной астрофизической обсерватории РАН (САО), Нижний Архыз, Россия.

<sup>1</sup>По спектроскопическим наблюдениям на 6-м телескопе САО РАН и на 2-м телескопе Болгарской национальной астрономической обсерватории, а также по данным публичных архивов спектрографов ELODIE и SOFIE.

Спектры НАО с разрешением  $R = 22\,000$  были получены с матрицей Photometrics AT200 CCD размером  $1024 \times 1024$  пиксела в третьем порядке куде-спектрографа 2-м телескопа системы Ричи–Кретьена–куде. Область Ca II простирается от 3898 до 3967 Å, а область Mg II — от 4447 до 4550 Å. Для обработки спектров использовались стандартные процедуры пакета IRAF<sup>2</sup>. Спектры CAO были получены на 6-метровом телескопе БТА с помощью либо эшелле-спектрометра НЭС, оборудованного камерой ПЗС  $2048 \times 2048$  пикселей [5], дающей разрешение  $R = 43\,000$  в спектральном диапазоне 4226–5654 Å, либо с помощью Основного звездного спектрографа (ОЗСП), оборудованного зеемановским анализатором и камерой ПЗС  $2048 \times 2048$  пикселей, с разрешением  $R = 15\,000$  в спектральном диапазоне 4453–4695 Å. Для обработки спектров CAO использовались контекст ZEEMAN, основанный на наборе процедур ESO MIDAS [6], и пакет REDUCE [7]. Кадры ОЗСП содержат две спектрограммы с круговой поляризацией, которые могут быть сложены для повышения отношения  $S/N$  в случае отсутствия магнитного поля в звезде. Также использовались спектры из архивов ELODIE и SOFIE, находящиеся в открытом доступе.

Для вычислений синтетических спектров, детальных профилей линий и для определения содержания элементов путем сравнения с наблюдаемыми линиями была использована программа SYNSPEC [8, 9]. ЛТР-модели атмосфер были интерполированы по сетке моделей Кастелли и Куруча [10]. Данные по атомным линиям были взяты из баз VALD [11–14], NIST [15] и работы [16].

Значения эффективных температур и ускорений сил тяжести на поверхности были получены с использованием программ UVBYBETA [17] и TEFFLOGG [18] по данным  $uvby\beta$ , взятым из SIMBAD. Поправки содержания элементов там, где они указаны, выражены относительно солнечного химического состава [19].

Лучевые скорости были определены методом кросс-корреляции [20] либо с использованием синтетических спектров, либо, в случаях, когда имелись дополнительные спектры, например, спектры НАО в области Ca II  $\lambda 3933$  Å, с использованием суммарных спектров в качестве шаблона.

<sup>2</sup>IRAF распространяется Национальной обсерваторией оптической астрономии (NOAO), управляемой Ассоциацией университетов для исследований в астрономии (AURA) в рамках совместного соглашения с Национальным научным фондом США (NSF).

### 3. АНАЛИЗ

#### 3.1. HD 182255

HD 182255 (V377 Vul=HR 7358=HIP 95260; В6III,  $V = 5.19$ ) является хорошо изученной, медленно пульсирующей звездой класса В в двойной системе. Проекция скорости вращения  $v \sin i$ , по оценкам Палмера и др. [21], полученным по линии Ca II  $\lambda 3933$  Å, составляет  $75 \text{ км с}^{-1}$ , а согласно Вольффу и Престону [22], которые использовали линию Mg II  $\lambda 4481$  Å, она составляет  $25 \text{ км с}^{-1}$ . Дэй [23] приводит  $v \sin i = 16 \text{ км с}^{-1}$ , а Слеттебак получил  $45 \text{ км с}^{-1}$  [24].

Хоффлайт и Варрен [25] указывают на переменную лучевую скорость со средним значением  $-12 \text{ км с}^{-1}$  в каталоге ярких звезд. Вольфф [26] получил среднюю лучевую скорость  $-24 \text{ км с}^{-1}$  по восьми значениям, меняющимся в внутри интервала в  $15 \text{ км с}^{-1}$  с периодом  $P < 15$  дней. Дюкс и др. [27] нашли орбитальный период величиной около одного года по спектроскопическим данным и три пульсационных частоты величиной около одного дня. Валчак и др. [28] провели самый детальный анализ, по результатам которого были найдены две доминантные пульсационные частоты.

Глаголевский и др. [29] исследовали HD 182255 как быстро осциллирующую Ар-звезду (гоАр-звезда) и нашли, что спектральная переменность центральных интенсивностей H $\delta$  и He I  $\lambda 4026$  Å связана с вращением звезды, и включили ее в список звезд, бедных гелием. Воклер и др. [30, 31] описали распределение гелия и кремния по поверхности звезды, а Дюкс и др. [27] показали, что химический состав звезды нормален для В-звезд на главной последовательности.

Используемые спектры перечислены в таблице 1.

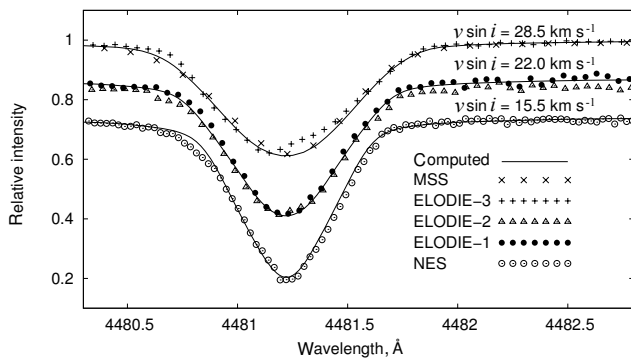
##### 3.1.1. Физические параметры, синтетические спектры

Значения эффективных температур и ускорений сил тяжести на поверхности, определенные разными авторами, распределены в относительно узком интервале. Фитцпатрик и Масса [32] получили  $T_{\text{eff}} = 14\,650 \text{ К}$  и  $\lg g = 4.19$ , Моленда и Полубек [33] приводят  $T_{\text{eff}} = 14\,355 \text{ К}$ ,  $\lg g = 4.24$ , а Зорек и др. [34] дают  $T_{\text{eff}} = 15\,350 \pm 850 \text{ К}$ .

Пользуясь индексами  $uvby\beta$  из баз SIMBAD и VizieR, мы получили  $T_{\text{eff}} = 14\,380 \text{ К}$  и  $\lg g = 4.17$ . При значении микротурбулентности, равном  $\xi = 0 \text{ км с}^{-1}$ , мы аппроксимировали линии He I  $\lambda 4471$  Å и Mg II  $\lambda 4481$  Å в спектре ОЗСП, немного увеличив содержание гелия и магния (в 1.1 и 2.5 раза соответственно).

Таблица 1. Список спектров и измеренные лучевые скорости HD 182255

Спектр	HJD 2450000+	$S/N$	$RV$ , $\text{км с}^{-1}$	Комментарий	Спектр	HJD 2450000+	$S/N$	$RV$ , $\text{км с}^{-1}$
ELODIE	2541.2929	100	$-5.4 \pm 1.9$	EL(1), H & металлы	NAO	6465.4502	95	$-29.5 \pm 0.4$
	2541.3276	151	$-5.9 \pm 1.8$	EL(2)		6466.4513	90	$-28.0 \pm 0.5$
	2962.3485	512	$+7.1 \pm 1.4$	EL(3)		6468.4461	80	$-27.4 \pm 0.5$
MSS	5021.3125	890	$-28.9 \pm 0.2$	область 4481 Å		6494.5109	95	$-36.6 \pm 0.4$
NES	4964.3520	180	$-28.2 \pm 0.2$	металлы		6527.4218	100	$-36.0 \pm 0.4$
NAO	6412.4818	95	$-24.0 \pm 0.6$	Ca II-K		6528.4388	95	$-35.5 \pm 0.4$
	6437.4935	95	$-26.2 \pm 0.3$			6613.1966	115	$-26.7 \pm 0.3$

Рис. 1. Профили линии Mg II  $\lambda$  4481 Å и их аппроксимация различными значениями  $v \sin i$  в спектрах HD 182255.

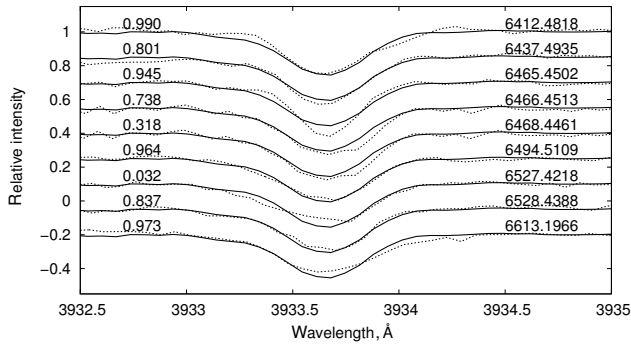
Помимо линии Mg II  $\lambda$  4481 Å, линии Mg II, возникающие на уровнях  $2p^6 4p$  (9.996 eV), также демонстрируют повышенное содержание магния, тогда как линии с уровней  $2p^6 4d$  и  $2p^6 4f$  (11.569 eV) отсутствуют во всех наших спектрах. Нужно отметить отсутствие четырех линий C II между 4735 и 4748 Å, существующих на уровне  $2s^2 p$  (13.715 eV), тогда как две линии около 3920 Å, имеющиеся на уровне  $2s^2 3p$ , две линии на 4267 Å с уровня  $2s^2 3d$  и две линии около 6580 Å, появляющиеся на уровне  $2s^2 3s$  (14.449 eV), присутствуют. В спектрах NAO также отсутствует линия He I  $\lambda$  3926 Å.

### 3.1.2. Проекция скорости вращения

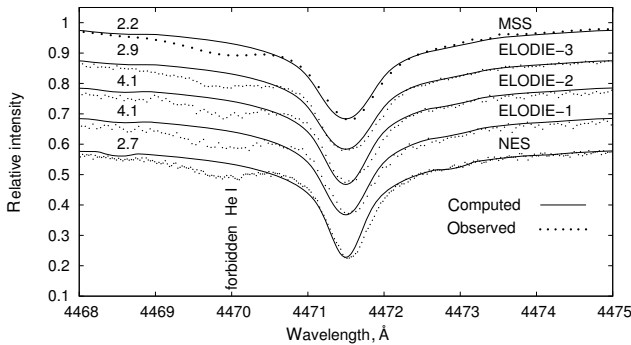
Прежде всего, сравнивая наблюдаемые спектры ОЗСП и ELODIE с очень высокими отношениями  $S/N$  с вычисленным спектром, мы получили оценку  $v \sin i = 28.5 \text{ км с}^{-1}$ . При этом остальные наблюдаемые спектры можно аппроксимировать гораздо меньшими значениями. Для профилей линий на двух других спектрах ELODIE под-

ходит значение  $v \sin i = 22 \text{ км с}^{-1}$ , тогда как для спектра НЭС лучшей оценкой является значение  $v \sin i = 15.5 \text{ км с}^{-1}$  (см. рис. 1).

Вместе с тем звезда является спектральной переменной. Глаголевский и др. [29] исследовали ее как запятненную CP-звезду, профили линий которой варьируются по мере вращения звезды. Они нашли, что центральные интенсивности линий Hδ и He I  $\lambda$  4026 Å переменны; также было обнаружено, что интенсивность линий кремния Si II  $\lambda$  4128 и  $\lambda$  4130 Å варьируется с периодом  $P = 1^d.26$ , что соответствует частоте  $f_2 = 0.8923/d$ , приведенной в работе Дюкса и др. [27]. Возникновение переменности спектральных линий из-за вращения приводит к деформации профилей, и в зависимости от сложности структуры поверхности запятненной звезды, ширины и глубины линий могут меняться. Меняющийся профиль Ca II  $\lambda$  3933 Å показан на рис. 2 в серии спектров NAO. Здесь показаны отдельные профили, а также средний спектр, полученный путем сложения индивидуальных. Фаза, вычисленная по эфемериде Глаголевского и др. [29], показана слева от каждого спектра, а его HJD 2450000+ приводится справа. Различия между отдельными спектрами очевидны; самое заметное из них — разность между двумя спектрами на близких фазах 0.990 и 0.032. Кальций тем не менее обычно не создает пятнистой структуры на поверхности CP-звезды, поэтому в данном случае могут играть роль факторы помимо переменности, связанной с вращением. Аналогично в порядке эксперимента мы сравнили вариации профилей с двумя самыми вероятными частотами на предмет фазовых корреляций, а также с пульсационной и суммарной частотами, однако ни с одной из частот связь не обнаружена. Тем не менее такой анализ возможен с большим количеством спектров Ca II, а



**Рис. 2.** Линия Ca II  $\lambda 3933 \text{ \AA}$  в спектре HD 182255. Для каждого спектра указаны фазы вращения (слева) и HJD 2450000+ (справа). Пунктирными линиями показаны наблюдаемые спектры, сплошными — суммарный спектр.

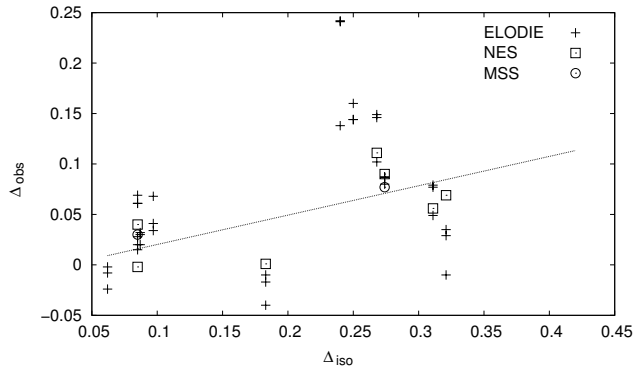


**Рис. 3.** Изотопный сдвиг линии He I  $\lambda 4471 \text{ \AA}$  у HD 182255. Наблюдаемые спектры сдвинуты на величину лучевой скорости, измеренной в области Mg II (с доминирующей линией Mg II  $\lambda 4481 \text{ \AA}$ ). Слева отмечены изотопные сдвиги в  $\text{км с}^{-1}$ .

также с лучшим фазовым покрытием и отношением  $S/N$ .

### 3.1.3. Линия He I $\lambda 4471 \text{ \AA}$

При исследовании спектров около Mg II  $\lambda 4481 \text{ \AA}$  мы обнаружили различие между лучевыми скоростями, определенными по He I  $\lambda 4471 \text{ \AA}$  и по Mg II  $\lambda 4481 \text{ \AA}$ , которое присутствует на всех спектрах данной области и варьируется от  $+2.2$  до  $+4.1 \text{ км с}^{-1}$  (см рис. 3). Сдвиг линий гелия в более длинноволновую область указывает на наличие изотопа  $^3\text{He}$  в атмосфере звезды. Фрэд и др. [35] вычислили сдвиги линий  $^3\text{He}$  относительно линий, возникающих в  $^4\text{He}$ . Линии, возникающие в синглетных термах, демонстрируют большие сдвиги, чем линии, возникающие в триплетных термах, тогда как наклон линии регрессии прямо пропорционален отношению  $^3\text{He}:(^3\text{He}+^4\text{He})$ . Мы исследовали двенадцать линий He I между 4000 и



**Рис. 4.** Корреляция между вычисленными и наблюдаемыми сдвигами линий  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  в спектре HD 182255.

$6700 \text{ \AA}$ : семь синглетов и пять триплетов. Линии и их вычисленные и наблюдаемые сдвиги перечислены в таблице 2, а корреляция между вычисленными и наблюдаемыми сдвигами  $\Delta_{\text{iso}}$  и  $\Delta_{\text{obs}}$  показана на рис. 4. Линия регрессии задается выражением  $\Delta_{\text{obs}} = 0.009(\pm 0.020) + 0.291(\pm 0.091)\Delta_{\text{iso}}$ , которое приводит к соотношению  $^3\text{He} : ^4\text{He}$  от 0.2 до 0.6. Несмотря на сильный разброс значений, особенно для линий синглетных термов (рис. 4), мы делаем вывод, что в атмосфере HD 182255 присутствует по крайней мере некоторое количество  $^3\text{He}$ .

Кроме того, в районе запрещенной линии He I  $\lambda 4470.02 \text{ \AA}$  на рис. 3 явно видна особенность. Запрещенные линии возникают в очень разреженном газе, что явно не подходит для случая гиганта класса B6III; мы предполагаем наличие протяженной атмосферы — возможного продукта пульсаций и наличия компаньона в двойной системе.

### 3.2. HD 214923

HD 214923 ( $\zeta \text{ Peg} = \text{HR } 8634 = \text{HIP } 112029$ ; B8V,  $V = 3.40$ ) является двойной звездой с ярким компонентом ADS 16182A и более слабым (на  $8^{\text{m}}9$ ) компонентом на расстоянии  $64''3$ . В каталоге ярких звезд [25] отмечена переменная лучевая скорость  $+7 \text{ км с}^{-1}$ , а в базе SIMBAD приводятся шесть значений между  $4.0$  и  $10.2 \text{ км с}^{-1}$ . Гебель [36] обнаружил, что  $\zeta \text{ Peg}$  является малоамплитудной, медленно пульсирующей звездой класса B, осциллирующей в нерадиальной  $g$ -моды с периодом  $P \approx 0^{\text{d}}95633$ . Будучи очень яркой, эта звезда была часто использована в качестве стандартной звезды во многих исследованиях.

Мы включили эту звезду в наши исследования из-за различий в значениях  $v \sin i$ , оцененных по двум разным спектральным линиям, а именно: Палмер и др. [21] получили  $v \sin i = 180 \text{ км с}^{-1}$  по

Таблица 2. Наблюдаемые сдвиги линий He I у HD 182255

Линия, Å	$\Delta_{\text{iso}}$ , Å	$\Delta_{\text{obs}}$ , Å					Терм
		EL(1)	EL(2)	EL(3)	НЭС	ОЗСП	
4009.256	0.240	0.139	0.242	0.241			S
4026.191	0.087	0.020	0.030	0.032			T
4120.815	0.087	0.041	0.068	0.034			T
4143.761	0.250	0.144	0.160	0.144			S
4387.930	0.268	0.149	0.146	0.149	0.111		S
4437.551	0.272	0.080	0.087	0.087	0.090	0.077	S
4471.480	0.085	0.061	0.061	0.061	0.040	0.030	T
4713.146	0.084	0.028	0.020	0.069	-0.002		T
4921.931	0.311	0.079	0.077	0.049	0.056		S
5015.678	0.183	-0.010	-0.017	-0.040	-0.010		S
5047.739	0.321	0.035	0.029	-0.010	0.069		S
5875.621	0.062	-0.002	-0.008	-0.024			T

Таблица 3. Список спектров и измеренных лучевых скоростей HD 214923

Спектр	HJD	$S/N$	$RV$ , км с <sup>-1</sup>	Комментарий	Спектр	HJD	$S/N$	$RV$ , км с <sup>-1</sup>	Комментарий
	2450000+					2450000+			
ELODIE	0292.5192	14	-6.3 ± 4.1	H $\alpha$ -H $\delta$	NAO	6494.5698	85	+12.0 ± 3.5	
	1779.4527	408	-1.4 ± 0.6	H, Mg, He		6527.5376	157	-17.2 ± 2.7	
	2245.2417	220	+29.5 ± 1.4	H, Mg, He		6528.5360	137	+0.7 ± 4.1	
	3320.3978	199	+27.7 ± 1.6	H, Mg, He		6586.3048	101	(+20) ± 4.5	
MSS	5075.4517	1600	+9.2 ± 0.5			6587.3545	97		
	6972.2188	254	+8.2 ± 0.6			6588.3271	103	+4.2 ± 3.7	
	6972.2236	225	+10.8 ± 0.6			6613.2306	150	+16.8 ± 3.1	
	6973.2660	384	+6.9 ± 0.5			6640.2256	300	-0.9 ± 5.8	
NES	5109.3604	226	+10.2 ± 2.5	H, He		6641.2089	263	+18.4 ± 3.3	
NAO	6468.5463	144	+22.5 ± 6.5			6642.2075	181	+12.4 ± 3.4	

линии Ca II  $\lambda 3933$  Å, тогда как Вольфф и Престон [22] приводят значение  $v \sin i = 125$  км с<sup>-1</sup>, полученное по линии Mg II  $\lambda 4481$  Å. Помимо спектров, перечисленных в таблице 3, мы также использовали четырнадцать спектров из архива SOFIE.

### 3.2.1. Физические параметры, синтетические спектры

Значения эффективных температур и ускорений сил тяжести на поверхности, определенные в разных источниках, приведены в таблице 4. Межесье [37] получил значение эффективной температуры с помощью  $UBV$ - и  $uvby$ -фотометрии и отношений интенсивностей линии Si II к Si III, тогда как

Таблица 4.  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$  из литературы и в данной работе

Метод	$T_{\text{eff}}, \text{K}$	$\lg g$	Источник
$UBV$ , $wby$ , Si II/Si III	12 000	3.25	[37]
$c_0$ и $\beta$ -индексы	11 320	3.62	[38]
$wby$	11 200	3.73	[39]
аппроксимация потоков	11 218	4.00	[40]
$UBVRIJHK$ , Geneva, $wby\beta$ , 2MASS	11 190	3.67	[32]
$H\gamma$	11 927	3.858–3.991	[41]
аппроксимация спектров	11 597	3.93	[42]
$wby\beta$	11 060	3.42	данная работа

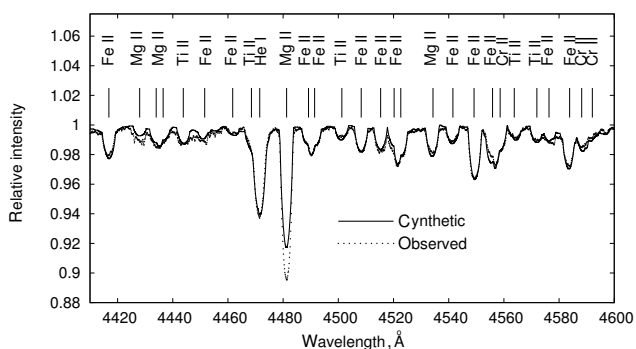


Рис. 5. Сравнение наблюдаемого спектра ОЗСП звезды HD 214923 в области  $\text{Mg II } \lambda 4481 \text{ \AA}$  со спектром, смоделированным для нулевой микротурбулентности, солнечного химсостава и  $v \sin i = 165 \text{ км с}^{-1}$ . Самая заметная особенность — различие между глубинами наблюдаемого и вычисленного профилей линии  $\text{Mg II } \lambda 4481 \text{ \AA}$ .

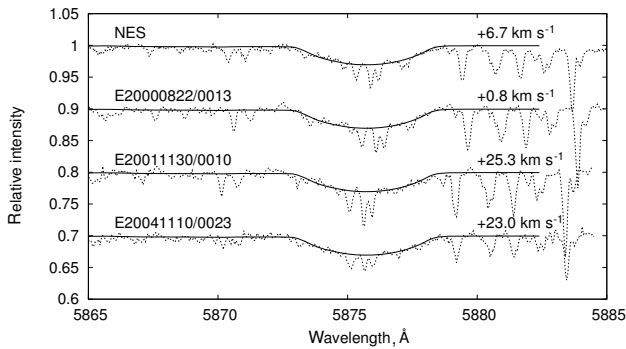
поверхностное тяготение было получено по профилям  $H\gamma$  и  $H\delta$ . Каstellли [38] использовал индексы  $c_0$  и  $\beta$ . Леон [39] использовал  $wby$ -фотометрию. Мальянини и Мороси [40] использовали метод аппроксимации потоков. Фитцпатрик и Масса [32] применили  $UBVRIJHK$ -,  $wby\beta$ -, Женевскую и 2MASS-фотометрии. Хуанг и Гайс [41] аппроксимировали профиль  $H\gamma$ , а Ву и др. [42] аппроксимировали наблюдения модельными спектрами. Значения  $T_{\text{eff}}$  простираются от 11 060 до 12 000 К, а значения  $\lg g$  — от 3.25 до 4.0.

Мы вычислили  $T_{\text{eff}} = 11\,060 \pm 130 \text{ К}$  и  $\lg g = 3.42 \pm 0.05$ , пользуясь четырьмя разными наборами индексов  $wby\beta$  из базы SIMBAD и применяя программы UVBYBETA [17] и TEFFLOGG [18]. Ошибки формальны, они вычислялись стандартными операциями. Далее модели атмосфер были интерполированы по сетке Каstellли и Куруча [10]. Теоретические спектры

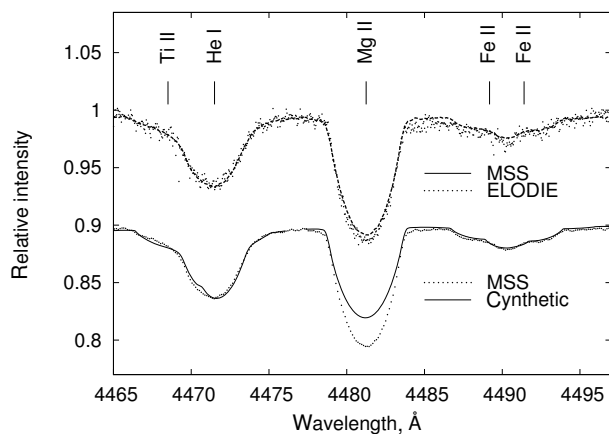
были вычислены для нулевой микротурбулентности и при нескольких различных значениях проекции скорости вращения. Тогда как линии большинства химических элементов аппроксимировались нормальным химическим составом, для хорошей аппроксимации линии  $\text{Ca II } \lambda 3933 \text{ \AA}$  его понадобилось уменьшить в два раза. Процедура аппроксимации не удалась для линии  $\text{Mg II } \lambda 4481 \text{ \AA}$ . С нормальным содержанием магния наблюдаемый профиль глубже вычисленного (см. рис. 5). В целом значение  $v \sin i = 165 \text{ км с}^{-1}$  лучше всего подходит для слабых линий металлов в этой области, а также для линии  $\text{Ca II } \lambda 3933 \text{ \AA}$  в спектрах НАО. Это значение, однако не подходит для линии  $\text{He I } \lambda 4471 \text{ \AA}$ . Для этой линии было использовано значение  $v \sin i = 135 \text{ км с}^{-1}$ , что соответствует значению  $v \sin i = 130 \text{ км с}^{-1}$ , полученному для  $\text{He I } \lambda 5875 \text{ \AA}$  в спектрах НЭС и ELODIE (см. рис. 6). На рис. 7 разности показаны в деталях. При попытках достигнуть лучшего соответствия между наблюдаемым и вычисленным профилями линии  $\text{Mg II}$ , мы обнаружили, что увеличение избытка магния в два раза недостаточно и, в то же время, вычисленные слабые линии  $\text{Mg II } \lambda 4434$ ,  $\lambda 4436$  и  $\lambda 4534 \text{ \AA}$  становятся сильнее наблюдаемых с увеличением избытка. Фитцпатрик и Масса [32] оценили микротурбулентность в  $1.6 \text{ км с}^{-1}$ , однако, это значение тоже не подходит, более того, вычисленные профили оставшихся линий становятся глубже наблюдаемых (см. рис. 8). Противоречивость профиля линии  $\text{Mg II } \lambda 4481 \text{ \AA}$  может быть связана с пульсациями, однако мы не обнаружили никаких вариаций в профиле линии при сравнении четырех имеющихся спектров.

### 3.2.2. Лучевые скорости

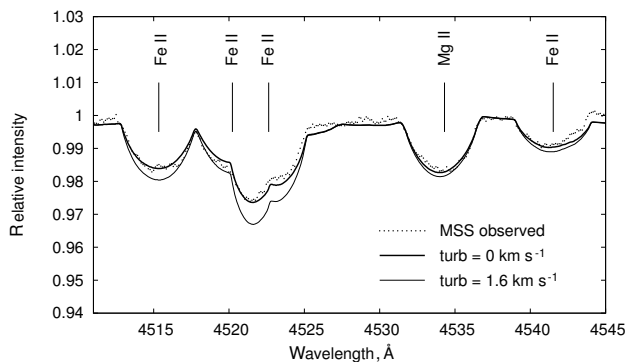
Как правило, мы вычисляли лучевую скорость путем кросс-корреляции наблюдаемого и синтетиче-



**Рис. 6.** Линия He I  $\lambda$  5875 Å в спектре HD 214923. Значение  $v \sin i = 130 \text{ км с}^{-1}$  находится в согласии со значением для линии He I  $\lambda$  4471 Å.



**Рис. 7.** Близкая окрестность Mg II  $\lambda$  4481 Å. Вверху: сравнение спектров ELODIE и MSS с отношениями  $S/N = 408$  и  $1600$  соответственно. Внизу: аппроксимация спектра ОЗСП вычисленным. Синтетический спектр составлен из двух частей: значение  $v \sin i = 135 \text{ км с}^{-1}$  было использовано для линии He I, тогда как для  $\lambda > 4477 \text{ Å}$  было взято  $v \sin i = 165 \text{ км с}^{-1}$ .



**Рис. 8.** Детальная иллюстрация эффекта увеличения микротурбулентности до  $v_{\text{micro}} = 1.6 \text{ км с}^{-1}$  на слабых линиях металлов в спектре HD 214923.

ского спектров. В случае с бальмеровскими линиями были использованы ядра в пределах  $\pm 2 \text{ Å}$  от центральной длины волны. Для линии He  $\lambda$  5875 Å был использован отрезок от 5870 до 5879 Å.

По нашим наблюдениям длительностью в 174 дня мы получили значение от  $-17.2$  до  $+18.4 \text{ км с}^{-1}$  для Ca по спектрам НАО. Спектры ОЗСП охватывают 1898 дня и дают от  $+6.9$  до  $+10.8 \text{ км с}^{-1}$ . Спектр НЭС дает  $+10.2 \text{ км с}^{-1}$ .

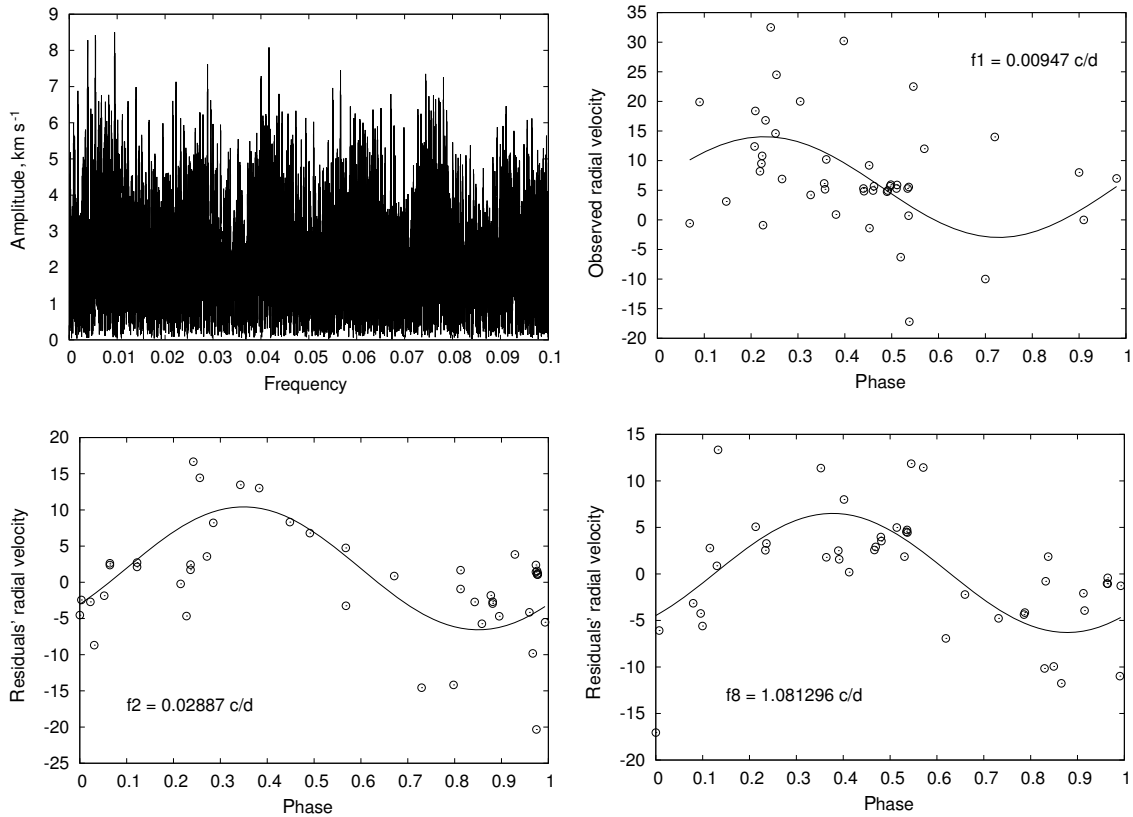
Помимо наших трех наборов спектров, мы воспользовались двумя архивными наборами из баз данных ELODIE и SOFIE, находящимися в открытом доступе, а также двумя наборами имеющихся в литературе данных.

В публичном архиве ELODIE имеются четыре спектра, охватывающие 3028 дней, с лучевыми скоростями от  $-6.3$  до  $+29.5 \text{ км с}^{-1}$ ; в архиве SOFIE есть четырнадцать спектров по 343 дням с лучевыми скоростями от  $+4.8$  до  $+6.1 \text{ км с}^{-1}$ . Лучевые скорости были получены по области в  $250 \text{ Å}$  вокруг линии Mg II  $\lambda$  4481 Å.

Исторические измерения лучевой скорости HD 214923 простираются до первой декады прошлого века, когда были проведены наблюдения в Йеркской [43] и в Ликской обсерваториях [44]. Данные первой охватывают период в 4832 дня и дают значения от  $-0.6$  до  $+24.5 \text{ км с}^{-1}$ , второй — от  $-10$  до  $+14 \text{ км с}^{-1}$  с длительностью наблюдений 447 дней.

В то время как разброс исторических данных, а также данных ELODIE и НАО для Ca, составляет более  $35 \text{ км с}^{-1}$ , данные ОЗСП и SOFIE концентрируются в пределах  $5\text{--}10 \text{ км с}^{-1}$ , хотя длительность наблюдений здесь также составляет сотни дней. Если разброс лучевых скоростей отражает орбитальное движение двойной системы, то данные ОЗСП, а также SOFIE и НЭС соответствуют времени прохождения вблизи узлов орбиты. Кроме того, шесть из четырнадцати значений SOFIE уменьшаются от  $+6.1$  до  $+4.9 \text{ км с}^{-1}$  во время наблюдений длительностью в  $0^{\text{d}}14$ , что может происходить из-за того, что звезда медленно пульсирует (около  $23^{\text{h}}$  по измерениям Гебеля [36]).

Для поиска периодичности данных мы пользовались программой Period04 [45]. В сумме у нас имелось 45 измерений лучевой скорости. Амплитудный спектр до  $1 \text{ с/д}$  не содержит несопоставимых деталей, наоборот, в спектре есть несколько максимумов выше  $8 \text{ км с}^{-1}$ . В области более длинных возможных орбитальных периодов вплоть до частот  $0.1 \text{ с/д}$  самая высокая амплитуда  $8.5 \text{ км с}^{-1}$  приходится на частоту  $f_1 = 0.0094707(2) \text{ с/д}$  ( $105.59(3) \text{ дня}$ ).



**Рис. 9.** HD 214923: амплитуда спектра в пределах 0–0.1 отсч./день (вверху слева); фазовые диаграммы для периодов 105.62 дня ( $f_1 = 0.00947$  c/d) вверху справа, 34.63 дня ( $f_2 = 0.02887$  c/d) внизу слева и 22.2 дня ( $f_8 = 1.081296$  c/d) внизу справа. Сплошной кривой показана аппроксимация данных синусоидой.

После предварительной фильтрации с  $f_1$ , возникает максимум  $f_2$  на частоте 0.0288704 (2) c/d (34.64 (3) дня); повторяя процедуру, получаем частоту  $f_3 = 0.064134$  (1) (15.59 (3) дня). После подбора аппроксимирующей кривой две последних амплитуды также стали выше  $8 \text{ км с}^{-1}$ . Оцененное отношение  $S/N$  амплитудного спектра на этих частотах превышает 3.5, а шум спектра в целом составляет  $2.5 \text{ км с}^{-1}$ . При повторении процедуры мы видим, как плоский амплитудный спектр достигает максимумов, сравнимых со средним отношением  $S/N$ ; однако мы обнаружили частоту  $f_8 = 1.081296$  (2) c/d с амплитудой  $6.4 \text{ км с}^{-1}$  и  $S/N \approx 3$ . Эта частота на удивление близка к пульсационной частоте, найденной Гебелем [36]. Первый амплитудный спектр и три фазовые диаграммы показаны на рис. 9. Наличие этих трех длинных периодов указывает на сложную (кратную) систему, так же, как и наблюдаемые сложные кривые лучевых скоростей, которые показывают очень большой разброс данных.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы исследовали спектры двух звезд с несопадающими проекциями скоростей вращения при измерении по разным спектральным линиям. Ранее было обнаружено, что обе звезды являются медленно пульсирующими звездами класса В [27, 28, 36].

Звезда HD 182255 была идентифицирована как двойная с орбитальным периодом около одного года [27]. В нашем распоряжении были четырнадцать спектров, три из которых были получены из публичного архива ELODIE. Вэс получил эффективные температуры и поверхностные тяготения используя, индексы  $uvby\beta$ . Мы получили оценку слегка увеличенного содержания магния по линиям с уровнями  $2p^64p$  (9.996 eV); однако мы отметили отсутствие линий Mg II, возникающих на уровнях  $2p^64d$  и  $2p^64f$  (11.569 eV). Для углерода и гелия имеются схожие сведения. Наши оценки проекции скорости вращения близки к значениям Вольфа и Престона [22]. При анализе спектров мы получили  $v \sin i = 15.5, 22$  и  $28.5 \text{ км с}^{-1}$  для разных источников. Серия спектров в области Ca II  $\lambda 3933 \text{ \AA}$  показывает переменность профиля этой



линии, которая может быть вызвана пульсациями, а не запятненной поверхностью звезды. Мы распознали смещение профиля линии He I  $\lambda 4471 \text{ \AA}$  в красную область, что указывает на присутствие  $^3\text{He}$  в атмосфере HD 182255; мы получили оценку отношения  $^3\text{He}$  к  $^4\text{He}$  между 0.2 и 0.6.

HD 214923 пульсирует с периодом порядка  $23^{\text{h}}$  [36]. Несмотря на то что исторические наблюдения показывают разброс лучевых скоростей более  $35 \text{ км с}^{-1}$ , ранее двойственность звезды не исследовалась. Мы получили шестнадцать новых спектров HD 214923; они были исследованы вместе с восемнадцатью спектрами из баз данных ELODIE и SOFIE, находящихся в свободном доступе. Мы нашли, что слабые линии, в том числе линии металлов, линия Ca II  $\lambda 3933 \text{ \AA}$  и ядра бальмеровских линий от H $\alpha$  до H $\delta$  можно хорошо описать значением  $v \sin i = 165 \text{ км с}^{-1}$ , тогда как для линий He I  $\lambda 4471 \text{ \AA}$  и  $\lambda 5875 \text{ \AA}$  лучше подходят  $v \sin i = 135$  и  $130 \text{ км с}^{-1}$  соответственно. Линию Mg II  $\lambda 4481 \text{ \AA}$ , с другой стороны, нельзя было аппроксимировать ни одной комбинацией избытка, микротурбулентности и  $v \sin i$ .

Была подтверждена переменность лучевой скорости, заподозренная по историческим наблюдениям, проведенным сто лет назад. Мы обнаружили сложную деталь переменности лучевой скорости с тремя длинными периодами, что предполагает кратную систему, состоящую из яркой главной звезды и трех объектов, которые недостаточно яркие, чтобы оставить линии в спектре. После предварительного отбеливания данных с тремя длинными периодами мы обнаружили период, близкий к пульсационному, найденному Гебелем. Ввиду фотометрической амплитуды пульсации, которая составляет порядка  $0.5 \mu\text{mag}$  [36], амплитуда пульсаций лучевой скорости около  $6 \text{ км с}^{-1}$  представляется неожиданно высокой.

В спектрах из архива SOFIE возможно присутствует слабое указание на пульсационные вариации лучевой скорости. Спектры, однако, не покрывают временной отрезок достаточной длительности, чтобы это было неоспоримо. Тщательное исследование этих спектров в области линии Ca II  $\lambda 3933 \text{ \AA}$  привело к обнаружению слабой межзвездной компоненты с эквивалентной шириной около  $4 \text{ m\AA}$ .

## БЛАГОДАРНОСТИ

При проведении этого исследования использовалась база данных SIMBAD (CDS, Страсбург, Франция), NIST [15] и база атомных данных VALD (Венский университет, Австрия). Работа выполнена при частичной финансовой поддержке

грантов Болгарского национального научного фонда DO 02-85 и DO 02-362, а также грантов Института астрономии для поддержки наблюдений (ИИ, ИС, ИБ). ИР, ДК, ЕС благодарят Российский научный фонд за частичную поддержку работы (грант РФФ № 14-50-00043). ЮЗ благодарит Р. Комзика за поддержку программного обеспечения. Астрономический институт Словацкой академии наук предоставил компьютерное и инструментальное оборудование. Наблюдения на 6-метровом телескопе САО РАН проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.619.21.0004, идентификатор проекта RFMEFI61914X0004).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Zverko, J. Žižňovský, I. Iliev, et al., *Astrophysical Bulletin* **66**, 325 (2011).
2. J. Zverko, I. Iliev, I. Romanyuk, et al., *Astrophysical Bulletin* **67**, 57 (2012).
3. J. Zverko, I. Iliev, I. Romanyuk, et al., *Astrophysical Bulletin* **68**, 57 (2013).
4. J. Zverko, I. Romanyuk, I. Iliev, et al., *Astrophysical Bulletin* **68**, 442 (2013).
5. V. Panchuk, V. Klochkova, M. Yushkin, and I. Najdenov, *J. Opt. Technol.* **76**, 87 (2009).
6. D. O. Kudryavtsev, *Baltic Astronomy* **9**, 649 (2000).
7. N. E. Piskunov and J. A. Valenti, *Astron. and Astrophys.* **385**, 1095 (2002).
8. I. Hubeny, T. Lanz, and C. S. Jeffery, *Newsletter Analysis Astron. Spectra*, No. 20 (1994).
9. J. Krtička, PhD Thesis (1998).
10. F. Castelli and R. L. Kurucz, *IAU Symp.* **210**, A20 (2003).
11. N. E. Piskunov, F. Kupka, T. A. Ryabchikova, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **112**, 525 (1995).
12. T. A. Ryabchikova, N. E. Piskunov, F. Kupka, and W. W. Weiss, *Baltic Astronomy* **6**, 244 (1997).
13. F. Kupka, N. Piskunov, T. A. Ryabchikova, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **138**, 119 (1999).
14. F. G. Kupka, T. A. Ryabchikova, N. E. Piskunov, et al., *Baltic Astronomy* **9**, 590 (2000).
15. A. Kramida, and NIST ASD Team, NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.3), [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/asd> [2016, March 18]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. (2015).
16. W. L. Wiese and J. R. Fuhr, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **38**, 565 (2009).
17. T. T. Moon and M. M. Dworetzky, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **217**, 305 (1985).
18. B. Smalley and M. M. Dworetzky, *Astron. and Astrophys.* **293** (1995).
19. N. Grevesse, M. Asplund, and A. J. Sauval, *Space Sci. Rev.* **130**, 105 (2007).
20. J. Zverko, J. Žižňovský, Z. Mikulášek, and I. K. Iliev, *Contr. Astron. Obser. Skalnaté Pleso* **37**, 49 (2007).

21. D. R. Palmer, E. N. Walker, D. H. P. Jones, and R. E. Wallis, *R. Obs. Bull.* **135**, 385 (1968).
22. S. C. Wolff and G. W. Preston, *Astrophys. J. Suppl.* **37**, 371 (1978).
23. R. W. Day and B. Warner, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **173**, 419 (1975).
24. P. Lenz and M. Breger, *Commun. Asteroseismology* **146**, 53 (2005).
25. D. Hoffleit and W. H. Warren, Jr., *VizieR Online Data Catalog* **5050** (1995).
26. S. C. Wolff, *Astrophys. J.* **222**, 556 (1978).
27. R. J. Dukes, Jr., W. R. Kubinec, A. Kubinec, and S. J. Adelman, *Astron. J.* **126**, 370 (2003).
28. P. Walczak, W. Szewczuk, and J. Daszyńska-Daszkiewicz, *Astronomische Nachrichten* **333**, 1065 (2012).
29. Y. V. Glagolevskij, A. V. Shavrina, and G. A. Chountonov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 460 (2011).
30. S. Vauclair, J. Hardorp, and D. M. Peterson, *Astrophys. J.* **227**, 526 (1979).
31. S. Vauclair, N. Dolez, and D. O. Gough, *Astron. and Astrophys.* **252**, 618 (1991).
32. E. L. Fitzpatrick and D. Massa, *Astron. J.* **129**, 1642 (2005).
33. J. Molenda-Zakowicz and G. Polubek, *Acta Astron.* **54**, 281 (2004).
34. J. Zorec, L. Cidale, M. L. Arias, et al., *Astron. and Astrophys.* **501**, 297 (2009).
35. M. Fred, F. S. Tomkins, J. K. Brody, and M. Hamermesh, *Phys. Rev.* **82**, 406 (1951).
36. J. H. Goebel, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **119**, 483 (2007).
37. C. Mégessier, *Astron. and Astrophys.* **10**, 332 (1971).
38. F. Castelli, *Astron. and Astrophys.* **251**, 106 (1991).
39. F. Leone, F. A. Catalano, and S. Malaroda, *Astron. and Astrophys.* **325**, 1125 (1997).
40. M. L. Malagnini and C. Morossi, *Astron. and Astrophys.* **326**, 736 (1997).
41. W. Huang and D. R. Gies, *Astrophys. J.* **683**, 1045 (2008).
42. Y. Wu, H. P. Singh, P. Prugniel, et al., *Astron. and Astrophys.* **525**, A71 (2011).
43. E. B. Frost, S. B. Barrett, and O. Struve, *Astrophys. J.* **64**, 1 (1926).
44. W. W. Campbell, *Publ. Lick Observatory* **16**, 1 (1928).
45. P. Lenz and M. Breger, *Commun. Asteroseismology* **146**, 53 (2005).

*Перевод Е. Чмырёвой*

## Stars with Discrepant $v \sin i$ as Derived from the Ca II $\lambda 3933 \text{ \AA}$ and Mg II $\lambda 4481 \text{ \AA}$ Lines. V. HD 182255 and HD 214923—SPB Stars in Binary Systems

**J. Zverko, I. Romanyuk, I. Iliev, D. Kudryavtsev, I. Stateva, and E. Semenko**

The axial rotation of a star plays an important role in its evolution, the physical conditions in its atmosphere and the appearance of its spectrum. We analyzed the CCD spectra of two stars for which their projected rotational velocity differs remarkably when derived from Ca II  $\lambda 3933 \text{ \AA}$  and Mg II  $\lambda 4481 \text{ \AA}$  lines. We estimated the projected rotational velocity of HD 182255 to be  $15.5 \text{ km s}^{-1}$ , although in various spectra of this star the line widths correspond to values as high as  $28.5 \text{ km s}^{-1}$ . We found the He I  $\lambda 4471.498 \text{ \AA}$  line to be shifted to longer wavelengths by  $0.046 \text{ \AA}$ , thus indicating a presence of the  $^3\text{He}$  I isotope in the atmosphere of this star with the  $^3\text{He} : ^4\text{He}$  ratio from 0.2 to 0.6. We also found an absorption feature at the position of the forbidden line He I  $\lambda 4470.02 \text{ \AA}$ . We found the lines of Mg II and C II originating from higher excited levels to be missing in the spectra of HD 182255. For HD 214923 we determined the projected rotational velocity  $v \sin i = 165 \text{ km s}^{-1}$  from the profiles of the metallic lines and Ca II  $\lambda 3933 \text{ \AA}$ , whereas for helium lines  $v \sin i \approx 130 \text{ km s}^{-1}$  is more appropriate. Radial velocity analysis results in three long periods of  $\approx 105$ , 34, and 15 days, and a short period of  $\approx 22$  hours, close to the pulsational one mentioned earlier in the literature.

*Keywords:* stars: chemically peculiar—stars: rotation—stars: individual: HD 182255, HD 214923