

УДК 524-38

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРА ПЕРЕМЕННОСТИ И ЭВОЛЮЦИОННОГО СТАТУСА МАГНИТНОЙ ЗВЕЗДЫ HD 40312 ИЗ СТАРОГО СКОПЛЕНИЯ AURIGA

С.Г.АЛИЕВ, В.М.ХАЛИЛОВ, З.М.АЛЫШОВА

Министерство науки и образования, Шамахинская Астрофизическая Обсерватория им.Н.Туси
AZ 5624, Азербайджан, г.Шамаха, пос.Ю.Мамедалиева
sabirshao5@gmail.com

Получена: 26.06.2023

Принята к печати: 02.10.2023

РЕФЕРАТ

Представлены некоторые результаты исследований параметров атмосферы магнитной СР-звезды θAur=HD40312 и ее эволюционного статуса. Путем сопоставления фазовых кривых магнитного поля (B_e), блеска (V) и эквивалентных ширин (W_i) линий пекулярных элементов (Si, Cr, Sr и др.) находились фазы, соответствующие максимально пекулярной $\phi(P)=0.05-0.1$ и относительно нормальной области $\phi(N)=0.45-0.52$ на поверхности звезды. Фундаментальные параметры звезды были определены по профилям линий ($H\gamma$, $H\delta$) и по фотометрическим индексам в системах Джонсона (UBV) и Стремгрена (ubvy). Масса и светимость звезды находились по стандартным соотношениям. Установлено местоположение звезды θAur на диаграмме Герцшпрунга-Рассела и, тем самым, определен ее эволюционный статус. Установлено, что звезда HD 40312 расположена ближе к верхней границе (ZAMS) полосы ГП.

Ключевые слова: магнитное поле, химически пекулярные звезды, эволюционный статус.

ВВЕДЕНИЕ

Общими свойствами магнитных химически пекулярных звезд (MCP-звезд) является то, что в их спектрах наблюдаются аномально сильные линии большого набора химических элементов (Si, Cr, Sr, Mn, Eu и др.), наличие мощного магнитного поля и относительно малые скорости осевого вращения ($Vsin i \leq 60 \text{ km/s}$) по сравнению с нормальными звездами ($Vsin i \geq 160 \text{ km/s}$) тех же спектральных классов Главной Последовательности (ГП). Особый интерес представляют вопросы о возможных изменениях химической аномалии и скоростей вращения MCP-звезд во время их пребывания на ГП. Не до конца решен и вопрос о том, какие из пекулярных свойств этих звезд больше подвергаются эволюции в фазе ГП, и подвергаются ли вообще.

В восьмидесятые годы прошлого века (XX) под руководством И.М.Копылова [1,2]

было показано, что во время жизни СР-звезд на главной последовательности у них не изменяются ни степень пекулярности, ни скорость вращения. Затем, Глаголовский и др. [3] обнаружили, что и магнитные поля на ГП не различаются у звезд членов молодых и старых звездных скоплений. В дальнейшем, Хубрик и др. [4] сообщили, что большинство магнитных звезд концентрируются у центра полосы ГП. Однако, Кочуковым и др. [5] было найдено, что MCP-звезды с массой $M \geq 3M_\odot$ равномерно распределены по всей ширине полосы ГП, а звезды с массами менее двух солнечных масс имеют тенденцию концентрироваться в центре полосы ГП. Авторы считают, что механизмы, которые формируют магнитные поля звезд больших и малых масс должны быть разными. В работе Ландстрита и др. [6] найдено, что магнитные поля присутствуют у звезд по всей ширине полосы от ZAMS до TAMS. Статистически для звезд с массами $M \geq M_\odot$ магнитные

поля ослабевают с возрастом, примерно до возрастов порядка 30 миллионов лет. А звезды с массами $M \leq M_{\odot}$ не показывают уменьшения величины магнитного поля вплоть до возрастов примерно 100 млн лет.

Несмотря на публикацию нескольких статей по этому вопросу из-за малочисленности исследованных объектов вопрос эволюции магнитного поля и химической аномалии до конца не решен. Исходя из этого в последние годы в ШАО нами были начаты работы по уточнению и определению эволюционного статуса MCP-звезд с помощью однородных спектральных материалов (см. ниже). В данной работе представлены результаты определения характера переменности и эволюционного статуса магнитной звезды HD40312 посредством комплексных наблюдений.

Звезда $\theta\text{Aur}=HD40312=HR2095$ - одна из ярких ($m_v=2.62$) магнитных звезд, спектрального класса B9-A0p, относящаяся к типу пекуллярности SiCr. Борра и др. [7] определили изменение магнитного поля этой звезды с периодом $P=3^d.6188$. Фотометрические [8] и спектральные [9,10] наблюдения также подтвердили переменность звезды с этим периодом.

МАТЕРИАЛЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ОБРАБОТКА

Спектральные наблюдения звезды HD40312 проводились в осенний сезон 1978г. в фокусе Куде 2-метрового телескопа ШАО НАН Азербайджана. К настоящему времени получено большое количество спектров в двух вариантах: а) классические фотографические спектры с дисперсией 4A/mm; б) CCD-спектры, полученные с помощью спектрометра Эшеле и спектрометра ShaFES [11], установленных в фокусах Куде и Кассегрена, соответственно.

В течение трех ночей 1999г. с помощью эшелле-спектрометра, установленного в фокусе Куде 2-метрового телескопа ШАО, для θAur были получены около 50 CCD-спектров высокого временного разрешения (3-5 мин.). С помощью этих материалов с хорошими временными разрешениями нам не удалось обнаружить у этой звезды кратковременных измене-

ний пульсационного характера [9]. Были измерены лучевые скорости V_r , эквивалентные ширины W_{λ} , полуширины FWHM и остаточные интенсивности R спектральных линий H α , H β и для линий следующих элементов SiII, CrI, FeI, FeII. Получено, что измеренные величины вышеуказанных параметров исследуемых линий изменяются с периодом $P=3^d.6188$, равным периоду вращения этой звезды. В работе [10] нами были приведены характеристики изменения эквивалентных ширин водородных линий Бальмеровской серии. Установлено, что амплитуды изменения относительных значений эквивалентных ширин водородных линий уменьшаются с номером линии.

В 2019г. на спектрометре ShaFES [11] было получено еще 10 спектров с разрешением $R=55000$ и два спектра с разрешением $R=27500$. Результаты обработки этих спектров будут представлены в виде отдельной статьи.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ПЕКУЛЯРНОСТИ

При изучении атмосферы магнитных С-звезд необходимо учитывать характерный для этих звезд эффект пекуллярности, который обусловлен неравномерным распределением химических аномалий и мощного магнитного поля по поверхности и глубине атмосферы звезды. Многократно было доказано, что наблюдаемые спектральные и иные переменности этих звезд связаны с эффектом пекуллярности, поэтому существующие методы для нормальных звезд трудно применить непосредственно к магнитным звездам. Таким образом, фундаментальные параметры, определенные с помощью материалов наблюдений, полученных от неоднородной по диску MCP-звезды, не соответствуют реальным значениям этих параметров ни в пятнистых (пекуллярных), ни в нормальных (вне пятнистых) областях. Поэтому необходимо учитывать эффект пекуллярности при изучении фундаментальных параметров атмосферы, химического состава, светимости и магнитного поля MCP-звезд. Для учета эффекта пекулляр-

ности были построены и затем сопоставлены фазовые кривые магнитного поля (Be), блеска (V) и эквивалентных ширин (W_λ) линий Si, Cr, Ca, Sr, которые являются пекулярными элементами у звезды θAur.

Из Рис.1 и Рис.2 видно, что экстремумы всех фазовых зависимостей практически совпадают (в пределах точности измерений ($\Delta\phi \approx \pm 0.05$)).

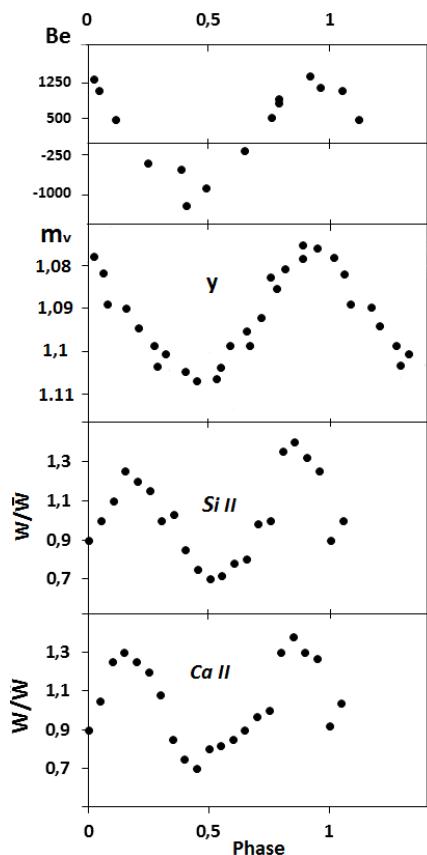


Рис.1

Фазовые кривые величин Be, измеренные по линиям пекулярных элементов, блеска (у) и относительные значение эквивалентных ширин (W/W) для линий $\lambda 4128$ SiII, $\lambda 3933$ CaII.

С помощью сопоставлений фазовых кривых магнитного поля (Be), блеска (V) и эквивалентных ширин (W_λ) линий пекулярных элементов, определены фазы экстремумов. Согласно модели наклонного ротатора фазы главных максимумов ($\phi \approx 0.05-0.10$) фазовые кривые соответствуют наиболее пекулярной (P) области, а фазы минимумов ($\phi \approx 0.45-0.50$) – относительно нормальной (N) области на по-

верхности звезды θAur. Найденные значения фазы для наибольшей пекулярной (P) и нормальной (N) области приведены в Таблице 1.

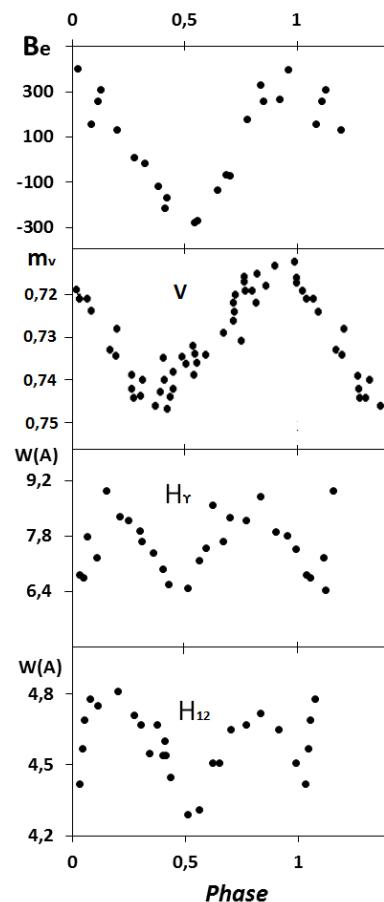


Рис.2

Фазовые кривые магнитного поля Be, измеренные водородным магнитометром, блеска (v) и эквивалентных ширин линий (H_γ , H_{12})

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ (T_{eff} и g)

Фундаментальные параметры звезды (T_{eff} и g) были определены с учетом эффекта пекулярности. Эффективная температура T_{eff} и ускорение силы тяжести g на поверхности звезды определялись двумя методами:

- Параметры T_{eff} и $lg g$ мы оценили путем сравнения наблюдаемых профилей водородных линий с модельным расчетами Куруча [12]. Полученные значения для пекулярной (P) и относительно нормальной областей звезды приведены в Таблице 1.

2. По фотометрическим индексам в системах Джонсона (UBV) получены $T_{\text{eff}}=10200$, $\log g=3.9$, а в системе Стремгрена ($uvby$) $T_{\text{eff}}=9500$, $\log g=3.6$ (Таблица 1).

Таблица 1

Основные параметры для пекулярной (P) и нормальной (N) области атмосферы магнитной СР-звезды θ Auriga

№	Параметры	P	N
1	Фазы соответствующие пекулярной (P) и относительно нормальной (N) области.	0.05-0.10	0.45-0.52
2	T_{eff} (K) и $\log g$ найденные по профилям H_γ и H_δ	9800 ± 250 3.65 ± 0.15	8800 ± 250 3.91 ± 0.15
3	T_{eff} (K) и $\log g$ найденные по фотометрическим индексам UBV и $uvby$	10200 ± 250 3.9 ± 0.1	9500 ± 250 3.6 ± 0.1
4	Значение величины $B_e(G)$, измеренные по линии H_β	$+270 \pm 60$	$\leq 50 \pm 60$
5	Значение величины $B_e(G)$, измеренные по линиям пекулярных элементов Si, Cr и Ca и др.	$+1200 \pm 200$	$\leq 70 \pm 200$
6	Радиус звезды найденные по $T_{\text{eff}}(P)$ и $T_{\text{eff}}(N)$	3.91 ± 0.15	3.55 ± 0.15
7	Масса	2.34	2.38
8	Светимость $\log L*/L_\odot$	2.44 ± 0.05	2.31 ± 0.05
9	Спектральные индексы пекулярности P(E) для SiII, CrII	3.24, 2.85	2.35, 1.87

РАДИУСЫ И МАССЫ

Оценки радиуса звезды θ Aur были сделаны по эмпирической зависимости главной последовательности в следующем виде

$$\log R = 8.46 - \log T_{\text{eff}} - 0.2M_{\text{bol}}. \quad (1)$$

Значение болометрической звездной величины (M_{bol}) и эффективной температуры (T_{eff}) даны в Таблице 1. Для нахождения болометрической звездной величины $M_{\text{bol}} = M_V + \Delta m_{\text{bol}}$ болометрическая поправка Δm_{bol} определена путем экстраполяции с помощью данных Страйжиса [13]. Найденное значение для M_{bol} приведено в Таблице 1.

Для учета эффекта пекулярности при определении радиуса использовались значения эффективной температуры, полученные для пекулярной T_{eff} (P) и относительно нормальной $T_{\text{eff}}(N)$ областей.

Масса звезды находилась по стандартным соотношениям, выражающим законы тяготения

$$lgm = lgg + 2lgR - 4.44 \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) видно, что основную неопределенность в оценку массы

звезды вносят ошибки определения ускорения силы тяжести (g) и температуры T_{eff} . Исходя из этого, оценки величин T_{eff} и $\log g$ были определены двумя способами: по фотометрическим индексам и по профилям водородных линий (Таблица 1).

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИНДЕКСЫ ПЕКУЛЯРНОСТИ P(E)

Для количественной характеристики химического состава атмосферы звезды θ Aur мы использовали спектральный индекс пекулярности P(E) [14]. Индекс $P(E) = W(P)/W(N)$ характеризует количественные меры усиления линии пекулярного элемента в спектре MCP звезды относительно тех же линий стандартной звезды. В атмосфере исследуемой звезды основными пекулярными элементами являются Si и Cr. Поэтому величины P(E) были определены для этих элементов и найденные значения показаны на Таблице 1.

ЭВОЛЮЦИОННЫЙ СТАТУС

Результаты большинства опубликованных работ показывают, что средняя величина

магнитного поля и химические аномалии МСР-звезд ослабляются с увеличением возраста этих звезд [6,15]. Поэтому обнаруженные разные значения магнитного поля группы проэволюционировавших и молодых МСР-звезд могут быть результатом эволюции.

Следует отметить, что диаграмма температура-светимость для звезд Главной последовательности (ГП) имеет полосатый вид. Нижняя граница этой полосы довольно резкая и соответствует, так называемой, линии нулевого возраста (ZAMS) звезд. Эта линия дает зависимость между эффективной температурой и светимостью для звезд, только что заканчивающих процесс гравитационного сжатия. Затем с увеличением температуры звезды начинаются ядерные реакции, идет процесс преобразования водорода в гелий (протон-протонный цикл). С этого момента времени звезда приходит в начальную стадию ГП - к линии нулевого возраста (ZAMS). По мере выгорания водорода в ядре звезды количество протонов уменьшается, и она перемещается в сторону верхней границы ГП (TAMS). Эти звезды являются старыми ($\log t \approx 8.7-8.9$) проэволюционировавшими звездами, которые приближаются к концу жизни на ГП. Магнитные звезды расположенные вблизи линии верхней границы (TAMS) обладают сравнительно слабыми магнитными полями, которые не характерны для молодых магнитных СР-звезд. С этой целью мы решили определить эволюционный статус и расположение на диаграмме Герцшпрунга-Рессела магнитной звезды θ Aur.

Для определения эволюционного статуса звезды HD40312 были вычислены ее светимость с помощью стандартного соотношения

$$\log(L*/L_{\odot}) = 0,4(M_{\odot} - M_*), \quad (2)$$

где M_{\odot} - абсолютная звездная величина Солнца равная $4^m,8$ и $\Delta M_{bol} = 0^m,1$.

Для определения абсолютной звездной величины (M_v) и светимости (L) звезды θ Aur значения параллакса ($\pi=0.02s$) брались из наблюдений Hipparcos [5]. С помощью найденных значений светимости и эффективной

температуры было установлено местоположение исследуемой звезды на диаграмме Герцшпрунга-Рессела (см. Рис.3) и, тем самым, определен ее эволюционный статус. Из рис 3 видно, что она является одной из старых проэволюционировавших звезд ($3,5 \cdot 10^8$ лет) и расположена ближе к верхней границе (TAMS) полосы ГП

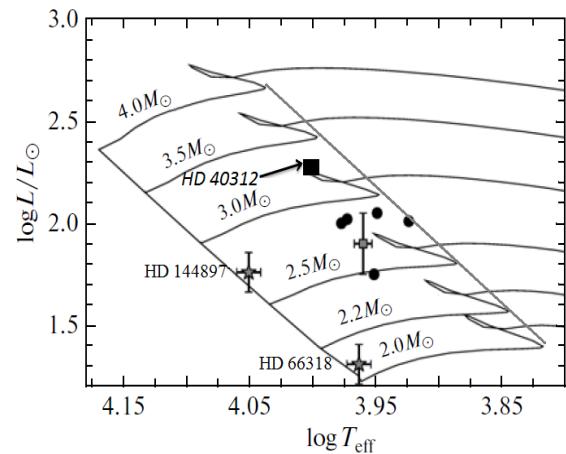


Рис.3
Диаграмма Герцшпрунга-Рессела с отмеченными положениями звезды HD 40312 и звезд сравнения HD 66318, HD 144897.

На этой диаграмме черным квадратом со стрелкой отмечено положение звезды θ Aur. Она располагается рядом с ранее изученными проэволюционировавшими МСР-звездами, отмеченными черными кружками. В эту же группу входят ряд старых звезд, такие как, HD 8441, HD 5797, HD 40711, HD 103498, HD 204411 и др. Для этой группы звезд характерны сильные и многочисленные линии элементов железного пика в спектрах. Однако линии пекулярных элементов Si, Cr и Ca по сравнению с молодыми звездами несколько ослаблены. На диаграмме звездочками обозначены звезды, обладающие сильными магнитными полями (HD66318, $B \approx 5000G$ и HD144897 $B \approx 4500G$). Эти молодые звезды обладают сильным магнитным полем, в спектрах которых наблюдается высокое содержание, как элементов железного пика, так и пекулярных элементов Si, Cr и Ca и др. [16]. Эти молодые

звезды были выбраны для сравнения с проэволюционировавшими MCP-звездами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

С помощью сравнений фазовых кривых интенсивности магнитного поля, эквивалентных ширин линий водорода, линий пекулярных элементов и блеска магнитной СР-звезды θ Aur получено, что наиболее пекулярная область находится на положительном полюсе магнитного поля. Результаты комплексных исследований позволили нам установить местоположение звезды θ Aur на диаграмме Герцшпрунга-Рассела и, тем самым, определить ее эволюционный статус. Она расположена рядом с проэволюционировавшими MCP-звездами, которые приближаются к концу жизни на ГП. В спектрах этой группы магнитных звезд интенсивности (спектральный индекс пекулярности $P(E)$) линии пекулярных

элементов по сравнению с молодыми MCP-звездами несколько ослаблены. Звезды этой группы, в том числе исследуемой звезды HD40312, обладают относительно слабыми магнитными полями ($B_e \leq 1\text{ kG}$), которые не характерны для магнитных СР-звезд [5]. Наблюдаемое максимальное значение магнитного поля для звезды HD40312 не превосходит 1kG. Тогда как у молодых подобных типов магнитных звезд величина продольного магнитного поля $B_e \geq 3\text{ kG}$.

Эти наблюдаемые факты указывают на то, что в ходе эволюции MCP звезды θ Aur ее магнитное поле и содержание (спектральный индекс пекулярности $P(E)$) пекулярных элементов Si, Cr и Ca уменьшается.

На основании вышеизложенных фактов, можно сделать вывод, что звезда θ Aur располагается в верхней полосе диаграммы Герцшпрунга-Рассела (TAMS) и приближается к концу жизни на Главной Последовательности.

1. В.Г.Ключкова, И.М.Копылов. *О скоростях вращения химически пекулярных звезд*, Астрономический журнал, **62** (1985) 947-955.
2. В.Г.Ключкова, И.М.Копылов. *Химически пекулярные звезды в группировках разного возраста*, Астрономический журнал, **63** (1986) 240-245.
3. Ю.В.Глаголевский, В.Г.Ключкова, И.М.Копылов. *Исследования магнитных полей химически пекулярных звезд*, Астрономический журнал, **64** (1987) 360-365.
4. S.Hubrig, P.North, G.Mathys. *Magnetic Ap Stars in the Hertzsprung-Russell Diagram*, Astrophys. J., **539** (2000) 352-363.
5. O.Kochukov, S.Bagnulo. Evolutionary state of magnetic chemically peculiar stars, Astronom. and Astrophys., **450** (2006) 763-775.
6. J.D.Landstreet, S.Bagnulo, V.Andretta et al. *Searching for links between magnetic fields and stellar evolution, II. The evolution of magnetic fields as revealed by observations of Ap stars in open clusters and associations*, Astronom. and Astrophys., **470** (2007) 685-698.
7. E.F.Borra, J.D.Landstreet. *The magnetic fields of the Ap stars*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **42** (1980) 421-445.
8. S.J.Adelman Stromgren uvby Photometry of the Magnetic Chemically Peculiar stars HR 1643, θ Aur, 49 Cam and HR 3724, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, **109** (1997) 9-14.
9. С.Г.Алиев, Н.З.Исмаилов. *Спектральная переменность Ap-звезды θ Aur*, Материалы международной конференции «Туси-800», Пиркули, 4-7 октября, (2001) 221-223.
10. С.Г.Алиев, Дж.Н.Рустамов. *Спектрофотометрическое исследование магнитно-переменной пекулярной звезды H 40312*, Циркуляр ШАО, №86 (1989) 3-8.
11. Kh.M.Mikailov, F.A.Musaev et all. *Shamakhy Fiber Echelle Spectrograph, Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **36** №1 (2020) 22-36.
12. R.L.Kurucz. CDROMs, Smithsonian Astrophys. Obs., (1993) 1-23.
13. И.М.Копылов. *Количественные спектральные индексы пекулярности СР-звезд верхней части Главной последовательности*, Астрофизические исследования, №24 (1987) 44-67.
14. В.Страйжис. *Многоцветная фотометрия звезд*, изд. «Мокслакс», Вильнюс, (1977). 305.
15. S.Hubrig, P.North, G.Mathys. Magnetic Ap stars in the H-R diagram, ESO Scientific preprint, №1372 (2000) 1-31.
16. F.R.Tatarenko et.al. *Chemical abundance and Evolutionary status of the Ap-star HD138633*, Pisma in Astron. J., **39** (2013) 390-400.

**QOCA AURIQA ULDUZ TOPASININ HD 40312 MAQNİT ULDUZUNUN
DƏYİŞKƏNLİK XÜSUSİYYƏTLƏRİ VƏ TƏKAMÜL STATUSUNUN TƏYİN EDİLMƏSİ**

S.H.ƏLİYEV, V.M.XƏLİLOV, Z.M.ALİŞOVA

Məqalədə θ Aur = HD40312 CP maqnit ulduzunun atmosfer parametrləri və təkamül statusunun tədqiqinin əsas nəticələri təqdim olunur. Maqnit sahəsinin (Be), parlaqlığının (V) və pekulyar elementlərin (Si, Cr, Ca, Sr və s.) ekvivalent enlərinin ($W\lambda$) faza asılılıqlarının müqayisəsi vasitəsilə ulduzun səthində ən çox pekulyar (P) və nisbətən normal (N) oblastlarına uyğun fazalar $\phi(P) = 0,05-0,1$ və $\phi(N) = 0,45-0,52$ tapılmışdır. $H\gamma$, $H\delta$ xəttlərinin profillərindən, Conson (UBV) və Strömgren (ubvy) sistemlərinin fotometrik indekslərindən istifadə edərək ulduzun fundamental parametrləri müəyyən edilmişdir.

Hertzsprung-Russell diaqramında θ Aur ulduzunun yeri müəyyən edilmiş və bununla da onun təkamül statusu təyin edilmişdir. Alınmışdır ki, HD40312 ulduzu BA zolağının yuxarı sərhəddində (TAMS) yerləşmişdir.

**STUDYING THE NATURE OF VARIABILITY AND EVOLUTIONARY STATUS
MAGNETIC STAR HD 40312 FROM THE OLD CLUSTER AURIGA**

S.H.ALİYEV, V.M.XALILOV, Z.M.ALİŞOVA

The results of studies of the atmospheric parameters and the evolutionary status of the magnetic SR star θ Aur = HD40312 have been presented. By comparing the phase curves of the magnetic field (Be), brightness (V) and equivalent widths ($W\lambda$) of the lines of peculiar elements (Si, Cr, Ca, Sr, etc.), the phases corresponding to the maximum peculiar $\phi(P)=0.05-0.1$ and relative normal region $\phi(N)=0.45-0.52$ on the stellar surface were found. The fundamental parameters of the star were determined from the line profiles ($H\gamma$, $H\delta$) and from the photometric indices in the Johnson (UBV) and Strömgren (ubvy) systems. The mass and luminosity of the star were found using standard relations.

The location of the star θ Aur on the Hertzsprung-Russell diagram has been established and thus, its evolutionary status has been determined. It was obtained that the star HD40312 has been located closer to the upper boundary (TAMS) of the MS band.