

УДК 524.35-56

HD 45583 — ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНАЯ ЗВЕЗДА С НЕОБЫЧНОЙ КРИВОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2008 Е. А. Семенко^{1*}, Д. О. Кудрявцев¹, Т. А. Рябчикова², И. И. Романюк¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Институт астрономии РАН, ул. Пятницкая, 48, Москва, 119017 Россия

Поступила в редакцию 3 марта 2008 г.; принята в печать 17 марта 2008 г.

Представлены результаты комплексного исследования химически пекулярной звезды HD 45583. Наблюдения выполнены на спектрографе ОЗСП с анализатором круговой поляризации и эшелле-спектрометре НЭС 6-м телескопа САО РАН. Измерения зеемановских спектров показали, что звезда характеризуется необычной переменностью продольной компоненты магнитного поля: имеется вторичный минимум. Период спектральной и магнитной переменности совпадает с периодом вращения $1^d177000$. Обсуждаются две возможные причины образования вторичного минимума: присутствие пятен повышенного содержания отдельных химических элементов на поверхности звезды или сложная структура магнитного поля. Определены параметры атмосферы ($T_{\text{eff}} = 13000$ К, $\log g = 4.0$) и содержание отдельных элементов: имеется избыток Fe, Si и Cr 1–2 dex, дефицит гелия по сравнению с Солнцем составляет около 2 dex.

1. ВВЕДЕНИЕ

Звезда HD 45583 — член рассеянного скопления NGC 2232 — была впервые отмечена как пекулярная в работе Байдельмана и МакКоннела [1] по результатам спектроскопического обзора звезд неба южного полушария. Ранее Клэриа [2] определил возраст ядра скопления (20 млн. лет) и расстояние до него (360 пк), что хорошо согласуется с расстоянием до звезды в 370 пк, определенным по параллаксу [3]. В дальнейшем возраст скопления $\log t$ неоднократно оценивался в пределах от 20 до 70 млн. лет. В базе данных WEBDA для скопления NGC 2232, которому принадлежит звезда, приведено $\log t = 7.727$, что равно примерно 53 млн. лет. Ландстрит и др. [4] оценивают возраст звезды HD 45583 примерно в 35 млн. лет.

В результате специальных фотометрических исследований, выполненных с узкополосными фильтрами в области депрессии в континууме на 5200 \AA , Майтцен и Фогт [5] определили для звезды среднюю величину параметра Δa (количественной характеристики депрессии) 0.063.

Фогт и Фаундес [6] выполнили фотометрические измерения HD 45583 в системе Стрёмгрена, что позволило оценить ее эффективную температуру.

Периодические изменения блеска звезды (с периодом $1^d177177$) в женеvской системе были впервые обнаружены Нортом [7]. Кривая блеска в различных фильтрах имеет сложную форму и малую амплитуду переменности. Период вращения определить трудно, поэтому в качестве второго вероятного периода Норт привел величину 0^d8672 . Наблюдения в женеvской системе позволили определить среднюю величину Z -параметра (как и Δa — это характеристика депрессии на $\lambda 5200 \text{ \AA}$), равную -0.060 , и предсказать [8] наличие сильного поверхностного поля $B_s = 4.7$ кГс.

Большие индексы Δa и Z указывают на существование сильной депрессии в континууме, поэтому звезда была включена в программу поиска магнитных звезд на 6-м телескопе САО РАН. Первые результаты измерений магнитного поля HD 45583 представлены Кудрявцевым и др. [9].

В настоящей работе мы представляем результаты дальнейших исследований HD 45583, в частности, приводим результаты определения параметров атмосферы звезды и оценку ее химического состава.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА СПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Величина продольного магнитного поля определялась по зеемановским спектрам, полученным на Основном звездном спектрографе 6-м телескопа

Работа основана на данных, полученных на 6-м телескопе САО РАН

*E-mail: sea@sao.ru

Таблица 1. Результаты измерений продольного магнитного поля. Фазы рассчитаны по эфемеридам JD 2453273.074+1^d177000 E

| JD 2450000+ | Фаза | $B_e \pm \sigma$ | JD 2450000+ | Фаза | $B_e \pm \sigma$ |
|-------------|-------|------------------|-------------|-------|------------------|
| 3273.550 | 0.404 | +3060 ± 770 | 3719.394 | 0.201 | +1330 ± 420 |
| 3274.581 | 0.280 | +3850 ± 510 | 3784.416 | 0.445 | +2570 ± 350 |
| 3275.570 | 0.121 | -1650 ± 860 | 3786.285 | 0.033 | -2140 ± 310 |
| 3363.401 | 0.743 | +3780 ± 590 | 3786.417 | 0.145 | -80 ± 400 |
| 3364.323 | 0.527 | +2010 ± 320 | 4015.573 | 0.840 | +90 ± 600 |
| 3365.493 | 0.521 | +2130 ± 330 | 4016.520 | 0.645 | +3330 ± 240 |
| 3667.600 | 0.196 | +1950 ± 280 | 4040.540 | 0.053 | -2500 ± 330 |
| 3717.560 | 0.643 | +4440 ± 480 | 4041.550 | 0.911 | -1670 ± 240 |
| 3717.572 | 0.653 | +3560 ± 340 | 4110.384 | 0.393 | +3350 ± 230 |
| 3718.332 | 0.299 | +3450 ± 230 | 4162.321 | 0.520 | +1480 ± 360 |
| 3718.515 | 0.455 | +1920 ± 470 | 4488.274 | 0.455 | +3470 ± 610 |

САО. Использовался анализатор круговой поляризации в сочетании с резателем изображений и поворотной пластинкой $\lambda/4$ [10]. Спектры с разрешением $R \sim 15000$ регистрировались на ПЗС-матрице размером 2000×2000 элементов. Работа осуществлялась в двух спектральных диапазонах: 4390–4626 Å и 4739–4971 Å.

Данные обрабатывались стандартным методом в системе MIDAS с использованием пакета программ ZEEMAN [11]. Первичная обработка включала в себя построение усредненного кадра электронной подложки (bias) с ее последующим вычитанием из всех рабочих снимков, калибровку по длинам волн с использованием спектра Th-Ag-лампы, экстракцию одномерного спектра и его нормировку на континуум. Для исследования спектральной переменности и анализа химического состава использовалась сумма зеемановских спектров (I -параметр Стокса).

Результаты измерений продольной компоненты магнитного поля представлены в табл. 1. Наблюдения получены в течение более 3-х лет. Хотя близкие по времени измерения удовлетворительно соответствуют периоду $P = 1^d177177$, указанному Нортон [7], более поздние данные смещены по фазе относительно ранее полученных. Весь объем измерений лучше описывается близким периодом $P = 1^d177000$, который мы считаем более точным, поскольку наши данные получены в течение большего времени, чем данные фотометрии. Кривая изменения продольного магнитного поля B_e с фазой периода вращения показана на рис. 1. Одно измерение, приведенное в работе [14], не согласуется с нашими данными, что можно объяснить

как возможной небольшой неточностью периода, так и разницей в методиках измерения магнитного поля, поэтому мы не стали использовать его для уточнения периода.

Указанный нами период также хорошо подтверждается и картиной спектральной переменности звезды. На рис. 2 показаны спектры звезды для различных фаз периода вращения, рассчитанных с периодом $P = 1^d177000$. Видно хорошее соответствие спектров, полученных в близкие фазы. Таким образом, можно наверняка утверждать, что предложенный период является более точным, а кривая продольного магнитного поля показывает двойную волну.

Измерения магнитного поля проводились по линиям металлов (в основном Fe и Cr) в области длин волн 4400–4600 Å. Продольная компонента магнитного поля измерялась по величине смещения между спектральными линиями зеемановских спектров, полученных в правой и левой круговых поляризациях. Для каждого измерения магнитного поля были получены по два зеемановских спектра с различной ориентацией пластинки $\lambda/4$ ($\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$), что позволило менять местами регистрируемые спектры правой и левой круговых поляризаций и компенсировать инструментальные эффекты при последующей обработке. В каждом из спектров удавалось измерить до 15-ти линий. Таким образом, результат измерения продольной компоненты магнитного поля был получен путем усреднения порядка 30-ти измерений отдельных спектральных линий, полученных при двух различных положениях пластинки $\lambda/4$. Для контроля измерений в каждую из ночей регистрирова-

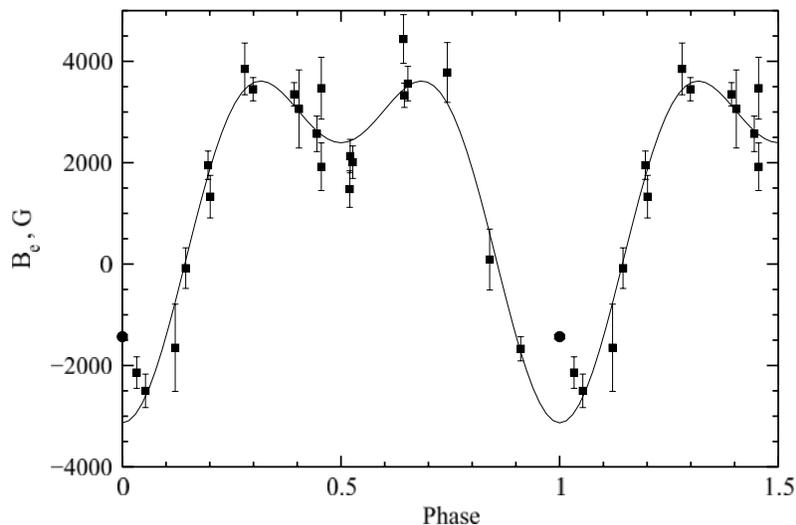


Рис. 1. Кривая переменности продольной компоненты магнитного поля B_e по результатам измерений зеемановских спектров. Крестики — измерение Баньюло и др. [14].

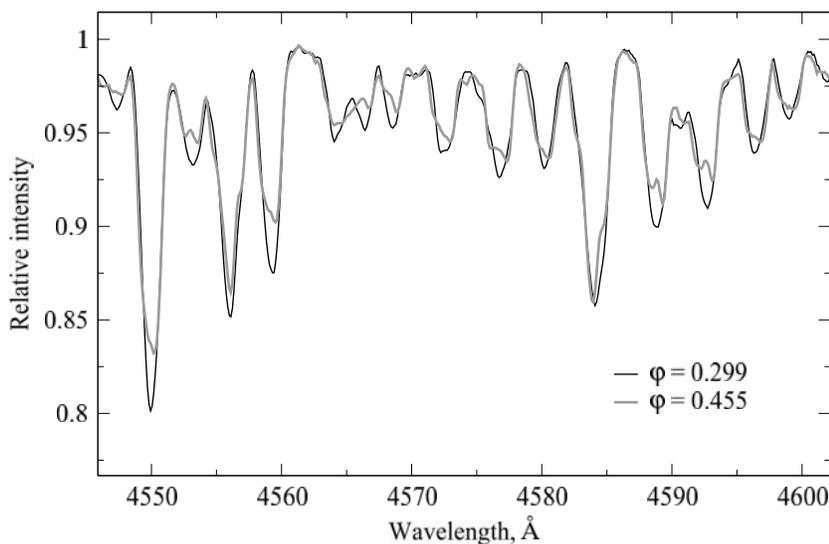


Рис. 2. Картина спектральной переменности HD 45583 с фазой вращения. Период $P = 1^d 177000$.

лись спектры стандартов магнитного поля (53 Cam, γ Equ), а также звезд поздних спектральных классов с нулевым общим магнитным полем.

Два спектра высокого разрешения ($R \approx 40000$) в спектральном диапазоне 4720 – 6180 Å были получены на эшелле-спектрометре НЭС 6-м телескопа [12] с использованием резателя изображений. Эти спектры использованы нами для детального изучения химического состава.

Редукция эшелле-спектров была выполнена с использованием программного пакета REDUCE, написанного на языке IDL [13]. Основные шаги обработки заключались в вычитании электронной подложки bias, коррекции на плоское поле, экстракции одномерных спектров и нормировке на

уровень непрерывного спектра. Калибровка спектров осуществлялась по спектру Th-Ag лампы, как и в случае с зеемановскими спектрами.

3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Магнитное поле HD 45583 впервые было измерено Кудрявцевым и др. [9]. Независимо одно измерение B_e этой звезды было выполнено на 8-м телескопе Европейской южной обсерватории [14]. Имея шесть измерений продольного магнитного поля и зная период звезды $P = 1^d 177177$ [7], Кудрявцев и др. [9] заподозрили, что изменение B_e в течение периода может иметь вид двойной волны.

Позднее наличие двойной волны было подтверждено в работе Кудрявцева и др. [15], где также высказывалось предположение о сложной конфигурации магнитного поля и была представлена модель магнитного поля (комбинация диполя и квадруполь), которая удовлетворительно описывала кривую изменения продольной компоненты. Согласно этой модели, поверхностное поле B_s звезды должно достигать величины 30 кГс.

Последующее моделирование V -параметров Стокса на основании предложенной модели показало плохое соответствие наблюдаемым данным. Отметим, что измерения поверхностного магнитного поля B_s у HD 45583 существенно осложнены быстрым вращением звезды. В следующем разделе будет показано, что моделирование профилей линий наилучшим образом соответствует поверхностному магнитному полю B_s величиной около 5 кГс.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРА

4.1. Параметры атмосферы

Первая попытка изучения химического состава звезды была предпринята Баньюло и др. [16], которые исследовали содержание кремния в звездах — членах рассеянных скоплений. В этой же работе приведена оценка эффективной температуры $T_{\text{eff}} = 13700$ К и ускорения силы тяжести $\log g = 4.1$. В работе Глаголевского [17] приведена оценка температуры HD 45583, полученная по различным фотометрическим индексам, $T_{\text{eff}} = 12900$ К. В настоящей работе мы независимым образом определили основные параметры атмосферы (T_{eff} , $\log g$), а также оценили содержание отдельных элементов в атмосфере звезды.

Для нахождения температуры и $\log g$ мы воспользовались имеющимися результатами фотометрии в женеvской системе и в системе *ubvy*. Последние взяты из оригинальной работы Фогта и Фаундеса [6], фотометрия HD 45583 в женеvской системе доступна в базе данных GCPD ([18], <http://obswww.unige.ch/gcpd/gcpd.html>).

Использование двух калибровок [19] для фотометрической системы Стрёмгрена приводит к несколько различающимся оценкам: согласно зависимости $T_{\text{eff}}(u - b)$, температура равна 12450 К, тогда как, $T_{\text{eff}}(c_1) = 12990$ К. Ранее при определении температур магнитных Ар-звезд мы заметили, что наиболее согласующиеся между собой оценки температур в Стрёмгреневской и Женеvской системах получаются при использовании зависимости $T_{\text{eff}}(u - b)$ [19] и калибровок Хоука и Норта [20], в то время как оценки температур с использованием зависимости $T_{\text{eff}}(c_1)$ систематически отличаются от двух других калибровок. В случае HD 45583 оценка температуры

$T_{\text{eff}}(u - b) = 12450$ К также оказывается ближе к результатам, полученным по Женеvской фотометрии ($T(X, Y) = 12680$ К) с использованием калибровки [21] для звезд с металличностью +1.0 dex и поправки $T_{\text{eff}} = 816 + 0.86 T_{\text{(North)}}$ [20]. Величина температуры, полученной с калибровкой Муна и Дворецкого [22], существенно отличается от приведенных выше оценок и составляет 13980 К. Однако данная калибровка ориентирована на все В-, А- и F-звезды и не учитывает специфику Ар-звезд (наличие химических пекуляриностей и магнитных полей), чем и объясняется столь большое отличие.

Таким образом, фотометрическую оценку эффективной температуры можно взять как среднее между $T_{\text{eff}}(u - b)$ и $T(X, Y)$: $T_{\text{eff}} = 12570$ К. Разброс в величинах $\log g$ по различным фотометрическим калибровкам колеблется в пределах от 4.0 до 4.2.

Дополнительно на спектрографе ОЗСП нами были получены два спектра HD 45583 в области линии водорода H β . Её профиль описывается наилучшим образом в предположении, что температура $T_{\text{eff}} = 13000$ К, $\log g = 4.0$ и $[M/H] = +1.0$ (рис. 3). Принимая во внимание расхождение различных фотометрических оценок и проблемы с содержанием кремния, рассмотренные ниже, мы решили исследовать химический состав звезды для двух случаев. В первом случае примем температуру равной 13000 К в соответствии с величиной, полученной нами при моделировании профиля линии H β . Во втором — температуру примем равной 13500 К, что ближе к оценке, полученной в работе [16].

Согласно работе Левато [23], проекция скорости вращения звезды на луч зрения ($v_e \sin i$) составляет 70 км/с. Наш анализ профилей отдельных линий дает величину $v_e \sin i$ между 70 и 75 км/с. Различия обусловлены значительной спектральной переменностью. В дальнейшем мы использовали $v_e \sin i = 75$ км/с, поскольку в этом случае удастся добиться наилучшего согласия полученных на ОЗСП спектров с расчетными. Однако нельзя исключить того, что мы не полностью учли уширение спектральных линий под влиянием магнитного поля, и тогда величина $v_e \sin i$ может быть меньше.

4.2. Химический состав и спектральная переменность

Содержание отдельных элементов определялось методом синтетических спектров. Расчет моделей атмосферы выполнен с использованием программы ATLAS9 [24]. Профили линий рассчитывались по программе SYNTHMAG [25, 26], которая решает уравнение переноса поляризованного излучения в звездной атмосфере в ЛТР-приближении.

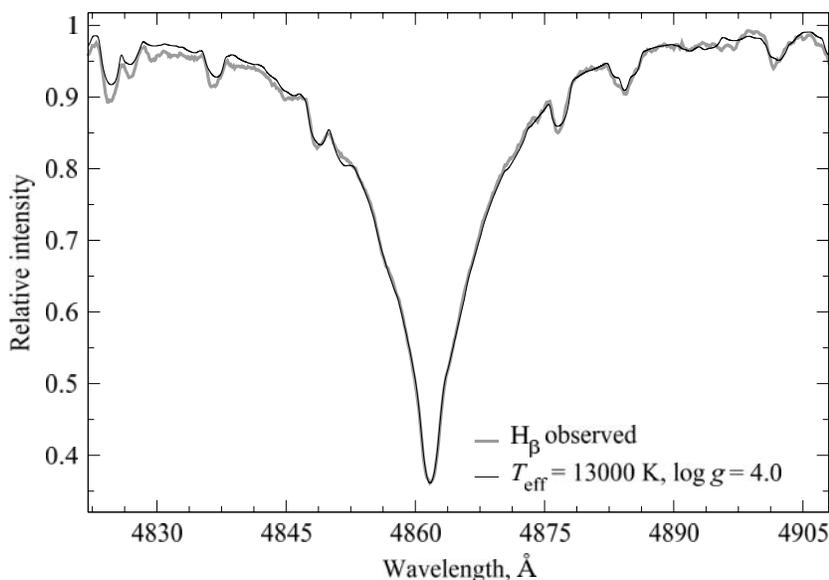


Рис. 3. Сравнение наблюдаемого профиля линии $H\beta$ с синтетическим, параметры которого приведены в тексте.

Анализ теоретических профилей и их сравнение с наблюдаемыми выполнялись с использованием программы ROTATE, написанной Н. Пискуновым.

Атомные параметры линий взяты из последней версии Венской базы данных VALD [27, 28], обновленной в начале 2008 года (см. <http://ams.astro.univie.ac.at/~vald/>). Для линий Fe II и Cr II использовались исправленные результаты расчетов Раассена и Уйлинга [29], также представленные в VALD, а для линий Si II и Si III уточненные силы осцилляторов были взяты из базы данных NIST [30].

Сравнение спектров в разных фазах вращения (рис. 4 и рис. 5) показывает значительную переменность профилей и интенсивности большинства линий. Безусловно, наиболее адекватным методом исследования химии таких звезд является доплер-зеemanовское картирование поверхности (см., например, [31]). Такой анализ будет проведен в дальнейшем, а в данной работе, чтобы выяснить степень химических аномалий в атмосфере HD 45583, мы даем оценку усредненного по поверхности содержания ряда химических элементов в фазах, когда достигаются экстремумы магнитного поля. Для дальнейшего анализа мы используем усредненные спектры в фазах: 0.02 и 0.03 (минимум B_e), 0.52 и 0.53 (вторичный минимум B_e), 0.64 и 0.65 (B_e близко к максимуму). Кроме того, анализировался спектр в фазе $\varphi = 0.15$, примерно соответствующей нулевой величине продольного магнитного поля. Дополнительно использовались два эшелле-спектра ($\varphi = 0.29$ и 0.40) в диапазоне длин волн 4720 – 6180 Å.

При моделировании химического состава атмосферы HD 45583 необходимо учитывать влияние

магнитного поля. К сожалению, быстрое вращение делает невозможным определение поверхностного поля звезды по зеemanовскому расщеплению спектральных линий. Дополнительные трудности возникают из-за спектральной переменности и неоднородного распределения различных элементов по поверхности звезды. В случае таких горячих быстровращающихся звезд как HD 45583, спектральные линии сильно уширены, и при наличии сильного блендирования полученные содержания элементов будут особо чувствительными к неточностям нормировки спектра на уровень континуума.

Для оценки величины магнитного поля мы аппроксимировали профили линий Fe II $\lambda 4520.2$ Å и $\lambda 4522.6$ Å при различных величинах поля B . Обе линии имеют примерно одинаковую интенсивность, а их факторы Ланде равны, соответственно, 1.5 и 0.9. Надо сказать, что в данном случае величина B не является модулем поверхностного поля B_s , а определяется в терминах модели, принятой в SYNTHMAG (подробности см. в работе [26]). Тем не менее, по порядку величины B и B_s близки.

Расчет линий Fe II $\lambda 4520.2$ Å и $\lambda 4522.6$ Å показал, что с ростом величины магнитного поля вторая линия становится более интенсивной и с увеличением B этот процесс ускоряется. В то же время интенсивность линии с большим фактором Ланде не так чувствительна к увеличению магнитного поля, его рост приводит к уширению профиля, тогда как глубина меняется незначительно. Таким образом, по наблюдаемому соотношению интенсивностей обеих линий мы приняли величину поля B равной 5 кГс для всех спектров, по которым определялся химический состав. Близкое значение (4.6 кГс) использовали ранее для HD 45583 Баныюло и др. [14].

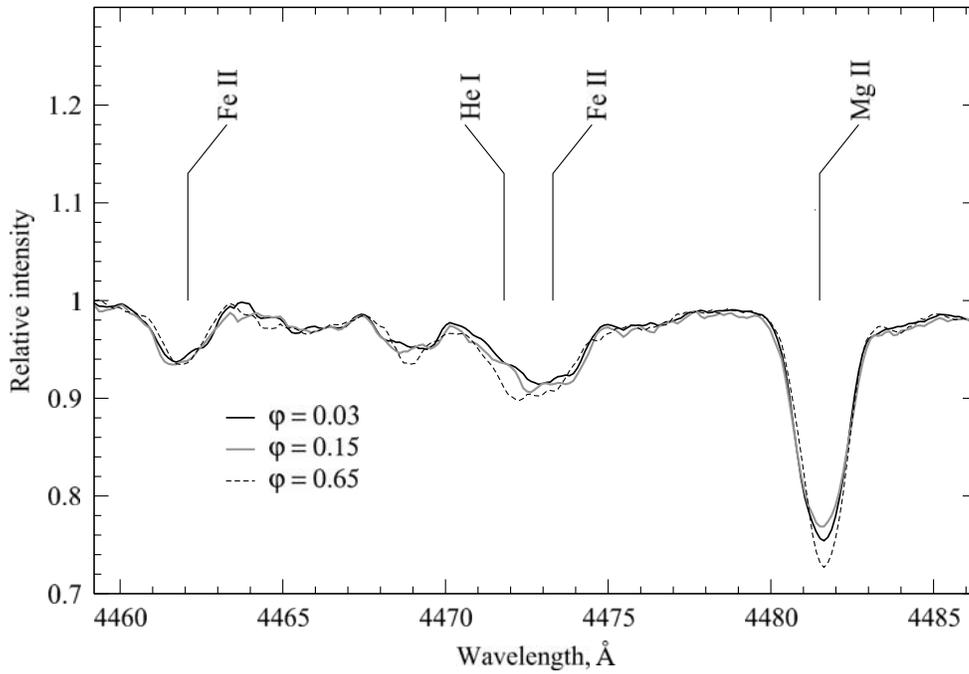


Рис. 4. Переменность спектральных линий гелия и магния в зависимости от фазы вращения.

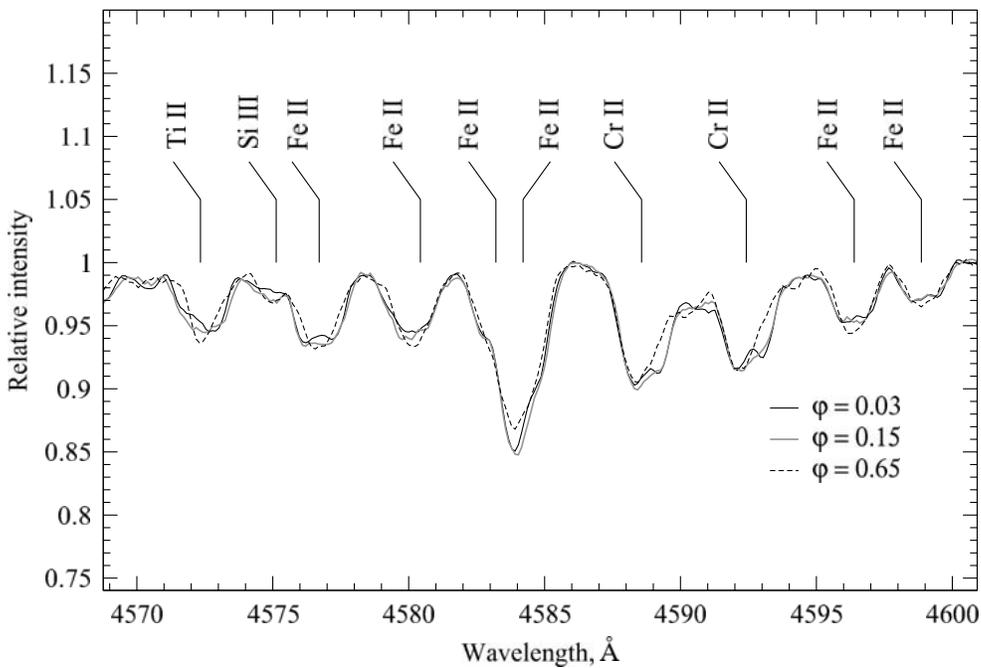


Рис. 5. Переменность спектральных линий в области 4570–4600 Å.

Результаты определения содержания некоторых элементов приведены в табл. 2, где также приведено содержание этих элементов на Солнце. В спектральном диапазоне λ 4400–4623 Å имеется достаточно много линий однократно ионизированного железа, несколько линий Cr II, Mg II и Ti II. Имеется одна линия Si II и три линии Si III.

Остальные элементы (He и Nd) представлены в виде бленд. В спектрах, полученных на НЭС, имеется значительное количество линий Nd III, Cr II, Fe II и Si II. Список линий, использованных для определения химического состава, с указанием бленд приведен в табл. 3. Прокомментируем результаты, полученные для некоторых элементов в предполо-

жении, что $T_{\text{eff}} = 13000$ К. Содержание элементов в случае $T_{\text{eff}} = 13500$ К приведено в табл. 2 и на его анализе мы детально останавливаться здесь не будем.

Гелий. Для измерений в спектральном диапазоне ОЗСП доступна линия He I $\lambda 4471.47$ Å. Несмотря на то, что линия находится в крыле более сильной линии Fe II $\lambda 4472.23$ Å, переменность гелия заметна хорошо (см. рис. 4). Наибольшее ослабление линии наблюдается в момент $\varphi = 0.02$, т. е. когда достигается отрицательный экстремум V_e . С ростом магнитного поля содержание гелия увеличивается. В результате анализа линии He I $\lambda 5875.62$ Å, присутствующей на эшелле-спектрах, мы получили содержание гелия $\log N_{\text{He}}/N_{\text{tot}} = -2.60$ dex.

Магний. Интенсивная линия Mg II $\lambda 4481.13$ Å — основной объект анализа. Глубина профиля в зависимости от фазы вращения меняется значительным образом. Минимальное содержание элемента наблюдается в фазах, соответствующих нулевому продольному полю. Магний — единственный элемент, показывающий наличие магнитного поля в фазе $\varphi = 0.15$, когда абсолютное значение V_e минимально. В спектральном диапазоне $\lambda 4700$ – 6180 Å магний представлен, в основном, в виде blends. Мы анализировали линии $\lambda 4739.59$ Å и 5401.56 Å. Наилучшее согласие достигается при содержании магния -3.65 ... -3.70 dex.

Кремний. Кроме линии Si II $\lambda 4621.72$ Å в спектрах с ОЗСП присутствуют три линии Si III: $\lambda 4552.62$, $\lambda 4567.84$ и $\lambda 4574.76$ Å. Последняя хорошо видна только когда достигается максимум положительной величины магнитного поля. Кроме того, для хорошего согласия наблюдаемых и теоретических профилей линий Si II, и Si III приходится использовать различное содержание кремния ($\log N_{\text{Si}}/N_{\text{tot}}$). Возможное объяснение этого эффекта будет приведено ниже. Содержание кремния меняется с фазой вращения, и когда модуль магнитного поля V_e достигает максимумов, содержание элемента одинаково и равно -3.40 dex. Максимальное количество кремния наблюдается, когда продольное поле равно нулю. Сравнительный анализ спектров в фазах $\varphi = 0.3$ и $\varphi = 0.65$ показал, что линия Si II описывается одинаково хорошо при одинаковом содержании элемента. В среднем избыток кремния в атмосфере HD 45583 по сравнению с Солнцем составляет 1 dex.

Хром. Элемент с спектрах с ОЗСП представлен значительным количеством линий. Как содержания, так и профили спектральных линий меняются

с фазой вращения. О характере изменений можно судить по рис. 5. Изменение формы профиля максимально свободных от блендирования линий свидетельствует о наличии пятен повышенного содержания элемента на поверхности звезды. В среднем избыток хрома по сравнению с солнечным содержанием составляет 2 dex.

Железо. Элемент представлен наибольшим количеством линий в спектре. В зависимости от фазы сильную переменность испытывает форма линий, но содержание железа меняется незначительно. В среднем избыток содержания железа по сравнению с солнечным составляет 1.5 dex. Минимальное значение $\log N_{\text{Fe}}/N_{\text{tot}}$ достигается в момент максимума отрицательного магнитного поля, а наибольшее содержание элемента совпадает с положительным максимумом поля V_e . В эшелле-спектрах нами были использованы только линии, свободные от blends. Содержание железа, полученное по спектрам с НЭС в момент, близкий к максимуму V_e , находится в хорошем соответствии с тем, что дает измерение соответствующих спектров с ОЗСП (см. колонки 5 и 6 табл. 2).

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Объект вызвал интерес в первую очередь необычной формой кривой переменности магнитного поля. В данной работе мы изучили химический состав звезды HD 45583 и попытались установить связь между изменением величины магнитного поля и содержанием некоторых элементов. При интерпретации двойной волны присутствием мультипольных компонент магнитного поля мы столкнулись с определенными трудностями. Глубина вторичного минимума около 1 кГс (см. рис. 1) вынуждает вводить в модель сильные мультипольные компоненты, а это, в свою очередь, ведет к существенному возрастанию ожидаемого поверхностного поля до величины в несколько десятков килогауссов.

В то же время при моделировании спектров с целью определения химического состава величина поверхностного магнитного поля получалась на уровне всего лишь 5 кГс, что чрезвычайно мало для магнитного поля, продольная величина которого достигает 4 кГс. Даже в случае простой дипольной конфигурации, поверхностное поле звезды должно составлять не менее 10 кГс. Более того, в работе [9] было показано, что в некоторых фазах периода наблюдается заметная разница между профилями спектральных линий в левой и правой круговых поляризациях, которую можно интерпретировать как частичное зеemanовское расщепление.

Таблица 2. Содержание отдельных элементов $\log N/N_{\text{tot}}$, определенное в разные фазы вращения. Для сравнения приведены содержания элементов на Солнце. Содержание элементов для случая $T_{\text{eff}} = 13500\text{K}$ приведено в скобках

| Элемент | $\varphi = 0.03$ | $\varphi = 0.15$ | $\varphi = 0.52$ | $\varphi = 0.65$ | $\varphi = 0.35$ | Солнце |
|---------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------|
| He | -3.10 (-3.15) | -3.05 (-3.20) | -2.50 (-2.60) | -2.60 (-2.70) | -2.60 | -1.05 |
| Mg | -4.00 (-4.00) | -4.15 (-4.10) | -3.80 (-3.70) | -3.75 (-3.80) | -3.65 | -4.51 |
| Si | -3.40 (-3.30) | -3.25 (-3.20) | -3.55 (-3.50) | -3.40 (-3.35) | -3.30 | -4.53 |
| Ti | -5.70 (-5.70) | -5.70 (-5.50) | -6.00 (-5.95) | -5.90 (-5.85) | -6.00 | -7.14 |
| Cr | -4.45 (-4.25) | -4.20 (-4.15) | -4.50 (-4.60) | -4.30 (-4.30) | -4.30 | -6.40 |
| Fe | -3.20 (-3.05) | -3.13 (-3.00) | -3.15 (-3.10) | -3.05 (-3.10) | -3.05 | -4.59 |
| Nd | -7.50 | -7.50 | -7.50 | -7.50 | -7.50 | -10.59 |

Таблица 3. Список линий, по которым проводилось определение химического состава атмосферы HD 45583

| Элемент | $\lambda, \text{\AA}$ | Блендирование | Элемент | $\lambda, \text{\AA}$ | Блендирование |
|---------|-----------------------|----------------|---------|-----------------------|---------------|
| Fe II | 4416.83 | Ti II 4417.71 | Cr II | 4616.63 | |
| Fe III | 4419.60 | | Cr II | 4618.80 | |
| Mg II | 4427.99 | | Si II | 4621.72 | |
| Ti II | 4443.80 | Fe II 4444.54 | Cr II | 4697.60 | |
| Fe II | 4455.27 | | Cr II | 4723.34 | |
| Fe II | 4461.71 | | Fe II | 4731.45 | |
| Ti II | 4468.51 | | Mg II | 4739.59 | |
| He I | 4471.47 | Fe II 4471.27 | Nd III | 4788.46 | |
| Fe II | 4472.93 | Nd III 4473.29 | Fe II | 4908.15 | |
| Mg II | 4481.13 | | Nd III | 4927.49 | |
| Fe II | 4489.18 | Ti II 4488.33 | Nd III | 4942.67 | |
| Fe II | 4491.41 | | Fe II | 4990.51 | |
| Fe II | 4493.53 | | Si II | 5041.02 | |
| Ti II | 4501.27 | Fe II 4499.69 | Fe II | 5045.11 | |
| Fe II | 4508.28 | | Si II | 5055.98 | |
| Cr II | 4511.78 | Fe II 4512.06 | Fe II | 5362.89 | |

Таблица 3. Продолжение

| Элемент | λ , Å | Блендирование | Элемент | λ , Å | Блендирование |
|---------|---------------|---------------|---------|---------------|---------------|
| Fe II | 4515.34 | | Fe II | 5387.06 | |
| Fe II | 4520.22 | | Fe II | 5402.06 | Mg II 5401.56 |
| Fe II | 4522.63 | | Fe II | 5465.93 | Si II 5466.89 |
| Ti II | 4529.48 | Fe II 4529.57 | Fe II | 5525.13 | |
| Ti II | 4533.96 | Fe II 4534.17 | Fe II | 5534.85 | |
| Cr II | 4539.60 | | Fe II | 5544.76 | |
| Fe II | 4541.52 | | Fe II | 5549.00 | |
| Fe II | 4549.47 | Ti II 4549.68 | Fe II | 5554.91 | |
| Si III | 4552.62 | | Cr II | 5569.07 | |
| Fe II | 4555.89 | Cr II 4554.98 | Fe II | 5726.56 | |
| Cr II | 4558.65 | | Fe II | 5751.49 | |
| Si III | 4567.84 | | Si II | 5868.44 | |
| Si III | 4574.76 | | He I | 5875.62 | |
| Fe II | 4576.34 | | Si II | 5978.93 | |
| Fe II | 4580.07 | Fe II 4579.53 | Nd III | 5987.68 | |
| Fe II | 4583.84 | | Fe II | 5991.38 | |
| Cr II | 4588.20 | | Fe II | 6049.45 | |
| Cr II | 4592.05 | | Cr II | 6053.47 | |
| Fe II | 4596.02 | | Fe II | 6060.98 | |
| Fe II | 4598.49 | | Fe II | 6103.50 | |

Это говорит о сильном поверхностном поле, особенно если принять во внимание быстрое вращение звезды и широкие спектральные линии ($v \sin i = 75 \text{ км/с}$).

Наиболее вероятным объяснением полученных несоответствий может служить наличие сильных пятен химических элементов на поверхности звезды, которые влияют на оценки как продольного, так и поверхностного магнитных полей, полученных по измерениям линий металлов. На рис. 6 показаны два спектра, полученные в течение одной ночи в фазах 0.299 и 0.455. Спектр в фазе 0.455, близкой ко вторичному минимуму, показывает расщепление спектральных линий, что доказывает наличие сильных пятен на поверхности. Отметим, что это расщепление не может быть интерпретировано как зеемановское, поскольку наблюдается одинаково в левой и правой круговых поляризациях.

Таким образом, вторичный минимум кривой B_e может быть объяснен существованием пятен повышенного содержания химических элементов без

привлечения сильных мультипольных компонент. В пользу этого предположения говорит и небольшая величина модуля поля, полученная при моделировании спектров с целью определения химического состава звезды. Для окончательного решения данного вопроса мы в настоящее время проводим измерения продольной компоненты магнитного поля по линиям водорода, который, в отличие от металлов, равномерно распределен по поверхности звезды. В дальнейшем мы планируем провести детальное картирование поверхности с целью установить настоящее распределение магнитного поля и пятен химических элементов по поверхности звезды.

Поверхностное распределение отдельных элементов в известной мере связано с геометрией магнитного поля. В хорошо известной магнитной звезде $\alpha^2 \text{ CVn}$, картирование которой выполнили Кочухов и др. [32], Si, Cr и Fe образуют кольцеобразные структуры вокруг магнитных полюсов, тогда как Cl, Ti и Nd концентрируются, преимуще-

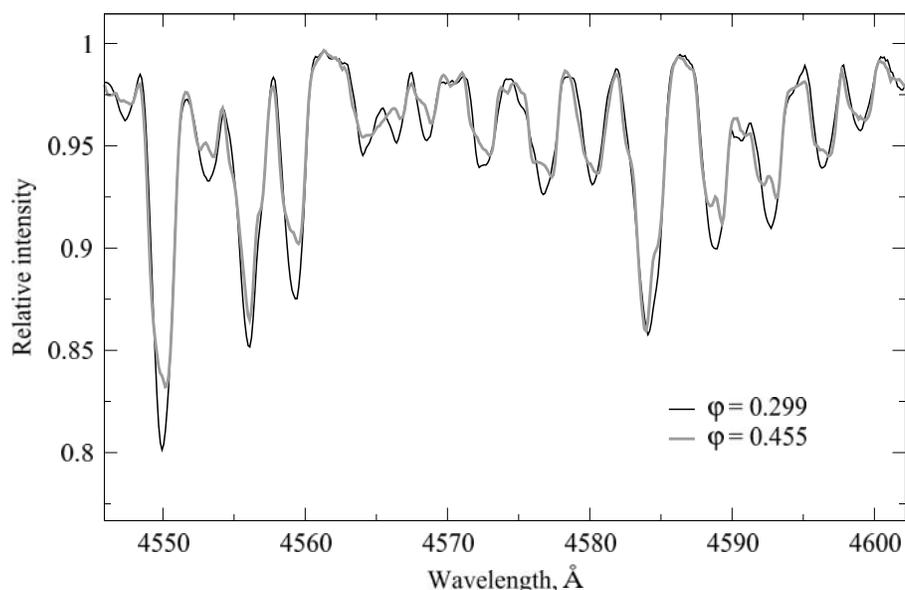


Рис. 6. Расщепление линий, вызванное неоднородным распределением элементов по поверхности звезды. В спектре, полученном в фазе 0.455, близкой ко вторичному минимуму кривой B_e , наблюдается расщепление линий, вызванное присутствием пятен.

шественно, вблизи одного или обоих полюсов. В случае HD 45583 хорошо видно, что в момент, когда продольное поле равно нулю, наблюдается усиление линий Cr и Si и в то же время содержание магния становится минимальным. В связи с этим можно сделать вывод, что хром и кремний концентрируются в области, близкой к магнитному экватору звезды (в предположении дипольной конфигурации поля). В то же время затруднительно дать более точную оценку взаимосвязи отдельных элементов и магнитного поля. На точность наших результатов сильно влияет переменность спектральных профилей, особенно это касается моментов, когда B_e либо максимально, либо близко к нулю.

Следует отметить, что содержание кремния, определенное по линиям Si II и Si III, различается на величину $N_{\text{Si III}} - N_{\text{Si II}} \sim 0.5$ dex. Одним из возможных объяснений нарушения ионизационного равновесия является неравномерное распределение Si с глубиной в атмосфере звезды. Согласно детальному спектроскопическому анализу стратификация Si наблюдается в Ap-звездах в широком диапазоне эффективных температур от достаточно холодных с $T_{\text{eff}} = 7500\text{--}8500$ K [33, 34] до более горячих с $T_{\text{eff}} \sim 12000$ K [35]. С другой стороны, нарушение ионизационного равновесия Si II/Si III также может быть вызвано неточным определением параметров атмосферы звезды. Именно по этой причине мы решили промоделировать случай, когда $T_{\text{eff}} = 13500$ K. Кроме того, с этой величиной T_{eff} также удастся удовлетворительно описать наблюдаемый профиль линии H β . Близкое

значение получается из калибровок женеvской фотометрической системы, что также может иметь физический смысл. Действительно, увеличением температуры удастся достичь лучшего согласия между теоретическими и наблюдаемыми профилями линий Si II и Si III. Но в этом случае возникает рассогласование между отдельными линиями железа в тех спектрах, что получены вблизи максимума продольного магнитного поля. Прояснить вопрос с температурой HD 45583, на наш взгляд, можно было бы, аппроксимируя синтетическими профилями сразу несколько линий бальмеровской серии водорода.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Звезда HD 45583 принадлежит к крайне малочисленной группе магнитных CP-звезд, кривая B_e которых показывает двойную волну. Удовлетворительную модель ее магнитного поля построить не удалось: измеренная нами по зеемановским сдвигам спектральных линий величина продольной компоненты находится в противоречии с оценкой поверхностного поля, полученной из анализа профилей линий.

Химический состав звезды характеризуется дефицитом гелия и избытком таких элементов, как Fe, Cr и Si. Это подтверждает принадлежность звезды к классу кремниевых звезд. Наш первый анализ показал, что в дальнейшем необходимо проведение доплер-зеемановского картирования звезды с целью выяснения причин существования вторичного минимума на кривой продольной компоненты и

построения реалистичной модели магнитного поля HD 45583.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант РФФИ No. 06-02-16110-а) и программой ведущих научных школ России (грант НШ-4354.2008.2). В работе использованы материалы, доступные в базах данных SIMBAD, WEBDA, NIST и VALD. Авторы выражают благодарность Чунтонову Г. А. за помощь в подготовке к наблюдениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. P. Bidelman and D. J. MacConnell, *Astronom. J.* **78**, 687 (1973).
2. J. J. Claria, *Astronom. and Astrophys.* **19**, 303 (1972).
3. ESA, The HIPPARCOS catalog, ESA SP-1200 (1997).
4. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, V. Andretta, et al., *Astronom. and Astrophys.* **470**, 685 (2007).
5. H. M. Maitzen and N. Vogt, *Astronom. and Astrophys.* **123**, 48 (1983).
6. N. Vogt and A. M. Faundez, *Astronom. and Astrophys.* **36**, 477 (1979).
7. P. North, *Astronom. and Astrophys.* **69**, 371 (1987).
8. P. North and N. Cramer, *Astronom. and Astrophys.* **58**, 387 (1984).
9. D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, V. G. Elkin, and E. Paunzen, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **372**, 1804 (2006).
10. G. A. Chountonov, in *Proceedings of the International Meeting on Magnetic Stars, Nizhnij Arkhyz, Russia, 2004*, Eds. by Yu. Glagolevskij, I. Romanyuk (SAO RAS, 2004), p. 286.
11. D. O. Kudryavtsev, *Baltic Astronomy* **9**, 649 (2000).
12. В. Е. Панчук, Н. Е. Пискунов, В. Г. Клочкова и др., Препринт №. 169 (САО РАН, 2002).
13. N. E. Piskunov and J. A. Valenti, *Astronom. and Astrophys.* **385**, 1095 (2002).
14. S. Bagnulo, J. D. Landstreet, E. Mason, et al., *Astronom. and Astrophys.* **450**, 777 (2006).
15. D. O. Kudryavtsev and I. I. Romanyuk, in *"CP#Ap Workshop"*, Eds. by J. Žižňovský, J. Zverko, E. Paunzen, M. Netopil, *Contribut. Astr. Obs. Skalnaté Pleso* (in press).
16. S. Bagnulo, J. D. Landstreet, E. Mason, and G. A. Wade, *EAS Publ. Series* **17**, 293 (2005).
17. Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **38**, 152 (1994).
18. G. Burki, N. Cramer, B. Nicolet, et al., GENEVA photometric database, <http://obswww.unige.ch/gcpd/ph13.html>.
19. R. Napiwotzki and D. Schoenberner, *V. Wenske, Astronom. and Astrophys.* **268**, 653 (1993).
20. B. Hauck and P. North, *Astronom. and Astrophys.* **269**, 403 (1993).
21. P. North and B. Nicolet, *Astronom. and Astrophys.* **228**, 78 (1990).
22. T. T. Moon and M. M. Dworetzky, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **217**, 305 (1985).
23. H. Levato, *Astronom. J.* **79**, 1269 (1974).
24. R. L. Kurucz, CD-ROM 13 (Cambridge, SAO, 1993).
25. N. E. Piskunov, in *Proc. of the 2nd International Workshop on Solar Polarization*, Eds. by K. N. Nagendra, J. O. Stenflo, (Kluwer Acad. Publ. ASSL, 1999), **243**, p.515.
26. O. Kochukhov, in *Physics of Magnetic Stars, Intern. Conf, Nizhnij Arkhyz, Russia, 2006*, Eds. by D. O. Kudryavtsev and I. I. Romanyuk (SAO RAS, 2007), p.109.
27. N. E. Piskunov, F. Kupka, T. A. Ryabchikova, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **112**, 525 (1995).
28. F. Kupka, N. Piskunov, T. A. Ryabchikova, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **138**, 119 (1999).
29. J. J. Raassen and P. H. M. Uylings, *Astronom. and Astrophys.* **340**, 300 (1998).
30. Yu. Ralchenko, A. E. Kramida, J. Reader and NIST ASD Team (2008). NIST Atomic Spectra Database (version 3.1.4), [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/asd3> [2008, February 29]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
31. N. Piskunov and O. Kochukhov, *Astronom. and Astrophys.* **381**, 736 (2002).
32. O. Kochukhov, N. Piskunov, I. Ilyin, et al., *Astronom. and Astrophys.* **389**, 420 (2002).
33. Е. А. Семенко, М. Е. Сачков, Т. А. Рябчикова и др., Письма в АЖ (в печати) (2008).
34. T. Ryabchikova, F. Leone, and O. Kochukhov, *Astronom. and Astrophys.* **438**, 973 (2005).
35. Ю. В. Глаголевский, Т. А. Рябчикова, Г. А. Чунтонов, *Письма в АЖ* **31**, 363 (2005).

**HD 45583 — A CHEMICALLY PECULIAR STAR WITH THE UNUSUAL
LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD CURVE****E. A. Semenko, D. O. Kudryavtsev, T. A. Ryabchikova, I. I. Romanyuk**

Results of complex investigation of the chemically peculiar star HD 45583 are presented. Observations were performed with the spectrograph MSS equipped with the circular polarization analyzer and with the echelle spectrometer NES mounted on the 6m telescope of SAO RAS. Measurements of zeeman spectra showed that star has an unusual double-wave curve of the longitudinal magnetic field. The period of spectral and magnetic variations corresponds with the rotational period $P = 1.17700$ days. Two possible reasons of the formation of the second minimum in the longitudinal magnetic field curve are discussed: the appearance due to the existence of strong spots of chemical abundancies at the stellar surface or due to a complex structure of the magnetic field. The parameters of atmosphere ($T_{\text{eff}} = 13000$ K and $\log g = 4.0$ dex) and abundance of individual chemical elements have been determined. Fe, Si and Cr are overabundant by 1 – 2 dex, helium is deficient by about 2 dex.