

УДК 524.335.8-337

О СТРУКТУРЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНОЙ ЗВЕЗДЫ α^2 CVn

© 2023 И. И. Романюк^{1*}, А. В. Моисеева¹, Д. О. Кудрявцев¹,
И. А. Якунин¹, В. Н. Аитов¹, Д. Н. Бакланова²

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, 298409 Россия

Поступила в редакцию 12 декабря 2022 года; после доработки 27 декабря 2022 года;
принята к публикации 28 декабря 2022 года

Выполнен новый поиск радиального (вертикального) градиента продольного магнитного поля химически пекулярной звезды α^2 CVn. Рассмотрена история магнитных исследований этого объекта, демонстрирующая большие различия в данных, полученных разными методами. Подобные различия могут быть объяснены тем, что магнитное поле резко (на 2 порядка сильнее, чем в случае дипольной структуры) падает с высотой в атмосфере. Данные спектроскопии, спектрополяриметрии и фотометрии указывают на то, что крупномасштабная и мелкомасштабная структуры атмосферы α^2 CVn не претерпели никаких изменений за более чем 90 лет наблюдений.

Ключевые слова: *звезды: химически пекулярные — звезды: магнитное поле — звезды: отдельные: α^2 CVn*

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучаемая нами α^2 CVn (HD 112413 \equiv ADS 8706 A \equiv HR 4915 \equiv HIP 63125 \equiv Renson 32650) — яркая звезда с переменным магнитным полем. Ее исследования ведутся уже более ста лет с помощью различных методов астрономических наблюдений. В 1899 г. при выполнении спектральной классификации для каталога Генри Дрейпера (HD) Антония Маури обнаружила, что звезда Сердце Карла (Cor Caroli \equiv α CVn) спектрального класса A имеет аномальные для данного класса спектральные линии некоторых химических элементов (Romanuk 2007). Звезда оказалась двойной: ее компонент α^1 CVn (HD 112412) находится на расстоянии 15'' и является немагнитной Am-звездой (Shorlin et al. 2002).

Когда были обнаружены и другие A-звезды с аномальными спектрами, их стали называть пекулярными A-звездами или звездами типа α^2 CVn.

Farnsworth (1932) выполнила фотометрические измерения, которые показали наличие переменности блеска α^2 CVn, и определила эфемериду: $JD = 2419869^d.720 + 5^d.46939E$. Данное значение периода до сих пор является актуальным.

*E-mail: roman@sao.ru

2. ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ЭПОХА ИССЛЕДОВАНИЙ СР-ЗВЕЗД

Babcock (1947) впервые обнаружил проявления эффекта Зеемана в спектрах Ap-звезд. Первые измерения магнитного поля звезды α^2 CVn приведены в знаменитом каталоге Babcock (1958). Согласно этим данным продольный компонент магнитного поля B_e меняется в диапазоне от -1400 Гс до $+1600$ Гс. Несмотря на несовершенство использованной в то время методики измерений, фазовая кривая переменности продольного компонента звезды прописывается надежно и хорошо согласуется с периодом вращения звезды из работы Farnsworth (1932). Она негармонична: максимум кривой B_e значительно уже минимума и занимает около 30% всего периода.

Еще в 1913 г. астроном из Пулковской обсерватории А. А. Белопольский обнаружил у α^2 CVn сильную переменность спектральных линий: интенсивность некоторых из них достигала 50% от континуума, после чего падала практически до нуля. Дальнейшие наблюдения показали, что эти переменные линии принадлежат хрому, стронцию, европию и другим редкоземельным элементам (Belopolsky 1913).

Более детальные исследования Babcock (1958) показали, что в спектрах звезды имеются определенные закономерности. Например, Cr и Eu меняются в противофазе. Максимум линий хрома

совпадает с положительным экстремумом поля ($B_e = 1600$ Гс), а европия — с отрицательным экстремумом ($B_e = -1400$ Гс). Наблюдается общая тенденция: слабые резкие линии становятся более многочисленными и резкими, когда европий усиливается в фазе отрицательного продольного поля.

Практически сразу же после обнаружения периодической переменности крупномасштабного магнитного поля Ар-звезд была предложена модель наклонного ротатора (Stibbs 1950), которая используется до настоящего времени. Одну из первых моделей магнитного поля звезды α^2 CVn построила Рупер (1969). В модели магнитное поле представлено в виде комбинации диполя и квадруполь, ось которого наклонена на угол $\beta = 50^\circ$ к оси вращения звезды.

По изменению интенсивности спектральных линий и лучевой скорости химические элементы можно разделить на три основные группы: редкоземельные элементы; элементы железного пика Fe, Ti, V, Cr, Mn; более легкие элементы Mg, Si и Ca. Наблюдаемые изменения продольного магнитного поля, эквивалентных ширин линий и лучевой скорости для первых двух групп успешно описываются построенной моделью наклонного ротатора. Данные для третьей группы также описываются моделью в предположении, что их распределение на поверхности звезды соответствует таковому для элементов второй группы. Однако полученная модель не объясняет переменность блеска и показателя цвета ($B - V$). Это несоответствие вызвало дискуссии о применимости такой модели, но Kodaira and Unno (1969) получили новые доказательства справедливости модели наклонного ротатора для этой звезды.

2.1. Химические пятна на поверхности CP-звезд

Значительный вклад в исследование распределения химических элементов на поверхности звезды α^2 CVn внесли работы В. Л. Хохловой и ее учеников. Первая работа (Khokhlova 1971) была посвящена рассмотрению факторов, способных вызвать наблюдаемую переменность спектров, кривых блеска и показателей цвета.

Khokhlova and Pavlova (1984) провели картирование поверхности звезды α^2 CVn и для решения проблемы инверсии (Рупер 1969) рассмотрели распределение элементов железного пика (Fe, Cr, Ti) по отдельности, а не в совокупности. Авторы выяснили, что эти элементы распределены в виде пятен, более сложных по структуре, чем было показано в работе Рупер (1969).

Для поиска решения той же проблемы Goncharskii et al. (1983) исследовали распределение европия и выяснили, что Eu сконцентрирован

в двух пятнах на поверхности, которые располагаются на магнитных полюсах звезды. Эти выводы отличаются от тех, что были получены в работе Рупер (1969), и объясняют сложное поведение элемента в спектрах.

Дальнейшее исследование проблемы инверсии для магнитного поля звезды провели Glagolevskii et al. (1985). Авторы выполнили наблюдения на 6-м телескопе БТА САО РАН и по полученным циркулярно-поляризованным спектральным линиям Fe II и Ti II нашли, что их распределение по поверхности звезды неоднородно. Это, в свою очередь, оказывает существенное влияние на модель, применяемую для описания магнитного поля звезды.

Это были наиболее важные работы, с максимальной точностью измерений, которую можно было получить по фотографическим спектрам. Однако уже по ним можно сделать вывод, что распределение ряда химических элементов по поверхности звезды неоднородно и имеет пятна сложной структуры.

2.2. Фотоэлектрическая магнитометрия

В начале 1970-х стартовала эпоха наблюдений магнитного поля при помощи фотоэлектрических магнитометров. Эти высокоточные, но одноканальные приборы позволяли измерять магнитное поле объектов, хотя и не давали возможности проводить картирование поверхности. В мире работало всего несколько таких приборов: конструкции Angel and Landstreet (1970), а в САО РАН — конструкции Shtol (1984).

Borra and Landstreet (1977) наблюдали α^2 CVn при помощи водородного магнитометра и получили фазовую магнитную кривую, которая не показывает такой большой разброс, как по фотографическим данным (Babcock 1947), но также хорошо описывается моделью наклонного ротатора с полем в виде нецентрального диполя (рис. 1). Было проведено детальное сравнение данных, полученных по линиям металлов (Babcock 1958) и по линии водорода. Оказалось, что водородная фазовая кривая B_e значительно ближе к синусоиде, а амплитуда переменности меньше: от -1400 Гс до $+1200$ Гс. По заключению Borra and Landstreet (1977), магнитное поле, определенное по спектральным линиям металлов, наиболее чувствительно к неравномерному распределению химических элементов по поверхности звезды. Однако более точно общую конфигурацию магнитного поля отражают его измерения по спектральным линиям водорода, который равномерно распределен по поверхности звезды.

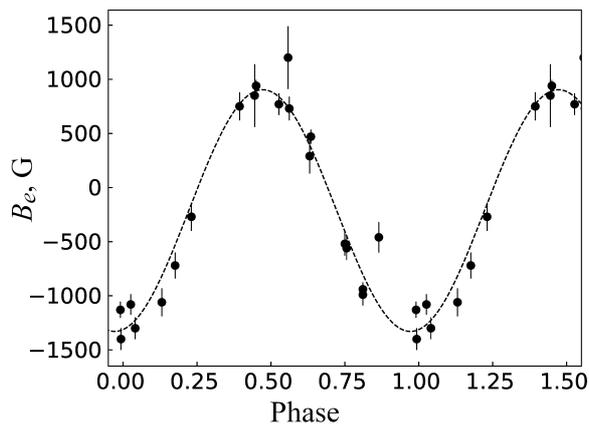


Рис. 1. Фазовая кривая измерений продольного магнитного поля B_e звезды α^2 CVn, определенное по спектральной линии H β (Vogt and Landstreet 1977). Штриховой линией обозначена аппроксимация измерений простой синусоидой. При построении графика использовалась эфемериды из работы Farnsworth (1932).

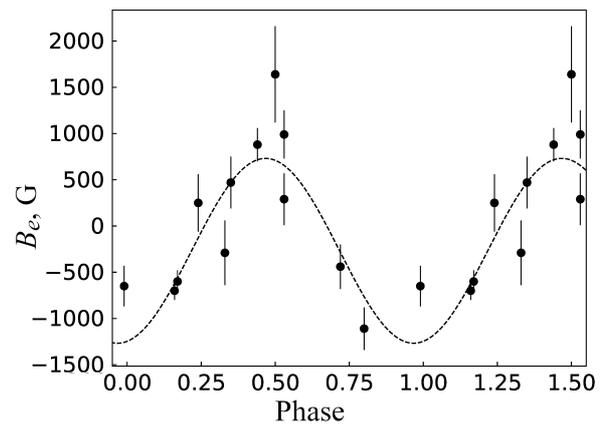


Рис. 2. Фазовая кривая измерений продольного магнитного поля B_e звезды α^2 CVn (Wolff 1978). Штриховой линией обозначена аппроксимация измерений простой синусоидой. При построении графика использовалась эфемериды из работы Farnsworth (1932).

2.3. Радиальный градиент магнитного поля

Проблема изучения вертикальной (радиальной) структуры магнитного поля у CP-звезд впервые была рассмотрена Preston (1965). Чтобы обнаружить этот эффект, он предложил измерять магнитное поле по линиям, которые образуются на разной оптической глубине в атмосфере CP-звезды. Он сформулировал два основных подхода:

- 1) измерять спектральные линии разной интенсивности;
- 2) использовать спектральные линии, которые расположены до и после бальмеровского скачка.

В первом варианте более слабые спектральные линии образуются на большей оптической глубине. Примером может быть звезда 53 Cam, для которой выявлена линейная зависимость с высоким коэффициентом корреляции между величиной поля и интенсивностью линий (Preston 1969, Romanuk 1980). Второй метод кажется более надежным: спектральные линии с длиной волны короче 3646 Å формируются в верхних слоях атмосферы с оптической глубиной порядка нескольких сотых, а линии в более длинноволновой области — на оптической глубине порядка единицы (Preston 1965).

Первая попытка обнаружить радиальный градиент магнитного поля в области коротковолновой стороны от бальмеровского скачка была сделана Wolff (1978). В качестве детектора использовалась фотолампа. Наблюдения проводились в области спектра 3300–3700 Å. В этом диапазоне спектральные линии образуются в более высоких слоях атмосферы, чем в области $\lambda > 3700$ Å. Результаты этих измерений представлены на рис. 2.

Таблица 1. Оценки продольного магнитного поля B_e по спектральным линиям разных элементов (N_{line} — количество использованных линий), согласно Romanuk (1980)

Элемент	B_e , Гс	N_{line}	Элемент	B_e , Гс	N_{line}
Gd I	−700	30	Mn I	−1380	30
Gd II	−1130	160	Mn II	−1780	20
Cr I	−760	50	Fe I	−900	70
Cr II	−1040	310	Fe II	−1260	410

Позже попытки обнаружить вертикальные неоднородности начались в наблюдениях на 6-м телескопе БТА СО РАН. Romanuk (1980) обсуждает реальность различий величины магнитного поля, измеренного по нейтральным атомам и ионам одного и того же элемента. Для звезд 53 Cam и α^2 CVn эти различия могут быть объяснены существованием радиального градиента магнитного поля. Результаты этих измерений для звезды α^2 CVn представлены в таблице 1. При их рассмотрении напрашивается вывод о том, что для ионов элементов магнитное поле на 25% больше, чем измеренное по нейтральным атомам. Как показала оценка достоверности этого различия, его надежность $p > 99.5\%$. Измерения проводились при благоприятных условиях около фазы $\phi = 0.0$, когда спектральные линии элементов железного пика и редкоземельных металлов имели максимальную интенсивность.

Новые наблюдательные возможности, появившиеся на 6-м телескопе БТА, позволили

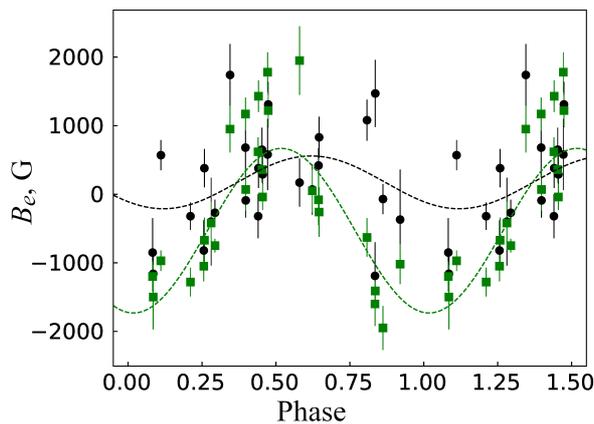


Рис. 3. Фазовая кривая измерений продольного магнитного поля B_e звезды α^2 CVn (Romanjuk 1986). Зелеными квадратами обозначены измерения магнитного поля по спектральным линиям после бальмеровского скачка, черными кружками — до бальмеровского скачка. Штриховыми линиями обозначена аппроксимация данных простой синусоидой. При построении графика использовалась эфемерида из работы Farnsworth (1932).

Romanjuk (1986) повторить наблюдения α^2 CVn с новым ахроматическим анализатором круговой поляризации. Полученные результаты продемонстрированы на рис. 3. Основное отличие от анализатора, с которым работала Wolff (1978), заключалось в том, что тот мог работать только в узком спектральном диапазоне: в ближней ультрафиолетовой области. Анализатор, сконструированный Najdenov and Chuntanov (1976), позволял получать спектры одновременно в широкой области спектра 3400–4200 Å, что повысило точность наблюдений благодаря единовременному учету систематических ошибок для областей до и после бальмеровского скачка.

Анализируя график на рис. 3, можно заметить большой разброс полученных измерений магнитного поля. В UV-области наблюдается значительно меньшая амплитуда изменения продольного магнитного поля по сравнению с видимой. Средняя величина магнитного поля в области отрицательного экстремума:

$$\langle B_e \rangle = -1190 \pm 129 \text{ Гс в области } \lambda > 3700 \text{ Å;}$$

$$\langle B_e \rangle = -65 \pm 359 \text{ Гс в области } \lambda < 3700 \text{ Å.}$$

Одновременное наблюдение всего диапазона длин волн исключает наличие систематических ошибок. Несмотря на большие различия точности определения магнитного поля в ультрафиолетовой и видимой области, наблюдается явное уменьшение величины магнитного поля в UV-области. Тем не менее, точность измерений по фотографическим данным оказалась недостаточной для выявления радиального градиента поля.

Следующий этап исследований тонкой структуры магнитного поля звезд начался с использованием цифровых детекторов.

3. ЦИФРОВАЯ ЭПОХА ИССЛЕДОВАНИЙ CP-ЗВЕЗД

Появление новых методов наблюдений, в первую очередь благодаря внедрению ПЗС-матриц, позволило получать спектры с более высоким разрешением и отношением сигнал/шум (S/N). Были разработаны методы магнитно-доплеровского картирования, с помощью которых можно обнаруживать и анализировать тонкую структуру поверхности запятненных звезд.

3.1. Картирование поверхности магнитных CP-звезд

Большой вклад в развитие методов картирования поверхности магнитных CP-звезд внесли работы Н. Е. Пискунова и О. П. Кочухова. По указанной тематике в течение последних двух десятилетий они являются лидирующими в мире.

Kochukhov et al. (2002) использовали новую программу INVERS10 (Piskunov and Kochukhov 2002), позволяющую методом инверсии моделировать вектор магнитного поля и распределение химических элементов по поверхности звезд одновременно. Спектрополяриметрические наблюдения высокого разрешения ($R = 80\,000$) для I- и V-параметров Стокса были получены на эшелле-спектрометре SOFIN и небольшое количество неполяризованных спектров ($R = 30\,000$) — на спектрографе MuSiCoS.

В результате авторы нашли, что магнитное поле α^2 CVn имеет доминирующую дипольную компоненту, но с небольшим вкладом квадрупольного компонента. Распределение химических элементов симметрично магнитному полю. Это открытие является первым прямым наблюдаемым подтверждением горизонтального процесса диффузии во внешней оболочке в сильно замагниченной звездной атмосфере.

Авторы уточнили фундаментальные параметры звезды по распределению энергии и по профилям спектральных линий водорода $H\gamma$, $H\beta$, $H\alpha$ с учетом параллакса спутника Hipparcos.

Через десять лет Kochukhov and Wade (2010) провели новые наблюдения звезды во всех четырех параметрах Стокса на спектрополяриметре MuSiCoS. Авторы выполнили магнитно-доплеровское картирование (Magnetic Doppler Imaging) поверхности α^2 CVn в линиях Fe II и Cr II. Впервые обнаружено проявление сложного поля. Распределение двух химических элементов и

полный вектор магнитного поля реконструированы с помощью программы INVERS10.

Оказалось, что магнитное поле звезды в целом дипольное, но имеются локализованные пятна с более высокой напряженностью поля. Эти мелко-масштабные структуры проявляют себя в спектрах линейной поляризации. Однако, если использовать только наблюдения V - и I -параметров Стокса, то их вклад незначителен. Авторы также нашли высококонтрастные пятна Fe и Cr, где минимумы содержания этих элементов совпадают с отрицательным экстремумом более слабого и топологически простого магнитного поля. Авторы считают, что проблему сложного поля CP-звезд не решить без исследования спектров линейной поляризации.

Silvester et al. (2014a) представили новые результаты магнитно-доплеровского картирования поверхности звезды α^2 CVn. Новые наблюдения $IQUV$ -параметров Стокса для α^2 CVn были проведены на спектрополяриметрах высокого разрешения ESPaDOnS и NARVAL. Авторы сравнили новые магнитные карты с полученными на MuSiCoS (Kochukhov and Wade 2010) и не обнаружили отклонений. Для построения своих карт Silvester et al. (2014a) также использовали сильные интенсивные линии Fe и Cr, но дополнительно смогли воспроизвести и более слабые линии этих элементов. В результате было получено, что топологическое дипольное магнитное поле звезды имеет сложную подструктуру, которую нельзя описать простой мультиполярной геометрией низкого порядка. Впервые показана стабильность как крупномасштабной, так и мелкомасштабной структуры поля на временах десятилетий.

В этом же году Silvester et al. (2014b) провели исследование распределения на поверхности звезды α^2 CVn девяти химических элементов: O, Si, Cl, Ti, Cr, Fe, Pr, Nd и Eu. Для этой работы использовались те же наблюдательные данные $IQUV$ -параметров Стокса высокого разрешения ($R = 65\,000$). Благодаря результатам предыдущей работы (Silvester et al. 2014a), авторы смогли исследовать взаимосвязь между структурами распределения химических элементов и топологией магнитного поля на поверхности звезды.

Silvester et al. (2014b) показали, что все элементы делятся на две основные группы. Элементы первой группы (O, Cl, Pr, Eu) накапливаются вблизи отрицательной части радиального поля, в то время как элементы второй группы (Si, Ti, Cr, Fe, Nd) демонстрируют более высокую концентрацию там, где радиальное магнитное поле составляет порядка 2 кГс независимо от его полярности. Авторы провели сравнение новых полученных данных с предыдущими результатами картирования и, за исключением распределения Cr и Fe, не выявили

существенных отклонений. Однако отсутствие согласия с теоретическими предсказаниями говорит о том, что существует пробел в понимании формирования горизонтальных структур распределения химических элементов и их связи с магнитным полем в CP-звездах.

3.2. Измерения магнитного поля методом LSD

Введение ПЗС-матриц дало новые возможности для проведения магнитных измерений. Произошло усовершенствование и создание новой приборной базы и методов.

Wade et al. (2000a) использовали новый подход к измерению продольного магнитного поля и линейной поляризации линий в спектрах магнитных CP-звезд: адаптировали метод LSD (Least Squares Deconvolution) (Donati et al. 1997). Этот кросс-корреляционный метод был специально разработан для выявления и измерения слабых поляризационных деталей, которые невозможно выделить в единичных спектральных линиях звезд. Он накапливает сигнал поляризации одновременно от многих линий и восстанавливает LSD-профиль, чтобы увеличить эффективное отношение S/N , что в свою очередь обеспечивает высокую точность измерений. Метод пригоден как для узких, так и для широких спектральных линий. Кроме того, имеется возможность выявлять не только круговую, но и линейную поляризацию.

Wade et al. (2000b) выполнили измерения магнитного поля для 14 Ap/Bp-звезд методом LSD, в том числе и для α^2 CVn (рис. 4). Спектральный материал $IQUV$ -параметров Стокса с разрешением $R = 35\,000$ был получен на спектрополяриметре MuSiCoS в течение 5.5 дней для равномерного перекрытия всего периода вращения звезды. Для построения LSD-профиля рассчитывалась маска линий, которая для спектрального класса A0p включала 276 спектральных линий: 54% линий принадлежат Fe; 29% — Cr; 8% — Ti и 9% — другим химическим элементам. На рис. 4 продемонстрировано отличное согласие измерений магнитного поля методом LSD, которые были получены в разное время и на разных приборах.

Авторы провели сравнение полученных фазовых кривых с результатами предыдущих работ. Они получили довольно хорошее соответствие с данными Landstreet (1982), где измерения магнитного поля проводились по линиям металлов. Было отмечено, что магнитное поле в экстремумах по LSD-измерениям имеет меньшие величины: $B_e(\min) = -900$ Гс и $B_e(\max) = 750$ Гс. Выявлено явное несоответствие с измерениями по линии водорода (Vogra and Landstreet 1977), особенно в

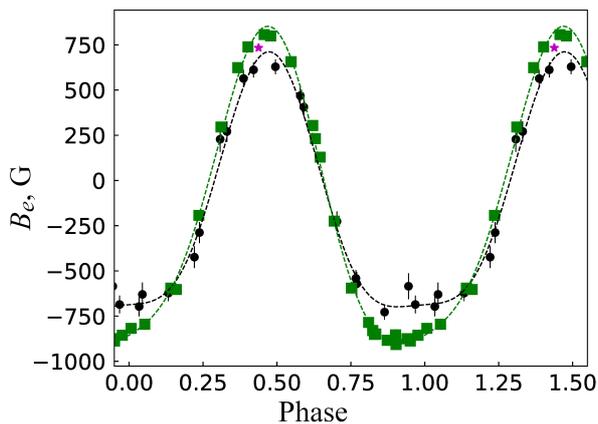


Рис. 4. Фазовая кривая измерений продольного магнитного поля B_e по методу LSD для звезды α^2 CVn. Черные кружки — данные Wade et al. (2000b); зеленые квадраты — данные Silvester et al. (2012); звезды — значение Sikora et al. (2019). Штриховыми линиями обозначены кривые аппроксимации измерений двойной синусоидой. При построении графика использовалась эфемерида из работы Farnsworth (1932).

области отрицательного экстремума. Средняя точность измерений магнитного поля по всем линиям составляет 55 Гс. В целом, полученные результаты авторов подтверждают выводы прежних фотографических наблюдений.

В работе Wade et al. (2000b) приведены фазовые кривые продольного магнитного поля, которое было отдельно измерено по спектральным линиям элементов Fe и Cr. Их сравнение показало различия в амплитуде (для Fe амплитуда изменения магнитного поля почти в два раза больше, чем для Cr), форме (экстремумы фазовой кривой Cr шире), и есть сдвиг по фазе.

Десятилетие спустя Silvester et al. (2012) провели исследование магнитного поля методом LSD для семи ярких mCP-звезд по спектральным данным высокого разрешения ($R = 65\,000$), полученных на спектрополяриметрах ESPaDOnS и NARVAL. Для звезды α^2 CVn было сделано 27 измерений магнитного поля, равномерно распределенных по фазе (рис. 4). Авторы провели сравнение новых измерений с результатами работы Wade et al. (2000b). Чтобы получить хорошее соответствие между двумя наборами данных, потребовался повторный анализ измерений Wade et al. (2000b) с использованием обновленной маски линий, которая применялась для спектров ESPaDOnS/NARVAL. В итоге авторы получили полное согласие с более ранними результатами и среднюю точность измерения магнитного поля почти в два раза выше 27 Гс.

При сравнении измерений LSD-анализа магнитного поля с результатами других авторов можно сделать следующие выводы:

- 1) амплитуда изменения фазовой кривой магнитного поля по методу LSD меньше примерно на 40% по сравнению с другими методами;
- 2) есть хорошее соответствие формы и положения экстремумов с результатами измерения магнитного поля по линиям металлов, но в максимуме метод LSD дает меньшую величину поля;
- 3) наблюдается сильное отличие топологии магнитного поля, полученного по измерениям методом LSD и по линиям металлов, от измерений по линии водорода.

Leroy (1995) впервые попытался исследовать широкополосную линейную поляризацию α^2 CVn, но из-за низкого качества материала не смог ее обнаружить.

Wade et al. (2000a) по LSD-профилям спектрополяриметрического материала MuSiCoS для Q - и U -параметров Стокса удалось зафиксировать очень сложные и переменные признаки линейной поляризации с достоверностью обнаружения в 13σ . Silvester et al. (2012) по спектрам ESPaDOnS/NARVAL также подтвердили наличие сильных и сложных деталей с сильной переменностью Q - и U -параметров Стокса. При сравнении с предыдущими результатами авторы получили хорошее согласие. Однако выполнить измерения на этих спектрополяриметрах в области до и после бальмеровского скачка не представлялось возможным по техническим причинам. Все используемые в наблюдениях цифровые детекторы имеют резкое падение чувствительности в области короче длин волн 3700 \AA .

3.3. Результаты наших наблюдений радиального градиента поля

Мы предприняли попытку по наблюдениям на 6-м телескопе БТА CAO РАН измерить величину магнитного поля по разные стороны бальмеровского скачка. Из-за резкого падения чувствительности ПЗС-матрицы в UV-области отношение S/N для спектров значительно ниже, чем в видимой. Поэтому точность измерений поля в UV-области хуже.

3.3.1. Наблюдения на эшелле-спектрометре НЭС

Изучение радиального градиента α^2 CVn на 6-м телескопе БТА продолжилось на спектрополяриметре высокого разрешения НЭС. Для его поиска Romanyuk et al. (2007) провели наблюдения с высоким спектральным разрешением ($R = 50\,000$) в области спектра $3400\text{--}4100 \text{ \AA}$ с ахроматическим анализатором круговой поляризации (Najdenov and Chuntunov 1976).

Таблица 2. Радиальный градиент магнитного поля B_e α^2 CVn в области до и после бальмеровского скачка по измерениям из работы Romanyuk et al. (2007): JD — юлианская дата наблюдений; фаза рассчитана согласно эфемеридам из работы Farnsworth (1932); [n] — количество измеренных линий

JD, 2450000+	Фаза	$B_e \pm \sigma$, Гс ($\lambda < 3646 \text{ \AA}$)	[n]	$B_e \pm \sigma$, Гс ($\lambda > 3646 \text{ \AA}$)	[n]
1385.258	0.17	-880 ± 310	25	-1130 ± 110	59
1591.415	0.86	-800 ± 350	111	-1000 ± 140	68
1592.404	0.04	-975 ± 267	74	-1134 ± 113	78
1593.386	0.22	-406 ± 482	76	-1394 ± 150	74
2594.583	0.28	-1024 ± 335	71	-1425 ± 100	327
2595.00	0.46	1663 ± 262	47	1970 ± 114	290
2596.588	0.64	-503 ± 310	37	-1140 ± 103	283

Для анализа использовалось большое количество линий химических элементов: 42% принадлежат Fe; 32% — Cr; 13% — редким землям; 14% — другим элементам. Результаты анализа представлены в таблице 2.

При сравнении двух наборов измерений радиального градиента звезды α^2 CVn (рис. 3, таблица 2) можно сделать некоторые общие выводы:

- 1) измерения Romanyuk et al. (2007) также демонстрируют большой разброс значений, но хорошо согласуются с предыдущими данными Romanyuk (1986);
- 2) среднеквадратичное магнитное поле до бальмеровского скачка и после него: $B_{\text{rms}} = 970 \pm 340$ Гс ($\chi^2/n = 11.4$) и $B_{\text{rms}} = 1350 \pm 120$ Гс ($\chi^2/n = 138.3$) соответственно;
- 3) точность новых данных выше, но фотографическим способом было получено больше оценок величины поля, равномерно распределенных по фазе вращения;
- 4) во всех фазах периода вращения модуль продольного компонента магнитного поля меньше в высоких слоях атмосферы, что согласуется с предыдущими результатами;
- 5) средние значения продольного магнитного поля в области отрицательного экстремума с учетом ошибок совпадают с предыдущими измерениями.

К сожалению, после 2010 г. наблюдения магнитного поля на НЭС по техническим причинам стали невозможны.

3.3.2. Наблюдения на ОЗСП

Дальнейшее наблюдение и исследование вертикального градиента магнитного поля α^2 CVn проводились при помощи спектрографа ОЗСП.

Kudryavtsev and Romanyuk (2011) рассмотрели вертикальную структуру атмосферы и конфигурацию магнитного поля, а также привели результаты измерений магнитного поля для 23 CP-звезд по линиям металлов и по ядру линии водорода H β . По сравнению с измерениями, выполненными на бальмеровском магнитометре по той же линии H β , имеется существенное отличие: ядро линии образуется в более высоких слоях атмосферы, чем ее крылья. Сравнивая результаты, полученные в разных частях профиля, можно судить о вертикальной структуре химического состава и магнитного поля. Было найдено, что у 22 из 23 звезд величина магнитного поля, определенная по ядру линии, оказалась значимо меньше, чем по крыльям линии H β .

Новый этап исследования градиента магнитного поля у CP-звезд мы начали с анализа звезды 53 Cam (Romanyuk et al. 2022a). В указанной статье, ставшей первой работой серии, мы детально описали используемую нами конфигурацию прибора, этапы обработки и методику анализа данных. Для α^2 CVn, как и в случае 53 Cam, мы предприняли попытку измерить продольный компонент магнитного поля по спектральным линиям высоких членов бальмеровской серии водорода. Ядра этих водородных линий образуются в высоких слоях атмосферы на уровне бальмеровского континуума, т.е. на оптической глубине короче скачка. Так как измерения проводятся одновременно по десяти линиям, в среднем получается приемлемая точность определения магнитного поля. Результаты наших измерений вертикального градиента продольного

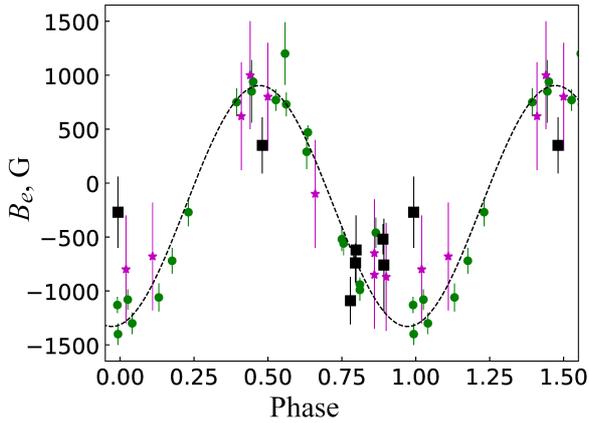


Рис. 5. Фазовая кривая измерений продольного магнитного поля B_e для звезды α^2 CVn по водородным линиям. Зеленые кружки — измерения Borra and Landstreet (1977), звезды — измерения по линии водорода $H\beta$ в видимой V -области спектра (ОЗСП) (Romanyuk et al. 2022b; 2016; 2017; 2018); черные квадраты — новые измерения по ядру спектральных линий высоких членов бальмеровской серии водорода. Штриховыми линиями обозначена аппроксимация измерений простой синусоидой. При построении графика использована эфемерида из работы Farnsworth (1932).

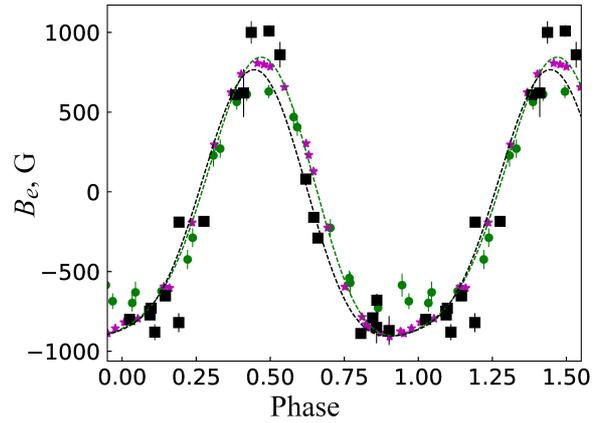


Рис. 6. Фазовая кривая измерений продольного магнитного поля B_e для звезды α^2 CVn по линиям металлов. Зеленые кружки — измерения Wade et al. (2000b), звезды — измерения Silvester et al. (2012); черные квадраты — измерения по линиям металлов в видимой V -области спектра (ОЗСП) (Romanyuk et al. 2020; 2022b; c; 2016; 2017; 2018). Штриховыми линиями обозначена аппроксимация измерений двойной синусоидой. При построении графика использовались эфемериды из работы Farnsworth (1932).

магнитного поля α^2 CVn по спектральным линиям водорода представлены в таблице 3.

В итоге мы демонстрируем те же результаты, что и предыдущие авторы. Нами получено хорошее соответствие с данными Borra and Landstreet (1977) по измерению продольного магнитного поля по линиям водорода как в видимой области, так и в ультрафиолетовой (рис. 5). К сожалению, нам не удалось получить наблюдательный материал, который бы равномерно покрыл весь период вращения звезды. Форма фазовой кривой аппроксимируется полиномом первого порядка, что говорит о простой дипольной конфигурации магнитного поля (рис. 6). Магнитное поле в максимуме оказывается примерно на 30% более сильным, что подтверждается и в работе Wade et al. (2000b). Форма фазовой кривой более сложная и аппроксимируется полиномом более высокого порядка. Наблюдаются более широкий минимум и узкий максимум, что также соответствует результатам других авторов. Такое расхождение в оценках магнитного поля может свидетельствовать либо о его сложной структуре, либо о недостатках теории звездных атмосфер в условиях сильного магнитного поля.

3.4. Фотометрические наблюдения

Provin (1953) нашел синхронную фотометрическую переменность на длинах волн 4400 Å и 5500 Å с минимумом блеска на фазе $\phi \approx 0.5$, т.е. на фазе максимума положительной полярности продольного компонента магнитного поля.

Таблица 3. Радиальный градиент магнитного поля B_e α^2 CVn по ядрам спектральных линий высоких членов бальмеровской серии водорода

JD, 2450000+	S/N	Фаза	$B_e \pm \sigma$, Гс
8918.324	600	0.481	350 ± 260
8947.302	700	0.779	-1090 ± 220
8948.472	900	0.993	-270 ± 330
9275.560	720	0.796	-740 ± 180
9275.568	720	0.798	-620 ± 320
9303.417	470	0.889	-520 ± 140
9303.423	300	0.892	-760 ± 430

Более детальные исследования UBV -фотометрии звезды α^2 CVn представил Рурег (1969). Он зафиксировал синхронную переменность в фильтрах U , B , V . Минимум кривой блеска оказался на фазе $\phi \approx 0.5$. Также была выявлена значительная переменность показателя цвета $B - V$ и ее отсутствие для $U - B$.

Мы провели фотометрические наблюдения звезды α^2 CVn на 38-см телескопе Крымской астрофизической обсерватории с использованием ПЗС-камеры Argoee Alta E47 в полосах U, B, V, R, I . Данные были получены в 2020–2022 гг. в течение 13 ночей (см. таблицу 4). Обработка фотометрических рядов проводилась стандартными процедурами в пакете программ

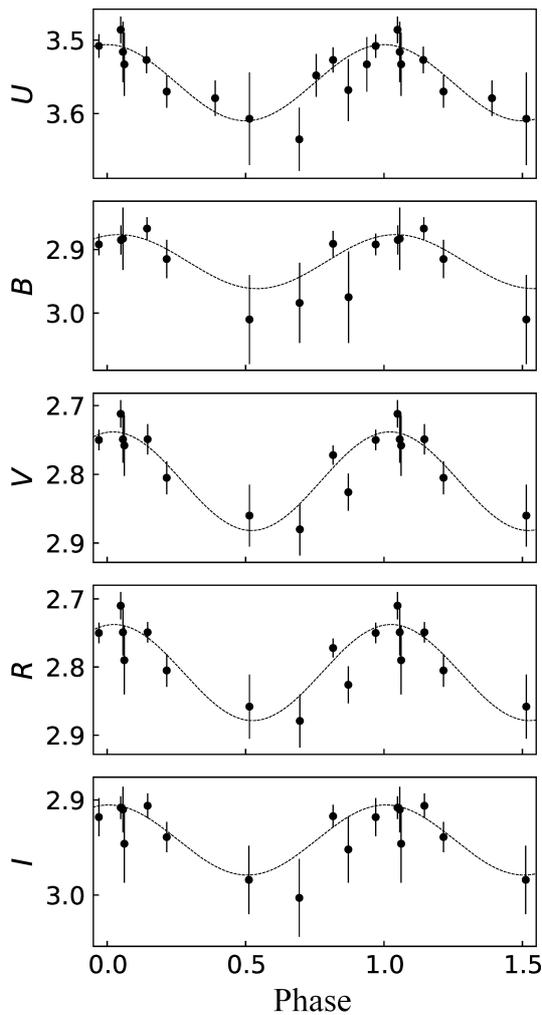


Рис. 7. Фазовая кривая блеска в фильтрах $UBVRI$ для звезды α^2 CVn. При построении графика использовалась эфемериды из работы Farnsworth (1932).

IRAF. В качестве стандарта использовалась звезда α^1 CVn. Значения ее звездной величины V и показателей цвета $U - B$, $B - V$, $V - R$, $R - I$ были взяты из работы Mallama (2018). Результаты фотометрии для звезды α^2 CVn приведены в таблице 4.

Фазовые кривые блеска для фильтров $UBVRI$ представлены на рис. 7. Мы также видим синхронную переменность во всех фильтрах с амплитудой $\Delta m \approx 0.05$, положительный и отрицательный экстремумы приходятся на $\phi_{\max} \approx 1.0$, $\phi_{\min} \approx 0.5$. Как и в работе Рупер (1969), наблюдается переменность в показателе цвета $B - V$.

Сравнивая эти данные с фазовой кривой переменности магнитного поля, можно сделать следующие выводы: максимум кривой блеска соответствует экстремальному значению отрицательного продольного магнитного поля, а минимум — экстремуму

му положительного поля; не обнаружено смещение фаз по сравнению с работой Рупер (1969).

Удивителен тот факт, что на протяжении около 90 лет период фотометрической переменности, который был определен Farnsworth (1932), до сих пор является актуальным. Однако в последние годы были получены новые высокоточные данные о периоде переменности магнитных звезд на основании наблюдений со спутников. По данным со спутника TESS найден период 5.43730 ± 0.430 суток (Kholtygin et al. 2020). В нашей работе мы его не использовали, так как в пределах ошибок эта оценка совпадает с общепринятым значением. Кроме того, по мнению авторов указанной работы, для уточнения периода вращения необходимо анализировать более длительные ряды наблюдений.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ всех имеющихся данных наблюдений указывает на то, что магнитное поле звезды α^2 CVn имеет сложную природу. В ранних работах, основанных на результатах фотографических наблюдений, можно было лишь в грубом приближении описать магнитное поле в виде диполя или комбинации диполя и квадрупольной модели представления магнитного поля в целом удовлетворительно описывала наблюдения.

Наши первые исследования градиента магнитного поля были получены на основании измерений фотографических спектров. Интенсивность спектра резко падает с уменьшением длины волны, видно увеличение ошибок в три раза по сравнению с видимой областью. Поэтому точность измерений по фотографическим данным оказалась недостаточной для выявления радиального градиента поля.

С развитием техники наблюдений появилась возможность изучать тонкую структуру спектральных линий. Анализ указывает на то, что дипольно-квадрупольной модели недостаточно. Например, об этом свидетельствуют результаты наблюдений линейной поляризации в линиях, которые невозможно описать в простейшем мультиполярном представлении, необходимо предполагать наличие мелкомасштабной пятенной структуры, где магнитное поле больше.

В настоящей статье мы впервые выполнили наблюдения продольного магнитного поля α^2 CVn в ядрах линий высоких членов бальмеровской серии, которые образуются в самых высоких слоях атмосферы. Использование одновременно около десяти линий водорода в каждом спектре позволило существенно увеличить точность измерений магнитного поля. Все имеющиеся в настоящее время данные указывают на уменьшение магнитного поля с высотой в диапазоне толщины атмосферы на величину

Таблица 4. Результаты фотометрического исследования звезды α^2 CVn (N_{exp} и T_{exp} — число и время экспозиций, для определения фазы использованы эфемериды из работы Farnsworth (1932))

JD, 2450000+	N_{exp}	Полное T_{exp} , с	Фаза	Звездная величина	JD, 2450000+	N_{exp}	Полное T_{exp} , с	Фаза	Звездная величина
$U \pm \sigma$					$V \pm \sigma$				
8916.470	97	849	0.142	3.527 ± 0.018	8921.435	45	3643	0.049	2.712 ± 0.020
8921.435	45	3641	0.049	3.486 ± 0.018	8948.347	45	3220	0.970	2.750 ± 0.015
8948.346	44	3220	0.970	3.508 ± 0.016	8980.321	25	1784	0.816	2.772 ± 0.014
8980.321	25	1791	0.816	3.527 ± 0.017	9272.383	167	12515	0.215	2.805 ± 0.024
9005.337	810	6990	0.390	3.579 ± 0.024	9304.332	111	8995	0.057	2.749 ± 0.034
9007.336	684	6747	0.755	3.548 ± 0.029	9744.382	196	16463	0.514	2.860 ± 0.045
9008.335	733	7501	0.938	3.533 ± 0.037	$R \pm \sigma$				
9272.383	168	12515	0.215	3.570 ± 0.022	8916.491	24	1083	0.146	2.749 ± 0.015
9304.332	110	8995	0.057	3.516 ± 0.041	8921.435	45	3632	0.049	2.710 ± 0.020
9744.385	202	16464	0.514	3.607 ± 0.063	8948.347	45	3220	0.970	2.750 ± 0.015
9745.371	192	17879	0.694	3.635 ± 0.043	8980.321	25	1783	0.816	2.772 ± 0.014
9746.339	93	8981	0.871	3.568 ± 0.042	9272.383	167	12523	0.215	2.805 ± 0.024
9747.382	200	15835	0.062	3.533 ± 0.043	9304.332	111	9004	0.057	2.749 ± 0.034
$B \pm \sigma$					9744.383	199	16542	0.514	2.858 ± 0.047
8916.480	24	203	0.144	2.867 ± 0.018	9745.380	197	17879	0.696	2.879 ± 0.039
8921.435	45	3643	0.050	2.885 ± 0.023	9746.335	76	9058	0.871	2.826 ± 0.027
8948.347	45	3220	0.970	2.892 ± 0.017	9747.381	198	15837	0.062	2.790 ± 0.050
8980.321	25	1792	0.816	2.891 ± 0.020	$I \pm \sigma$				
9272.382	164	12515	0.215	2.915 ± 0.030	8916.491	25	1083	0.146	2.906 ± 0.013
9304.332	112	8995	0.057	2.883 ± 0.049	8921.435	45	3643	0.049	2.908 ± 0.012
9744.387	184	16551	0.514	3.010 ± 0.070	8948.347	45	3219	0.970	2.918 ± 0.020
9745.373	152	17889	0.695	2.984 ± 0.063	8980.321	25	1775	0.816	2.917 ± 0.012
9746.340	84	9306	0.872	2.975 ± 0.072	9272.383	167	12533	0.215	2.939 ± 0.016
9745.380	196	17879	0.696	2.880 ± 0.038	9304.331	112	9013	0.057	2.910 ± 0.024
9746.335	76	9139	0.871	2.826 ± 0.027	9744.375	137	16542	0.512	2.984 ± 0.036
9747.382	190	15757	0.062	2.758 ± 0.044	9745.371	126	17879	0.694	3.003 ± 0.041
$V \pm \sigma$					9746.337	47	8980	0.871	2.952 ± 0.035
8916.491	24	1082	0.146	2.749 ± 0.022	9747.379	195	15683	0.062	2.946 ± 0.041

порядка 30%. В рамках дипольной модели такой эффект объяснить невозможно.

Подобный эффект наблюдается не только для α^2 CVn. Мы нашли его подтверждение и для звезды 53 Cam (Romanyuk et al. 2022a), а также при анализе вертикальной структуры атмосферы и конфигурации магнитного поля для 23 CP-звезд по

линиям металлов и по ядру линии водорода $H\beta$ (Kudryavtsev and Romanyuk 2011). Этот факт указывает на общую причину, которая вызвана ослаблением магнитного поля с глубиной атмосферы на 2–3 порядка от возможного при чисто дипольном поле, либо на существенные недостатки используемых моделей атмосфер.

Звезда α^2 CVn исследуется разными методами более 90 лет. За все время исследований не найдено никаких изменений в структуре поля и положениях химических пятен на поверхности. Так же, как и для других CP-звезд мы получаем доказательства справедливости теории «вмороженности» силовых линий поля в атмосфере звезд.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Национальный комитет по тематике российских телескопов (НКРТ — <https://www.sao.ru/hq/Komitet/>) за выделение наблюдательного времени. При выполнении работы авторы пользовались базами данных SIMBAD (<https://simbad.cds.unistra.fr>), VizieR (<https://vizier.cds.unistra.fr>), NASA's Astrophysics Data System (ADS) (<https://ui.adsabs.harvard.edu>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, грант № 20-02-00233. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. R. P. Angel and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **160**, L147 (1970).
2. H. W. Babcock, *Astrophys. J.* **105**, 105 (1947).
3. H. W. Babcock, *Astrophys. J. Suppl.* **3**, 141 (1958).
4. A. Belopolsky, *Astronomische Nachrichten* **196** (1), 1 (1913).
5. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **212**, 141 (1977).
6. J. F. Donati, M. Semel, B. D. Carter, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **291** (4), 658 (1997).
7. G. Farnsworth, *Astrophys. J.* **76**, 313 (1932).
8. Y. V. Glagolevskii, N. E. Piskunov, and V. L. Khokhlova, *Sov. Astron. Lett.* **11**, 154 (1985).
9. A. V. Goncharkii, T. A. Ryabchikova, V. V. Stepanov, et al., *Sov. Astron.* **27**, 49 (1983).
10. V. L. Khokhlova, *Astron. Zh.* **48**, 939 (1971).
11. V. L. Khokhlova and V. M. Pavlova, *Sov. Astron. Lett.* **10**, 158 (1984).
12. A. F. Kholtygin, A. V. Moiseeva, I. A. Yakunin, and S. Hubrig, *Astrophysical Bulletin* **75** (3), 284 (2020).
13. O. Kochukhov, N. Piskunov, I. Ilyin, et al., *Astron. and Astrophys.* **389**, 420 (2002).
14. O. Kochukhov and G. A. Wade, *Astron. and Astrophys.* **513**, id. A13 (2010).
15. K. Kodaira and W. Unno, *Astrophys. J.* **157**, 769 (1969).
16. D. O. Kudryavtsev and I. I. Romanyuk, in *Proc. Int. Meeting on Magnetic Stars, Nizhnij Arkhyz, Spec. Astrophys. Obs. RAS, Russia, 2010*, Ed. by I. I. Romanyuk and D. O. Kudryavtsev (Spec. Astroph. Obs. RAS, Nizhnij Arkhyz, 2011), p. 104.
17. J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **258**, 639 (1982).
18. J. L. Leroy, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **114**, 79 (1995).
19. A. Mallama, *J. Amer. Association Var. Star Observers* **46** (1), 90 (2018).
20. I. D. Najdenov and G. A. Chuntunov, *Soobshcheniya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii* **16**, 63 (1976).
21. N. Piskunov and O. Kochukhov, *Astron. and Astrophys.* **381**, 736 (2002).
22. G. W. Preston, *Contrib. Lick Obs.* **205**, 25 (1965).
23. G. W. Preston, *Astrophys. J.* **157**, 247 (1969).
24. S. S. Provin, *Astrophys. J.* **118**, 489 (1953).
25. D. M. Pyper, *Astrophys. J. Suppl.* **18**, 347 (1969).
26. I. I. Romanyuk, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **12**, 3 (1980).
27. I. I. Romanyuk, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **22**, 25 (1986).
28. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **62** (1), 62 (2007).
29. I. I. Romanyuk, A. V. Moiseeva, D. O. Kudryavtsev, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (2), 156 (2022a).
30. I. I. Romanyuk, A. V. Moiseeva, E. A. Semenko, et al., *Astrophysical Bulletin* **75** (3), 294 (2020).
31. I. I. Romanyuk, A. V. Moiseeva, E. A. Semenko, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (1), 94 (2022b).
32. I. I. Romanyuk, A. V. Moiseeva, E. A. Semenko, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (3), 271 (2022c).
33. I. I. Romanyuk, V. E. Panchuk, N. E. Piskunov, and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **62** (1), 26 (2007).
34. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, D. O. Kudryavtsev, and A. V. Moiseeva, *Astrophysical Bulletin* **71** (3), 302 (2016).
35. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, D. O. Kudryavtsev, et al., *Astrophysical Bulletin* **72** (4), 391 (2017).
36. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **73** (2), 178 (2018).
37. S. L. S. Shorlin, G. A. Wade, J. F. Donati, et al., *Astron. and Astrophys.* **392**, 637 (2002).
38. V. G. Shtol, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **18**, 139 (1984).
39. J. Sikora, G. A. Wade, J. Power, and C. Neiner, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **483** (3), 3127 (2019).
40. J. Silvester, O. Kochukhov, and G. A. Wade, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **440** (1), 182 (2014a).

41. J. Silvester, O. Kochukhov, and G. A. Wade, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **444** (2), 1442 (2014b).
42. J. Silvester, G. A. Wade, O. Kochukhov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **426** (2), 1003 (2012).
43. D. W. N. Stibbs, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **110**, 395 (1950).
44. G. A. Wade, J. F. Donati, J. D. Landstreet, and S. L. S. Shorlin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **313** (4), 823 (2000a).
45. G. A. Wade, J. F. Donati, J. D. Landstreet, and S. L. S. Shorlin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **313** (4), 851 (2000b).
46. S. C. Wolff, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **90**, 412 (1978).

On Magnetic Field Structure of Chemically Peculiar Star α^2 CVn

I. I. Romanyuk¹, A. V. Moiseeva¹, D. O. Kudryavtsev¹, I. A. Yakunin¹, V. N. Aitov¹, and D. N. Baklanova²

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

²Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny, Crimea 298409 Russia

We searched again for a radial (vertical) gradient of the longitudinal magnetic field of the chemically peculiar star α^2 CVn. We considered the history of magnetic studies of this object demonstrating large differences in the data obtained with different methods. Such differences can be explained by the fact that the magnetic field sharply drops (by 2 orders stronger than in the case of a dipole structure) with height in the atmosphere. The spectroscopic, spectropolarimetric, and photometric data indicate that the large- and small-scale structure of the atmosphere of α^2 CVn has not changed over more than 90 years of observations.

Keywords: *stars: chemically peculiar—stars: magnetic field—stars: individual: α^2 CVn*