

Поиск радиального градиента магнитного поля CP-звезды α^2 CVn

И. И. Романюк¹, В. Е. Панчук¹, Н. Е. Пискунов², Д. О. Кудрявцев¹

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, п. Нижний Архыз, 369167, Россия

² Упсальский университет, Vox 515, 751 20 Упсала, Швеция

Поступила в редакцию 27 декабря 2005; принята к печати 14 сентября 2006.

Обсуждается возможность исследования вертикальной структуры магнитного поля у химически пекулярных звезд Главной последовательности. Неоднородное распределение элементов по поверхности существенно усложняет проблему. Показано, что наиболее результативны измерения продольной компоненты поля по линиям с длинами волн больше и меньше 3646 Å (до и после бальмеровского скачка), образующимся на разной оптической глубине в атмосфере.

Рассматриваются различные методические проблемы, преодоление которых необходимо для выполнения этой задачи. Для ярчайшей магнитной звезды α^2 CVn выполнены наблюдения на эшелле-спектрометре НЭС с ПЗС-матрицей Uppsala. Новые наблюдения подтверждают наш прежний результат: продольная компонента магнитного поля B_e у звезды α^2 CVn увеличивается в глубину примерно на 30% на масштабах толщины атмосферы.

Ключевые слова: химически-пекулярные звезды, магнитные поля звезд, α^2 CVn

SEARCH FOR THE RADIAL MAGNETIC-FIELD GRADIENT IN THE CP-STAR α^2 CVN, by I. I. Romanyuk, V. E. Panchuk, N. E. Piskunov, D. O. Kudryavtsev. The possibility of investigating the vertical structure of the magnetic field in chemically peculiar main-sequence stars is discussed. The nonuniform distribution of chemical elements over the surface complicates the problem substantially. The most efficient measurements are shown to be those of the longitudinal field components based on spectral lines with wavelengths longer and shorter than 3646 Å (shortward and longward of the Balmer jump), which form at different optical depths in the atmosphere.

Various methodological problems are addressed that must be overcome in order to accomplish the task. The brightest magnetic star α^2 CVn is observed with the echelle spectrometer equipped with an Uppsala CCD chip. New observations corroborate our previous result: the longitudinal component of the magnetic field B_e of the α^2 CVn star increases with depth by about 30% over the atmosphere thickness scale.

Key words: stars: chemically peculiar – stars: magnetic fields – stars: individual: α^2 CVn

1. Введение

Тот факт, что спектральные линии химически пекулярных (CP) звезд показывают значительную регулярную круговую поляризацию во всех фазах осевого вращения, указывает на то, что магнитные поля этих объектов имеют относительно простую глобальную структуру и высокую степень упорядоченности на больших масштабах. Действительно, если поля концентрируются в небольших пятнах, как у Солнца, усредненная по диску круговая поляризация была бы значительно меньше наблю-

даемой, так как поляризация от полей с противоположной ориентацией взаимно компенсируется.

За исключением нескольких объектов, форма кривой переменности продольной компоненты магнитного поля B_e в течение периода вращения звезды близка к синусоидальной, что долгое время считалось убедительным доказательством обладания дипольной структуры магнитного поля.

С другой стороны, хорошо известно (см., например, Хохлова, 1983) большое разнообразие проявлений химической пекулярности: практически

невозможно найти две одинаковые CP-звезды. Так как все магнитные A- и B-звезды Главной последовательности являются одновременно и химически пекулярными, то связь между существованием аномалий и наличием поля представляется несомненной. Теория диффузии химических элементов в очень стабильной атмосфере в присутствии магнитного поля, впервые предложенная Мишо (1970), в настоящее время является наиболее разработанной, хотя и не лишена недостатков.

Возникает закономерный вопрос: почему в полях одинаковой дипольной структуры возникают столь разные неоднородности распределения элементов по поверхности у различных звезд? Наоборот, естественнее объяснять большое разнообразие проявлений химической пекулярности именно индивидуальными особенностями физических условий в атмосферах CP-звезд и различиями в деталях конфигурации их магнитных полей.

Ответ на этот вопрос не до конца ясен, так как в большинстве случаев процедуры определения химического состава и продольной компоненты поля существенно различаются, и полученные в наблюдениях результаты относятся к разным по масштабу областям наблюдаемой полусферы звезды. В то время как картирование химсостава по поверхности звезд выполняется уже более 20 лет (Хохлова, 1983), магнитные поля до недавних пор измерялись либо способом, предложенным еще Бэбкоком (1947), либо по анализу круговой поляризации в линиях, в основном водородных (Ландстрит, 2001). Такая процедура позволяла получать только усредненные по всей видимой поверхности звезды параметры ее магнитного поля.

Любой процесс, протекающий в звездной атмосфере, имеет трехмерную структуру. Приближения меньшей размерности могут привести к ошибочным выводам. Поэтому, наряду с изучением эффекта модуляции осевым вращением неоднородностей химического состава и магнитного поля, важно получить информацию об изменениях химического состава и магнитного поля с глубиной в атмосфере.

Замена фотопластинки на ПЗС-матрицу при сохранении недостаточно высокого спектрального разрешения кардинально не улучшила ситуацию. Действительно, стало возможным анализировать профили линий, но низкое разрешение не позволяло выявлять в них поляризованных деталей. Для воспроизведения наблюдаемого профиля круговой поляризации достаточно было предположить, что магнитное поле CP-звезды представляет собой суперпозицию коллинеарных диполя, квадруполь и октополя (Ландстрит, 1988), либо произвольно ориентированных диполя и квадруполь

(Баньюло и др., 2001).

Между тем, одним из авторов этой статьи (Пискунов, 2001) были разработаны и написаны программы Допплер-Зеемановского картирования (ZDI), позволяющие реконструировать распределение вектора магнитного поля по поверхности CP-звезды независимо от каких-либо предварительных предположений о его геометрии. Для практической реализации метода ZDI необходимо получить спектрополяриметрические наблюдения с высоким спектральным разрешением и отношением C/Ш, при этом для каждой звезды они должны проводиться не менее чем в 10-ти различных фазах периода осевого вращения.

Первые результаты спектрополяриметрии в четырех параметрах Стокса (Кочухов и др., 2004) известной магнитной звезды 53 Cam показали существенно более сложное, чем это принималось ранее, строение поля. Несмотря на синусоидальный характер магнитных кривых B_e и B_s , картирование показало, что строение поля совершенно не похоже на диполь или квадруполь (максимум пространственных частот приходится на сферические гармоники с номерами в районе 5-6), хотя и Ландстрит (1988), и Баньюло (2001) весьма успешно воспроизвели круговую поляризацию и профили интенсивности, используя мультиполярное разложение только низкого порядка.

Кроме картирования по поверхности звезды, можно попытаться исследовать вертикальное строение атмосфер CP-звезд: стратификацию различных химических элементов и вертикальный (радиальный) градиент магнитного поля. Следует иметь в виду, что толщина наблюдаемой в оптическом диапазоне атмосферы CP-звезды примерно на три порядка меньше ее диаметра. В случае чисто дипольного поля на масштабах порядка толщины атмосферы оно должно увеличиваться в глубину на величину не более нескольких десятков Гс, что практически неизмеряемо современными методами. Поэтому постановка задачи об измерениях вертикального градиента поля может показаться преждевременной.

Тем не менее, регулярно делаются попытки (они будут рассмотрены ниже) исследований вертикальной структуры, так как при детальном изучении магнитных полей CP-звезд выявлены такие особенности, которые можно было бы объяснить большими (недипольными) их изменениями по высоте.

После того, как Кочухов и др. (2004) показали, что синусоидальная кривая продольного поля автоматически не означает дипольное поле с неизмеримо малым вертикальным градиентом, задача измерения приобрела новый смысл: можно получить дополнительное и независимое доказательство су-

ществования тонкой структуры магнитного поля CP-звезд.

2. Постановка задачи

Впервые проблема изучения вертикальной структуры магнитных полей CP-звезд была рассмотрена Престоном (1965): он предложил проводить измерения магнитных полей по линиям, образующимся на разной оптической глубине в атмосфере CP-звезды. Он рассмотрел два варианта: 1) измерения проводить по сильным и слабым линиям (слабые образуются на больших оптических глубинах); 2) использовать линии, расположенные по разные стороны от бальмеровского скачка (линии с коротковолновой стороны от него образуются выше в атмосфере, чем более длинноволновые). Принципиальные трудности состоят в том, как уловить изменения поля с глубиной в слое толщиной 10^3 – 10^4 км при “пятнистой” поверхности звезды диаметром 10^6 – 10^7 км, а также как определить глубины образования линий в неоднородной звездной атмосфере.

В случае Солнца различные методы определения дают сходный результат: локальное магнитное поле в солнечных пятнах увеличивается в глубину на несколько десятых Гс/км. Но в CP-звездах можно наблюдать поля глобального характера, и, как мы указывали выше, в случае дипольной структуры их изменение на расстояниях порядка 10^3 км по вертикали не превышает нескольких десятых долей процента, что современными методами еще не может быть измерено. Из-за неравномерного распределения элементов по поверхности CP-звезд процедура определения вертикального градиента поля еще более усложняется, так как горизонтальные неоднородности могут ложным образом быть приняты за вертикальные. Таким образом, обнаружение вертикального градиента поля может указывать либо на существенные отличия структуры поля от дипольной, либо на изъяны в применяемой диагностике магнитных полей звезд.

На существование измеримого градиента магнитного поля указывали некоторые факты. Например, еще Престон (1969) заметил, что у звезды 53 Cam магнитное поле, измеренное по слабым линиям, имеет большую величину, чем по сильным, при этом получилась линейная зависимость с высоким коэффициентом корреляции между величиной поля и интенсивностью линий. Для объяснения этого эффекта Престон предложил гипотезу об увеличении магнитного поля в глубину, хотя частично он может быть объяснен насыщением линий. Романюк (1980) подтвердил вывод Престона о том, что для 53 Cam величина измеренного по-

ля зависит от интенсивности линий, кроме того, им было показано, что поле, измеренное по линиям ионов, сильнее, чем измеренное по линиям нейтральных атомов. Это обстоятельство также указывало на рост поля в глубину атмосферы 53 Cam. Однако в то время еще не было разработано надежных моделей звездных атмосфер, и вопрос о глубине образования линий продолжал оставаться дискуссионным.

Более надежных результатов можно было ожидать при измерениях вертикального градиента поля по линиям, образующимся по разные стороны бальмеровского скачка. В самом деле, линии с длиной волны короче 3646 \AA формируются в условиях сильного поглощения бальмеровским континуумом (т.е. в верхних слоях атмосферы с оптической глубиной порядка нескольких сотых). В то же время слабые линии в более длинноволновой области — на оптической глубине — порядка единицы.

Однако имеются многочисленные методические трудности, существенно усложняющие получение наблюдательного материала в спектральной области около бальмеровского скачка. Падение пропускания атмосферы, оптики телескопа, анализатора поляризации и спектрографа, чувствительности детекторов приводит к резкому падению отношения С/Ш с уменьшением длины волны. Прямая квадратическая зависимость величины зеемановского расщепления от длины волны приводит к тому, что точность измерений поля на 3600 \AA в два раза хуже, чем в обычной визуальной области, а увеличение блендирования в ультрафиолетовом диапазоне еще больше ухудшает точность измерений.

Первую попытку измерения магнитного поля в области с коротковолновой стороны от бальмеровского скачка предприняла Вольф (1978). Для этой цели был специально построен зеемановский анализатор со слюдяной фазосдвигающей пластинкой, рабочая область которого находилась в пределах 3400 – 3600 \AA . Результат Вольф следующий: для звезды α^2 CVn обнаружено небольшое ($\sim 25\%$) уменьшение величины продольного поля B_e и амплитуды его переменной по сравнению с обычной областью спектра, т.е. получено указание на рост магнитного поля в глубину атмосферы этой звезды. Для другой магнитной звезды, β CrV, величина и амплитуда переменной магнитного поля оказались одинаковыми в областях до и после скачка, но фиолетовая и обычная кривые B_e оказались сдвинутыми по фазе на 0.15 периода. Поскольку Вольф не получила одновременно спектры в обычной визуальной области, то нельзя было исключить влияние различных методических причин на полученный ею результат.

В серии работ Романюка (1984a,b, 1986, 1991) были выполнены наблюдения на Основном звездном спектрографе 6-м телескопа с ахроматическим анализатором круговой поляризации (Найденов и Чунтонов, 1976), работающим в широком спектральном диапазоне от 3300 до 7000 Å. На фотопластинке области спектра по разные стороны от бальмеровского скачка получались одновременно, что позволяло исключить из рассмотрения многие инструментальные факторы. В этих работах было показано, что, в полном согласии с результатами Вольф (1978), продольная компонента поля V_e у CP-звезды α^2 CVn имеет меньшую величину и амплитуду переменности в верхних слоях атмосеры, в то время как у другой звезды, β СтВ, такой эффект не наблюдается.

Чтобы уменьшить влияние неоднородного распределения элементов по поверхности, в работе Романюка (1984b) было проведено измерение магнитных полей раздельно по линиям железа, хрома и титана. За подробностями отошлем читателя к указанной работе, а здесь ограничимся кратким изложением выводов: поле, определенное по линиям железа и хрома, уменьшается с высотой, в то время как поля, измеренные по линиям титана, расположенным по разные стороны от скачка, оказались одинаковыми. Использование фотопластинки в качестве светоприемника позволяло получить наблюдательный материал для исследований вертикального градиента только для ярчайших звезд, даже при наблюдениях на 6-м телескопе.

Первые ПЗС-приемники БТА были чувствительны только в красной области спектра, поэтому мы были вынуждены прервать наблюдения в диапазоне бальмеровского скачка более чем на 10 лет. И только после внедрения в наблюдения ПЗС-матриц, чувствительных в синей области спектра (в 1999 г.), работы по исследованиям вертикального градиента поля были возобновлены, но уже на совершенно другом методическом уровне.

3. Выбор объектов

В программу наблюдений на 6-м телескопе нами были включены несколько ярких магнитных звезд. Достаточное количество данных получено только для одной из них — α^2 CVn (HD 112413). Это ярчайшая магнитная звезда, продольная компонента ее магнитного поля измерялась в десятках работ. Обобщая их, можно сделать следующие выводы: продольная компонента поля V_e , измеренная по линиям металлов в обычной визуальной области спектра, меняется от -1600 до $+1800$ Гс, кривая ангармонична: положительный экстремум более узкий и резкий, чем отрицательный. Изме-

рения, проведенные на бальмеровском магнитометре по линиям водорода (Борра и Ландстрит, 1977), показывают почти синусоидальную кривую V_e , но с меньшей амплитудой вариаций (от -1300 до $+1100$ Гс).

Период всех изменений — фотометрических, спектральных и магнитных — удовлетворяет эфемеридам Фарнсворт (1932):

$$JD = 2419869^d72 + 5^d46939E.$$

Для объяснения переменности были предложены различные модели этой звезды. Ранние (Пайпер, 1969; Кумайгородская и Копылов, 1972, и много других) сводились к модели наклонного ротатора с дипольным магнитным полем и неоднородным химсоставом. Современные методы (Кочухов и Пискунов, 2002) позволяют реконструировать геометрию магнитного поля и распределение химсостава по поверхности звезды без привлечения упрощающих предположений о структуре магнитного поля. В работе Кочухова и др. (2002) было показано, что дипольная компонента является преобладающей в конфигурации магнитного поля α^2 CVn, вклад квадрупольной компоненты небольшой, распределение элементов по поверхности тесно связано с конфигурацией магнитного поля. Таким образом, получено еще одно независимое указание на преобладание дипольной компоненты магнитного поля α^2 CVn, что делает вопрос об измерениях радиального градиента по-прежнему трудно разрешимым.

В последние годы активно обсуждается проблема стратификации химических элементов в атмосферах CP-звезд. В ряде работ (например, Вэйд и др., 2001, Рябчикова и др., 2002) показано, что для объяснения профилей линий у некоторых холодных CP-звезд необходимо предполагать большую стратификацию элементов, в частности для β СтВ концентрация металлов увеличивается в глубину на 3 порядка на масштабах оптической толщины в атмосфере.

В нашем раннем исследовании α^2 CVn (Романюк и Топильская, 1997), проведенном по фотографическим спектрам в области бальмеровского скачка, такой большой стратификации не замечено. Мы получили увеличение содержания железа в верхних слоях атмосферы этой звезды на 0.38 dex. Подчеркнем здесь, что α^2 CVn не является холодной CP-звездой, поэтому параметры стратификации у нее могут отличаться существенным образом от таковых у более холодных звезд.

Полученный нами материал позволяет изучать стратификацию элементов (по линиям в области до и после бальмеровского скачка) в атмосфере указанной звезды с существенно более высокой

точностью. Мы планируем выполнить такую работу в будущем. Нам представляется, что исследования стратификации элементов по линиям до и после бальмеровского скачка могут дать независимые и более надежные результаты по сравнению с полученными по методикам, применяемым в настоящее время.

Получены также спектры еще для трех звезд: β CrV, 52 Her и 53 Cam. Результаты их изучения будут сообщены в следующей работе.

4. Наблюдения

Для обработки зеемановских спектров и измерения продольного магнитного поля мы использовали программы, написанные Кудрявцевым (2000) в среде MIDAS.

Для исследования вертикального градиента поля мы провели наблюдения с высоким спектральным разрешением ($R = 50000$) в области спектра 3400–4100 Å на кварцевом эшелле-спектрометре НЭС 6-м телескопа (Панчук и др., 2002) с ахроматическим анализатором круговой поляризации (Найденов и Чунтонов, 1976). В качестве светоприемников в 1999–2001 гг. использовалась ПЗС-матрица ISD 017A (1040×1160 элементов с размером элемента 16×16 мкм), а с 2002 г. — ПЗС-матрица Uppsala (2048×2048 элементов с размером элемента 15×15 мкм). Описание основных характеристик эшелле-спектрометра НЭС можно найти в работе Панчука и др. (1999). Результаты первых наблюдений магнитных полей на нем опубликованы Панчуком и др. (2000).

Получение зеемановских спектров в области бальмеровского скачка — трудная наблюдательная задача: эффективность матрицы и пропускание анализатора резко падают с уменьшением длины волны, начиная с 4000 Å. До настоящего времени наш материал — эшелльные зеемановские спектры, полученные с ПЗС-матрицей в области 3400–4100 Å, — остается уникальным.

Для достижения максимально возможной точности мы проводили наблюдения только в фотометрические ночи при качестве изображений не хуже 2". Каждый цикл наблюдений включал в себя серию из двух или четырех экспозиций длительностью по 1 часу в области спектра 3500–3900 Å с матрицей меньшего формата и 3400–4100 с ПЗС-матрицей 2048×2048 элементов. Для контроля за постоянством инструментальных параметров зеемановского анализатора и эшелле-спектрометра, а также величиной инструментального сдвига, вызванного отклонениями в параллельности расположения спектра и столбцов (или рядов) матрицы, каждую ночь проводились наблюдения ярких

немагнитных звезд. Для калибровки спектров по длине волны использовался спектр Th–Ar лампы.

Для иллюстрации на рис. 1 приведены участки спектра и увеличенные в 10 раз V -параметры Стокса в областях до и после бальмеровского скачка для одного и того же спектра звезды α^2 CVn. Видно значительное падение отношения S/Π в коротковолновой области. Спектр получен в фазе 0.275 (см. таблицу 1), что близко к фазе кроссовера для этой звезды (т. е. когда силовые линии дипольного поля перпендикулярны лучу зрения). По этой причине профили V -параметра Стокса имеют сложную форму.

Список линий, использованных при измерениях магнитного поля в областях до и после бальмеровского скачка, приведен в таблице 1.

Среднее значение фактора Ланде для отобранных линий с длиной волны $\lambda < 3646$ Å $z(UV) = 1.146 \pm 0.055$, стандартное отклонение 0.402. В области с $\lambda > 3646$ Å $z(V) = 1.229 \pm 0.038$, стандартное отклонение 0.463. Таким образом, наши данные подтверждают ранее известное обстоятельство: факторы Ланде линий, которые обычно используются при измерениях магнитных полей в областях спектра до и после бальмеровского скачка, в среднем значимо не отличаются. Ранее Романюк (1984b) исследовал этот вопрос в деталях и показал, что факторы Ланде линий разных химических элементов, наблюдаемых в спектрах звезд, в среднем практически одинаковые (1.20 – 1.25). Исключение составляют только редкоземельные элементы европий и гадолиний, факторы Ланде линий которых в среднем имеют величину 1.7 – 1.8.

Корреляционные методы, эффективно используемые при поисках магнитных полей холодных звезд (см. например, Донати и Колье Кэмерон, 1997), основаны на том, что факторы Ланде линий различаются мало и в достаточно узких спектральных областях можно накопить суммарный сигнал круговой поляризации, так как он мало меняется от линии к линии.

Кроме всего прочего, это значит, что блендирование не может существенно исказить результаты измерений магнитных полей. Поэтому экспресс-измерения магнитных полей звезд, проведенные без детального и трудоемкого процесса отождествления линий, широко применяются, а полученные результаты мало отличаются от таковых, полученных с использованием отождествлений и факторов Ланде отдельных линий.

В данной работе мы провели анализ полученных измерений как без отождествления, так и с учетом индивидуальных факторов Ланде линий.

Таблица 1: Список линий, использованных для измерений магнитного поля

Длина волны	Элемент	Фактор Ланде	Длина волны	Элемент	Фактор Ланде
3516.7720	Gd 2	1.30	3862.5950	Si 2	0.83
3529.6850	Cr 2	1.63	3863.9510	Fe 2	0.49
3531.1320	Eu 2	1.65	3865.5960	Cr 2	1.10
3532.6810	Fe 2	0.84	3866.5230	Cr 2	1.13
3535.4100	Ti 2	1.10	3867.2159	Fe 1	1.48
3542.0756	Fe 1	1.08	3868.6660	Cr 2	2.27
3547.0900	Cr 2	0.33	3871.5780	Fe 2	1.06
3554.9246	Fe 1	1.21	3872.5012	Fe 1	1.25
3556.8779	Fe 1	1.17	3902.9457	Fe 1	1.20
3558.5151	Fe 1	0.58	3907.1070	Eu 2	1.65
3561.0260	Cr 1	1.16	3909.2470	Cr 2	0.83
3561.5800	Ti 2	1.11	3911.3210	Cr 2	1.12
3563.9120	Cr 2	0.60	3913.4680	Ti 2	0.89
3564.5310	Fe 2	0.98	3914.9920	Fe 2	0.97
3565.3190	Cr 2	1.15	3915.2690	Cr 2	0.45
3566.0590	Fe 2	0.53	3916.5090	Gd 2	1.66
3570.0977	Fe 1	1.04	3917.3180	Mn 2	1.02
3571.9953	Fe 1	1.50	3918.0570	Gd 2	1.48
3572.5260	Sc 2	1.33	3919.4010	Cr 2	1.09
3573.3936	Fe 1	0.67	3920.6350	Fe 2	1.13
3573.7320	Ti 2	0.60	3922.9118	Fe 1	1.50
3576.3400	Sc 2	1.16	3923.8410	Cr 2	1.12
3578.6840	Cr 1	1.40	3925.4180	Cr 2	1.11
3581.1930	Fe 1	1.16	3927.9199	Fe 1	1.50
3583.9720	Cr 2	0.86	3929.2570	Fe 2	0.34
3585.4920	Cr 2	1.55	3930.4990	Eu 2	1.96
3586.9848	Fe 1	0.67	3932.0230	Ti 2	1.50
3588.3200	Cr 2	1.27	3933.6630	Ca 2	1.17
3589.4830	Fe 2	1.00	3934.8320	Gd 2	2.13
3592.0210	V 2	1.00	3935.9620	Fe 2	1.05
3596.0520	Ti 2	0.86	3936.9520	Cr 2	0.92
3596.5020	Ti 2	1.00	3938.1140	Gd 2	1.25
3602.4621	Fe 1	1.59	3940.4920	Fe 2	0.49
3603.7760	Cr 2	1.61	3941.2753	Fe 1	1.24
3605.4528	Fe 1	0.99	3942.1090	Fe 2	1.37
3608.6350	Cr 2	0.63	3946.9949	Fe 1	1.13
3610.1591	Fe 1	1.49	3949.5920	Cr 1	2.48
3613.1320	Cr 2	2.92	3950.6250	Cr 2	0.95
3614.8760	Fe 2	0.80	3953.6810	Cr 2	1.22
3617.2560	Cr 2	1.09	3955.6380	Cr 2	1.38
3618.7679	Fe 1	0.77	3956.4554	Fe 1	1.23
3618.9840	Cr 2	1.22	3958.0810	Cr 1	1.15
3621.2700	Fe 2	1.15	3959.5290	Gd 2	1.38
3624.8240	Ti 2	1.38	3986.0830	Fe 2	1.14
3631.4610	Cr 2	1.61	3987.6000	Ti 2	1.22
3632.0388	Fe 1	1.00	3989.6010	Fe 1	1.19
3633.9940	Cr 2	1.18	3989.9790	Cr 1	1.17
3634.7540	Gd 2	1.45	3990.2060	Cr 2	1.14
3638.2965	Cr 1	1.19	3991.1070	Cr 1	0.67
3640.3885	Fe 1	1.39	3994.2470	Cr 2	0.94

Таблица 1: Список линий, использованных для измерений магнитного поля (продолжение)

Длина волны	Элемент	Фактор Ланде	Длина волны	Элемент	Фактор Ланде
3643.2050	Cr 2	1.40	3998.9850	Cr 2	2.32
3643.6780	Fe 2	1.19	4000.4572	Fe 1	1.11
3647.3730	Cr 2	1.41	4002.4830	Cr 2	1.65
3647.8428	Fe 1	0.95	4003.2830	Cr 2	0.94
			4003.8420	Gd 2	1.68
			4004.1510	Fe 2	1.17
			4005.1880	Cr 2	1.42
3709.1830	Cr 2	0.97	4008.9090	Gd 2	1.52
3712.8920	Cr 2	2.77	4011.6800	Eu 2	1.93
3715.1720	Cr 2	1.17	4012.4960	Cr 2	0.91
3719.9347	Fe 1	1.20	4015.2080	Fe 2	0.76
3738.3560	Cr 2	1.08	4017.9630	Cr 2	1.75
3741.6350	Ti 2	1.12	4018.4900	Fe 2	2.31
3743.4682	Fe 1	1.01	4022.3780	Cr 2	1.03
3745.8995	Fe 1	-0.01	4024.5470	Fe 2	1.09
3754.5660	Cr 2	0.89	4025.4120	Fe 2	1.74
3755.1230	Cr 2	1.20	4028.3430	Ti 2	1.04
3757.7370	Cr 2	1.55	4030.3580	Cr 2	1.81
3759.2960	Ti 2	1.14	4031.4420	Fe 2	1.20
3761.8510	Cr 2	2.30	4034.2350	Fe 2	1.65
3762.8930	Fe 2	1.20	4036.4480	Fe 2	1.23
3763.7891	Fe 1	1.00	4037.0670	Fe 2	1.77
3765.5860	Cr 2	0.52	4037.9720	Cr 2	1.04
3766.6370	Cr 2	0.81	4042.7520	Gd 2	1.25
3767.1918	Fe 1	-0.02	4044.0120	Fe 2	0.86
3774.2930	Gd 2	-0.37	4045.8124	Fe 1	1.25
3778.5090	Fe 1	1.53	4047.8130	Gd 2	0.49
3781.5090	Fe 2	1.26	4048.8320	Fe 2	1.14
3782.0500	Cr 2	1.06	4051.2120	Fe 2	1.47
3786.3210	Ti 2	1.67	4051.9300	Cr 2	1.19
3787.2370	V 2	1.42	4052.4750	Fe 2	1.62
3810.2470	Gd 2	0.83	4054.0760	Cr 2	1.50
3812.2550	Cr 1	1.01	4056.0560	Cr 2	0.45
3813.9950	Cr 2	1.14	4059.3590	Gd 2	1.70
3814.6010	Cr 1	0.83	4060.7420	Fe 2	1.05
3815.8403	Fe 1	1.15	4061.7820	Fe 2	1.33
3816.1700	Cr 1	1.25	4063.5860	Gd 2	1.69
3816.9620	Cr 2	1.50	4064.7560	Fe 2	-0.18
3817.3410	Fe 2	1.24	4069.8830	Fe 2	1.22
3817.6395	Fe 1	1.39	4070.7707	Fe 1	1.39
3819.6720	Eu 2	1.40	4071.7380	Fe 1	0.68
3820.4252	Fe 1	1.21	4072.5024	Fe 1	0.75
3821.1778	Fe 1	0.99	4073.1920	Gd 2	1.94
3821.9270	Fe 2	1.27	4073.7470	Gd 2	1.59
3824.9290	Fe 2	1.59	4076.8550	Cr 2	1.52
3825.8812	Fe 1	1.14	4077.5110	Cr 2	1.05
3850.8179	Fe 1	1.25	4082.2850	Cr 2	1.15
3852.4620	Gd 2	1.97	4119.5240	Fe 2	1.29

Таблица 1: Список линий, использованных для измерений магнитного поля (продолжение)

Длина волны	Элемент	Фактор Ланде	Длина волны	Элемент	Фактор Ланде
3853.6650	Si 2	1.07	4121.1510	Fe 2	1.49
3854.2220	Cr 1	1.62	4122.6680	Fe 2	1.33
3856.0180	Si 2	1.10	4123.7283	Fe 1	0.99
3859.9114	Fe 1	1.50	4124.7870	Fe 2	1.38
			4128.0540	Si 2	0.90
			4129.7250	Eu 2	1.93
			4130.8940	Si 2	1.05

5. Результаты измерений магнитного поля

Процесс измерения магнитных полей предполагает несколько этапов: 1) проводятся стандартные процедуры экстракции зеэмановских спектров из ПЗС-изображений; 2) осуществляется калибровка по длине волны и стандартизация спектров (коррекция длин волн за движение Земли, нормировка на континуум и пр.); 3) находится средний зеэмановских сдвиг всех измеряемых линий (в случае, когда отождествление не выполняется), при этом центры линий определяются по аппроксимации их профиля гауссианой.

Результаты измерений продольной компоненты магнитного поля α^2 CVn представлены в таблице 2. Там же для сравнения приведены результаты измерений стандартных немагнитных звезд.

В колонках таблицы: юлианская дата наблюдений, фаза периода осевого вращения, полученные величины магнитных полей в верхних ($\lambda < 3646 \text{ \AA}$) и глубоких слоях ($\lambda > 3700 \text{ \AA}$) атмосферы, $[n]$ — количество измеренных линий. Указано также количество использованных зеэмановских спектрограмм. Для α^2 CVn отношение С/Ш составляет 200–300 на длине волны около 3900 \AA и 50–60 на $\lambda 3600 \text{ \AA}$, а для ярких звезд-стандартов — порядка 500 и 100, соответственно.

Из табл. 2 видно, что в области до бальмеровского скачка имеется значительно меньше пригодных для измерения линий. Наряду с падением интенсивности спектра это приводит к существенному ухудшению точности определения магнитного поля в верхних слоях атмосферы. Тем не менее, наблюдения ярких стандартных звезд с узкими и резкими линиями показывают, что применяемая нами методика наблюдений и измерений позволяет учесть различные ошибки, вызванные инструментальными причинами.

Видно, что во всех наблюдаемых фазах периода вращения α^2 CVn модуль продольной компоненты ее магнитного поля B_e меньше в высоких слоях атмосферы, что согласуется с предыдущими исследованиями (Романюк, 1984а). Другими словами, амплитуда кривой изменения магнитного поля

меньше для верхних слоев атмосферы.

За исключением фазы 0.461 (положительный экстремум), остальные шесть измерений были выполнены в моменты, когда виден преимущественно отрицательный магнитный полюс звезды. Для лучшего выявления искомого нами эффекта найдем среднее значение продольной компоненты поля в интервале фаз, соответствующих отрицательной полуволне фазовой кривой B_e . Как мы уже указывали выше, кривая ангармонична, фаза отрицательного продольного поля занимает большую часть периода.

Найденное нами среднее значение отрицательного поля, измеренного по линиям с длиной волны меньше 3646 \AA , $B_e = -765 \pm 103 \text{ Гс}$, а по линиям с $\lambda > 3646 \text{ \AA}$ — $B_e = -1204 \pm 68 \text{ Гс}$. Сравнение средних по критериям распределения Стьюдента дает величину $t = 3.57$, что позволяет отвергнуть предположение о случайном различии средних на уровне значимости 2%. Таким образом, из наших измерений следует, что в фазах с преобладанием поля отрицательной полярности у CP-звезды α^2 CVn модуль продольной компоненты поля на масштабах толщины атмосферы уменьшается с высотой примерно на 30%.

К сожалению, на положительном участке кривой B_e нами получены наблюдения всего в одной фазе. Измерения показали, что продольное поле в верхних слоях на 300 Гс меньше, но этих данных пока недостаточно.

Сравним новые данные с полученными ранее фотографическим способом на 6-м телескопе (Романюк, 1984а, 1986). Перечислим кратко некоторые итоги этих исследований.

Точность фотографических измерений была существенно ниже, однако это обстоятельство частично компенсируется тем, что было получено гораздо большее количество (около 50) зеэмановских спектров, более или менее равномерно распределенных по периоду. Это позволило провести статистический анализ данных, полученных в разных фазах.

В работе Романюка (1986) приведены средние значения продольных магнитных полей α^2 CVn в

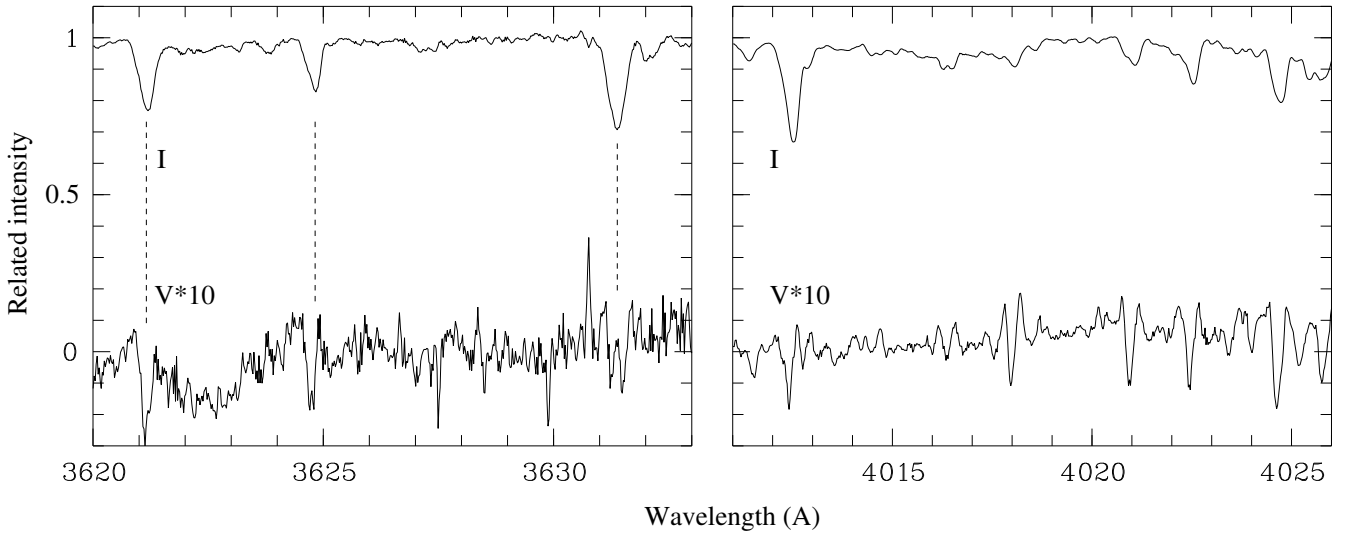


Рис. 1: Фрагменты спектра $\alpha^2 CVn$: а) в области $\lambda < 3646 \text{ \AA}$, б) в области $\lambda > 3646 \text{ \AA}$. Вверху – I-параметр Стокса, внизу – V-параметр (с увеличением масштаба в 10 раз).

Таблица 2: Результаты измерений вертикального градиента магнитного поля

JD 2450000+	Фаза	$B_e \pm \sigma$ ($\lambda < 3646 \text{ \AA}$)	[n]	$B_e \pm \sigma$ ($\lambda > 3646 \text{ \AA}$)	[n]	К-во спектров
<u>$\alpha^2 CVn$</u>						
1385.258	0.167	-880 ± 310	[25]	-1130 ± 110	[59]	1
1591.415	0.860	-800 ± 350	[111]	-1000 ± 140	[68]	2
1592.404	0.042	-980 ± 270	[74]	-1130 ± 110	[78]	4
1593.386	0.219	-410 ± 480	[76]	-1390 ± 150	[74]	2
2594.583	0.275	-1020 ± 330	[71]	-1420 ± 100	[327]	4
2595.600	0.461	$+1660 \pm 260$	[47]	$+1970 \pm 110$	[290]	2
2596.588	0.641	-500 ± 310	[37]	-1140 ± 100	[283]	4

Немагнитные стандартные звезды

<u>α Boo</u>						
1384.292		-82 ± 108	[41]	-32 ± 59	[75]	
1385.228		$+41 \pm 24$	[150]	$+74 \pm 17$	[176]	
<u>α Per</u>						
2594.210		$+88 \pm 63$	[99]	-43 ± 14	[507]	
2596.158		-59 ± 262	[32]	$+7 \pm 30$	[475]	
<u>α CMi</u>						
1592.213		$+24 \pm 32$	[226]	$+71 \pm 19$	[187]	
1593.248		-78 ± 22	[254]	-10 ± 13	[182]	
2594.498		$+46 \pm 18$	[260]	$+1 \pm 5$	[949]	
2595.546		$+4 \pm 17$	[269]	-3 ± 5	[915]	

Таблица 3: Среднее продольное магнитное поле $\alpha^2 CVn$

Длина волны	Положительный экстремум	Отрицательный экстремум
$\lambda < 3646 \text{ \AA}$	$+600 \pm 240 \text{ Гс}$	$-410 \pm 240 \text{ Гс}$
$\lambda > 3646 \text{ \AA}$	$+1070 \pm 220 \text{ Гс}$	$-1110 \pm 120 \text{ Гс}$

Таблица 4: Магнитное поле $\alpha^2 CVn$, измеренное по разным элементам

JD(2450000+)	Фаза	Элемент	$B_e \pm \sigma$			
			$\lambda < 3646$		$\lambda > 3700$	
2594.583	0.275	все линии	-1150 ± 330	[105]	-1600 ± 80	[327]
		Fe	-710 ± 550	[34]	-2280 ± 180	[79]
		Cr	-1200 ± 333	[35]	-1780 ± 350	[60]
		Ti	-2100 ± 720	[12]	-1850 ± 360	[8]
		Gd	-2040 ± 190	[6]	-1180 ± 330	[18]
		Eu			-1690 ± 220	[4]
2595.600	0.461	все линии	$+1700 \pm 250$	[48]	$+2150 \pm 100$	[290]
		Fe	$+2500 \pm 530$	[22]	$+2330 \pm 220$	[63]
		Cr	$+670 \pm 400$	[10]	$+1800 \pm 390$	[27]
		Ti	$+2450 \pm 440$	[6]	$+2900 \pm 940$	[6]
		Gd			$+940 \pm 190$	[15]
		Eu			$+1060 \pm 620$	[3]
2596.588	0.641	все линии	-600 ± 300	[52]	-1220 ± 100	[283]
		Fe	-770 ± 544	[17]	-1390 ± 240	[55]
		Cr	-710 ± 370	[20]	-890 ± 250	[45]
		Gd	-620 ± 50	[3]	-1420 ± 320	[15]
		Eu			-1530 ± 270	[6]

фазах положительного и отрицательного экстремумов (табл. 3). Видим достаточно хорошее согласие между новыми данными и полученными ранее: величина модуля продольного поля и амплитуда его изменений уменьшаются с высотой в атмосфере CP-звезды $\alpha^2 CVn$.

Рассмотрим далее кривые продольного поля, полученные по линиям некоторых отдельных элементов. Мы провели отождествление спектральных линий $\alpha^2 CVn$ в трех разных фазах периода вращения, для чего была использована база данных VALD (Купка и др., 1999). Звезда спектрально переменна, поэтому в каждой фазе поле измерялось по различному набору линий.

Результаты измерений продольной компоненты магнитного поля с учетом факторов Ланде отдельных линий представлены в табл. 4, где приведены: юлианская дата наблюдений, фаза периода, химический элемент, по линиям которого измерялось магнитное поле, величина продольного поля B_e в области до и после бальмеровского скачка. В квадратных скобках указано количество измеренных линий.

Как мы и ожидали, поле по всем линиям практически одинаковое и в случае учета факторов от-

дельных линий, и без него. При этом по линиям железа и хрома продольное поле B_e увеличивается в глубину, а по линиям титана мы не можем сделать вывод об изменениях поля с высотой, что также согласуется с нашими прежними данными.

Любопытно отметить малое рассеяние результатов измерений, проведенных по линиям гадолиния в области спектра до бальмеровского скачка. Возможно, это следствие резкой концентрации элемента в пятне, расположенном вокруг отрицательного полюса магнитного диполя: все линии образуются в одном локальном участке поверхности и показывают одинаковое поле.

6. Обсуждение результатов

Магнитные поля CP-звезд были открыты Бэбком еще в 1947 г., поэтому многие их свойства и особенности исследованы довольно хорошо. Изучению вертикальной структуры на протяжении трех последних десятилетий были посвящены единичные работы, в основном наши, основанные на измерениях зеемановских спектров, полученных на 6-м телескопе. Причины этого достаточно очевидны: необходимо исследовать очень тонкий эф-

фект путем специально поставленных длительных наблюдений на больших телескопах, наблюдательное время на которых трудно получить.

И только совсем недавно Нэсвасил и др. (2004) измерили поверхностное магнитное поле B_s у нескольких холодных CP-звезд с узкими и резкими линиями, для которых можно было непосредственно измерить зеемановское расщепление линий в области до и после бальмеровского скачка. Наблюдения были проведены без анализатора поляризации на 3.6-м телескопе ESO в Чили. Авторы получили данные об изменении поля с высотой у двух южных звезд. Таким образом, получены новые независимые результаты, свидетельствующие о возможности существования измеримого вертикального градиента поля.

Подчеркнем, что наш наблюдательный материал — зеемановские спектры в области бальмеровского скачка — является уникальным и не имеющим аналогов в мире до настоящего времени. Он был получен благодаря внедрению на БТА эшелле-спектрометра НЭС с кварцевой оптикой, крупноформатной матрицы “Uppsala”, чувствительной в голубой и ультрафиолетовой области спектра, и поляризационной оптики, разработанной и изготовленной в САО РАН. Мы подтвердили на значительно более высоком уровне точности найденное нами ранее по фотографическим спектрам уменьшение величины продольного магнитного поля α^2 CVn с высотой. Полученные нами на 6-м телескопе спектры позволяют исследовать и стратификацию химических элементов в разных фазах периода вращения α^2 CVn. Но это требует специальной обработки и анализа, которые в данной работе не выполнялись. Здесь мы ограничились лишь измерениями магнитного поля по линиям, образующимся на различной оптической глубине.

Особенно перспективным нам представляется изучение профилей поляризации линий редкоземельных элементов. Многочисленные предыдущие исследования α^2 CVn (например, Хохлова, 1983) показали, что редкие земли в ее атмосфере концентрируются в двух очень резких пятнах размером менее 10° , расположенных в области полюсов магнитного диполя. Таким образом, эффекты, связанные с горизонтальными неоднородностями поля и химического состава, будут влиять значительно меньше на изучение вертикальной структуры поля в случае, если оно будет проводиться по линиям редкоземельных элементов, образующихся на разной оптической глубине.

Выше мы уже отмечали, что в работе Кочухова и др. (2002) было найдено преобладание дипольной компоненты в структуре поля α^2 CVn. Это свидетельствует о том, что топология магнитного

поля этой звезды не до конца ясна. Интерпретация полученных нами результатов затруднительна, требуется тщательное моделирование. Отметим, что уменьшение B_e с высотой может означать как реальное уменьшение поля с высотой в атмосфере звезды, так и изменение его ориентации. Это важно, так как Леруа (1995) на основании наблюдений широкополосной линейной поляризации нашел у многих звезд области с незамкнутыми силовыми линиями при общем дипольном строении магнитного поля.

По нашему мнению, только Доплер-Зеемановское картирование по линиям, полученным на разных уровнях по высоте в атмосфере, может решить вопрос и о структуре поля, и о стратификации химических элементов. Полученный нами материал позволяет выполнить такую работу.

Благодарности. В работе были использованы базы данных VALD и SIMBAD.

И. И. Романюк, В. Е. Панчук и Д. О. Кудрявцев благодарят Российский Фонд Фундаментальных Исследований за частичную финансовую поддержку настоящей работы (РФФИ, гранты 03-02-16342, 04-02-17564 и 06-02-16110а). Н. Е. Пискунов благодарит шведский Фонд Научных Исследований (Vetenskapsradet) за поддержку наблюдений в САО. Авторы благодарят М. В. Юшкина за помощь в подготовке к наблюдениям и участие в наблюдениях.

Список литературы

- Баньюло и др. (Bagnulo S., Wade G. A., Donati J.-F., et al.), 2001, *Astron. Astrophys.*, **369**, 889
 Бэбкок (Babcock H. W.), 1947, *Astrophys. J.*, **105**, 105
 Борра, Ландстрит (Borra E. F., Landstreet J. D.), 1977, *Astrophys. J.*, **212**, 141
 Вольф (Wolff S. C.), 1978, *PASP*, **90**, 412
 Вэйд и др. (Wade G. A., Ryabchikova T. A., Bagnulo S., Piskunov N.), 2001, *Magnetic fields across the Hertzsprung-Russel diagram*, (Eds.: G. Mathys, S. K. Solanki, D. T. Wickramasinghe), *ASP Conf. Series*, **248**, 373
 Донати и Колье Камерон (Donati J.-F., Collier Cameron A.), 1997, *MNRAS*, **291**, 1
 Кочухов, Пискунов (Kochukhov O., Piskunov N.), 2002, *Astron. Astrophys.*, **388**, 868
 Кочухов и др. (Kochukhov O., Piskunov N., Ilyin I., et al.), 2002, *Astron. Astrophys.*, **389**, 420
 Кочухов и др. (Kochukhov O., Bagnulo S., Wade G. A., et al.), 2004, *Astron. Astrophys.*, **414**, 613
 Кудрявцев (Kudryavtsev D. O.), 2000, *Baltic Astronomy*, **9**, 649
 Кумайгородская Р. Н., Копылов И. М., 1972, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, **4**, 50

- Купка и др. (Kupka F., Piskunov N., Ryabchikova T. A., Stempels H. C., Weiss W., 1999, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **138**, 119
- Ландстрит (Landstreet J. D.), 1988, *Astrophys. J.*, **326**, 967
- Ландстрит (Landstreet J. D.), 2001, *Magnetic fields across the Hertzsprung–Russel diagram*, (Eds.: G. Mathys, S. K. Solanki, D. T. Wickramasinghe), *ASP Conf. Series*, **248**, 277
- Леруа (Leroy J.-L.), 1995, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **114**, 79
- Мишо (Michaud G.), 1970, *Astrophys. J.*, **160**, 641
- Найденев И. Д., Чунтонов Г. А., 1976, *Сообщ. САО*, **16**, 63
- Нэвасил и др. (Nesvacil N., Hubrig S., Jehin E.), 2004, *Astron. Astrophys.*, **422**, L51
- Пайпер (Pyper D.), 1969, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **18**, 1
- Панчук и др. (Панчук В. Е. Клочкова В. Г., Найденев И. Д.), 1999, *Препринт САО N^o135*
- Панчук и др. (Panchuk V. E., Romanyuk I. I., Kudryavtsev D. O.), 2000, *Magnetic Fields of CP and related stars*, (Eds.: Yu. V. Glagolevskij, I. I. Romanyuk, Moscow), 75
- Панчук В. Е., Пискунов Н. Е., Клочкова В. Г. и др., 2002, *Препринт САО N^o169*
- Пискунов (Piskunov N. E.), 2001, *Magnetic fields across the Hertzsprung–Russel diagram* (Eds.: G. Mathys, S. K. Solanki, D. T. Wickramasinghe), *ASP Conf. Series*, **248**, 293
- Престон (Preston G. W.), 1965, *Contr. Lick Obs.*, *N^o205*, 25
- Престон (Preston G. W.), 1969, *Astrophys. J.*, **157**, 247
- Романюк И. И., 1980, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, **12**, 3
- Романюк И. И., 1984а, *Письма в АЖ*, **10**, 443
- Романюк И. И., 1984б, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, **18**, 37
- Романюк И. И., 1986, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, **22**, 25
- Романюк И. И., 1991, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, **33**, 53
- Романюк, Топильская (Romanyuk I. I., Topil'skaja G. P.), 1997, *Stellar magnetic fields*, (Eds.: Yu. V. Glagolevskij, I. I. Romanyuk, Moscow), 170
- Рябчикова и др. (Ryabchikova T., Piskunov N., Kochukhov O., Tsymbal V., Mittermayer P., Weiss W.), 2002, *Astron. Astrophys.*, **384**, 545
- Фарнсворт (Farnsworth G.), 1932, *Astrophys. J.*, **76**, 313
- Хохлова В. Л., 1983, *Итоги науки и техники. Астрономия*, (Москва, ВИНТИ), **24**, 233