

ИЗУЧЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ МАГНИТНЫХ СР-ЗВЕЗД

С.Г. АЛИЕВ, С.Г. ЗЕЙНАЛОВ

*Шамахинская Астрофизическая Обсерватория им. Н.Туси НАН Азербайджана
AZ 372243, г.Шамаха, Азербайджан*

В работе изучено неоднородное распределение химических элементов на поверхности различных типов магнитных СР-звезд. Были построены и комплексно проанализированы фазовые кривые эквивалентных ширин, лучевых скоростей и магнитных полей, для линий водорода и различных пекулярных элементов. Было выявлено, что наблюдаемые переменности у магнитных СР-звезд, связаны с различиями физических условий в локальных областях, в виде "пятен", а не физическими различиями в атмосферах звезд.

Как известно, изменения у магнитных химически пекулярных (СР) звезд были обнаружены около 100 лет назад и изучались многими учеными [1].

Интерес к этим звездам резко возрос, когда Бэбкок установил, что они обладают сильными магнитными полями, достигающими 34 тыс. гаусс.

К настоящему времени опубликовано большое число работ по магнитным СР-звездам, выполненных за последние 30 лет, благодаря которым был выявлен ряд их особенностей.

Однако, результаты этих работ не позволили полностью объяснить причины физических процессов, которые приводят к возникновению наблюдаемых удивительных свойств этих звезд. Следует отметить, что большинство работ по магнитным звездам часто не дают однозначных сводок по химическому составу и по физическим параметрам атмосферы.

Кроме того, как от звезды к звезде, так и между результатами различных авторов для одной и той же звезды может существовать систематическое различие.

Возможно, это обстоятельство является следствием переменности магнитных звезд, так как разные авторы используют наблюдательные материалы соответствующие разным фазам изменения рассматриваемой звезды.

Однако, при изучении магнитных звезд в некоторых работах не было обнаружено заметной спектральной переменности [2]. Поэтому авторы этих работ предположили, что поверхности магнитных СР-звезд более или менее однородны, и они не показывают существенных спектральных изменений.

Более детальные исследования показали, что все эти магнитные звезды являются спектральными, магнитными и фотометрическими переменными. Значительная часть исследуемых звезд в работе [2] видна почти с полюсов и поэтому они не показывают переменности. Как нам представляется, указанные разногласия, связанные, в основном, с некорректностью прямого применения классических методов (разработанных для нормальных звезд) к магнитным звездам и с неравномерным распределением некоторых пекулярных химических элементов (Ca, Cr, Sr, Si, Eu и т.д.) по поверхности магнитных звезд.

Для объяснения наблюдаемой особенности магнитных СР-звезд в [3] была высказана гипотеза, так называемой «модели наклонного ротатора» с неоднородным распределением химических элементов по поверхности вращающихся магнитных звезд. При этом предполагается, что ось вращения звезды, магнитная ось и направление луча зрения не совпадают друг с другом.

Все многочисленные спектроскопические исследования, измерения фотометрических параметров и магнитных полей подтверждают модель наклонного ротатора [1]. В пользу того, что имеет место реальная неоднородность

химического состава, а не различия в условиях возбуждения и ионизации, свидетельствуют следующие наблюдательные факты:

1. Линии, находящиеся в различной стадии ионизации с разной температурной зависимостью, меняются синхронно.
2. Сильные изменения обнаруживаются у линии Si II $\lambda\lambda 4128+4130$, которая мало чувствительна к изменению температуры и давления. Согласно [1], для звезды В8 с $T_{\text{eff}}=14000\text{K}$, чтобы получить наблюдаемые изменения эквивалентной ширины (W_{λ}) линии Si II $\lambda\lambda 4128+4130$, необходимо увеличить температуру до 4000K , в то время, как наблюдаемые изменения блеска и цвета соответствуют изменению температуры на $300\div 400\text{K}$. Для того чтобы получить наблюдаемые изменения W_{λ} , достаточно увеличить обилие Si всего лишь в 20 раз.
3. Изменения физических условий должны отражаться на линиях всех химических элементов, в то время как заметные изменения показывают только линии некоторых (пекулярных) элементов в спектрах отдельных магнитных звезд.

Кроме выше указанных фактов, в пользу эффекта химической аномалии, к настоящему времени имеется ряд работ, в которых указывается, что некоторые увеличения интенсивностей линий в спектрах магнитных CP-звезд могут быть связаны с магнитным усилением [4]. Особенно этот эффект резко проявляет себя в линиях с большим фактором Ланде (Z) и, в принципе, его можно учесть при определении обилия элемента, если используются линии с известным значением величины Z [5].

Все последующие исследования подтверждают модель наклонного ротатора, (в основе которой лежит пятнистость поверхности звезды), согласно которой наблюдаемые ширины спектральных линий пропорциональны величине $V_{\text{экр}} \cdot \sin i$, всегда равны или меньше ширины ($\Delta\lambda$), соответствующей экваториальной скорости вращения ($V_{\text{экр}}$). Величина $V_{\text{экр}}$ определяется по наблюдаемому периоду (P) и известному радиусу (R) звезды следующей формулой

$$V_{\text{экр}}=50.7 \cdot R/P.$$

В отличие от Солнца проявление пятнистости на поверхности звезды практически невозможно. Дело в том, что понятие пятнистость поверхности звезды раньше было знакомо только астрономам - солнечникам. Угловой диаметр Солнца (0.5 градуса) позволяет наблюдать мелкие детали (пятна) на его поверхности. Угловые диаметры самых близких магнитных CP-звезд составляют примерно 0.001 сек. дуги. Поскольку угловые разрешения современных телескопов не превосходят 0.5 сек. дуги, выделить в изображении звезды отдельные локальные участки (пятна) ее поверхности невозможно.

Однако, согласно модели наклонного ротатора перемещение пятен вследствие вращения звезды (вращения жесткие) должно привести к переменности профилей и доплеровскому смещению наблюдаемых линий. Первая попытка представления картины распределения химических элементов по поверхности звезды на основе Фурье анализа наблюдаемых изменений спектральных линий была сделана Дейчем [6]. Этот метод несколько модифицирован Хохловой и применен для анализа магнитной CP-звезды HD112413 [1]. В обеих работах профили наблюдаемых линий были предварительно разделены на компоненты. Затем в ряд Фурье раскладывалась кривая изменения эквивалентной ширины (W_{λ}) и лучевой скорости V_r каждого компонента. Далее, сшивались результаты, получившиеся по каждой из компонент. В дальнейшем, для изучения неоднородности поверхности магнитных звезд были предложены различные методы [7,8]. В основе всех этих методов лежит процедура разделения наблюдаемых контуров линий на компоненты. Для этого необходимо иметь

спектрограммы с высоким разрешением ($\Delta\lambda \geq 0.03\text{Å}$), для получения которых требуется крупные телескопы и высококачественные светоприемники. Естественно, что такие возможности становятся доступным не всем специалистам астрономам (занимающиеся исследованием магнитных и пекулярных звезд).

В случае когда используются материалы с низкой и даже со средней точностью регистрации спектра, из-за шумов и других дефектов разделение линий на компоненты становится практически невозможным.

Линия заметной интенсивности образуется не всегда только в пятне, а так же вне его. В таких случаях наблюдаемые профили линий выглядят еще сложнее. В результате проявляются «ложные» компоненты и разделение линий на компоненты становится неоднозначным. В таких случаях число найденных пятен оказываются около десяти ($8 \div 10$) [9]. Нам кажется, что настаивать на существовании такого большого числа пятен на поверхности звезды бессмысленно. Поскольку размеры пятен составляют, в среднем 15-20% поверхности звезды [1], естественно, они должны сливаться в одно сплошное кольцо что делает практически невозможным наблюдать их в виде отдельных пятен.

В настоящее время особый интерес представляет изучение физических параметров, аномалии химического состава и магнитного поля «феномена пятна», но не определение их числа на поверхности звезды.

Целью настоящего исследования является выявление неоднородности (пятнистости) атмосферы и определение фазы спектральной переменности, относящейся к самому (ведущему) пятну на поверхности звезды, который вносит наибольший вклад в наблюдаемые изменения.

ВЫБОР ОБЪЕКТОВ И ИХ НАБЛЮДЕНИЯ

Известно, что основными отличительными свойствами магнитных CP-звезд от нормальных является аномальное усиление линий различных химических (пекулярных) элементов в спектре, более низкой скорости вращения ($v \sin i$) и наличие сильного магнитного поля (10^2 - 10^4 гаус) в атмосферах этих звезд.

Исходя из этого, в программу исследования нами были включены представители различных типов магнитных звезд со следующими особенностями:

1. Согласно классификации [10,11] в программу включены все типы пекулярности (за исключением Mn-Hg звезд) магнитных CP-звезд.
2. Звезды с различными значениями осевого вращения- $V_{\text{эк}} \cdot \sin i$ по данным каталога [12].
3. По возможности подобраны звезды с различными значениями магнитного поля (He) на основании литературных данных [13,14].
4. Звезды, принадлежащие к различным спектральным классам в интервале F0-V6.

С целью сравнения полученных результатов и для определения ошибки измерения в программу были включены нормальные звезды, соответствующие тем же спектральным классам магнитных звезд.

Общий список и основные характеристики программных звезд приведены в [15, 16]

Для выбранных нами магнитных и нормальных звезд были проведены спектральные наблюдения на 2-м телескопе ШАО им. Н.Туси НАН Азербайджана двумя различными методами:

1. С помощью традиционного фотографирования спектров.
2. С помощью Эшеле - спектрометра в сочетании современного приемника излучения – ПЗС камерой.

Большая часть фотографических спектрограмм была получена в фокусе Кудэ, выше указанного телескопа, с дисперсией $4\text{Å}/\text{мм}$.

В некоторых случаях спектрограммы были получены на фокусе Кассегрена этого телескопа с дисперсией $10\text{Å}/\text{мм}$. Эти спектрограммы были использованы в основном, для определения или уточнения спектрального периода рассматриваемой звезды, а также при исследовании водородных линий для некоторых звезд [15]. Для каждой исследуемой звезды были получены около 15-20 фотографических спектрограмм, которые полностью охватывают период спектральной переменности. Из имеющегося в нашем распоряжении большого количества наблюдательного материала для каждой исследуемой звезды мы отобрали только те спектрограммы, которые получены в одинаковом режиме (выбор ширины щели, область спектра, камера, порядок, дисперсия и т.д.).

Для оценки точности измерения были использованы регистрограммы, полученные для нормальных (стандартных) звезд. Результаты измерений длин волн показывают, что среднее отклонение для различных линий составляет $\Delta\lambda = \pm 0,025$. Это соответствует ошибке измерения лучевых скоростей примерно на $\Delta V_r = \pm 1,75 \text{ км/с}$ для $\lambda = 4500\text{Å}$.

Вероятная относительная ошибка определения эквивалентных ширин W_λ , в зависимости от интенсивности линии, составляет 7-12%.

Второй вариант наших спектральных наблюдений проведен на Эшелле спектрометре, установленном (1998г.) в фокусе Кудэ 2-м телескопа ШАО, с применением ПЗС матрицы с 530×580 элементами.

При помощи этого комплекса нами проведены систематические наблюдения ряда магнитных звезд, которые были включены в программу наблюдений. В результате было получено большое количество CCD спектров, в основном, для пяти типичных магнитных звезд – HD 40312 (B9 A0), HD 112185 (B8), HD 196502 (A2), HD 201601 (F0), HD220825 (A0).

В настоящей работе были использованы Эшелле-спектры (CCD) только для двух магнитных звезд HD 40312 и HD 220825. Подробная информация о редукации, аппаратуре и методике обработки CCD спектров приведена в [16].

С целью выполнения поставленной задачи на полученных регистрограммах каждой исследуемой звезды проведена идентификация спектральных линий, в основном, наиболее «типичных» пекулярных элементов для рассматриваемой звезды. При этом сопоставлено несколько регистрограмм для пекулярных и нормальных звезд.

Если для какой-либо фазы или очень близких фаз (в пределах $0,03 \div 0,05p$) мы имели несколько спектрограмм, то проводилось их сравнительное изучение. Это позволило нам учесть блендирование и расщепление линий пекулярных элементов. Все рассматриваемые пекулярные элементы нами были разделены на три группы: первая группа – легкие химические элементы с атомными номерами $Z \leq 20$ (Ca), вторая группа – «группа железа» от кальция (Ca) до циркония (Zr) $20 \leq Z \leq 40$ и третья – редкоземельные и тяжелые элементы от Ce до Lu $50 \leq Z \leq 71$.

В Таблице 1 приводится список линий вышеуказанных и наиболее представительных аномальных (пекулярных) элементов, по которым в данной работе был исследован характер спектральных изменений исследуемых магнитных CP-звезд. Некоторые из выбранных линий слегка блендированы, особенно в фазах максимумов интенсивности линий различных рассматриваемых элементов. Многие из блендированных линий освобождены от блендов в спектрах нормальных и в фазах минимума большинства магнитных звезд.

Во всех спектрограммах были измерены полная (суммарная) эквивалентная ширина W_λ (сумма эквивалентных ширин всех компонентов данной линии, если

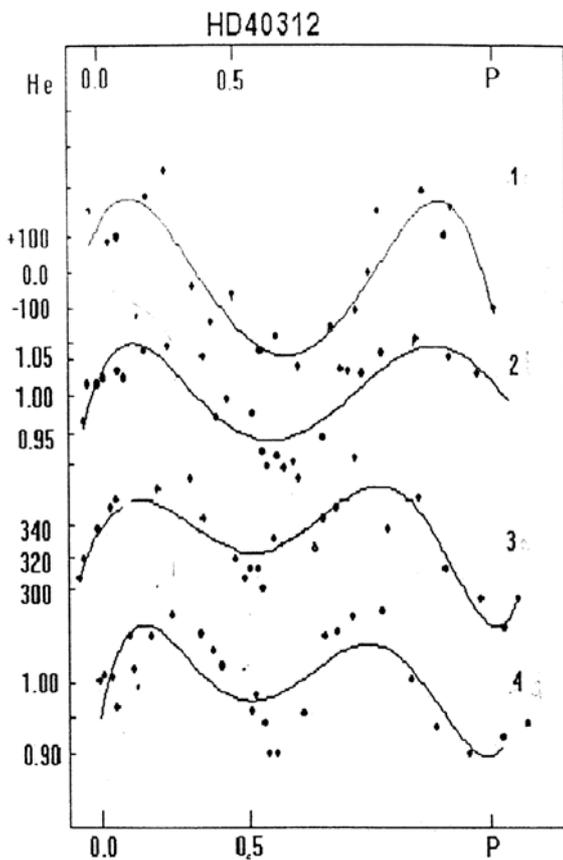
Таблица 1.

Элемент мультиплет	Длина волны λ , Å	Примечание
Mg II 4 10	4481.33 4390.56	Довольно интенсивно. Слегка блендирована 90, 98 Ti II (61).
Si II ? 3 3 1	4200.70 4128.05 4130.88 3856.02	Бленда с Ti II λ 4200.40 (96). Слегка блендирована Mn II 28.14 (2) Иногда раздваивается.
Ca II 1	3933.66	Довольно интенсивно и имеет очень сложный профиль.
Sr II 1 1 31 31	4077.71 4215.52 4242.38 4275.57	Слегка блендирует. Cr II 77.50 (19). Блендирует. Cr II 15.77 (18).
Cr I 1 1	4254.35 4282.72	Блендирует. 82.50 Mn III
Cr II 31 31 44	4242.38 4275.57 4558.75	Дублет 58.66 (44) и 58.83 (44) Cr II
Eu II 1 1 4	4129.73 4205.05 4435.60	Слегка блендирует. Mn II 05.37 (2)
Mn I 2 5 23	4030.76 4048.76 4235.14	30.50 Fe I (560) слаб.
Mn II ? 7	3897.53 4136.95 4206.37 4308.20 4478.67	07.90 Ti II (41) слаб.
Fe I 20 43 48 68 826	3865.53 4045.82 4260.48 4459.12 4525.14	65.59 Cr II бленда (слаб). 45.63 Zr II (30) слегка бленд.
Fe II 3 28 27 37 37 38	3958.29 4122.64 4385.38 4491.40 4515.34 4541.52	40.90 Fe I (974)

она расщеплена на компоненты), центральные глубины (R_0) и лучевые скорости (V_r) для выбранных линий.

Чтобы избавиться от некоторых случайных ошибок и возможных (переменных) блендирований, были определены относительные значения эквивалентных ширин ($W_\lambda/\overline{W}_\lambda$) для каждой линии.

Построены графики зависимости измеренных величин W_λ , $W_\lambda/\overline{W}_\lambda$, V_r , V_r/\overline{V}_r от фазы (ϕ) периода (фазовые кривые) для каждой исследуемой звезды. С целью



сравнения мы построили кривые зависимости относительных значений интенсивности водородных линий и эффективного магнитного поля (He) от спектрального периода для исследуемых CP-звезд. В качестве примера на Рис.1(1,2,3,4) представлены сопоставления фазовых кривых выше указанных параметров (W_λ , $W_\lambda/\overline{W}_\lambda$, V_r , V_r/\overline{V}_r и He) для звезд: HD 40312, HD 112413, HD 124224, HD 184905. Из этих зависимостей видно, что фазы экстремумов, в основном фазы главного максимума величин W_λ для линий водорода и пекулярных элементов, а также интенсивности магнитного поля для каждой исследуемой звезды совпадают (в пределах точности измерений $\sim 0.03p$).

Рис.1.

Зависимость измеренных величин W_λ , $W_\lambda/\overline{W}_\lambda$, V_r , V_r/\overline{V}_r и He от фазы для звезды HD 40312.

Для некоторых звезд (θ Aur, HD 112185, HD 112413, HD 220825 и т.д.) на кривых изменений выше указанных параметров по периоду наблюдаются вторичные максимумы.

Кроме того, в спектрах звезды HD 19832 интенсивности линий Sr, Cr и Eu меняются синхронно, а фаза максимума для линии Si II ($\lambda\lambda$ 4128, 4130) смещена на $0,15p$. Подобные картины наблюдаются и у других магнитных звезд (HD 112185, HD 133029 и HD 112413). По-видимому, это связано с тем, что центры тяжести концентраций для различных пекулярных элементов не совпадают в пределах области данного пятна на поверхности звезды. Кроме того, из Рис.1-4 видно, что на фазовых кривых наблюдается несколько экстремумов с разными амплитудами. Согласно модели наклонного ротатора в таких случаях фаза главного максимума, по-видимому, соответствует области самого сильного (ведущего) пятна на поверхности звезды. В этой фазе (в фазе главного максимума) значения лучевых скоростей для пекулярных элементов доходят до нуля. Это означает, что в этот момент (в этой фазе), где $V_r=0$ главное (самое сильное) пятно располагается на центральном меридиане видимого диска звезды.

Таким образом, комплексный анализ фазовых кривых для указанных параметров позволяет определить место расположения на поверхности звезды

области главного пятна, которое обладает максимальной аномалией химического состава и сильным магнитным полем.

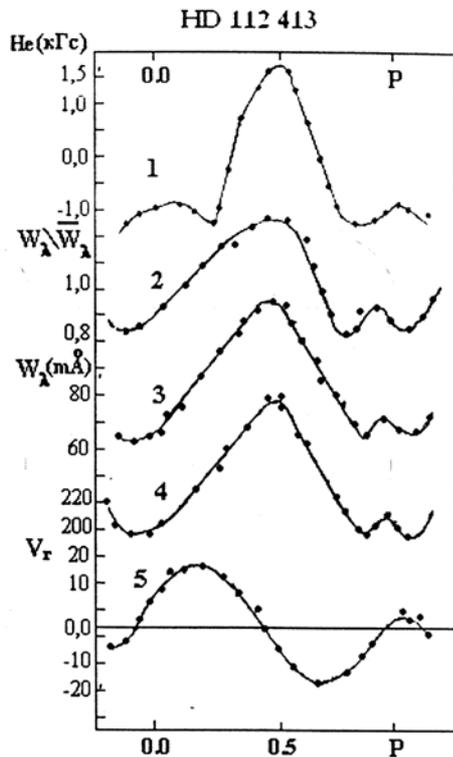


Рис.2.

Зависимость аналогичная Рис.1 для звезды HD 112413

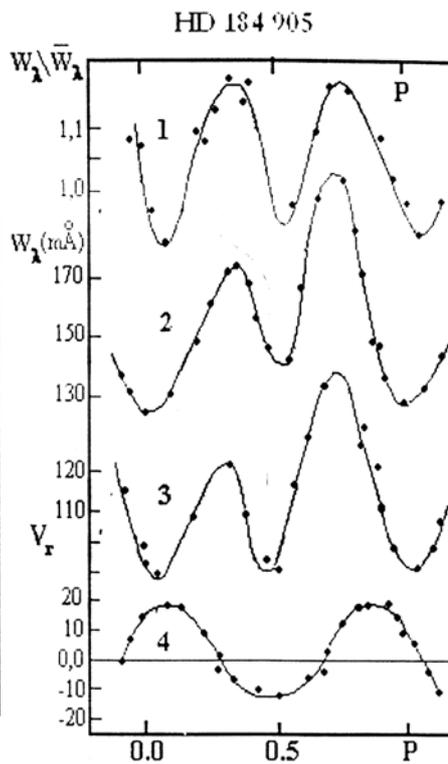


Рис.3.

Зависимость аналогичная Рис.1 для звезды HD 184905

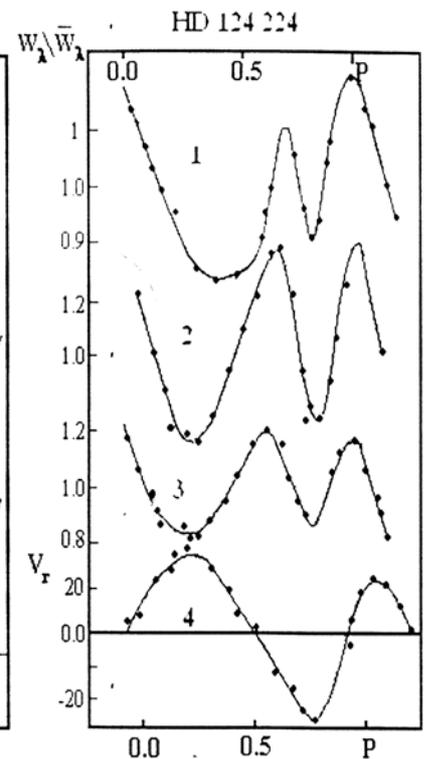


Рис.4.

Зависимость аналогичная Рис.1 для звезды HD 124224

Результаты сравнения эквивалентных ширин линий различных элементов в спектрах магнитных и нормальных звезд позволяют заключить, что фазы минимумов (Рис.1) соответствуют области без пятен. Эти поверхностные части атмосферы, по-видимому, можно считать относительно однородными и имеющими, в среднем, нормальный химический состав.

В случаях, когда величины W_λ и He для различных элементов изменяются в противофазе, то естественно можно считать, что эти элементы сконцентрированы не в полюсах, а вблизи магнитного экватора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенного нами анализа изменений с фазой величин W_λ , $W_\lambda / \bar{W}_\lambda$, R_0 и V_r для линии водорода, пекулярных элементов в спектрах различных магнитных CP-звезд с привлечением данных о напряженностях магнитного поля выяснилось, что распределение химических элементов по поверхности этих звезд неоднородно.
2. Эквивалентные ширины и центральные глубины линий водорода и пекулярных элементов в спектрах исследуемых звезд подвержены синхронным изменениям с фазой.
3. Получено, что у всех исследуемых магнитных CP-звезд интенсивности и профили водородных линий подвергаются периодическим изменениям, обусловленным различиями физических условий в области пятен, которые обладают аномальным химическим составом и сильным магнитным полем.

4. Впервые предложен и применен более простой метод, с помощью которого можно выяснить распределение химических элементов по поверхности магнитных CP-звезд.

Получено, что фаза главного максимума интенсивности линий водорода и пекулярных элементов и магнитного поля соответствует области, где расположено «главное пятно», которое в момент $V_r=0$ находится на центральном меридиане видимого диска звезды.

Авторы глубоко благодарны Х.М. Микайлову, за помощь в получении спектрального материала, А.А. Алиевой и Н.Я. Ахмедовой, за помощь при подготовке статьи к печати.

1. В.Л.Хохлова, *Итоги науки и техники. Астрономия. М. ВИНТИ*, **24** (1983) 230.
2. S.J.Adelman, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **25** (1973) 523.
3. D.W.Stibbs, *Mon. Not. R.A.S.*, **110** (1950) 395.
4. А.А.Боярчук, Ю.С.Ефимов, В.Е.Степанов, *Изв. КрАО*, № 24 (1960) 52.
5. И.И.Романюк, *Изв. САО*, № 18 (1984) 37.
6. A.J.Deutch, *Astrophys. J.*, **150** (1970) 985.
7. D.Pyper, *Astrophys. J., Suppl.*, **18** № 164 (1969) 347.
8. В.С.Лебедев., В.В.Соколов, *Астроф. Исслед. (Изв. САО)*, **12** (1980) 22.
9. *Магнитные Ар-звезды (сборник). Баку, «Элм»*, (1975) 170.
10. K.Osava, *Ann. Tokyo Astron. Obs. Ser. 2*, **9** (1965) 123.
11. И.М.Копыло, *Астрофиз. Исслед. (Изв.САО)*, **24** (1987) 44.
12. А.А.Боярчук, И.М. Копылов, *Изв. КрАО*, **31** (1964) 44.
13. H.W.Babcock, *Astrophys. J. Suppl.*, **3** № 30 (1958) 141.
14. E.Borra, J.Landstreet, *Astrophys. J. Suppl.*, **42** (1980) 421.
15. С.Г. Алиев, *Циркуляр ШАО*, № 85 (1989) 3.
16. С.Г.Алиев, Спектральные исследования СЗ-магнитных звезд с учетом эффекта пятнистости, дисс. на соискание ученой степени к.ф.-м.н., БГУ, Баку, (2003) 167.

CP-MAQNİT ULDUZLARININ SƏTHİNDƏ QEYRİ BİRCİNSLİLİYİN ÖYRƏNİLMƏSİ

S.H.ƏLİYEV, S.Q.ZEYNALOV

İşdə kimyəvi elementlərin müxtəlif növlü CP-mağnit ulduzlarının səth üzrə paylanması öyrənilmişdir. Bunun, üçün hidroqen və müxtəlif pekulyar elementlərin xətlərinin ekvivalent eni, şüa sürətləri və mağnit sahəsinin faza əyrisi qurulub, kompleks şəkildə arasdırılıb. CP-mağnit ulduzlarında müşahidə olunan dəyişkənliklərin, fiziki şəraitin müxtəlifliyi ilə deyil, əsasən pekulyar elementlərin səth üzrə qeyribircins, lokal oblastlarda "ləkə" şəklində paylanmaları ilə əlaqədar olması aşkar edilmişdir.

STUDY OF NON-HOMOGENIOUSITY OF SURFACE OF MAGNETIC CP-STARS

S.H. ALIYEV, S.G. ZEYNALOV

Non-homogeneous distribution of chemical elements on surface of various types magnetic CP-stars have been studied in this work. Phase curve of equivalent width, radial velocity and magnetic field for hydrogen lines and various peculiar elements have been built and analyzed complexly. It was revealed that the observed variability's of magnetic CP-stars deal with various physical conditions in local spheres in "spots" type, but not with physical differences in the atmospheres of stars.

Редактор: А.Гулиев