

## Магнитные CP-звезды Главной последовательности II. Физические параметры и химический состав атмосфер

И. И. Романюк

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167, Россия

Поступила в редакцию 24 декабря 2005 г.; принята к печати 27 января 2006 г.

Продолжение серии обзорных работ, посвященных магнитным CP-звездам. Показано, что частота встречаемости CP-звезд составляет примерно 15–20% среди звезд Главной последовательности спектральных классов B5–F0. Рассмотрены вопросы выделения и классификации этих объектов. Предпочтение отдается классификации Престона (1974), в которой химически пекулярные звезды делятся на следующие группы: Am,  $\lambda$  Boo, Ap/Bp, Hg–Mn, He-weak, He-strong. Кратко рассмотрены основные отличительные особенности объектов каждой группы. Показано, что скорости вращения CP-звезд примерно в 3 раза меньше, чем у нормальных звезд тех же спектральных классов (за исключением объектов типа  $\lambda$  Boo и He-strong). Периоды вращения CP-звезд заключены в пределах от 0.5 суток до 100 суток, но имеется небольшая группа с особо длинными (до десятков лет) периодами переменности. Все виды пекулярных звезд могут встречаться в визуально-двойных системах, причем Am- и Hg–Mn-звезды главным образом в короткопериодических с  $P < 10$  суток и процент двойных среди них близок к нормальному. Процент двойных среди магнитных звезд (20%) меньше, чем среди нормальных. При исследовании принадлежности CP-звезд к скоплениям выяснилось, что довольно большая доля CP1- и CP2-звезд встречается в молодых скоплениях (возраст менее  $10^7$  лет). Обсуждаются вопросы фотометрической и спектральной переменности пекулярных звезд разных типов, продемонстрировано, что вариации блеска и спектра показывают только объекты, обладающие магнитным полем. Рассматривается химический состав атмосфер CP-звезд различных типов. Определение содержания различных элементов выполняется, как правило, путем сравнения профилей линий наблюдаемого спектра и синтетического, рассчитанного для различных моделей атмосфер. Показано, что существуют различные механизмы, способствующие появлению химической неоднородности на поверхности, наиболее разработана гипотеза селективной диффузии атомов в условиях стабильной атмосферы. Уделено внимание также проблемам определения локального химического состава, в том числе стратификации элементов. У части самых холодных SrCrEu пекулярных звезд обнаружены быстрые вариации блеска с периодами от 6 до 15 мин. Они не связаны с вращением, а представляют собой нерадиальные пульсации. В заключительной части обзора рассмотрены фундаментальные параметры CP-звезд. Показано, что их эффективные температуры, светимости, радиусы и массы соответствуют аналогичным физическим параметрам нормальных звезд Главной последовательности тех же спектральных классов.

**Ключевые слова:** химически пекулярные звезды, магнитные поля звезд

### MAIN-SEQUENCE MAGNETIC CP-STARS. II. PHYSICAL PARAMETERS AND CHEMICAL COMPOSITION OF THE ATMOSPHERES, by I.I.Romanyuk.

This paper continues a series of reviews devoted to magnetic CP-stars. The occurrence frequency of CP-stars among B5–F0-type main-sequence stars is shown to be equal to about 15–20%. The problems of identification and classification of these objects are addressed. We prefer the classification of Preston (1974), which subdivides chemically peculiar stars into the following groups: Am,  $\lambda$  Boo, Ap/Bp, Hg–Mn, He-weak, and He-strong stars. The main characteristic features

of the objects of each group are briefly analyzed. The rotation velocities of CP stars are shown to be about three times lower than those of normal stars of the same spectral types (except for  $\lambda$  Boo and He-strong objects). The rotation periods of CP stars range from 0.5 to 100 days, however, there is also a small group of objects with especially long (up to several tens of years) variability periods. All kinds of peculiar stars occur in visual binaries. Am- and Hg-Mn-type stars are found mostly in short-period binaries with  $P < 10$  days and the binary rate of these stars is close to normal. The percentage of binaries among magnetic stars (20%) is lower than among normal stars. A rather large fraction of CP1- and CP2-type stars was found to occur in young clusters (with ages smaller than  $10^7$  years). The photometric and spectral variability of peculiar stars of various types is discussed and it is shown that only objects possessing magnetic fields exhibit light and spectral variations. The chemical composition of the atmospheres of CP stars of various types is considered. The abundances of various elements are usually determined by comparing the line profiles in the observed spectrum with those of the synthetic spectra computed for various model atmospheres. Different mechanisms are shown to contribute to chemical inhomogeneity at the star's surface, and the hypothesis of selective diffusion of atoms in a stable atmosphere is developed. Attention is also paid to the problems of the determination of local chemical composition including the stratification of elements. Some of the coolest SrCrEu peculiar stars are found to exhibit fast light variations with periods ranging from 6 to 15 min. These variations are not associated with rotation, but are due to nonradial pulsations. The final part of the the review considers the fundamental parameters of CP stars. The effective temperatures, luminosities, radii, and masses of these objects are shown to agree with the corresponding physical parameters of normal main-sequence stars of the same spectral types.

**Key words:** stars: chemically peculiar — stars: magnetic fields

## 1. Введение

Настоящая работа продолжает серию обзоров, посвященных магнитным химически пекулярным (CP) звездам. В первом из них (Романюк, 2005а) рассмотрены методы диагностики звездных магнитных полей. В представляемой статье проводится анализ результатов исследований физических параметров (вращения, двойственности, радиусов, масс, светимостей и пр.) CP-звезд всех типов, а также строения и химического состава их атмосфер. Особое внимание будет уделено магнитным CP-звездам и сравнению различных параметров магнитных и немагнитных пекулярных звезд. Вопросы, связанные с результатами измерений магнитных полей, предполагается рассмотреть в отдельной статье.

Более 100 лет назад, при выполнении массовой спектральной классификации для составленного Э. Пикерингом каталога HD, Антония Маури обнаружила, что звезда спектрального класса A “Сердце Карла XII” (другое название —  $\alpha^2$  Гончих Псов) имеет в спектре необычные, аномальные линии. Когда были обнаружены другие A-звезды с аномальными спектрами, за неимением других объяснений, их называли просто Ap (A-peculiar), или звездами типа  $\alpha^2$  CVn.

В 1913 г. известный пулковский астроном А. А. Белопольский обнаружил у той же  $\alpha^2$  CVn большую спектральную переменность: некоторые линии достигали интенсивности 50% от континуума, а затем исчезали. Дальнейшие наблюдения показали, что эти сильные и часто переменные аномальные линии принадлежат специфическим эле-

ментам, таким как хром, стронций, европий, гадолиний и др. Особенно удивительно было наличие в спектрах очень сильных и переменных линий редкоземельных элементов. Позже оказалось, что аномалии распространяются не только на звезды класса A, но и на поздние подтипы класса B, поэтому в целом эту группу звезд сейчас называют Ap/Vp звездами.

Есть еще другой вид пекулярных звезд — более поздние, так называемые металлические Am/Fm-звезды, которые характеризуются усиленными линиями элементов железного пика и отсутствием спектральной переменности.

Наиболее полный к настоящему времени “Общий каталог Ap/Vp- и Am/Fm-звезд”, содержащий сведения о почти 6700 таких объектах, был составлен Ренсоном и др. (1991а), а база данных для 3195 Ap/Vp-звезд описана в работе Ренсона и др. (1991б).

В семидесятые годы XX века стало ясно, что спектральные аномалии не являются результатом особенностей физических условий в атмосферах пекулярных звезд, а имеют химическую природу. Это отразилось и в названии: начиная с работы Престона (1974), принято называть их химически пекулярными (CP) звездами.

Многokrратно было показано, что химически пекулярные звезды — это объекты Главной последовательности, их пространственное распределение и скорости не отличаются от таковых для нормальных звезд той же температуры. Анализ недавних результатов, полученных со спутника ГИППАРХ, подтверждает эти представления.

Имеется несколько превосходных обзоров, посвященных СР-звездам и их магнитным полям (например, Борра и др. (1982), на русском языке — работа В. Л. Хохловой (1983)). К сожалению, большинство из них были написаны в восьмидесяти годы прошлого века, поэтому уже не могут отражать современного состояния проблемы. Тем не менее, некоторые из них, такие как, например, фундаментальная монография Вольф (1983), не утратили своего значения до настоящего времени.

Из последних — можно отметить обстоятельный фотометрический обзор Куртца и Мартинеса (2000), посвященный, в основном, быстрой переменности магнитных звезд. Очень много полезных сведений о химическом составе пекулярных и нормальных А-звезд приведено в монографии Л. С. Любимкова (1995).

Наблюдается существенный прогресс в моделировании звездных атмосфер. Вместо прежних одномерных строятся трехмерные модели, в том числе и атмосферы СР-звезд. Это связано как с резким повышением точности наблюдений, так и значительным увеличением вычислительных возможностей. Новейшие сведения по этому вопросу можно найти в материалах Симпозиума МАС “Моделирование звездных атмосфер” (Пискунов и др., 2003), проходившего в Уппсале (Швеция) в июне 2002 г. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен в 7 разделе настоящего обзора.

## 2. Частота встречаемости

Вопрос о частоте встречаемости тесно связан с критериями, по которым пекулярные звезды отделяют от нормальных. Практика показала, что разные подходы дают похожие результаты, поэтому можно считать вопрос, в целом, решенным.

Частоту встречаемости пекулярных звезд можно оценить, например, следующим образом. В работе Гомес и др. (1998а) показано, что в каталоге ГИПАРХ насчитывается 2578 нормальных звезд спектральных классов В5–F5 и 467 пекулярных ярче 7.5 звездной величины. Таким образом, частота встречаемости пекулярных звезд в этой выборке равна  $467/(2567+467) = 15.3\%$ .

Нам представляется, что список пекулярных и нормальных звезд ярче 7.5 величины практически исчерпан. Полученные нами цифры хорошо совпадают с прежними: в литературе обычно приводят частоту встречаемости 10–15% (например Хохлова, 1983).

Шнайдером (1993) представлены несколько отличающиеся данные о частоте встречаемости, правда, для самых ярких СР-звезд: для объектов ярче  $V = 6$  доля СР-звезд в области спектральных

классов В0–F2 составляет 26.6%, а для более узкого диапазона В6–F0 — 32.8%. В целом доля СР-звезд согласно Шнайдеру — 29.2% (440 из 1505) для звезд ярче  $V = 6$  и 23.9% (905 из 3788) для звезд ярче  $V = 7$ .

Таким образом, можно предположить некоторый рост доли пекулярных звезд с увеличением блеска объектов. Причина этого очевидна — спектры ярких звезд изучены более подробно, поэтому выявляются слабые пекулярности, которые не видны у менее изученных слабых объектов. Естественно, необходимо, чтобы исследователи пользовались одними и теми же количественными критериями при определении границы между пекулярными и нормальными звездами. Этот вопрос будет рассмотрен ниже.

Нам представляется разумным принять долю СР-звезд равной примерно 15–20% от всех звезд Главной последовательности спектральных классов В5–F0.

Нет сведений о каких-либо различиях в частоте встречаемости СР-звезд в скоплениях различных возрастов. В молодых (в Орионе и Скорпионе-Центавре) встречаются горячие пекулярные звезды с аномалиями гелия, в то время как в старых — более холодные, что имеет явно эволюционный смысл.

Получила широкую известность серия работ по исследованию пекулярных звезд в скоплениях разного возраста, выполненная на 6-м телескопе в восьмидесяти годы прошлого века под руководством И.М. Копылова. Используем некоторые ее результаты для выяснения вопроса о зависимости частоты встречаемости СР-звезд от возраста и других параметров. Для демонстрации приведем таблицу (см. табл. 1) из работы Ключковой и Копылова (1986а) в которой просуммированы результаты их обширного исследования СР-звезд в различных скоплениях. В ней приведены: название группы или скопления,  $\lg t$  — логарифм возраста ( $t$  — в годах),  $q$  — доля СР-звезд (в процентах) от общего количества звезд спектральных классов В2–A7 на ГП,  $n$  — количество изученных авторами Ар/Вр звезд.

Статистический анализ приведенных в табл. 1 данных показывает, что зависимость частоты встречаемости СР-звезд от возраста не наблюдается.

## 3. Выделение СР-звезд и их классификация

### 3.1. Общие критерии

Отличить пекулярную звезду от нормальной по спектру достаточно легко: аномалии видны даже

Таблица 1: CP-звезды в скоплениях разного возраста

Группа	lg t	q (%)	n	Группа	lg t	q (%)	n
Ori OB 1a	7.3	11	7	$\alpha$ Per	7.3	14	5
Ori OB 1b	6.6	8	6	Группа Плеяд	7.5	28	22
Ori OB 1c	6.4	8	11	Плеяды	8.1	6	4
Ori OB 1d	< 6.0	0	2	M 39	8.2	10	6
Per OB 2	6.4	6	9	M 34	8.3	27	4
Upper Sco				Поток UMa	8.6	14	9
Ядро	6.6	14	4	Coma	8.7	18	5
Внутр. зона	6.7	33	13				
Вост. зона	7.0	12	3				
Запад. зона	7.1	22	10				

на низкодисперсионных фотографических спектрах при визуальном просмотре, именно так отбирались пекулярные звезды при составлении каталога HD в конце XIX века. Главный признак: при нормальных линиях водорода усилены линии кремния, металлов и/или редких земель, а кальция ослаблены.

Впоследствии были найдены и другие отличительные особенности CP-звезд, в частности, широкие и мелкие депрессии в их непрерывных спектрах (Глаголевский, 1966; Кодайра, 1969). Это позволило разработать и реализовать количественные фотометрические способы их выделения (см., например, Майтцен, 1976; Руфенер, 1988 и др.). Среднеполосная фотоэлектрическая фотометрия оказалась эффективной при поисках пекулярных звезд и их классификации (подробнее об этом в монографии Страйжиса, 1977).

Спектры CP-звезд очень разнообразны; для каждой звезды характерны свои индивидуальные особенности, тем не менее попытки общей классификации предпринимались неоднократно. По современным представлениям химически пекулярные звезды могут быть поделены на две общие группы: магнитные и немагнитные. Сильные, упорядоченные магнитные поля были измерены у звезд Ap SrCrEu, Ap Si, Bp He-weak SiSrTi, Bp He-strong. В общем случае не найдены магнитные поля у Ap HgMn, Am/Fm, He-weak, P, Ga и звезд типа  $\lambda$  Boo.

Вплоть до начала 60-х спектральная классификация CP-звезд оставалась глазомерной. Впервые понятие количественной степени (индекса) пекулярности  $P$  некоторого элемента как отношение эквивалентной ширины линии этого элемента в спектре данной CP-звезды к ее эквивалентной ширине в спектре нормальной звезды с такой же температурой и спектральным классом было введено В. В. Леушиным (1971а,б).

И. М. Копылов (1987) определил количествен-

ные спектральные индексы пекулярности разных элементов у 160 CP-звезд. В интервале спектральных классов B2-A9 они были определены по избранным линиям Si II, Mn II, Cr II, Sr II, Eu II. Им были исследованы зависимости величины каждого из этих индексов от спектрального класса, поведение индексов  $P$  вдоль температурной последовательности, установлены температурные границы его появления и исчезновения.

Фараджиана (1987) выполнила обзор спектральной классификации CP-звезд. Она показала, что с развитием методов наблюдений резко возросла точность спектроскопии и соответственно точность определения содержания элементов. Стало возможным выявлять слабые аномалии, что, в результате, привело к существенному уменьшению доли нормальных звезд. Таким образом, вопрос о количественных критериях отбора очень важен. Фараджиана предлагает в качестве критерия взять величину 0.3 dex: если аномалии содержания ее превосходят, то считать звезду пекулярной. Мы полагаем такой критерий разумным, необходимо только помнить при этом о спектральной переменности CP-звезд.

Разработаны различные системы классификации CP-звезд, основанные на зависимости тех или иных проявлений пекулярности от физических параметров объектов. Широкое распространение получила система Престона (1974), в которой он разбил все CP-звезды на 4 группы в зависимости от температуры: CP1 — Am (наиболее холодные), CP2 — магнитные Ap/Bp, CP3 — HgMn и CP4 — наиболее горячие звезды с аномальными линиями гелия.

Имеются работы, в которых спектральная классификация проведена иным образом. Например, Яшек и Эгрет (1982) предлагают следующее деление CP-звезд на группы: 1) звезды с аномальными линиями гелия разделяются на 3 подгруппы: А — с усиленными линиями гелия, В — с ослаблен-

ными линиями гелия, С — с переменными линиями гелия; 2) классические Ар-звезды — на 4 подгруппы: А — Si  $\lambda$  4200 и Si, В — HgMn, С — Si+, D — SrCrEu в различных комбинациях; 3) Am-звезды, 4) звезды типа  $\lambda$  Boo. Они отмечают, что имеется некоторое перекрытие характеристик у звезд с ослабленными линиями гелия и типа Si  $\lambda$  4200.

Фотометрические классификации CP-звезд основаны на измерениях величины аномалий в распределении энергии в непрерывном спектре. В различных фотометрических системах CP-звезды выделяются по-разному, об этом детальнее см. в обзоре Фараджиана (1987). На наш взгляд, такой разницей отражает недостаточность нашего понимания физики явления пекулярности этих объектов, поэтому мы вынуждены довольствоваться феноменологическими зависимостями.

В дальнейшем изложении будем придерживаться классификации Престона (1974), которая, на наш взгляд, является наиболее физической. Приведем ее с учетом модификации Куртца и Мартинеса, 2000 (см. табл. 2).

### 3.2. Звезды с усиленными линиями металлов Am/Fm

Первую группу (CP1 по Престону) составляют более холодные и менее массивные Am/Fm-звезды, расположенные в интервале спектральных классов F5–A8 и температур 7000–10000 К. По их спектрам виден дефицит Ca или Sc (иногда обоих элементов одновременно) и избыток Sr и редкоземельных элементов — Eu и других лантаноидов. У них не обнаружено ни спектральной, ни фотометрической переменности, хотя в этой же части диаграммы Г–Р располагаются пульсирующие звезды типа  $\delta$  Sct и  $\delta$  Del, имеющие такие же массы и температуры. Am-звезды вращаются медленнее, чем нормальные, а процент двойных среди них гораздо выше, чем у нормальных звезд тех же масс (Абт и Голсон, 1962; Абт и Сноуден, 1973).

Эффективные температуры Am-звезд наиболее точно определяются методом инфракрасных потоков Блэквелла и Шаллиса (1977). Модификацию метода с учетом аномалий содержания и двойственности предложил Смейли (1993).

Химический состав исследовался различными методами анализа атмосфер у многих Am-звезд. Наибольшее распространение получили модели атмосфер Куруча, подробнее об этом будет сообщено в параграфе 8. Некоторые общие выводы: скорости вращения этих объектов малы, как правило  $v_e \sin i < 10$  км/с. Содержание легких элементов на полпорядка–порядок ниже солнечного, хрома, титана и железа — близки к солнечному, тяжелые и сверхтяжелые элементы усилены на 1–2 по-

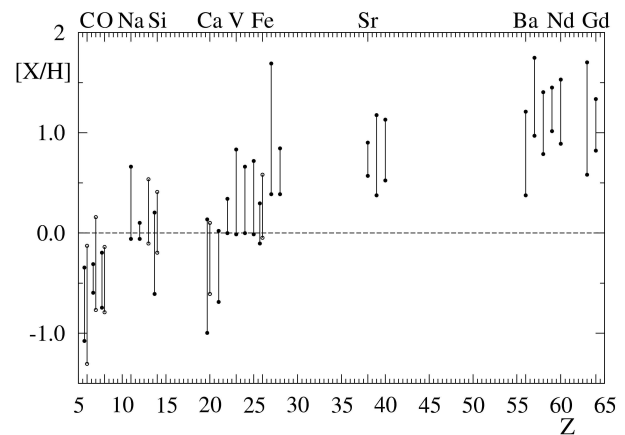


Рис. 1: Пределы изменения химического состава Am-звезд (из работы Любимкова, 1995).

рядка. На точность определения химсостава влияют: ошибки проведения непрерывного спектра, неточности определения эффективной температуры  $T_e$  и ускорения силы тяжести  $\log g$  (как правило они определяются по профилям водородных линий); плохое знание атомных параметров (сил осцилляторов, констант уширения и пр.); неадекватность моделей атмосферы.

Отметим большой вклад астрономов Крымской астрофизической обсерватории в изучении химического состава Am-звезд (в частности А.А. Боярчука, Л.С. Любимкова, И.С. Саванова). Результаты их исследований обобщены в монографии Любимкова (1995). Воспользуемся некоторыми сведениями из нее.

Для всех Am-звезд наблюдения показывают дефицит содержания легких элементов и сверхобилие тяжелых, но эта закономерность для конкретных звезд не строго одинаковая, каждая из них имеет индивидуальные особенности. Общее представление о том, в каких пределах может изменяться химический состав по разным элементам в спектрах разных Am-звезд, можно получить из рис. 1. Он взят из монографии Любимкова (1995), где приведено содержание 26 элементов в порядке увеличения их атомного номера Z.

На рисунке хорошо виден рост аномалий содержания с увеличением Z. Отклонения от усредненной зависимости для индивидуальных звезд невелики. Более подробные объяснения можно найти в указанной выше монографии.

Проводились поиски корреляций между аномалиями разных элементов. Согласно Боярчуку и Саванову (1986), обнаруживается довольно отчетливая связь между содержаниями Ca и Sc, а также La и Nd. Намечается корреляция содержания ванадия со скоростью вращения: чем оно быстрее,

Таблица 2: Классификация CP-звезд

Интервал температур	Магнитные звезды	Немагнитные звезды
7000–10000	Ap, SrCrEu A3-F0	Am, $\lambda$ Boo A0-A1
10000–14000	Ap Si B8-A2	Ap Hg-Mn B6-B9
13000–18000	He-weak Si, SrTi B3-B7	He-weak P Ga B4-B5
18000–22000	He-strong B1-B2	

тем меньше отклонение от нормального содержания. Предельная скорость вращения, при которой аномалии ванадия уже не существуют — около 100 км/с.

Среди Am-звезд имеется много ярких, в том числе ярчайшая звезда неба Сириус. Это дало возможность получить для некоторых из них высокоточный наблюдательный материал и провести детальное изучение спектров.

Двойственность Am-звезд осложняет процесс точного определения химсостава, так как часто компоненты двойной близки по своим характеристикам: спектральному классу, температуре, светимости. Для получения реального химсостава необходимо каждую из них изучать отдельно. Так как проблемы определения химического состава Am-звезд подробно обсуждаются в монографии Любимкова (1995), отошлем читателя к ней, здесь ограничимся лишь общими замечаниями. Больше внимания уделим поискам магнитных полей этих объектов.

Вопрос о присутствии магнитного поля у Am-звезд дискутируется до настоящего времени, хотя большинство исследователей его не обнаруживают. Первые эпизодические наблюдения провел Бэбкок. В своем каталоге (Бэбкок, 1958) он находит магнитное поле, по крайней мере, у двух Am-звезд ( $B_e = 400 \pm 42$  Гс у 68 Tau и  $375 \pm 35$  Гс у 16 Ori).

Конти (1969) занялся систематическими поисками магнитных полей Am-звезд с зеемановским анализатором на Ликском телескопе. Поле величиной более 50 Гс у двух наиболее ярких Am-звезд 16 Ori и 15 Vul обнаружено не было.

В.М. Кувшинов и его соавторы (Кувшинов, 1972; Кувшинов и др., 1975, Кувшинов и др., 1976) на фотоэлектрическом магнитометре КРАО обнаружили переменные магнитные поля порядка 100 Гс у Am-звезд 15 Vul и 68 Tau. По нашему мнению, поле такой величины находится за пределами обнаружения при наблюдениях с магнитометром КРАО.

Босгард и др. (1975) не обнаружили сильного

поля у  $\xi$  Boo A. Измерялись зеемановские спектрограммы, полученные на 224-см телескопе с  $D = 2$  Å/мм. Авторы не нашли магнитного поля и у Am-звезды  $\tau$  Peg.

Борра (1975) провел наблюдения Сириуса на 5-м телескопе при помощи магнитометра с интерферометром Фабри-Перо. Измерялась круговая поляризация в линии Fe II 4520 Å. Продольного поля больше нескольких Гс найдено не было, что не подтвердило более ранний результат астрономов КРАО. Проведенные нами впоследствии наблюдения Сириуса с интерферометром Фабри-Перо на 6-м телескопе не привели к обнаружению поля, однако категорически отвергать его наличие у этой звезды автор обзора не стал бы, так как в распределении круговой поляризации по профилю указанной линии временами появляются слабые особенности, характерные для магнитных звезд.

Если поле у Am-звезд все же существует, но имеет сложную, недипольную конфигурацию, методами анализа круговой поляризации его можно и не обнаружить (см. первую часть нашего обзора (Романюк, 2005а)). Альтернатива — это поиск магнитного уширения линий. Было выполнено несколько таких работ.

Матис и Ланц (1990) сообщают об обнаружении магнитного поля порядка 2 кГс у Am-звезды  $o$  Peg, но структура поля сложная. Поле заподозрено по магнитному уширению линий.

Бикмаев и др. (1998) нашли аномальное уширение линий в спектре 15 Vul, причиной которого авторы считают магнитное поле. Используя методику Стенфло-Линдегрена, по 164 линиям Fe I они нашли величину  $fB = 2.4$  кГс, при этом магнитные области более холодные. Поле предполагается сложной структуры. Таким образом, получены указания на то, что у Am-звезд поле существует, но имеет сложную структуру.

Шорлин и др. (2000) провели поиски магнитных полей у большой группы Am-звезд по циркулярно-поляризованным спектрам, используя процедуру LSD (подробнее в первой части нашего

обзора (Романюк, 2005а)). Наблюдения проводились на спектрополяриметре MUSICOS. Стандартное отклонение составило 15 Гс. Ни у одной звезды не было зарегистрировано магнитное поле. Следует иметь в виду, однако, что таким способом измерялась лишь продольная компонента магнитного поля, и в случае сложной структуры оно может быть и не обнаружено.

Таким образом, хотя большинство исследователей считает Am-звезды немагнитными (отсутствие спектральной переменности косвенным образом подтверждает этот тезис), мы не считаем проблему закрытой. Как правило, наблюдения круговой поляризации надежно свидетельствуют об отсутствии измеримых крупномасштабных продольных магнитных полей, в то же время наблюдается уширение линий, которое может быть вызвано магнитными полями, имеющими сложную недипольную структуру.

По-видимому, только высокоточные измерения 4-х параметров Стокса с высоким спектральным разрешением дадут ответ на вопрос о присутствии магнитных полей у Am-звезд.

### 3.3. Звезды типа $\lambda$ Boo

К немагнитным относятся также звезды типа  $\lambda$  Boo, которые имеют спектральный класс по водороду между A0 и F0, по линии K CaII — A0 или немного позже, в их спектрах присутствуют и очень слабые линии металлов, в частности Mg II 4481 Å. В классификации Престона группировка этих звезд отсутствует. К типу  $\lambda$  Boo принадлежит Вега — звезда, которую долгое время принимали в качестве стандартной по химическому составу и другим параметрам.

В монографии Любимкова (1995) приведены следующие классификационные особенности химического состава звезд этого типа: 1) практически нормальное содержание C, N, O; 2) дефицит ряда металлов от Mg до Ni, составляющий в среднем 0.5 dex.

Наблюдаемые вариации содержания элементов среди звезд типа  $\lambda$  Boo приведены на рис. 2. Видим, что в отличие от Am-звезд, наблюдается общий дефицит содержания химических элементов при отсутствии какой-либо зависимости от атомного номера элементов.

Долгое время шли споры об эволюционном статусе этих объектов — бедные металлами, они могли быть звездами первого поколения, а не “антипекулярными”. Заметим, что многие объекты типа  $\lambda$  Boo являются одновременно пульсирующими звездами класса  $\delta$  Sct (Паунзен и др., 1999). Но в настоящее время этот вопрос решен, рассматриваемые объекты не являются очень старыми звезда-

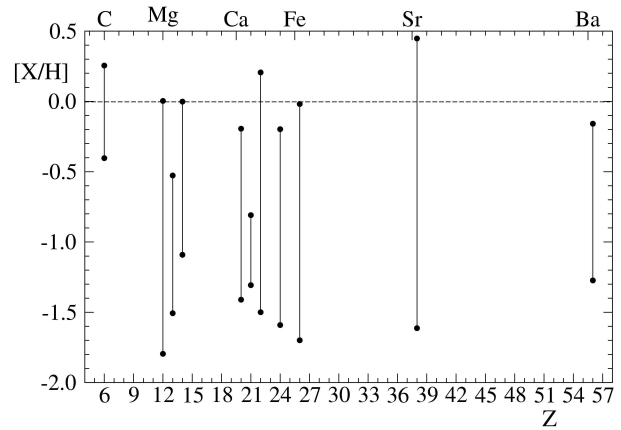


Рис. 2: Пределы изменения химического состава звезд  $\lambda$  Boo (из работы Любимкова, 1995).

ми, а дефицит металлов можно объяснить разными механизмами. Приведем их, следуя Любимкову (1995). Один из механизмов — гравитационная диффузия, если допустить, что имеет место потеря массы со скоростью порядка  $10^{-13}$  массы Солнца в год. Однако гипотеза диффузии сталкивается со следующими трудностями: 1) быстрое вращение, характерное для таких объектов, порождает меридианальную циркуляцию и тем самым препятствует диффузионному разделению элементов в атмосфере; 2) предсказанный на основе данной гипотезы дефицит металлов 0.5 dex существенно меньше наблюдаемого. Вторая гипотеза — понижение содержания металлов есть результат аккреции на эти звезды межзвездного вещества (в котором многие элементы находятся в дефиците вследствие того, что часть атомов пребывает в связанном состоянии в частицах межзвездной пыли).

Позже Паунзен (1998), используя данные спутника ГИППАРХ, нашел абсолютные звездные величины и определил эволюционный статус звезд типа  $\lambda$  Boo. Чтобы сделать выбор между двумя конкурирующими теориями возникновения аномалии химсостава (диффузия и/или потеря массы или аккреция) был определен возраст и использованием новых эволюционных треков. Результаты его вычислений показали, что эти объекты находятся очень близко к оси Главной последовательности. Они подтверждаются наблюдениями и эволюционными треками до Главной последовательности. Автор считает, что его новые результаты в большой степени соответствуют предсказаниям теории аккреции.

Остановимся несколько подробнее на вопросе о магнитных полях этих объектов. Из-за того, что звезды типа  $\lambda$  Boo быстро вращаются и имеют дефицит металлов, линии в их спектрах очень сла-

бые и широкие. Поэтому фотографическим способом (Романюк, 2005а) поиски магнитных полей выполнить было невозможно.

Результативные попытки поиска были предприняты на фотоэлектрических магнитометрах по линиям водорода. Первые результаты были получены на водородном магнитометре 6-м телескопа (Илиев и др., 1988, 1990). Круговой поляризации в крыльях водородных линий  $H_\beta$  и  $H_\gamma$ , вызванной продольным эффектом Зеемана, нами обнаружено не было. Немного позже Болендер и Ландстрит (1990) опубликовали большой обзор магнитных измерений звезд типа  $\lambda$  Boo. Ни у одного из объектов не было обнаружено продольного поля  $B_e$  по линиям водорода.

Таким образом, можно сделать вывод, что если крупномасштабное магнитное поле у этих объектов и имеется, то оно такое, что его продольный компонент не превышает 200–300 Гс.

### 3.4. Магнитные Ap/Vr-звезды

Во вторую группу (CP2) Престон (1974) включил магнитные звезды классов Ap/Vr с температурами 8000–15000 К. Они имеют наиболее ярко выраженные химические аномалии: резко усиленные линии некоторых элементов, в частности Si, Cr, Sr, Mn, Fe, Eu, Gd, Ce. Наблюдается дефицит кальция и других легких элементов. Сверхобилие тяжелых элементов может достигать фактора порядка  $10^5$ , а недостаток легких — фактора  $10^{-2}$ .

CP2-звезды найдены в скоплениях разного возраста ( $\lg t$  от 6.4 до 8.7 (Клочкова и Копылов, 1986а)), имеют малые скорости вращения, как правило,  $v_e \sin i$  не превышает 100 км/с.

Характерным признаком Ap/Vr-звезд является сильная переменность линий, причина которой — химическая неоднородность поверхности вращающейся звезды. Поэтому понятие химического состава атмосферы можно принять лишь с определенной натяжкой, правильнее вести речь о локальном химсоставе в том или ином месте на поверхности конкретной звезды.

Тем не менее, общие закономерности все же существуют. В целом, представление о химическом составе Ap/Vr-звезд можно получить из рис. 3 и рис. 4, взятых из монографии Любимкова (1995) в качестве примера. Разными значками на этих рисунках представлены данные разных авторов. За подробными объяснениями следует обращаться к оригинальной работе.

На рис. 3 представлено относительное содержание различных элементов (по отношению к солнечному) в атмосфере одной из наиболее холодных пекулярных звезд  $\beta$  CrB. Спектральной переменности у нее не замечено, неоднократные иссле-

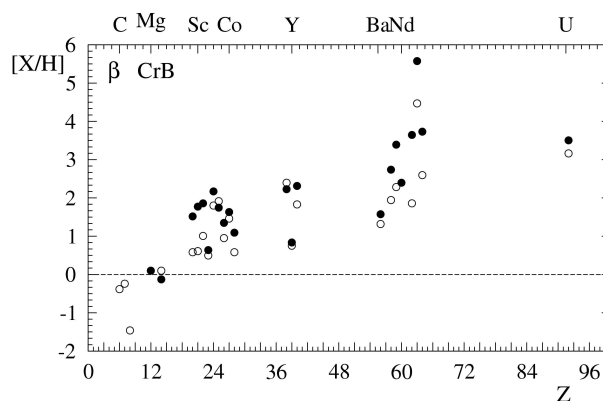


Рис. 3: Относительное содержание химических элементов в атмосфере  $\beta$  CrB (из работы Любимкова, 1995).

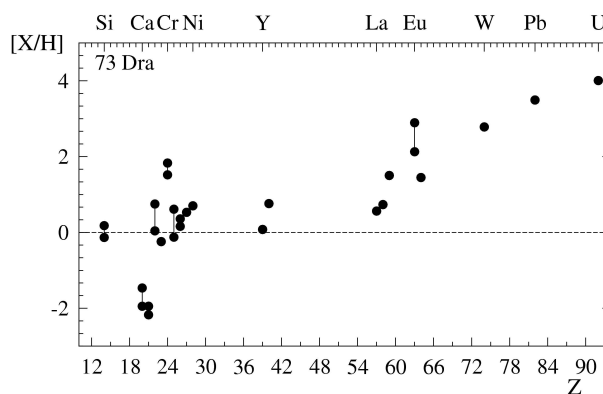


Рис. 4: Относительное содержание химических элементов в атмосфере CP-звезды 73 Dra (из работы Любимкова, 1995).

дования химического состава приводят к близким результатам.

На рис. 4 приведены данные о другой CP-звезде, 73 Дракона. Спектральные линии у нее переменны, что указывает на вариации химического состава по поверхности. Эффективная температура 73 Dra ( $T_e = 8900$  К) выше, чем у  $\beta$  CrB ( $T_e = 7900$  К), поэтому интересно оценить степень аномальности ее спектра. Содержание некоторых элементов этой звезды определено в двух фазах. Оно различно, что хорошо отражает явление пятнистого распределения элементов.

Видим, что, хотя различия в химическом составе двух звезд имеют место, сохраняется общая тенденция роста аномальности содержания с увеличением атомного номера элемента (так же, как у Am-звезд).

Детальное объяснение и указания на источники получения данных о химсоставе можно найти в указанной выше монографии Любимкова (1995).



Главная отличительная особенность CP звезд этого типа — сильные регулярные магнитные поля глобального характера величиной от сотен Гс (нижняя граница, обусловленная точностью измерений) до десятков кГс. В 2002 г. был опубликован наиболее полный каталог магнитных CP-звезд (Романюк, 2000). Он насчитывает 212 объектов. К настоящему времени обнаружено еще более 100 новых магнитных звезд, из них около 70 — на 6-м телескопе (Елькин и др., 2002, 2003, Кудрявцев и др., 2004, 2006) и более 40 — на 8-м телескопах VLT в Чили (Баньюло и др., 2006).

Результаты измерений магнитных полей Ap/Vp-звезд будут изложены в отдельной публикации. Здесь кратко отметим некоторые моменты.

Основные сведения о магнитных полях CP-звезд получены из измерений продольной компоненты  $B_e$ . Расщепленные зеемановские компоненты, позволяющие найти модуль усредненного по всей видимой поверхности вектора поля, найдены в спектрах менее чем у 20% из них.

Наблюдается периодическая синхронная фотометрическая, спектральная и магнитная переменность на шкале времени от суток до десятилетий. Это является доказательством того, что причиной всех видов вариаций является вращение химически неоднородной звезды с сильным магнитным полем общего характера (преимущественно дипольного), при этом оси — вращения и магнитная — непараллельны (модель наклонного ротатора).

Широкое развитие получили методы Доплер-Зеемановского картирования, при помощи которых удается построить более сложные модели. Детальнее о методах диагностики магнитных полей CP-звезд можно почитать в первой статье серии (Романюк, 2005а). Сведения о спектральной переменности, аномалиях химического состава и моделях атмосфер магнитных Ap- и Vp-звезд будут представлены ниже, в разделах 6 и 7.

Среди наиболее холодных Ap/Vp-звезд с аномалиями SrCrEu имеются быстро осциллирующие гоAp-звезды. Они были обнаружены Куртцем (1978). Быстрые осцилляции имеют периоды в пределах от 5 до 16 мин, наблюдаются как фотометрически — в широких полосах, так и в узких спектральных линиях. Эти периоды не связаны с вращением, а имеют другую природу.

Куртц и Мартинес (2000) сделали большой обзор гоAp-звезд, у многих из них обнаружены сильные магнитные поля. К настоящему времени выявлены 32 таких объекта. Пульсации магнитных звезд и их интерпретация будут рассмотрены подробнее в разделе 8.

### 3.5. Ртутно–марганцевые (Hg-Mn) звезды

Третья группа по Престону CP3 — ртутно–марганцевые (Hg-Mn) звезды с температурой в интервале 10000–15000 К. Их спектры характерны усиленными линиями ртути, марганца, платины, кобальта и хлора.

Каталог Hg-Mn-звезд, насчитывающий 111 объектов, составлен Шнайдером (1981). Звезды этого типа отличаются меньшей степенью пекулярности, чем классические Ap/Vp-звезды: у них практически отсутствует фотометрическая переменность, депрессия на 5200 Å очень незначительная. Более 60% этих объектов входят в двойные системы. У них не обнаружено какой-либо существенной переменности спектральных линий, свидетельствующей о наличии пятен на поверхности. Последние два обстоятельства, а также мнение об отсутствии измеримого продольного поля позволяет многим исследователям считать Hg-Mn-звезды продолжением последовательности Am-звезд в сторону высоких температур.

Однако недавно была опубликована работа Кочухова и др. (2005), в которой найдено неравномерное распределение ртути по поверхности у двух быстровращающихся Hg-Mn-звезд. На эшелле-спектрометре НЭС 6-м телескопа САО РАН с высоким спектральным разрешением были проведены наблюдения резонансной линии HgII 3984 Å в спектрах быстровращающихся Hg-Mn-звезд с атмосферными параметрами, похожими на параметры атмосферы  $\alpha$  And. Для обнаружения возможных горизонтальных неоднородностей использовалось моделирование синтетического спектра и преимущества доплеровского картирования поверхности, которое точнее выполняется для быстровращающихся звезд. Явное присутствие пятен обнаружено по профилям линии HgII 3984 Å у звезд HR 1185 и HR 8723. Два спектра последней звезды, разделенные по времени наблюдения на 2 суток, показывают переменность профиля линии. Сделан вывод о том, что неравномерное распределение Hg является распространенным явлением для быстровращающихся Hg-Mn-звезд в интервале температур 13000–13800 К независимо от стадии эволюции звезды. Этот результат указывает на факт существования нового класса спектрально-переменных пятнистых V-звезд. Предполагается, что наблюдаемые неоднородности Hg являются следствием динамических нестабильностей в процессах химической диффузии и не связаны с магнитными явлениями.

На наш взгляд, так же, как и в случае с Am-звездами, отсутствие магнитного поля у Hg-Mn-звезд не является надежно установленным фактом. Поле может иметь сложную структуру и об-

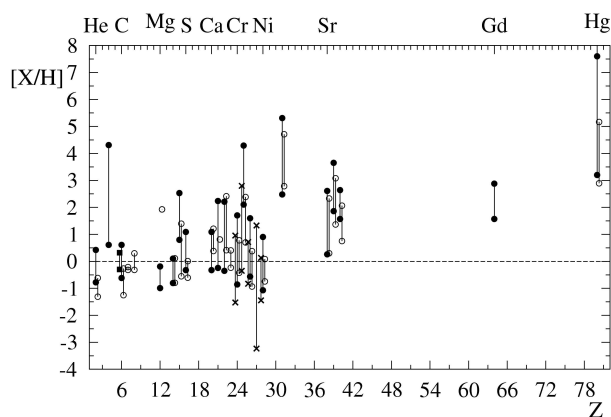


Рис. 5: Пределы изменения химического состава ртутно-марганцевых звезд (из работы Любимкова, 1995).

наружение пятен ртути, возможно, косвенный аргумент в пользу его существования у этих объектов. Несколько более подробно эта проблема будет рассмотрена ниже.

Аналізу химсостава Hg-Mn-звезд посвящено много работ, которые мы рассмотрим в разделе 7. Здесь же на рис. 5 продемонстрированы наблюдаемые вариации содержания элементов у ртутно-марганцевых звезд. Как и предыдущие, рисунок взят из работы Любимкова (1995). Там же можно найти детальные пояснения к рисунку. Здесь обращаем внимание на значительно меньший рост аномалий содержания с увеличением атомного номера элемента по сравнению с Am/Fm- и Ap/Vr-звездами.

Избыток ртути как правило составляет 4-5 порядков, марганца — 1-3 порядка. Теория гравитационной диффузии наиболее часто рассматривается в качестве объяснения аномалий химсостава Hg-Mn-звезд, но она не может объяснить все наблюдаемые особенности (Любимков, 1995).

Рассмотрим подробнее вопрос о возможном присутствии магнитных полей в атмосферах Hg-Mn-звезд. Так же, как и в случае Am-звезд, он не прояснен окончательно. Впервые магнитные поля у них были найдены Бэбоком (1958), однако его результаты регулярно подвергаются ревизии. Конти (1970) не нашел магнитных полей у четырех Hg-Mn-звезд, которые являются двухлинейчатými спектрально-двойными. Верхний предел поля — не более 500 Гс. Результат был получен по измерениям фотографических зеемановских спектров. Требовались более точные наблюдения. И они были проведены нами на 6-м телескопе с магнитометром высокого разрешения с интерферометром Фабри-Перо. Измерения магнитного поля ярчайшей Hg-Mn-звезды  $\alpha$  And, полу-

ченные путем усреднения наблюдений, проведенных на протяжении нескольких ночей, дали результат:  $B_e = 33 \pm 19$  Гс (Глаголевский и др., 1985). Таким образом, была получена оценка верхнего предела (порядка 60 Гс) величин возможного продольного (общего) поля этой звезды.

С другой стороны, группа, работающая на телескопах ESO в Чили, регулярно обнаруживает магнитные поля ртутно-марганцевых звезд (например Матис и Хубрик, 1995, Хубрик и др., 1999). По аномальному уширению линий, которое, по их мнению, имеет магнитную природу, они нашли поля величиной порядка единиц килогаусс у нескольких таких объектов.

Шорлин и др. (2000) провели наблюдения на спектрополяриметре MUSICOS с применением LSD-процедуры редукции. Продольное магнитное поле не было обнаружено для семи Hg-Mn-звезд. Ошибки измерений составляли в среднем 50–100 Гс. Аналогичный результат был получен Чунтоновым (2001), применившим модуляционный способ наблюдений с ПЗС-матрицей. Наблюдения 6 звезд с точностью 20–50 Гс показали отсутствие продольной компоненты поля.

По-видимому, следует считать доказанным, что сильного (кГс) дипольного магнитного поля в атмосферах ртутно-марганцевых звезд не существует. С другой стороны, имеется достаточно много указаний на поле как причину (в числе других) уширения линий. Обе группы данных объясняются, если предположить, что в атмосферах Hg-Mn-звезд существуют килогауссные поля сложной структуры. Проверить эту гипотезу можно путем проведения *IQUV*-наблюдений в спектральных линиях, что представляет собой трудную задачу.

Таким образом, многие обстоятельства указывают на то, что Hg-Mn-звезды являются продолжением в сторону более высоких температур последовательности Am-звезд.

Имеется уникальный случай: Хилл и Блэйк (1996) обнаружили сильное переменное магнитное поле  $B_e$  у звезды HD 22316. Несколькими независимыми авторами она классифицируется как Hg-Mn, но с усиленными линиями кобальта и хлора. Содержание двух последних элементов в несколько тысяч раз превышает нормальное. Существование сильного поля, продольный компонент которого меняется периодически и в максимуме превышает 2 кГс, подтверждено нашими наблюдениями на 6-м телескопе. Этот случай пока единственный, где продольное магнитное поле обнаружено надежно у звезды с аномалиями ртути и марганца.

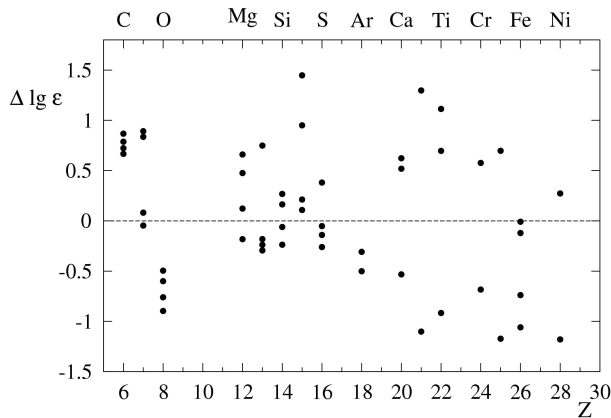


Рис. 6: Химический состав гелиевых звезд (из работы Любимкова, 1995).

### 3.6. Звезды с аномальными линиями гелия

Четвертая группа по классификации Престона (1974) CP4 — это звезды с аномальными линиями гелия (температурный интервал 13000–25000 К). Она состоит из двух подгрупп — более холодные звезды He-weak с ослабленными линиями гелия в спектрах и более горячие He-rich (или He-strong) с усиленными линиями гелия. CP4-звезды обладают сильными магнитными полями, как и звезды группы CP2.

Они быстро вращаются, средние величины  $v_e \sin i$  находятся в пределах 100–150 км/с, периоды вращения порядка 1–1.5 суток. Много звезд с аномальными линиями гелия найдено в молодых скоплениях, в частности в Орионе. Содержание других элементов, кроме гелия, близко к солнечному. Общий обзор звезд этой группы выполнен Глаголевским и Чунаковой (1986), а также Хунгером (1986).

Эффективные температуры  $T_e$  и ускорения силы тяжести  $\lg g$  соответствуют В-звездам Главной последовательности. В случае звезд He-r не существует фотометрических критериев, по которым их можно отличить от непекулярных объектов спектрального класса В. Звезды He-wk делятся на 3 подгруппы: 1) PGa (не показывающие ни фотометрической, ни спектральной переменности), 2) Si и 3) SrTi — спектрально и фотометрически переменные звезды.

Химический состав гелиевых звезд представлен на рис. 6 из работы Любимкова (1995). Видим, что, в отличие от CP-звезд других типов, здесь не наблюдается роста степени аномалий содержания с увеличением атомного номера элемента.

Магнитные поля гелиевых звезд были обнаружены и исследованы Борра и Ландстритом (см., например, их объемную работу 1979 г. и коммен-

тарии в ней).

CP-звезды с ослабленными линиями гелия изучены в работе Борра и др. (1983). Для 12 объектов было обнаружено или подтверждено существование магнитных полей; 9 из них принадлежат подгруппе кремниевых звезд или подгруппе SrTi Ар-звезд со слабыми линиями He. По-видимому, среди звезд He-wk, обладателей сильных магнитных полей (более 1 кГс) больше, чем среди Ар-звезд, но меньше, чем среди He-r-звезд.

В работах Борра и Ландстрита (1979), Болендера и др. (1987) исследованы звезды с усиленными линиями гелия. Авторы показали, что в целом как группа, звезды He-r имеют поля в 3 раза больше, чем Ар-звезды. Члены группы с большими и малыми скоростями вращения имеют сравнимые магнитные поля. Распределение по  $v_e \sin i$  соответствует распределению нормальных В-звезд, что указывает на относительную неэффективность магнитного торможения перед стадией ГП или во время жизни на ГП этих массивных короткоживущих объектов.

В заключение раздела отметим, что одна из основных феноменологических особенностей магнитных CP-звезд всех типов по сравнению с немагнитными — наличие спектральной переменности, указывающей на химическую неоднородность поверхности.

### 3.7. Положение на диаграмме Герцшпрунга–Рессела

Неоднократно было показано, что химически пекулярные звезды являются объектами Главной последовательности. Положение CP-звезд на диаграмме Герцшпрунга–Рессела проиллюстрировано, например, на рис. 7, взятом из работы Кочухова и Баньюло (2006).

На данные, полученные Нортон (1993) для звезд — членов рассеянных скоплений, были наложены эволюционные треки от начальной Главной последовательности для звезд с солнечным содержанием. Данные Норта свидетельствуют, что практически все CP-звезды лежат в полосе Главной последовательности. Кроме того, он делает заключение, что частота встречаемости не меняется с фазой эволюции (подтверждая вывод Ключковой и Копылова, 1986b).

Хубрик и др. (2000) снова рассмотрели этот вопрос с использованием данных, полученных со спутника ГИППАРХ. Они пришли к выводу, что на достаточно высоком уровне достоверности распределение магнитных Ар-звезд с массами менее 3-х солнечных на диаграмме Герцшпрунга–Рессела отличается в деталях от распределения нормальных звезд той же температуры. Магнитные звез-

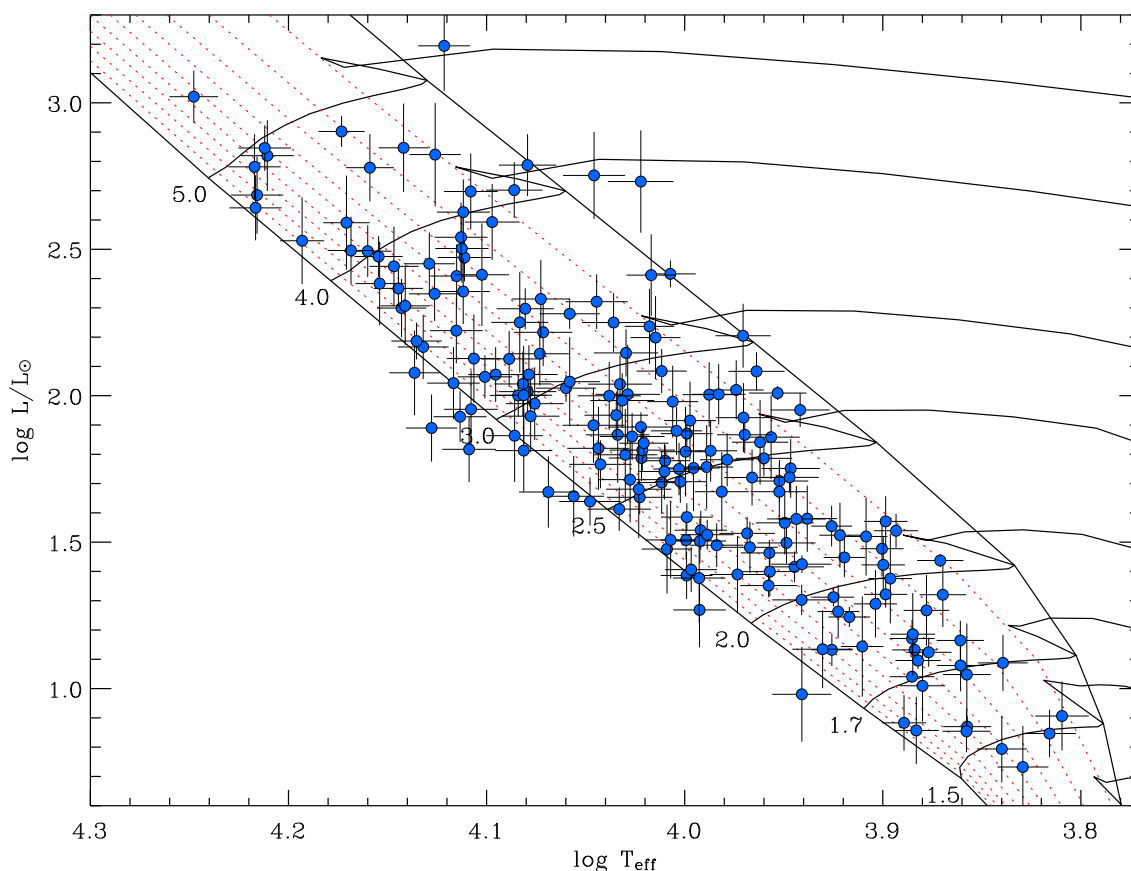


Рис. 7: Положение CP-звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рессела. Сплошной линией указаны теоретические эволюционные треки для звезд разной массы. Пунктиром отмечены линии одинакового относительного возраста в единицах времени жизни звезды на ГП с шагом 0.1 между ZAMS ( $\tau = 0$ ) и концом фазы горения водорода ( $\tau = 1$ ). Из статьи Кочухова и Баньюло (2006).

ды концентрируются к центру полосы Главной последовательности. В частности, было найдено, что магнитные поля появляются только у звезд, которые провели по крайней мере 30% времени своей жизни на ГП. Нет четкой картины эволюции магнитного поля во время пребывания на ГП. Были найдены соотношения между магнитным полем и другими звездными параметрами, в частности, обнаружено, что звезды с более короткими периодами имеют более сильное поле. Нет корреляции между периодом вращения, частотой встречаемости и временем жизни на ГП, и это указывает, что замедление вращения этих звезд произошло до того времени, как они стали магнитными.

Не со всеми выводами этой работы автор обзора может согласиться, так как некоторые из них, в частности, касающиеся эволюции магнитных полей, еще не подкреплены достаточно надежными наблюдательными данными. Тем не менее в ней получены новые обширные и более точные данные. Впервые для этой цели были использованы результаты работы спутника ГИППАРХ, что позволило

определить абсолютные светимости многих CP-звезд. Новые данные позволяют более детально проанализировать эволюционный статус магнитных звезд, но главное — еще раз надежно подтвержден вывод о том, что эти объекты принадлежат Главной последовательности и их фундаментальные параметры (за исключением скорости вращения), в целом, практически не отличаются от параметров нормальных звезд ГП.

## 4. Вращение CP-звезд

### 4.1. Скорости вращения

Положение A- и B-звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рессела таково, что они должны вращаться быстро (экваториальные скорости вплоть до 300 км/с) и не подвергаться магнитному торможению. Распределение скоростей вращения A-звезд подробно рассмотрено в работе Ройе и др. (2005). С использованием однородной выборки величин  $v_e \sin i$  для A-звезд Главной последо-

Таблица 3: Средние значения  $v_e \sin i$  (км/с) для пекулярных и нормальных А-звезд

Спектр. класс	Нормальные звезды			Пекулярные звезды	
	V	IV	III	Ap	Am
A0–A1	142	62	52	32	30
A2–A4	131	62	68	41	42
A5–F0	125	89	73	30	46

вательности были определены экваториальные скорости вращения  $v_e$  как функция спектрального класса в интервале от В9 до F0. Химически пекулярные и двойные звезды не рассматривались. Показано, что поздние В и ранние А-звезды имеют бимодальное распределение вычисленных экваториальных скоростей (с максимумами на величинах примерно 200 км/с и 50 км/с), по-видимому, связанное с потерей углового момента до прихода звезды на ГП. Более холодные (A2–A9) звезды имеют скорости вращения от 0 до 70 км/с без явно выраженных максимумов.

Скорости вращения СР-звезд (за исключением подклассов  $\lambda$  Воо и He-г) необычно малы по сравнению с нормальными звездами этого же спектрального класса. Так как в наблюдениях мы получаем не прямо экваториальные скорости вращения  $v_e$ , а лишь их проекции на луч зрения  $v_e \sin i$ , то возникали опасения двух видов: 1) пекулярные звезды имеют такие же скорости вращения, как и нормальные, но мы их видим со стороны полюсов; 2) многие объекты могут быть вообще не отнесены к группе пекулярных из-за уменьшения центральных остаточных интенсивностей аномальных линий при быстром вращении.

В настоящее время эти опасения сняты: доказано более медленное вращение СР-звезд. В отличие от нормальных, для пекулярных звезд можно определить, кроме  $v_e \sin i$ , и периоды вращения. Найдена очень четкая обратная зависимость между  $v_e \sin i$  и периодом вращения, надежно доказывающая существенно более низкую угловую скорость вращения пекулярных звезд.

В фундаментальной работе последних лет (Абт и Моррел, 1995) исследовано вращение 1700 северных А-звезд. В предположении случайной ориентации осей вращения найдено, что все быстрые ротаторы имеют нормальные спектры, а почти все медленные — аномальные (Ap или Am). Некоторые результаты этого анализа приведем в табл. 3.

Показано существенное и статистически значимое различие в распределении скоростей вращения нормальных и пекулярных А-звезд. В предположении случайной ориентации осей вращения величина  $v_e$  для А звезд V класса светимости имеет

максимум в распределении около 200 км/с, а пекулярных (Ap+Am) — около 50 км/с. Новые данные подтверждают старые: не удалось обнаружить пекулярные звезды среди быстрых ротаторов и нормальные — среди медленных.

Распределение скоростей вращения среди магнитных Ap/Vp-звезд различных подклассов рассмотрел Смит (1996). Основные данные он взял из известной монографии С. Вольф (1983). Найдено, что в группу Si-звезд входит много быстрых ротаторов ( $v_e \sin i > 100$  км/с), в то же время среди SrCrEu-звезд таких нет. Это служит неким указанием общего уменьшения величины  $v_e \sin i$  для Ap/Vp-звезд с уменьшением массы. В то же время скорости вращения звезд  $\lambda$  Воо и He-г соответствуют нормальным (Абт и Моррел, 1995).

Интересен вопрос о связи аномалий химсостава и вращения. Заметим, что имеется очень малое перекрытие в распределении Am- и нормальных А-звезд в области  $v_e \sin i < 40$  км/с (впервые обнаружено Вольф и Вольф (1974) и подтверждено Абтом и Моррел (1995)). Все или почти все медленноротацирующие А-звезды — пекулярные.

Для поздних В-звезд картина немного другая. В обзоре Вольф и Престона (1978) Hg-Mn-звезд показано, что среди них нет объектов с  $v_e \sin i > 100$  км/с, но зато найдены поздние В-звезды с медленным вращением ( $v_e \sin i < 40$  км/с), которые не показывают Hg-Mn-пекулярностей. Таким образом, медленное вращение является необходимым, но недостаточным условием для появления Hg-Mn-характеристик звезд.

В нашей работе (Романюк, 2004) было показано, что фотометрический индекс  $\Delta a$ , характеризующий глубину депрессии континуума на 5200 Å, увеличивается с ростом периода вращения (в интервале температур 8000–11000 К), таким образом, степень аномальности континуума выше для медленных ротаторов.

## 4.2. Периоды вращения

В отличие от нормальных звезд, в спектрах Ap- и Vp-звезд наблюдается синхронная периодическая спектральная, фотометрическая и магнитная переменность, которая однозначно интерпретируется как следствие вращения звезды с химически неоднородной поверхностью. Как мы уже указывали в предыдущем параграфе, наблюдается четкая обратная зависимость между скоростями и периодами вращения СР-звезд, что надежно доказывает справедливость модели наклонного ротатора для этих объектов.

Каталог наблюдаемых периодов Ap- и Vp-звезд составлен Каталано и Ренсоном (1998). В нем содержатся данные о 364 СР-звездах классов CP2,

CP3 и CP4. Впоследствии были опубликованы несколько дополнений: последнее в 2001 г. (Ренсон и Каталано, 2001). В каталоге и дополнениях к нему содержатся сведения о всех определениях периода для каждой звезды с указанием первоисточников.

Анализируя данные каталога, делаем вывод, что периоды вращения CP-звезд заключены в пределах от 0.5 суток до 100 суток, но имеется небольшая группа звезд с особо длинными (годы и десятки лет) периодами.

Наблюдается очень хорошее согласие между скоростями вращения, определенными по ширинам спектральных линий и получаемыми по размерам звезды и периоду вращения. Это указывает на адекватное представление магнитной звезды моделью наклонного ротатора. Даже у звезд типа  $\gamma$ Eri с периодом изменения поля порядка 75 лет она справедлива.

Радиусы CP-звезд можно независимо определить по эффективным температурам и светимостям. Многочисленные исследования показывают, что они находятся в пределах от 1.7 до 5 солнечных (например Штифт, 1974).

Экваториальная скорость вращения  $v_e$  вычисляется по простой формуле:

$$v_e = 50.6R/P, \quad (1)$$

при этом скорость вращения измеряется в км/с, радиус  $R$  — в единицах солнечного радиуса, а период  $P$  — в сутках.

Так как малые скорости вращения пекулярных звезд хорошо известны, в литературе регулярно обсуждается проблема замедления их вращения. Наиболее часто для этого исследуют CP-звезды в скоплениях разного возраста. На начальном этапе результаты разных авторов противоречили друг другу.

Вольф (1975) нашла корреляцию периодов вращения Ar-звезд (кроме кремниевых) с их радиусами: чем больше период, тем больше радиус. Это было ею интерпретировано как наблюдаемое свидетельство существования замедления вращения за время пребывания звезды на Главной последовательности. Кремниевые Ar-звезды более массивны, чем остальные, и время их жизни на ГП недостаточно для существенного замедления. Впоследствии Вольф (1981) исследовала скорости вращения звезд в скоплениях и получила зависимость от возраста и для Si-звезд. Она предложила механизм магнитной аккреции для объяснения этого торможения. Но большинство исследователей с выводом о существовании магнитного торможения на ГП не соглашались.

На наш взгляд, наиболее существенный вклад в решение этой проблемы внесли В. Г. Ключкова и

И. М. Копылов. Их результаты суммированы в работах Ключковой и Копылова (1986 a,b). Авторы исследовали 108 CP-звезд в 10 скоплениях в интервале возрастов  $\lg t = 6.4-8.7$  лет. Скорости вращения рассматривались отдельно для четырех типов пекулярности: 1) He-weak (90 звезд), 2) кремниевые (49 звезд), 3) SrCrEu (22 звезды) и 4) ртутно-марганцевые (46 звезд). Для всех групп не было найдено никакой корреляции с возрастом. Был сделан вывод, что нет существенной потери углового момента всеми типами CP-звезд на протяжении эволюции внутри полосы ГП.

П. Норт (1998), придерживавшийся ранее точки зрения о том, что существует магнитное торможение на ГП, после обработки данных для большой выборки звезд, полученных со спутника ГИП-ПАРХ, пришел к выводу, что нет никаких доказательств потери углового момента Si-звездами во время их жизни на Главной последовательности.

В настоящее время вывод об отсутствии магнитного торможения на ГП является общепринятым, следовательно, надо принять, что малые скорости вращения CP-звезды получили на стадиях эволюции, предшествующих ей.

Детальное исследование магнитных CP-звезд, имеющих периоды вращения от долей суток до десятков лет, проведено в работе Романюка (2004). В ней показано, что сложная структура поля наблюдается только у быстрых ротаторов. Магнитное поле медленных ротаторов несколько слабее, чем у быстрых, однако такое уменьшение поля нельзя объяснить работой механизма динамо.

## 5. Двойственность

### 5.1. Общие сведения

Все виды пекулярных звезд могут встречаться в визуально-двойных системах, причем Am- и Hg-Mn-звезды главным образом в короткопериодических ( $P$  меньше 10 дней), и процент двойных среди них близок к нормальному. Двойных среди магнитных звезд 20%, что меньше, чем среди нормальных. При исследовании принадлежности CP-звезд к скоплениям выяснилось, что довольно большая доля двойных CP1- и CP2-звезд встречается в молодых скоплениях (возраст менее  $10^7$  лет).

Ниже отметим некоторые из первых работ по этой теме. Одними из первых Абт и Сноуден (1973) предприняли поиски спектрально-двойных среди Ar-звезд. Исследовались 62 объекта. Найдено, что среди Hg-Mn-звезд — 40% двойных, а среди кремниевых звезд и звезд группы SrCrEu число двойных значительно более низкое — всего 20%. Авторы сделали заключение, что сильные магнит-

ные поля кремниевых и SrCrEu-звезд препятствуют образованию двойных с расстояниями между компонентами  $10^6$ – $10^9$  км. Во всех трех группах CP-звезд могут образовываться системы с расстоянием между ними  $10^{10}$ – $10^{11}$  км. Вероятность того, что в двойных встречаются компоненты с очень низкими массами ( $\sim 0.01 M_{\odot}$ ), очень мала.

В работе Желвановой и др. (1976) подтверждено малое число спектрально-двойных среди Ar-звезд и нормальное для ртутно-марганцевых. Распределение периодов и эксцентриситетов орбит для Ar и нормальных звезд различно. Найден недостаток тесных пар среди пекулярных.

Подробные исследования вопроса о спектральной двойственности CP-звезд опубликованы в работах Китамура (1980), Зегевиса (1981) и других.

Шнайдер (1986) проанализировал двойственность ртутно-марганцевых звезд. Из 111 исследованных объектов 56.7% оказались двойными и еще 15.3% — возможными двойными. В распределении периодов имеется максимум — около 7 суток и заметный дефицит периодов — менее 3 суток. Системы с периодами менее 15 суток вращаются синхронно, а более широкие пары — нет.

В работе Жербальди и др. (1986) проведено подробное исследование частоты встречаемости двойных среди различных групп пекулярных звезд, основанное на анализе большой выборки данных. Результаты этой работы не потеряли актуальности до настоящего времени (они приведены в табл. 4).

## 5.2. Характеристики орбит двойных CP-звезд

Для большинства двойных орбиты неизвестны (Хенсберг и Ван Ренсберген, 1986). Только 23 из 97 Hg–Mn двойных и 26 из 233 классических CP-звезд были изучены Жербальди и др. (1986). Отмечен недостаток коротких периодов (менее 3 суток) и круговых орбит. Двухспектровые двойные редки и только одна пекулярная звезда из них оказалась затменной (Норт, 1984).

Am-звезды очень часто находят в двойных системах (например Норт и др., 1998b). Важно найти двухлинейчатые двойные, у которых хотя бы один компонент является пекулярной звездой.

Отметим работу Илиева и др. (2005) по поиску SB2-систем среди избранных Am-двойных. Авторы нашли спектры вторичной компоненты в системах HD 434, HD 861, HD 108642, HD 178449, HD 216608. Были найдены периоды и построены орбиты каждой из них. Отношения масс компонент находятся в пределах от 1.1 до 2, в среднем около 1.5. Спектры обеих звезд очень похожи в большинстве случаев, вероятно, вторичный компонент

также является Am-звездой.

Будай (1996, 1997) нашел указания на то, что наблюдаемые особенности содержания химического состава Am-звезд зависят от элементов орбиты в двойной системе. Аномалии более выражены в системах с большим эксцентриситетом, а также, вероятно, с более длинными орбитальными периодами.

Норт и др. (1998a) измерили лучевые скорости холодных Ar- и Am-звезд, входящих в кратные системы. Найдено, что HD 8441 является не только членом двойной системы с периодом обращения  $P = 106.357$  суток, но и входит в тройную систему. Третий компаньон имеет период обращения более 5000 суток. Улучшены параметры орбиты классической Ar-звезды  $\beta$  CrB. Найдены новые элементы орбиты для двух Am, SB2-двойных HD 43478 и HD 96391.

Из последних обширных исследований по этой проблеме следует отметить работу Карье и др. (2002). В ней получены орбиты 16 двухлинейчатых (SB2) двойных с пекулярным компонентом. 4 из них — Am-звезды. 12 других — это Ar-звезды: HD 9996, HD 12288, HD 40711, HD 54908, HD 65339, HD 73709, HD 105680, HD 138426, HD 184471, HD 188854, HD 200405 и HD 216533. Для известной магнитной звезды 53 Cam (HD 65339) была проведена оценка масс компонентов с учетом измеренных авторами лучевых скоростей, данных спекл-интерферометрии и параллаксов, полученных на ГИППАРХе. Определив функцию масс 74 спектрально-двойных, авторы работы заключают, что распределение отношения масс является одинаковым для холодных Ar-звезд и G-карликов. Таким образом, разница между двойными с нормальными компонентами и содержащими Ar-звезду состоит только в распределении периодов. За исключением HD 200405, орбитальные периоды всех двойных с пекулярным компонентом больше или равны 3 суткам. Следствием этого пекулярного распределения является дефицит нулевых эксцентриситетов. Нет никаких указаний на то, что вторичные компоненты имеют специальные характеристики (например являются белыми карликами и т.п.).

Таким образом, завершая этот параграф, можно сделать заключение, что доля двойных среди немагнитных Am и Hg–Mn пекулярных звезд примерно равна или больше, чем для нормальных звезд GP тех же спектральных классов, в то же время наблюдается недостаток двойных среди магнитных Ar/Vr-звезд. CP-звездой является главный компонент, либо пекулярными являются оба.

Таблица 4: Количество и процент двойных среди CP-звезд различных типов

	He-wk	Si	SCr/SiSr	HgMn	SrCr	Eu+
	Количество звезд					
$m < 5$	7	17	1	15	13	6
$5 < m < 6$	19	63	9	41	17	14
$m > 6$	5	40	13	41	20	20
Общее	31	120	23	97	50	40
	Процент двойных					
Спектрально-двойные						
$m < 5$	43%	65%	100%	53%	31%	50%
$5 < m < 6$	21%	14%	22%	36%	41%	36%
$m > 6$	0%	7%	8%	17%	10%	5%
Общее	22%	19%	17%	31%	26%	22%
	Процент двойных и переменность $v_r$					
Спектрально-двойные и переменность $v_r$						
$m < 5$	43%	70%	100%	67%	69%	100%
$5 < m < 6$	47%	36%	55%	71%	53%	57%
$m > 6$	20%	32%	15%	37%	25%	20%
Общее	42%	40%	35%	54%	46%	45%

## 6. Фотометрическая и спектральная переменность

### 6.1. Фотометрическая переменность

В настоящем разделе мы будем обсуждать “усредненные вариации блеска”, не затрагивая быстрых осцилляций  $\gamma$ Ar-звезд, которые происходят на шкале от 5 до 16 мин (Куртц и Мартинес, 2000).

В большинстве магнитных CP-звезд наблюдается переменность блеска. Это модулированные вращением вариации блеска, связанные с неоднородностями химсостава. Стандартное объяснение: редкие земли собираются в пятна на магнитных полюсах, они имеют много абсорбционных линий в ультрафиолетовом и голубом диапазоне спектра, это приводит к тому, что звезда становится более тусклой в этой области, когда магнитный полюс попадает на луч зрения. Блокировка линиями увеличивает температурный градиент.

Согласно обзору Жижновского (1994), фотометрическая переменность была обнаружена Гутником и Прагером в 1914 г. Они построили кривую блеска  $\alpha^2$  CVn. Позже Абт и Голсон (1962) пришли к выводу, что все магнитные звезды переменные. Каталог наблюдаемых периодов CP-звезд Каталано и Ренсона (1998) и несколько Приложений к нему, содержащий сведения о периодах около 500 объектов, основан главным образом на данных фотометрии.

В работе Стемпеня (1968) впервые сделано заключение, что существует связь между фотометрической, спектральной и магнитной переменностью CP-звезд. Возникли трудности из-за того, что форма кривой блеска и амплитуда переменности

в разных полосах неодинаковы. Были найдены и такие случаи, когда в одной полосе наблюдается двойная волна, в другой — одна волна, и полное отсутствие переменности в третьей. Некоторые из кривых блеска находятся в противофазе не только с магнитными кривыми, но в разных полосах и между собой.

Петерсон (1970) предложил решение, основанное на перераспределении потока, вызванного поглощением линиями Si в ультрафиолетовой области спектра. Наблюдения в ультрафиолете показали, что это может привести к изменениям в визуальной области спектра.

В табл. 5 приведены параметры 11 затменно-переменных звезд, взятые из обзора Жижновского (1994). Эти объекты представляют особый интерес, так как детальное исследование блеска и спектра в фазе затмения может дать ценную информацию о структуре поверхности химически неоднородной звезды и геометрии ее магнитного поля.

В колонках таблицы приведены название звезды и ее номер в каталогах HD или BD, спектр и тип пекулярности, орбитальный период в сутках и звездная величина  $V$  вне затмения.

Фотометрическая переменность CP-звезд исследуется не только в широких спектральных областях, выделяемых фильтрами системы UVV, широко распространены измерения в различных узких полосах. Так, Мусиелок и Мадей (1988) представили результаты измерений  $\beta$ -индекса для 22 Ar-звезд. Для 17-ти из них фотометрия дает периодическую переменность  $\beta$ -индекса с фазой вращения, для остальных 5 найден верхний предел переменности. Обсуждаются 2 механизма,



Таблица 5: Некоторые параметры затменно-переменных CP-звезд

Звезда	HD/BD	Sp (Pec)	Период	V
YZ Cas	HD 4161	A2m (Sr)	4.4672	5.71
VV Scl	HD 7676	A5 (SrCrEu)	2.4796	8.40
AR Aur	HD 34364	B9 (HgMn) (Cr)	4.1347	6.15
AO Vel	HD 68826	A0 (Si)	1.5846	9.60
$\omega$ UMa	HD 94334	B9.5 (SrCrEu)	15.8318	4.68
AX Vir	BD +4°2748	A2 (?)	0.7025	10.00
TV Nor	HD 143654	A0 (SrCrEu)	8.5244	8.90
CC Her	HD 146772	A1 (Sr)	1.7340	10.20
V 2125 Oph	HD 159376	B8 (Si)	9.75	6.57
V 624 Her	HD 161321	A3 (SiSr)	3.8950	6.18
V 392 Car	Co -60°691	A2 (SrCrEu)	3.1750	9.50

предлагаемые для объяснения переменности водородных линий: вертикальная и горизонтальная неоднородность, вызванная диффузией элементов, и возможность искажения атмосферы магнитной звезды сильными электрическими токами.

В работе Майтцена и др. (2000) представлены результаты  $H_{\beta}$ -фотометрии CP-звезд ярче 8.5 зв. величины. По данным ГИППАРХа были вычислены абсолютные звездные величины 152 CP-звезд. Они были сравнены с данными для 1147 нормальных звезд классов В–F. Получилось, что в среднем CP-звезды ярче на 0.5 величины, чем нормальные.

Обзор последних результатов в области изучения фотометрической переменности дан Жижновским (2004). Вкратце опишем их, следуя указанному обзору.

Большинство недавних открытий CP-звезд сделано Паунзенем и Майтценом (1998). Были найдены периоды вращения 130 звезд из каталога Ренсона и др. (1991b). Они находятся в пределах от 25.4 суток (HD 92106) до 0.135 суток (HD 79781). Последняя звезда является наиболее быстрым ротатором среди CP2-звезд. Адельман (1998) обратил внимание на немагнитные CP-звезды, наблюдаемые ГИППАРХом, и сделал вывод, что среди них Am-звезды более постоянны, чем ртутно-марганцевые.

Яркую двойную как затменную открыл Торрес (2003) в скоплении Плеяды. Эта звезда (HD 23642) давно известна как двойная с наблюдаемыми спектрами обеих компонент (SB2). Очень важно, что обе компоненты HD 23642 являются CP-звездами: A0p(Si)+Am (Абт и Левато, 1978). Затменные CP-звезды представляют собой довольно редкий случай, только два объекта, HD 23642 и HD 121276, и были обнаружены в последние 10 лет (Норт, 1995).

Большой вклад в увеличение количества фотометрических данных для разных групп CP-звезд внесли Адельман и Пайпер. На протяжении 12 лет,

используя автоматический фотометрический телескоп, они выполнили большое количество UVB- и uvby-измерений, найдены периоды переменности многих десятков объектов.

Переменность магнитных звезд искали не только в оптической области спектра. Длительный мониторинг CP2-звезд в ближней ИК-области (полосы J,H,K) выполнен на 1-м телескопе в Ла-Силла в 1986-1993 гг. Результаты опубликованы Каталано и др. (1998a, 1998b). Амплитуда переменности в ближней ИК-области оказалась меньше, чем в визуальной. В выборке из 20 SrCrEu-звезд, переменных в визуальной области, 14 менялись с тем же периодом в ИК-диапазоне.

В подавляющем большинстве случаев фотометрический период и кривая блеска стабильны, что полностью соответствует модели жесткого наклонного ротатора. Однако имеется ряд исключений: наблюдаются либо плавные, либо скачкообразные изменения периода. Они подробно описаны в обзоре Жижновского (2004). Автор обзора склонен поддерживать возможное объяснение подобных эффектов, предложенное Стемпенем (1998). “Звезда должна быть в состоянии торсиональных осцилляций, возникающих из-за взаимодействия меридианальной циркуляции и внешнего магнитного поля”.

## 6.2. Спектральная переменность

Спектральная переменность была открыта Людендорфом в 1906 г. Наиболее переменными элементами являются те, которые и наиболее аномальны, включая Cr, Sr, Eu, Si. Все линии одного и того же элемента меняются вместе. Фазовые соотношения в переменности между элементами для разных звезд различны.

Эти характеристики могут быть поняты при помощи модели наклонного ротатора, в которой

элементы распределены неравномерно по поверхности звезды. Дейч (1957, 1970) был первым, кто понял, что такую информацию можно использовать для определения распределения содержания элементов по поверхности звезды. В дальнейшем это направление получило бурное развитие при построениях карт химсостава с использованием процедуры инверсии (например реконструкцию по максимуму энтропии (Хатцез, 1993; Велау и Райс, 1993 и др.)). Исследованиям спектральной переменности CP-звезд посвящены многие сотни работ, опишем здесь лишь некоторые из первых.

Кодайра (1973) собрал из разных источников фотометрические и спектральные данные о 49 периодических переменных класса Ar. Установлено, что при интенсивных линиях Eu наблюдаются сравнительно большие колебания блеска, другие пекулярности также коррелируют с различными спектрофотометрическими характеристиками. В целом, магнитное поле только поддерживает химические неоднородности, сама же напряженность поля не показывает явной корреляции с амплитудой изменения блеска.

В семидесятые и восьмидесятые годы прошлого века широко использовались результаты работы Адельмана (1973). Он провел исследование химического состава 21 холодной пекулярной звезды типа SrCrEu. Для изучения были отобраны объекты, не показывающие спектральной переменности и имеющие скорость вращения менее 10 км/с. Анализ проводился методом моделей атмосфер с учетом зеемановского и доплеровского механизмов уширения линий. Несмотря на то, что содержание элементов в разных звездах разное, все исследуемые Ar-звезды имеют одинаковые характерные аномалии, например, сильный избыток Sr, Cr и редкоземельных элементов. Сравнение со спектрально-переменными звездами этого типа показало, что в переменных аномалии химического состава более ярко выражены. Обнаружены общие свойства у некоторых холодных Ar-звезд и Si-звезд.

Шор и Адельман (1976) рассмотрели влияние магнитного поля на спектральную переменность через механизм диффузии. Ими показано, что поле вызывает у звезд отклонение от сферичности, что приводит к свободной прецессии оси вращения у самых быстровращающихся Ar-звезд.

Вольф (1976) кратко описывает характер переменности и обсуждает эволюционный статус CrSrEu-звезд. Для всех звезд этого типа справедлива модель наклонного ротатора. К концу семидесятых эта модель магнитной CP-звезды стала общепринятой и на протяжении 30 лет практически не подвергалась ревизии.

Флоке (1979) впервые изучила распределение

металлов по магнитным широтам в Ar-звездах. Она показала, что в объектах с короткими периодами вращения ( $P < 5$  дней) металлы имеют тенденцию концентрироваться, в основном, в районе магнитного экватора, в то время как для звезд с более длинным периодом ( $P > 6$  дней) эти элементы локализируются на магнитных полюсах.

Следует отметить фундаментальную серию из 14 работ Адельмана с соавторами: Адельман (1979) — первая и (Адельман, 1983) — заключительная. Были проведены спектрофотометрические наблюдения, в результате которых изучено распределение энергии в непрерывном спектре и структура депрессии на 5200 Å примерно у сотни CP-звезд разных типов. Из спектрофотометрических данных синтезировались индексы  $\Delta a$  Майтцена (Майтцен, 1976). Исследована переменность спектра с периодом вращения звезд. Данные Адельмана — это основание для дальнейших детальных исследований звезд, которые по-настоящему так и не были востребованы до наших дней.

Таким образом, еще в семидесятые годы было доказано, что спектральная переменность является следствием неравномерного распределения элементов по поверхности CP-звезды. Впоследствии, с развитием техники компьютерного моделирования, относительно простые работы, в которых изучалась бы только спектральная переменность, практически не выполнялись. Методика исследований существенно изменилась, в основном сравнивались синтезированные из моделей атмосфер спектры с наблюдаемыми, а затем анализировался химический состав в разных фазах периода вращения и строились карты распределения различных элементов по поверхности звезды. Вопросы картирования мы рассмотрим ниже.

Несмотря на значительное уменьшение количества работ по исследованию спектральной переменности, они очень полезны, так как позволяют получать экспресс-информацию о распределении химического состава по поверхности звезды.

Восполняет пробел очень полезный обзор Зверко (2004), посвященный этой проблеме. В нем рассмотрены различные аспекты спектральных вариаций CP-звезд различных типов, а также обсуждаются вопросы радио и рентгеновского излучения этих объектов. Продемонстрировано, что, как и прежде, не наблюдается единообразия в поведении линий различных элементов. Некоторые линии меняются синфазно (например HeI, CaII и MgII в HD 34452, Sr и CaII у  $\iota$  Cas и др.), некоторые в противофазе или вне фазы (как EuII и CrII у HD 125248, HeI и FeII у HD 34452, SrII и CaII у HD 140160, CaII и CrII у  $\gamma$  Ari, Eu II, CrII и FeII у  $\alpha^2$  CVn). Фазовые зависимости разные для разных

звезд. Переменность линий кремния менее выражена.

## 7. Химический состав атмосфер CP-звезд

### 7.1. Введение

При рассмотрении вопроса о химическом составе атмосфер CP-звезд мы будем основываться на базовых принципах, изложенных в работе В.Л.Хохловой (1983), дополнив их современными данными наблюдений и расчетов. За последние 20 лет, благодаря внедрению новой техники, точность наблюдательных данных выросла на порядок. Например, в настоящее время на больших телескопах получены спектры многих сотен звезд с точностью, которая 30 лет тому назад была достижима только для Солнца. Возможности вычислительной техники возросли на много порядков, что позволило развить принципиально новые подходы к решению различных задач в астрономии. Как результат — стало возможным построить трехмерные модели атмосфер с учетом неравномерного горизонтального и вертикального распределения элементов, а также структуры магнитного поля.

Как уже неоднократно говорилось выше, одной из выдающихся особенностей исследуемых нами звезд являются аномалии химического состава. Хохлова (1983) полагала, что они являются лишь поверхностным эффектом, а все вещество звезды имеет нормальный химический состав. Наиболее убедительным аргументом в пользу такого предположения является то, что не обнаружено ни одного красного гиганта с аномалиями химсостава, похожими на наблюдаемые у Ar-звезд. Видимо, перемешивание в фазе красного гиганта уничтожает пекулярности. CP-звезды находятся в интервале спектральных классов звезд со стабильной атмосферой, что определяется отсутствием внешней конвективной зоны и слабостью гелиевой конвективной зоны. Медленное вращение и магнитное поле способствуют стабилизации атмосферы.

Со стороны малых масс граница области CP-звезд определяется наличием развитой конвекции, а со стороны больших масс — истечением вещества под действием лучевого давления, т.е. наличием развитого звездного ветра. Наблюдения дают информацию только об очень тонком поверхностном слое (над уровнем  $\tau = 1$  в атмосфере A0-звезды находится лишь малая часть вещества звезды). Пока различий заметить не удалось, из чего следует, что граница слоя лежит глубже 0.01 по  $\tau_{5000}$ .

В обзоре Смейли (2005) проанализированы последние результаты наблюдений конвекции в A-звездах. Он приходит к выводу, что в звездах клас-

са A0 V ( $T_e = 10000$  K) конвекция отсутствует полностью, A5 V ( $T_e = 8500$  K) — она слаба и развивается в субфотосферных слоях, а для звезд F0 V ( $T_e = 7000$  K) она сильна на поверхности. Пекулярные A-звезды в этом обзоре специально не рассматриваются. Тем не менее можно сделать заключение, что конвекция может иметь существенное значение только для самых холодных Ar и Am/Fm пекулярных звезд.

В.Л. Хохлова (1983) указывала, что нет заметных различий в положении на диаграмме G-R звезд только с поверхностными и с общими аномалиями, так как из-за малого обилия тяжелых элементов они и в случае избытка остаются малыми примесями к водороду и гелию. Для высокотемпературной части магнитных Ar-звезд, в атмосферах которых содержание водорода меньше, чем гелия, важно что строение звезд целиком гелиевых и звезд только с гелиевой атмосферой различно. При одинаковых  $T_e$  и  $\lg g$  целиком гелиевая звезда ( $x = 0.1, z = 0.02$ ) имеет массу, отличную от массы звезды с нормальным содержанием водорода и гелия ( $x = 0.71, z = 0.02$ ), однако спектроскопически такие звезды неотличимы.

### 7.2. Модели атмосфер CP-звезд

Для определения химического состава необходимо знать физические параметры атмосферы, в первую очередь эффективную температуру  $T_e$  и логарифм ускорения силы тяжести  $\lg g$ . Моделям звездных атмосфер посвящена обширнейшая литература, выпущены учебники, неоднократно проводились международные совещания различного уровня. Крупным событием было проведение Симпозиума МАС “Моделирование звездных атмосфер” в Уппсале (Швеция) в 2002 г. Материалы симпозиума, отражающие современные взгляды на атмосферы звезд разных типов, изложены в одноименной книге (Пискунов и др., 2003).

Мы не ставим перед собой задачу обзора обширнейшей литературы по моделям атмосфер и отошлем читателя к указанной выше книге. Здесь обратим внимание лишь на некоторые важные для изучения атмосфер CP-звезд моменты.

В исследованиях, проводившихся вплоть до последнего времени, предполагалось, что атмосфера состоит из плоско-параллельных слоев, так как ее толщина мала ( $< 1\%$ ) по сравнению с радиусом звезды. Предположение об однородности сильно упрощает вычисления, но атмосферы CP-звезд заведомо неоднородны.

Можно лишь надеяться (Михалас, 1982), что одномерные модели дают некоторую усредненную информацию, но поскольку процесс усреднения нелинеен, вопрос на самом деле остается откры-

тым. Трехмерные модели атмосфер стали развиваться только в последние годы, на их расчеты требуется гигантское количество времени самых мощных современных компьютерных систем.

Условие стационарности атмосферы в CP-звездах, в целом, соблюдается, хотя обнаружение гоAr-звезд требует усложнения теории, необходимо объяснение процессов, зависящих от времени. Как правило, соблюдается условие ЛТР (локального термодинамического равновесия). Звезда находится в условиях гидростатического равновесия, при этом не учитывается влияние магнитных сил и движений малых масштабов.

Для построения разумных моделей атмосфер CP-звезд, по мнению Сахибуллина (1997), необходимо ответить на два вопроса: 1) каково распределение различных химических элементов по поверхности звезды, 2) какова структура магнитного поля, вызывающего такое распределение.

Величины  $T_e$  и  $\lg g$  для CP-звезд получают обычно спектроскопическим методом, сравнивая вычисленные (синтетические) и наблюдаемые профили водородных линий  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$ ,  $H_\delta$ . Широко используются стандартные модели Куруча (1993).

Модель атмосферы задает ход с глубиной (геометрической  $z$  или оптической  $\tau$ ) основных физических характеристик: температуры  $T$ , газового давления  $P_g$ , электронного давления  $P_e$ , концентрации свободных электронов  $N_e$ . Зная изменение этих параметров с глубиной, можно вычислить, как меняются и другие характеристики вещества атмосферы — плотность, ионизация, возбуждение различных элементов, непрозрачность в непрерывном спектре и линиях. Конечной целью моделирования является расчет спектра выходящего излучения как в континууме, так и в линиях. После этого становится возможным анализ наблюдаемого спектра звезды.

Первые попытки расчета моделей атмосфер с магнитным полем (Стемпень, 1978, Мутсам, 1979) показали, что обнаруживаются большие различия в структуре атмосфер магнитных и немагнитных звезд. Магнитное поле изменяет структуру атмосферы, по крайней мере, посредством двух эффектов:

- зеемановское расщепление многочисленных линий увеличивает непрозрачность вещества;
- изменение магнитного поля с высотой в атмосфере изменяет гидростатическое равновесие, и, следовательно, изменяется поведение давления, температуры и плотности с глубиной.

В монографии Сахибуллина (1997) дается пример: при одинаковой температуре в магнитных звездах газовое давление меньше, так как магнитные силы дополнительно поддерживают слои атмосферы.

### 7.3. Перенос частиц и поверхностные неоднородности

Существуют различные механизмы, которые могут привести к появлению химической неоднородности на поверхности Ar- и Vr-звезд.

В настоящее время наиболее разработанной является теория, предложенная Мишо (1970), которая объясняет аномалии химического состава всех CP-звезд сепарацией химических элементов в их атмосферах вследствие механизма селективной диффузии атомов и ионов под действием двух сил: силы тяжести, заставляющей более тяжелые элементы тонуть, и выталкивающей их силы лучевого давления в частотах спектральных линий. Первым необходимым условием работы диффузионного механизма является стабильность атмосферы. Количественные оценки показывают, что скорости диффузии очень малы (0.01–0.001 см/с) и для образования наблюдаемых аномалий требуется время порядка  $10^6$  лет.

Звезды, принадлежащие Hg-Mn- группе, имеют большие, чем Am-звезды, массы и  $T_e$  и вращаются медленно. Водородная конвективная зона у них отсутствует. Диффузная теория предсказывает погружение He и выталкивание Mn и Hg. Для магнитных Ar-звезд надо также учитывать и магнитное поле. Поле не играет роли при диффузии нейтральных атомов, но оно радикально меняет картину при движении ионов. Кроме того, поле может способствовать стабилизации атмосферы и тем самым аккумуляции эффектов, производимых диффузией. Зеемановское расщепление увеличивает непрозрачность в частотах спектральных линий, чем увеличивает силу лучевого давления в них, влияя тем самым на диффузию (Алесьян и Артру, 1987; Мишо, 1980б 1995).

Модели диффузии предсказывают стратификацию многих элементов в атмосферах пекулярных звезд. Эти модели, используемые для вычислений горизонтальной сепарации, часто также приводили и к выводу о вертикальной стратификации. Например, в работах Бабеля (1992, 1994) обсуждаются вопросы стратификации кальция в магнитных звездах. Смит (1995) увидел, что профили резонансных линий GaIII аномальны, но могут быть объяснены процессом диффузии по теории Мишо.

В развитие своей теории Мишо (1995) рассматривает различные процессы диффузии, которые могут привести к наблюдаемым поверхностным неоднородностям. Горизонтальный компонент магнитного поля способствует уменьшению потери массы и изменяет направление диффузии. Уменьшение потери массы может привести к образованию неоднородностей на поверхности на вре-

менной шкале  $10^4$ – $10^5$  лет. Величина эффекта будет зависеть от стадии ионизации и от концентрации элементов в разных частях поверхности звезды.

Подробно вопрос о диффузии элементов в астрофизических условиях рассматривается в обзоре Мишо (2005). Утверждается, что атомная диффузия играет существенную роль у Солнца и звезд Главной последовательности вплоть до температур 25000 К. Простейшая модель предполагает, что разница между Ar-звездами и другими происходит от присутствия магнитного поля у Ar-звезд и отсутствия такового на поверхности других. Когда магнитное поле горизонтально, ионы не могут двигаться поперек силовых линий поля. Магнитное поле вынуждает воспроизводить диффузию в виде пятен, колец или более сложных образований в зависимости от его структуры.

Для случая Am/Fm-звезд рассматриваются две различные модели атомной диффузии. Обе предполагают диффузию в околосверхностной зоне, таким образом, что в этот процесс включается не более  $10^{-10}$  массы звезды. В первой модели предполагается сепарация ниже водородной конвективной зоны. В другой модели — что сепарация возникает гораздо глубже, на уровне, где температура достигает 200000 К. В указанном обзоре (Мишо, 2005) обе гипотезы детально обсуждаются.

Там же указывается, что случай Ar-звезд наиболее труден для моделирования. Например, в простейшей модели (Бабель и Мишо, 1991) предполагалась диффузия полдюжины элементов с различной магнитной структурой. Принималось, что потеря массы и турбулентность пренебрежимо малы. Используя детальные ЛТР-вычисления, Бабель и Мишо (1991) пришли к заключению, что простейшая модель объясняет в целом наблюдаемые аномалии звезды 53 Cam. Однако поверхностное распределение аномалий не соответствует наблюдаемой магнитной конфигурации поля.

Целенаправленно, в течение многих лет, проблему диффузии в магнитных CP-звездах разрабатывает Ж. Алесьян. В концентрированном виде результаты его работ представлены в обзоре (Алесьян, 2005). По его мнению, диффузия элементов в звездной плазме сильно изменяется в присутствии магнитного поля по двум главным причинам. Первая из них заключается в том, что в среднем движение ионов ограничивается магнитным полем. Вторая причина — это увеличение непрозрачности в линиях из-за зеемановского эффекта, которое часто приводит к увеличению лучевого ускорения. Эти эффекты являются важными и их необходимо учитывать при построении модели сложной химической структуры поверхности звезды.

Более детально вопрос о диффузии в магнитных звездах мы предполагаем рассмотреть в другой статье.

Аномалии ртутно-марганцевых звезд также неоднократно пытались объяснить при помощи теории диффузии. В обзоре Мишо (2005) вопрос подробно обсуждается, приводится много литературных ссылок. Описываются детали разных вычислений. Предполагается, что для Hg-Mn-звезд имеет место потеря массы. В основе вычислений лежит идея о том, что лучевое давление на разные элементы различно, в частности для ртути и марганца. Поэтому некоторые элементы всплывают (например Hg, Mn, Ca, Sr и др.), так как сила лучевого давления на них превышает силу тяжести. Однако детального сравнения со спектрами реальных Hg-Mn-звезд до сих пор проведено не было.

#### 7.4. Некоторые общие сведения о химическом составе CP-звезд

Исследование химического состава CP-звезд традиционно привлекает внимание, имеется несколько сотен печатных работ на эту тему.

До начала семидесятых годов XX века обсуждались две конкурирующие гипотезы, объясняющие аномальное поведение спектральных линий: 1) аномалии содержания химических элементов; 2) аномалии физических условий в атмосферах. В настоящее время считается твердо установленным, что имеет место химическая неоднородность поверхности. Поэтому проблема определения содержания различных элементов неразрывно связана с проблемой химического картирования поверхности. Большая переменность спектральных линий в магнитных CP-звездах свидетельствует о том, что правильнее принимать во внимание локальный химсостав.

Впервые разделила профили линий на компоненты и изучила локальный химический состав на поверхности пекулярной звезды  $\alpha^2$  CVn Д. Пайпер (1969). Позже Кумайгородская и Копылов (1972) провели более рафинированный анализ полученных Пайпер наблюдений. Они обнаружили, что пятна различных редкоземельных элементов имеют слегка различающееся расположение.

Химическая неоднородность поверхности магнитных CP-звезд не означает, что следует отвергать исследования химсостава звезды в целом. Во-первых, у Am и некоторых других звезд не наблюдается спектральной переменности, у некоторых Ar и Vr она слаба. Во-вторых, даже средние данные указывают на аномальный химсостав, обнаружены определенные закономерности.

Имеется много хороших обзоров по исследованию химсостава, отошлем читателя к опубли-

Таблица 6: Содержание элементов в атмосферах CP-звезд по Любимкову (1995)

Элемент	$\lg \varepsilon$ (пределы)			
	Ar/Vr		Am	
He	-1	+1	-1	-0.5
Li	0	+1	0	+1
C, N, O	-2	0	-1	-0.5
Mg, Al	-1	0	0	
Si	0	+1	0	
Ca, Sc	-1	+1	-0.5	0
Группа Fe	0	+1	0	+0.5
Sr, Re, U	+3	+4	+1.5	+2

кованным на русском языке — Хохлова (1983) и Любимков (1995). В последнем можно найти многочисленные ссылки на современные работы, выполненные на основании наблюдений с ПЗС-матрицами.

Отметим, что под химическим составом имеется в виду атомный состав, точнее, полная концентрация атомов разных элементов, определенная по отношению к водороду.

Приведем некоторые общие сведения о химическом составе CP-звезд, взятые из монографии Любимкова (1995). Наблюдается четкая зависимость содержания элементов от атомного номера. Легкие элементы (C, N, O) могут находиться в дефиците на порядок, содержание элементов железного пика — на 1–2 порядка выше солнечного, а редкоземельных элементов — на 3–4 порядка выше солнечного. Содержание элементов в целом для магнитных Ar/Vr и немагнитных Am-звезд просуммировано в табл.6.

Проводились поиски зависимости между аномалиями содержания различных химических элементов у Ar- и Am-звезд. Например, Хохлова (1975, 1977) выявила корреляции между аномалиями содержания некоторых элементов в атмосферах магнитных Ar-звезд. Особенно четко выражены зависимости между избытками Mn и Zr, а также элементов железного пика и редкоземельных. Анализ показал, что относительное содержание самого железа сохраняется постоянным во всем диапазоне химических составов, содержание более легких и более тяжелых элементов связано с содержанием железа степенной зависимостью. Существует непрерывный переход от нормальных к Am- и Ar-звездам.

Большой вклад в исследования химического состава Am-звезд внесли астрономы Крымской обсерватории, в частности, известны работы Любимкова и Саванова (1983, 1984, 1985) и др. Согласно обзору Боярчука и Саванова (1986), для

Am-звезд обнаруживается отчетливая корреляция между содержаниями Ca и Sc, а также La и Nd. Намечается корреляция содержания ванадия со скоростью вращения, а именно: чем она выше, тем меньше отклонение от нормального содержания.

Каули (1980) рассматривает редкоземельные элементы в спектрах Ar- и Am-звезд. Выдвигается предположение, что традиционная методика анализа содержания редких земель, приводящая к обнаружению их избытков, требует существенной модификации. Обсуждается возможность нарушения уравнения ионизационного равновесия Саха в горячих Ar-звездах и изменений в структуре верхней атмосферы Ar- и Am-звезд,

Мы предложили учитывать магнитное усиление линий в спектрах, которое в случае редкоземельных элементов может увеличить эквивалентную ширину линий очень существенно (Романюк, 1984). Учет этого эффекта может привести к снижению на порядок величины определяемого содержания редкоземельных элементов в звездах с сильными магнитными полями.

Заметим также, что для правильного определения химического состава необходимо иметь надежно определенные силы осцилляторов. Несмотря на настойчивые усилия, многие из них очень плохо известны, особенно для редкоземельных элементов. Если имеются лабораторные измерения, то пользуются ими, в противном случае силы осцилляторов определяют по солнечным и звездным спектрам. Вклад отечественных астрономов в решение этой проблемы заметен (Боярчук и Саванов, 1985, 1986; Рябчикова и Смирнов, 1994; Рябчикова и др., 1994).

Громадное значение для выработки общего подхода к определению химического состава CP-звезд имело создание VALD (Венской базы атомных данных) (Пискунов и др., 1995; Купка и др., 1999). В VALD собраны наиболее точные и надежные атомные параметры. Для спектроскопистов она исключительно полезна при отождествлении спектров и построении моделей звездных атмосфер. Отметим большую работу Т. А. Рябчиковой по созданию банка атомных данных. Использование VALD привело к существенному улучшению взаимного согласия в результатах, полученных разными группами. Прежние разногласия часто были результатом использования разнородных данных об атомных параметрах.

## 7.5. Определение локального химического состава

Исходя из того, что профили линий достаточно быстро вращающихся звезд являются доплеровскими, был предложен метод картирования по-

верхности, подробнее см. обзор Хохловой (1983). Здесь мы рассмотрим, какие последствия имеет развитие этого метода для определения химического состава.

Мы отмечаем основополагающий вклад В.Л. Хохловой и укажем ее основные работы, посвященные этому вопросу.

В работе Хохловой (1976) критически рассмотрены опубликованные данные по определению химического состава атмосфер Ар-звезд. Она впервые показала, что традиционные методы кривых роста и моделей атмосфер не могут быть применены для количественных исследований атмосфер магнитных Ар-звезд из-за неоднородного химического состава их поверхности и могут дать только качественные результаты. Показано, что в интервале температур от 7000 до 19000 К величина избытка элементов не зависит от эффективной температуры. Рассмотрены методы определения локального химического состава и полученные результаты указывают на избыток некоторых элементов в пятнах при их дефиците вне пятен.

Хохловой (1978) предложен спектроскопический метод оценки нижней границы толщины слоя с аномальным химическим составом в атмосфере Ар-звезды, основанный на использовании линий, расположенных по разные стороны от бальмеровского скачка и формирующихся на разных глубинах атмосферы.

В работе Межесье и др. (1979) сравниваются два метода анализа распределения химических элементов по поверхности Ар-звезд: метод гармонического анализа Дейча и метод подбора локальных параметров, предложенный Хохловой. В рамках модели наклонного ротатора обсуждается точность обоих методов. Показано, что можно определить количество пятен и их долготное распределение как первым, так и вторым методом. Ширина пятен определяется менее уверенно.

Пионерские работы В.Л. Хохловой относятся к периоду, когда определение химического состава выполнялось на основании измерений фотографических спектров. Требовались чрезвычайно большие усилия, чтобы достигнуть точности, необходимой для выполнения доплеровского картирования по деталям профилей спектральных линий. О магнитном (зеemanовском) картировании, для которого требовалось иметь поляризованные спектры еще более высокого качества, в то время не могло быть и речи.

Примерно с середины восьмидесятых повсеместно начали внедряться ПЗС-матрицы, что позволило повысить точность наблюдений более чем на порядок. Решаются принципиально новые задачи — на основании тонкого изучения I,Q,U,V-профилей Стокса можно выполнять

Доплер-Зеемановское (Д-З) картирование поверхности CP-звезд.

Рассмотрение результатов (Д-З)-моделирования мы планируем сделать в следующей статье нашей серии. Здесь же, для полноты картины, укажем еще на несколько работ, сыгравших важную роль для развития методики картирования химических неоднородностей (Гончарский и др., 1983; Птицын и Рябчикова, 1986; Саванов и др., 1996).

## 7.6. Стратификация элементов

Стратификация элементов — вопрос довольно новый, хотя время от времени он возникал и ранее, см. например, Леушин и Снежко (1976).

Любая методика поисков стратификации неизбежно будет основываться на изучении линий, либо частей профилей линий, образующихся на разной оптической глубине в атмосфере.

Один из возможных вариантов — исследование химического состава по линиям одних и тех же элементов и ионов с длинами волн до и после бальмеровского скачка  $\lambda 3646 \text{ \AA}$ . В области короче скачка резко увеличивается непрозрачность континуума, поэтому спектральные линии с длиной волны короче  $3646 \text{ \AA}$  образуются в значительно более высоких слоях атмосферы, чем более длинноволновые. В наших работах, выполненных по указанной выше схеме (Романюк и др., 1992; Романюк и Топильская, 1997), исследовано содержание железа по фотографическим спектрам и показано его увеличение в верхних слоях атмосферы на 0.38 dex у звезды  $\alpha^2 \text{ CVn}$ .

Первое десятилетие после внедрения в наблюдения ПЗС-матрицы были очень слабочувствительными в синей области спектра. Поэтому работать с ними в области бальмеровского скачка стало возможным только в последние годы, и то с существенно более низкой точностью, чем в обычной визуальной. Поэтому пришлось изучать стратификацию по 30-му мультиплету Cr II, линии которого распределены в разных частях профиля водородной линии  $H_{\beta}$ , образующихся на разной оптической глубине (Хохлова и Топильская, 1992; Жижновский и Зверко, 1995; Саванов и др., 2001). Стратификации хрома для нескольких изучавшихся CP-звезд не было найдено.

Отметим, что имеются существенные затруднения при исследовании линий, находящихся в профиле широкого крыла водородной линии. Главная проблема — неопределенность в проведении континуума, что сильно влияет на точность определения эквивалентных ширин линий.

В противовес предыдущим исследованиям, в работе Вэйда и др. (2001) при использовании дру-

ного способа — анализа профилей неблендированных линий — было найдено большое (на 3 порядка!) увеличение содержания Fe, Cr и Ti с глубиной атмосферы. Суть метода: сравнение синтетических и наблюдаемых профилей линий; расчетные профили со стратификацией лучше соответствуют наблюдениям.

Рябчикова и др. (2003) привели новые доказательства существования стратификации, особенно у  $\alpha$ Ar-звезд, в которых амплитуда пульсаций различна для линий разных состояний ионизации. Эмпирическое моделирование стратификации содержания основано на дифференцировании профилей линий, которые формируются на разной глубине. В указанной работе перечислены основные наблюдательные факты, которые необходимо учитывать при изучении вертикальной неоднородности звездной атмосферы: 1) невозможность одновременного объяснения формы ядер и крыльев сильных спектральных линий при однородном химическом составе, 2) нарушения ионизационного баланса, 3) расхождения в содержании, полученном по сильным и слабым линиям одного и того же иона, 4) непредсказуемое поведение линий высокого возбуждения ионов железного пика, 5) аномалии в изотопном содержании.

Дальнейшее развитие исследования стратификации путем моделирования профилей линий получило в работах Рябчиковой и др. (2005 a,b).

Большие расхождения между результатами, полученными из анализа линий, образующихся по разные стороны бальмеровского скачка (не показывающими существенной стратификации), и полученными методом, изложенным Рябчиковой и др. (2003) (в которых содержание металлов на толщине атмосферы может меняться на 3 порядка), требуют своего объяснения.

В первую очередь необходимо выполнить высокоточные наблюдения и провести тщательный анализ линий, образующихся по разные стороны бальмеровского скачка. К сожалению, такой анализ на современном уровне еще не проводился.

### 7.7. Выводы

Современные методы наблюдений и их редукции позволяют определить содержание различных элементов в атмосферах CP-звезд с точностью порядка 0.2 dex. Химическая неоднородность поверхности магнитных CP-звезд надежно установлена. Для некоторых ярких звезд химическое картирование выполнялось многократно, в разное время и с применением различных методов регистрации и моделирования.

Можно сделать общее заключение: хотя замечаются существенные различия в деталях (в кон-

фигурации и контрасте пятен, иногда даже в их количестве), в целом картина распределения химического состава сохраняется. Ни для одной из CP-звезд не замечено каких-либо миграций пятен по поверхности на протяжении десятков лет. Например, для описания фотометрических, спектральных и магнитных вариаций звезды  $\alpha^2$  CVn прекрасно подходят элементы, предложенные еще в 1932 г. (Фарнсворт, 1932), что означает сохранение постоянства неоднородной поверхности на протяжении более 70 лет.

## 8. Пульсации CP-звезд

### 8.1. Фотометрия

В предыдущих разделах неоднократно демонстрировалась справедливость модели наклонного ротатора, в которой все виды переменности объясняются вращением химически пятнистой звезды с магнитным полем дипольного характера, при этом ось диполя наклонена к оси вращения. Тем не менее попытки найти явления, подобные вспышкам на Солнце, предпринимались неоднократно. Отметим усилия Полосухиной (например Полосухина, 1969; Полосухина и Чуваев, 1974) или Брегера (1970).

Для работы механизма диффузии необходимы исключительно стабильные атмосферы, поэтому отсутствие какой-либо физической переменности представлялось весомым доказательством в ее поддержку. Но наблюдения поставили это под сомнение: в конце 70-х Куртц (1978, 1982; Куртц и Мартинес, 2000) обнаружил быстропульсирующие, так называемые  $\alpha$ Ar-звезды. Все они холодные SrCrEu-звезды, которые пульсируют с периодами от 6 до 16 мин и амплитудой до 0.008 звездной величины.

Детальный обзор  $\alpha$ Ar-звезд приведен в работе Куртца и Мартинеса (2000). В большинстве из них обнаружены магнитные поля. Более того, оказалось, что амплитуда пульсаций зависит от фазы вращения звезды и достигает максимума в то время, когда наблюдается экстремум магнитного поля.

Для объяснения быстрых вариаций блеска применяется модель наклонного пульсатора (Куртц, 1982). В ней пульсации являются нерадиальными, они происходят в направлении, параллельном магнитной оси звезды, поэтому их по-разному видно в разных фазах вращения. Математическое обоснование модели было дано в работе Шихаши и Сайо (1985).

Предполагается, что  $\alpha$ Ar-звезды пульсируют в  $p$ -моды высоких обертонов. Моды описываются асимптотическим соотношением как функция радиальных обертонов  $n$  и степени сферической



гармоники  $l$  в виде:

$$\nu_{nl} = \Delta\nu_0(n + l/2 + \xi) + \delta\nu, \quad (2)$$

где

$$\Delta\nu_0 = (2 \int_0^R dr/c(r))^{-1}. \quad (3)$$

Большое расщепление  $\Delta\nu_0$  — это обратная величина на времени, необходимого звуку для преодоления расстояния по всей поверхности звезды. В  $\alpha$ Ar-звездах эта величина может быть использована для определения астросейсмологической светимости.

Малое расщепление  $\delta\nu_0$  чувствительно к скорости звука в ядре звезды, которая зависит от его среднего молекулярного веса  $\mu$ , изменяющегося с возрастом. В звезде HR 1217, например, наблюдаются пульсации на четырех близких частотах около 34 мкГц. Из этих данных можно вычислить указанные в формулах (2) и (3) величины и исследовать астросейсмологию звезды. Эти процедуры детально описаны в обзоре Куртца и Мартинеса (2000). Заметим, что хотя в нем в деталях рассмотрены различные аспекты пульсаций, вопрос о спектральных вариациях не затрагивается. Вкратце восполним этот пробел.

## 8.2. Спектроскопия

Купка и др. (1996), используя спектры с высоким временным разрешением и высоким отношением С/Ш, методом спектрального синтеза получили для  $\alpha$ Ar-звезды  $\alpha$  Cig величину  $v_e \sin i = 12.5$  км/с и подтвердили существование магнитного поля. Найден недостаток С, N, O и сверхобилие редкоземельных элементов, что сравнимо с другими холодными звездами. Найдено сверхобилие Со, по величине такое же, как и Sr, что нетипично для SR-звезд. В дальнейшем сверхобилие кобальта было подтверждено для  $\gamma$ Equ, HD 24712 (Куртц и Мартинес, 2000) и для других звезд, были обнаружены аномально усиленные линии дважды ионизованных атомов редкоземельных элементов (Гелбман и др., 2000).

И наконец, Кочухов и Рябчикова (2001) провели спектральные исследования с фазой периода пульсаций ярчайшей  $\alpha$ Ar-звезды  $\gamma$ Equ. Было найдено, что наибольшие изменения лучевых скоростей (с амплитудой до 0.8 км/с) претерпевают линии редкоземельных элементов. Более того, был найден сдвиг по фазе между кривыми пульсаций однократно и двукратно ионизованных редкоземельных элементов. Это позволяет получать сведения о вертикальной стратификации этих элементов. Не найдено зависимости между амплитудой лучевых

скоростей и интенсивностями линий, заподозренной по более ранним наблюдениям. Авторы считают, что индивидуальности в вариациях разных ионов являются результатом сложного взаимодействия между неоднородным вертикальным и горизонтальным распределением химических элементов и индивидуальными модами пульсаций  $\gamma$ Equ.

Детальное спектральное и магнитное исследование пульсаций SR-звезд только начинается, систематические наблюдения могут принести важные результаты для понимания этого процесса.

## 9. Фундаментальные параметры SR-звезд

К фундаментальным параметрам звезд относятся их эффективные температуры, светимости, радиусы, массы. Литература по этому вопросу суммирована в обзоре Степеня (1994).

### 9.1. Эффективные температуры

Эффективная температура  $T_e$  — это единственный из фундаментальных параметров, который определяется непосредственно по спектрам. Существует прямой метод оценки  $T_e$ , который вытекает из определения этой величины:  $H_r = \sigma T_e^4$ , где  $H_r$  — полный поток излучения от звезды с единицы поверхности,  $\sigma$  — постоянная Стефана-Больцмана.

Трудность заключается в том, что  $H_r$  непосредственно из наблюдений найти не удастся, можно получить лишь полную освещенность  $E$  на уровне Земли.

$$E = (R/d)^2 H_r,$$

где  $d$  — расстояние до звезды,  $R$  — ее радиус.

Величины  $R$  и  $d$  определены с достаточной точностью для малого количества звезд, следовательно, для большинства звезд приходится применять иные способы определения  $T_e$ .

Нередко для оценки  $T_e$  применяют фотометрические методы, основанные на измерениях освещенности в широком диапазоне длин волн. Такой метод для определения  $T_e$  предложен Степенем и Доминицаком (1989). Эффективно используется метод инфракрасных потоков (Блэквелл и др., 1980). Однако в большинстве работ применялся метод моделей атмосфер. Определение параметров  $T_e$  и  $\lg g$  проводится совместно, при этом анализируются не только фотометрические, но и спектроскопические характеристики звезды (профили и эквивалентные ширины бальмеровских линий). Ионизационное равновесие — еще один критерий: сравниваются линии одних и тех же элементов, но в различных стадиях ионизации.

Методы определения температур увязаны таким образом, что для нормальных звезд  $T_e$ , определенные разными способами, совпадают между собой. Для CP-звезд наблюдаются различия, главное из которых —  $T_e$ , определенные по распределению энергии в непрерывном спектре, систематически выше, чем определенные по спектральным линиям.

Имеется всего 20 CP-звезд, у которых  $T_e$  было найдено непосредственно из измерений распределения энергии в непрерывном спектре, их список приведен в обзоре Стемпеня (1994). Их можно считать первичными стандартами, эффективные температуры других CP-звезд можно определять относительно них, используя первичный список для целей калибровки.

Используя эти данные, Хаук и Норт (1993), а также Напивоцки и др. (1993) перекалибровали свои данные, полученные с использованием жевневской и стремгреновской фотометрии. Это важно с практической точки зрения, так как имеются тысячи измерений CP-звезд, выполненных в этих фотометрических системах. Списки эффективных температур пекулярных звезд регулярно публикует Ю. В. Глаголевский (Глаголевский и Чунакова, 1986а; Глаголевский, 1994, 2002).

## 9.2. Светимости

До полета спутника ГИППАРХ светимости CP-звезд можно было вычислить только по данным спектрофотометрии, учитывая болометрические поправки. Расстояния до звезд были известны с низкой точностью, поэтому прямым методом светимости определялись крайне неточно. Кардинальные изменения произошли после обработки данных ГИППАРХа. В работах Гомес и др. (1998а, 1998b) показано, что большинство CP-звезд являются объектами Главной последовательности и занимают всю ее ширину (около 2 зв. величин). Абсолютные величины находятся в пределах от +2 до -4, за исключением звезд He-rich, распределение которых по этому параметру не имеет четко выраженного максимума. Некоторые Am-звезды находятся вне ГП, но это может быть следствием ошибочной классификации.

Данные ГИППАРХа позволяют уверенно определять расстояния до 200–300 пк, что в случае CP-звезд означает уверенное определение светимостей порядка 1000 объектов ярче 7–8 величин.

Уже после сдачи этой статьи в печать появилась работа Кочухова и Баньюло (2006), в которой используются данные ГИППАРХа для определения фундаментальных параметров и возраста 150 магнитных химически пекулярных звезд. Анализ результатов этой работы будет выполнен в следу-

ющей статье серии наших обзоров.

## 9.3. Радиусы

Радиусы можно определить, зная период и скорость вращения, либо зная светимость и расстояние.

Если хорошо известен период вращения звезды  $P$  и проекция скорости вращения  $v_e \sin i$ , то можно вычислить величину  $R \sin i$ :

$$R \sin i = 0.0198 P v_e \sin i$$

(радиус  $R$  — в солнечных радиусах,  $v$  — в км/с,  $P$  — в сутках).

Этот метод был применен Стемпенем (1989) к тщательно отобранной выборке из 66 звезд с надежными значениями периода  $P$  и  $v_e \sin i$ . Результаты показывают, что радиусы CP-звезд такие же, как у звезд, лежащих на ГП.

Радиусы звезд могут быть также вычислены, исходя из  $M_{bol}$  и  $T_e$ :

$$\lg R = 8.468 - \lg T_e - 0.2 M_{bol}$$

(константа определена по Солнцу, для которого принято  $T_e = 5780$  К,  $M_{bol} = 4.72$ ).

После обработки данных ГИППАРХа радиусы, определенные последним способом, оказались наиболее надежными. Подтверждено, что радиусы CP-звезд соответствуют радиусам нормальных звезд ГП той же температуры.

## 9.4. Массы

Согласно работе Карье и др. (2002), массы Ар-звезд лежат в пределах от 2 до 5 солнечных, у Am-звезд распределение по массам более узкое — от 1.5 до 2.5.

Для CP-звезд, которые входят в двойные системы, можно определить функцию масс. Функция масс содержит неизвестный параметр — наклон орбиты к лучу зрения  $i$ . Выход лежит в реалистичном предположении о случайном распределении орбит в пространстве. В работе Карье и др. (2002) найдены функции масс 74 CP-звезд, а в работе Норта (1998) массы 60 главных компонент, среднее отношение массы вторичного компонента к главному — 0.75. Вторичными компонентами являются звезды ГП, нет ни одного случая, чтобы в этом качестве был, например, белый карлик.

Распределение 60 первичных компонент, являющимися CP-звездами, по массам (из статьи Норты, 1998) приведено в табл. 7.

Таблица 7: Распределение CP-звезд по массам

Пределы масс	К-во звезд	Пределы масс	К-во звезд
1.5–2.0	7	3.0–3.5	13
2.0–2.5	8	3.5–4.0	8
2.5–3.0	18	>4.0	6

## 10. Заключение

На этом мы завершаем рассмотрение общих свойств CP-звезд, осознавая, что многие вопросы изложены фрагментарно, многие совсем опущены. Часть из них будет рассмотрена в следующих статьях нашей серии. Интересен вопрос: а чем же различаются магнитные и немагнитные CP-звезды? Кроме присутствия дипольного поля глобальной структуры, главные особенности магнитных звезд это: 1) ярко выраженные аномалии химического состава, 2) спектральная и фотометрическая переменность, связанная с химической неоднородностью поверхности, 3) недостаток двойных.

В следующей статье серии мы планируем сосредоточиться на свойствах магнитных химически пекулярных звезд Ap/Vp и топологии их магнитных полей.

**Благодарности.** Автор искренне благодарен В. Л. Хохловой, Дж. Ландстриту, Ю. В. Глаголевскому, Д. О. Кудрявцеву и Г. А. Чунтонову за многочисленные дискуссии по проблемам CP-звезд, а Е. А. Семенко за помощь в оформлении данного обзора. Выполнение работы частично финансировалось из средств грантов РФФИ 03-02-16342а и 06-02-16110а.

## Список литературы

- Абт и Голсон (Abt G.H., Golson J.C.), 1962, *Astrophys J.*, **136**, 35
- Абт и Сноуден (Abt Helmut A., Snowden Michael S.), 1973, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **25**, No.215, 137
- Абт и Левато (Abt H.A., Levato H.), 1978, *PASP*, **90**, 201
- Абт и Моррел (Abt Helmut A., Morrel Nidia I.), 1995, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **99**, 135
- Адельман (Adelman S.J.), 1973, *Astrophys. J.*, **183**, No.1, 95
- Адельман (Adelman S.J.), 1979, *Astron. J.*, **84**, 857
- Адельман (Adelman S.J.), 1983, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **51**, 511
- Адельман (Adelman S.J.), 1998, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **132**, 93
- Алесьян (Alecian G.), 2005, in: "The A-star puzzle", *Proceed. IAU Symp.224*, Eds. J.Zverko, J. Ziznovsky, S.J. Adelman, W.W. Weiss., p.185
- Алесьян и Артру (Alecian G., Artru M-C.), 1987, *Astron. Astrophys.*, **186**, 223
- Бабель, (Babel J.), 1992, *Astron. Astrophys.*, **258**, 449
- Бабель, (Babel J.), 1994, *Astron. Astrophys.*, **283**, 189
- Бабель и Мишо (Babel J., Michaud G.), 1991, *Astrophys. J.*, **366**, 560
- Баньюло и др. (Bagnulo S., Landstreet J.D., Mason E., Andretta V., Silaj J., Wade G.A.), *Astron. Astrophys.*, **450**, 777
- Бикмаев И.Ф., Мусаев Ф.А., Галазутдинов Г.А., Саванов И.С., Савельева Ю.Ю., 1998, *Астрон. Ж.*, **75**, 362
- Блэквелл и Шаллис (Blackwell, D. E., Shallis, M. J.), 1977, *MNRAS*, **180**, 177
- Блэквелл и др. (Blackwell D.E., Petford A.D., Shallis M.J.), 1980, *Astron. Astrophys.*, **82**, 249
- Болендер и Ландстрит (Bohlender D.A., Landstreet J.D.), 1990, *MNRAS*, **247**, 606
- Болендер и др. (Bohlender, D. A., Brown D.N., Landstreet J.D., Thompson I.B.), 1987, *Astrophys. J.*, **323**, 325
- Борра (Borra E.F.), 1975, *Astrophys. J.*, **202**, 741
- Борра и Ландстрит (Borra E.F., Landstreet J.D.), 1979, *Astrophys.J.*, **228**, 809
- Борра и др. (Borra E.F., Landstreet J.D., Thompson I.B.), 1983, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **53**, 151
- Борра и др. (Borra E.F., Landstreet J.D., Mestel L.), 1982, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **20**, 191 bibitem
- Босгард и др. (Boesgaard A., Mercant C.D., Preston G.W.), 1975, *PASP*, No.517, 353
- Боярчук А.А., Саванов И.С., 1985, *Изв. КрАО*, **70**, 57
- Боярчук и Саванов (Boyarchuk A.A., Savanov I.S.), 1986, in: *Upper Main Sequence Stars with Anomalous Abundances*, IAU Coll., No.90, Crimea, Reidel, 433
- Брегер (Breger M.), 1970, *Astrophys. J.*, **162**, 597
- Будай (Budaj J.), 1996, *Astron. Astrophys.*, **313**, 523
- Будай (Budaj J.), 1997, *Astron. Astrophys.*, **326**, 655
- Бэбкок (Babcock H.W.), 1958, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **30**, 141
- Вейд и др. (Wade G.A., Ryabchikova T.A., Bagnulo S., Piskunov N.), 2001, *PASP Conf. ser.*, **248**, 373
- Велау и Райс (Wehlau W.H., Rice J.B.), 1993, *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **182**, 450
- Вольф (Wolff S.C.), 1975, *Astrophys., J.*, **202**, 121
- Вольф (Wolff S.C.), 1976, in: *Multiperiodic Variable Stars*,
- Вольф (Wolff S.C.), 1981, *Astrophys. J.*, **244**, 224
- Вольф (Wolff S.C.), 1983, *The A-type stars: Problems and Perspectives*, Monograph series on Nonthermal Phenomena in stellar atmospheres, NASA, SP-463
- Вольф и Вольф (Wolff S.C., Wolff R.J.), 1974 *Astrophys.J.*, **194**, 65
- Вольф и Престон (Wolff S.C., Preston G.), 1978, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **37**, 371
- Гелбман и др. (Gelbmann, M., Ryabchikova, T., Weiss, W. W., Piskunov, N., Kupka, F., Mathys, G.), 2000, *Astron. Astrophys.*, **356**, 200
- Глаголевский Ю.В., 1966, кандидатская диссертация, Алма-Ата
- Глаголевский (Glagolevskij Yu.V.), 1994, *Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв.*, **38**, 152
- Глаголевский (Glagolevskij Yu.V.), 2002, *Bull. Spec. Astrophys. Observ.*, **53**, 33

- Глаголевский Ю.В., Бычков В.Д., Романюк И.И., Найденов И.Д., 1985, Письма в АЖ, **11**, 107
- Глаголевский Ю.В., Чунакова Н.М., 1986, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), **22**, 39
- Гомес и др. (Gomes A.E., Luri X., Greiner S., Figueras F., North P., Royer F., Torra J., Menniesier M., 1998a, *Astron. Astrophys.*, **336**, 953
- Гомес и др. (Gomes A.E., Luri X., Sabas V., Greiner S., Figueras F., North P., Royer F., Torra J., Menniesier M., 1998b, *Contr. Scalnate Pleso Obs.*, **26**, 171
- Гончарский А.В., Рябчикова Т.А., Степанов В.В., Хохлова В.Л., Ягола А.Г., 1983, *Астрон. Ж.*, **60**, 83
- Гутник и Прагер (Gutnik P., Prager R.), 1914, *Veroeff Stw.Berlin-Babelsberg*, **1**, 38
- Дейч (Deutsch A.), 1957, *Astron. J.*, **62**, 139
- Дейч (Deutsch A.), 1970, *Astrophys. J.*, **159**, 985
- Елькин В.Г., Кудрявцев Д.О., Романюк И.И., 2002, Письма в АЖ, **28**, 195
- Елькин В.Г., Кудрявцев Д.О., Романюк И.И., 2003, Письма в АЖ, **29**, 455
- Желванова и др. (Zelwanova E., Schoneich W., Nikolova S.), 1976, *Astron. Nachr.*, **297**, 229
- Жербальди и др. (Gerbaldi M., Floguet M., Hauck B.), 1986, *Astron. Astrophys.*, **146**, 341
- Жижновский (Ziznovsky J.), 1994, in: *Chemically Peculiar and Magnetic Stars*, eds: J. Zverko and J. Ziznovsky, *Tatranska Lomnica*, 155
- Жижновский (Ziznovsky J.), 2004, in: *Magnetic Stars, Proceed. of Intern. conf.*, eds: Yu.V. Glagolevskij, D.O. Kudryavtsev and I.I. Romanyuk, *Nizhnij Arkhyz*, p.85
- Жижновский и Зверко (Ziznovsky J., Zverko Yu.), 1995, *Contrib. Skalnate Pleso*, **25**, 39
- Зверко (Zverko Yu.), 2004, in: *Magnetic Stars, Proceed. of Intern. conf.*, eds: Yu.V. Glagolevskij, D.O. Kudryavtsev and I.I. Romanyuk, *Nizhnij Arkhyz*, p.88
- Зегевис (Seggewiss W.), 1981, in: *Upper Main Sequence CP stars*, 1981, 23-th Liege, Coll., Liege, 185
- Илиев и др. (Iliev I.Kh., Barzova I.S., Glagolevskij Yu.V., Bychkov V.D., Romanyuk I.I., Shtol V.G.), 1988, in: *Magnetic stars, Proc. of Internat. Conf.*, (eds: I.M. Kopylov and Yu.V. Glagolevskij), *Leningrad, Nauka*, 87
- Илиев и др. (Iliev I., Barzova I., Glagolevskij Yu.V., Romanyuk I.I., Bychkov V.D., Elkin V.G., Shtol V.G.), 1990, in: *Hot chemically peculiar and magnetic stars*, ed. G.Scholz, *Proc. of 8-th magnetic conf. of East Europe countries, Potsdam obs. contr.*, No.125, 78
- Илиев и др. (Iliev I., Fenovchik M., Budaj J., Ziznovsky J., Zverko J., Barzova I., Stateva I., 2005, in: *A stars puzzle, Proceed. IAU Symp.224*, Eds. J.Zverko, J. Ziznovsky, S.J. Adelman, W.W. Weiss., 301
- Каталано и Ренсон (Catalano F.A., Renson P.), 1998, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **127**, 421
- Каталано и др. (Catalano F. A., Leone F., Kroll R.), 1998a, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **129**, 463
- Каталано и др. (Catalano F. A., Leone F., Kroll R.), 1998b, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **131**, 63
- Карье и др. (Carrier F., North P., Udry S., Babel J.), 2002, *Astron. Astrophys.*, **394**, 151
- Каули (Cowley C.R.), 1980, *Vistas Astron.*, **24**, 245
- Китамура (Kitamura M.), 1980, *Ap.Spa.Sci.*, **68**, 283
- Клочкова и Копылов (Klochkova V.G., Kopylov I.M.), 1986a, in: *Upper Main Sequence Stars with Anomalous Abundances*, *IAU Coll., No.90, Crimea, Reidel*, 160
- Клочкова В.Г., Копылов И.М., 1986b, *Астрон. Ж.*, **63**, 240
- Кодайра (Kodaira K.), 1969, *Astrophys.J.*, **157**, 59
- Кодайра (Kodaira K.), 1973, *Astron.Astrophys.*, **26**, 385
- Конти (Conti P.S.), 1969, *Astrophys. J.*, **156**, 661
- Конти (Conti P.S.), 1970, *Astrophys. J.*, **160**, 309
- Копылов И.М., 1987, *Астрофиз.исслед. (Изв. САО)*, **24**, 44
- Кочухов и Рябчикова (Kochukhov O.P., Ryabchikova T.A.), 2001, *Astron. Astrophys.*, **374**, 615
- Кочухов и Баньюло (Kochukhov, O., Bagnulo, S.), 2006, *Astron.Astrophys.*, **450**, 763
- Кочухов и др. (Kochukhov O., Piskunov N. Sachkov M., Kudryavtsev D., 2005, *Astron. Astrophys.*, **439**, 1093
- Кувшинов В.М., 1972, *Астрон. Цирк.*, No.682, 3
- Кувшинов В.М., Хилдебрант Г., Шенайх В., 1975, *Изв.КрАО*, **53**, 253
- Кувшинов и др. (Kuvshinov V.M., Hildebrandt H., Schenaich W.), 1976, *Astron. Nachr.*, **297**, 181
- Кудрявцев и др. (Kudryavtsev D.O., Romanyuk I.I., Elkin V.G.), 2004, in: *Magnetic Stars, Proceed. of Intern. meet.*, Eds: Yu.V. Glagolevskij, D.O. Kudryavtsev and I.I. Romanyuk, *Nizhnij Arkhyz*, 93
- Кудрявцев и др. (Kudryavtsev D.O., Romanyuk I.I., Elkin V.G. and Paunzen E.), 2006, *MNRAS*, **372**, 1804
- Кумайгородская Р.Н., Копылов И.М., 1972, *Известия САО*, **4**, 50
- Купка и др. (Купка F., Ryabchikova T. A., Weiss W. W., Kuschnig R., Rogl, J., Mathys, G.), 1996, *Astron. Astrophys.*, **308**, 886
- Купка и др. (Купка F., Piskunov N., Ryabchikova T. A., Stempels H.C., Weiss W.), 1999, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **138**, 119
- Куртц (Kurtz D.), 1978, *IBVS. No.1436*, 1
- Куртц (Kurtz D.), 1982, *MNRAS*, **200**, 807
- Куртц и Мартинес (Kurtz D., Martinez P.), 2000, *Baltic Astronomy*, **9**, 253
- Куруч (Kurucz R.L.), 1993, *CDROMs 1-23 Smithsonian Astroph. obs.*
- Леушин В.В., 1971a, *Изв. КрАО*, **43**, 113
- Леушин В.В., 1971b, *Астрофиз. Исслед. (Изв. САО)*, **3**, 36
- Леушин В.В., Снежко Л.И., 1976, *Циркуляр ШАО*, No.64, 3
- Любимков Л.С., 1995, *Химический состав звезд: метод и результаты анализа*, *Астропринт: Одесса*, с.1-323
- Любимков Л.С., Саванов И.С., 1983, *Изв. КрАО*, **67**, 3
- Любимков Л.С., Саванов И.С., 1984, *Изв. КрАО*, **69**, 50
- Любимков Л.С., Саванов И.С., 1985, *Астрофизика*, **22**, 63
- Майтцен (Maitzen H.M.), 1976, *Astron. Astrophys.* **51**, 223
- Майтцен и др. (Maitzen H.M., Paunzen E., Vogt N., Weiss W.W.), 2000, *Astron. Astrophys.*, **355**, 1003
- Матис и Ланц (Mathys G., Lanz T.), 1990, *Astron. As-*

- trophys., **230**, 1,21
- Матис и Хубрик (Mathys G., Hubrig S.), 1995, *Astron. Astrophys.*, **293**, 810
- Михалас Д., 1982, *Звездные атмосферы*, Москва, Мир
- Межесье и др. (Meggesier C., Khokhlova V.L., Ryabchikova T.A.), 1979, *Astron. Astrophys.*, **71**, 285
- Мишо (Michaud G.), 1970, *Astrophys. J.*, **160**, 641
- Мишо (Michaud G.), 1980, *Astron. J.*, **85**, 589.
- Мишо (Michaud G.), 1995, in: *Stellar Surface Structure*, *Proceed. IAU Symp.* 176, eds: K.G. Strassmejer and J. Linsky, 321
- Мишо (Michaud G.), 2005, in: *The A-star puzzle*, *Proceed. IAU Symp.* 224, Eds. J.Zverko, J. Ziznovsky, S.J. Adelman, W.W. Weiss., 173
- Муслилок и Мадей (Musielok B., Madej J.), 1988, *Astron. Astrophys.*, **202**, 143
- Мутсам (Muthsam H.), 1979, *Astron. Astrophys.*, **73**, 159
- Напиовски и др. (Napiwotski R., Schonberner D., Wenske W.), 1993, *Astron. Astrophys.*, **268**, 653
- Норт (North P.), 1984, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **55**, 259
- Норт (North P.), 1993, in: *Peculiar versus Normal Phenomena in A-type and Related Stars*, *IAU Coll* 138 *Proceed.*, M.M. Dworetsky, F.Castelli and R. Farragiana (eds), San Francisco, 577
- Норт (North P.), 1995, *IBVS*, No.4147
- Норт (North P.), 1998, *Astron. Astrophys.*, **334**, 181
- Норт и др. (North P., Carquillat J.-M., Ginestet N., Carrier F., Udry, S., 1998a, *Astron. Astrophys. Suppl.*, **130**, 223
- Норт и др. (North P., Ginestet N., Carquillat J.-M., Carrier F., Udry S.), 1998b, *CAOSP*, **27**, 179
- Пайпер (Puper D.), 1969, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **18**, 1
- Паунзен (Paunzen, E.), 1998, *Scalnat Pleso Obs. Contr.* **27**, 479
- Паунзен и Майтцен (Paunzen, E., Maitzen H.M.) 1998, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **133**, 1
- Паунзен и др. (Paunzen, E., Kamp, I., Iliev, I.Kh., Heiter, U., Hempel, M., Weiss, W. W., Barzova, I. S., Kerber, F., Mittermayer, P.), 1999, *Astron. Astrophys.*, **345**, 597
- Петерсон (Peterson D.M.), 1970, *Astrophys. J.*, **161**, 685
- Пискунов и др. (Piskunov N.E., Kupka F., Ryabchikova T.A., Weiss W.W., Geffery C.S.), 1995, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **112**, 525
- Пискунов и др. (Piskunov N.E., Weiss W.W., Gray D.F. eds), 2003, *Modeling of stellar atmospheres*, *Proceed IAU Symp.* 210, 1-420
- Полосухина Н.С., 1969, *Известия КрАО*, **39**, с.34
- Полосухина и Чуваев (Polosukhina N.S., Chuvaev K.K.), 1974, *Nature*, **251**, 693
- Престон (Preston G.W.), 1974, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, Palo Alto, Calif., 257
- Птицын Д.А., Рябчикова Т.А., 1986, *Астрон. Ж.*, **63**, 527
- Ренсон и Каталано (Renson P., Catalano F.A.), 2001, *Astron. Astrophys.*, **378**, 113
- Ренсон и др. (Renson P., Farragiana R., Catalano F.), 1991a, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **89**, No.3, 429
- Ренсон и др. (Renson P., Kobi D., North P.), 1991b, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **89**, 61
- Ройе и др. (Royer F., Zorec J., Gomes A.E.), 2005, in: *The A-star puzzle*, *Proceed. IAU Symp.* 224, Eds. J.Zverko, J. Ziznovsky, S.J. Adelman, W.W. Weiss, p.109
- Романюк И.И., 1984, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), **18**, 37
- Романюк (Romanyuk, I.I.), 2000, in: *Magnetic fields of CP and related stars*, *Proceed of intern. meeting*, Eds. Yu.V. Glagolevskij and I.I. Romanyuk, Moscow, 18
- Романюк И.И., 2005, *Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв.*, **58**, 63
- Романюк И.И., 2004, *Нижний Архыз, докторская диссертация*, 1-520
- Романюк и др. (Romanyuk I.I., Topilskaja G.P., Mikhnov O.A.), 1992, in: *Stellar magnetism*, *Proceed of intern. meeting*, Eds: Yu.V. Glagolevskij and I.I. Romanyuk, Sankt-Petersburg, Nauka, 76
- Романюк и Топильская (Romanyuk I.I., Topilskaja G.P.), 1997, in: *Stellar magnetic fields*, *Proceed of intern. meeting*, Eds: Yu.V. Glagolevskij and I.I. Romanyuk, Moscow, 170
- Рябчикова (Ryabchikova, T.), 2005, in: *The A-star puzzle*, *Proceed. IAU Symp.* 224, Eds. J.Zverko, J. Ziznovsky, S.J. Adelman, W.W. Weiss, 283
- Рябчикова Т.А., Смирнов Ю.М., 1994, *Астрон. Ж.*, **71**, 83
- Рябчикова и др. (Ryabchikova T.A., Hill G.M., Landstreet J.D., Piskunov N.E., Sigut T.A.T.), 1994, *MNRAS*, **267**, 697
- Рябчикова и др. (Ryabchikova T.A., Wade G., LeBlanc F.), 2003, *Modeling of stellar atmospheres*, *Proceed IAU Symp.* 210, 301
- Рябчикова и др. (Ryabchikova, T., Leone, F., Kochukhov, O., Bagnulo, S., 2005a, in: *The A-star puzzle*, *Proceed. IAU Symp.* 224, Eds. J.Zverko, J. Ziznovsky, S.J. Adelman, W.W. Weiss., 580
- Рябчикова и др. (Ryabchikova, T., Leone, F., Kochukhov, O.), 2005b, *Astron. Astrophys.*, **438**, 973
- Руфенер (Rufener F.), 1988, *Catalog of Geneva photometry*
- Саванов И.С., Рябчикова Т.А., Давыдова Е.С., 1996, *Письма в АЖ*, **22**, 910
- Саванов И.С., Кочухов О.П., Цымбал В.В., 2001, *Астрофизика*, **44**, 79
- Сахибуллин Н.А., 1997, *Методы моделирования в астрофизике*, Казань, ФЭН, 1-315
- Смейли (Smaley, B.), 1993, *MNRAS*, **265**, 1035
- Смейли (Smaley, B.), 2005, in: *The A-star puzzle*, *Proceed. IAU Symp.* 224, Eds. J.Zverko, J. Ziznovsky, S.J. Adelman, W.W. Weiss, 131
- Смит (Smith K.), 1995, *Astron. Astrophys.*, **297**, 237
- Смит (Smith K.), 1996, *Astrophys. and Spa.Sci.*, **237**, 77
- Степень (Stepien K.), 1968, *Astrophys. J.*, **154**, 945
- Степень (Stepien K.), 1978, *Astron. Astrophys.*, **70**, 509
- Степень (Stepien K.), 1989, *Astron. Astrophys.*, **220**, 105
- Степень (Stepien K.), 1994, in: *Chemically Peculiar and magnetic stars*, eds: J. Zverko and J.Ziznovsky, *Tatranska Lomnica*, 8
- Степень (Stepien K.), 1998, *Astron. Astrophys.*, **337**, 764
- Степень и Доминицак (Stepien K., Dominiczak R.),

- 1989, *Astron. Astrophys.*, **219**, 197
- Страйжис В.Л., 1977, Многоцветная фотометрия звезд, Вильнюс: Моклас, 1
- Торрес (Torres G.), 2003, *IBVS*, No.5402
- Фараджиана (Faraggiana R.), 1987, *Astrophys Spa. Sci.*, **134**, 381
- Фарнсворт (Farnsworth G.), 1932, *Astrophys. J.*, **76**, 313
- Флоке (Floquet M.), 1979, *Astron. Astrophys.*, **74**, 250
- Хатцез (Hatzes A.), 1993, *Astrophys. J.*, **410**, 777
- Хаук и Норт (Hauck B., North P.), 1993, *Astron. Astrophys.*, **269**, 403
- Хенсберг и Ван Ренсберген (Hensbere H., Van Rensbergen W.), 1986, in: Upper Main Sequence with Anomalous Abundances, IAU Coll., No.90, Crimea, Reidel, 151
- Хилл и Блэйк (Hill G.M., Blake C.C.), 1996, *MNRAS*, **278**, 183
- Хунгер (Hunger K.), 1986, in: Upper Main Sequence CP stars, IAU Coll., No.90, Crimea, Reidel, 257
- Хохлова В.Л., 1975, Письма в АЖ, **1**, п.6, 28
- Хохлова (Khokhlova V.L.), 1976, *Astron. Nachr.*, **297**, 203
- Хохлова В.Л., 1977, Письма в АЖ, **3**, 21
- Хохлова В.Л., 1978, Письма в АЖ, **4**, 228
- Хохлова В.Л., 1983, В кн. "Итоги науки и техники", Москва, ВИНТИ, 283
- Хохлова и Тошильская (Khokhlova V.L., Topilskaja G.P.), 1992, in: Stellar magnetism, Proc. of intern. meeting, Eds: Yu.V. Glagolevskij and I.I. Romanyuk, Sankt-Petersburg, Nauka, 85
- Хубрик и др. (Hubrig S., Castelli F., Walgren C.M.), 1999, *Astron. Astrophys.* **346**, 139
- Хубрик и др. (Hubrig S., North, P., Mathys, G.), 2000, *Astrophys. J.*, **539**, 352
- Чунтонов (Chountonov G.A.), 2001, in: Magnetic fields across the Hertzsprung–Russel diagram, Eds. G. Mathys, S.K. Solanki, D.T. Wickramasinghe, ASP Conf. Ser., **248**, p. 385
- Шибехаши и Сайо (Shibahashi H., Saio H.), 1985, *PASJ*, **45**, 617
- Шнайдер (Schneider H.), 1981, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **44**, 137
- Шнайдер (Schneider H.), 1986, in: Upper Main Sequence Stars with Anomalous Abundances, IAU Coll., No.90, Crimea, Reidel, 205
- Шнайдер (Schneider H.), 1993, The 25-th meeting and workshop of EWG on CP stars, eds: I. Jankovich and I. Vince, Sombathely, Hungary, 1
- Шор и Адельман (Shore Steven N, Adelman S.J.), 1976, *Astrophys.J.*, **209**, No.3, 816
- Шорлин и др. (Shorlin S.L.S., Lansdstreet J.D., Wade G.A., Donati J-F.), 2000, in: Magnetic fields of CP and related stars, Proceed of intern. meeting, Eds: Yu.V. Glagolevskij and I.I. Romanyuk, Moscow, 54
- Штифт (Stift M.J.), 1974, *Astron. Astrophys.*, **34**, 153
- Яшек и Эгрет (Jaschek M., Egret D.), 1982, *Catalogue of Stellar Groups*, Publ. Speciale du CDS, No.4