

УДК 524.3

## Исследования космического магнетизма в Крымской астрофизической обсерватории.

### II. Прямые спектрополяриметрические измерения магнитных полей звезд

*С.И. Плачинда, В.В. Бутковская*

ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», Научный, Крым, 298409  
*psi@crasrimea.ru*

Поступила в редакцию 4 июня 2020 г.

**Аннотация.** С 80-х годов 20-го века по настоящее время в Крымской астрофизической обсерватории выполняются регулярные спектрополяриметрические наблюдения невырожденных звезд разных спектральных классов и типов светимостей. В обзоре изложено становление инструментальной базы и развитие методики измерения звездных магнитных полей, а также приведен ряд результатов исследования магнитных полей разных объектов, впервые полученных в Крымской астрофизической обсерватории в разные годы.

**Ключевые слова:** звезды, магнитные поля звезд, спектрополяриметрия

## 1 Спектрополяриметрия высокого спектрального разрешения в КрАО

КрАО АН СССР изначально создавалась и развивалась как астрофизическая обсерватория. В 1954 году был введен в эксплуатацию первый башенный солнечный телескоп, а в октябре 1956 года А.Б. Северным и коллегами с помощью изготовленного в КрАО магнитометра были начаты измерения продольного компонента магнитного поля на Солнце. В 1961 году В.Е. Степанов и коллеги разработали, изготовили и запустили в строй векторный магнитометр, который позволял измерять полный вектор магнитного поля. Параллельно в КрАО создавался мощный теоретический фундамент для изучения формирования спектральных линий в присутствии магнитного поля в атмосферах Солнца и невырожденных звезд. Основы теории были заложены Унно (Япония) и В.Е. Степановым (КрАО) в 50-х годах, а окончательное решение для приближения модели атмосферы Милна – Эддингтона с включением магнито-оптических эффектов было опубликовано Д.Н. Рачковским (КрАО) в 1962 году ([Rachkovsky, 1962](#)). С тех пор астрофизики пользуются уравнениями Унно – Рачковского.

Первые успешные измерения слабых магнитных полей звезд были выполнены в КрАО в конце 60-х годов прошлого столетия. Для длиннощелевого спектрографа АСП-14 в стационарном фокусе куде 2.6-м телескопа им. Г.А. Шайна (ЗТШ) с одним плоским диагональным зеркалом в тракте переброски света был создан звездный магнитометр с аналоговой электроникой. С этой целью была модифицирована конструкция солнечного магнитометра, работавшего на солнечном башенном телескопе КрАО (Н.С. Никулин). Результаты наблюдений были опубликованы в работах [Severny \(1970\)](#) и [Северный и др. \(1974\)](#).

Для вычисления продольного компонента магнитного поля применялась адаптированная методика обработки солнечных магнитометрических наблюдений: магнитное поле рассчитывалось по максимальным значениям круговой поляризации в синем и красном крыльях спектральной линии с учетом калибровки звездного модулятора на магнитографе Башенного солнечного телескопа по магнитному полю солнечного пятна. Используя эту методику, магнитные поля были впервые зарегистрированы у ряда ярких немагнитных горячих и конвективных звезд. Из-за сложности калибровки

и несовершенства первой методики обработки магнитных полей у звезд оказались сильно завышены – в некоторых случаях почти на порядок величины.

Современные методы измерения магнитных полей звезд с использованием поляризованных профилей спектральных линий существенно превосходят ранние методики в точности измерений. Но первые прямые измерения магнитного поля звезд подтвердили главную гипотезу: обычные немагнитные звезды разных спектральных классов на разных стадиях эволюции подобно Солнцу обладают магнитными полями. И хотя их поля на порядки слабее, чем у магнитных звезд, они, тем не менее, доступны для регистрации. Начался новый этап развития звездной астрофизики – изучение магнитных полей у обычных звезд.

В конце 20-го века у звезд были обнаружены первые планеты. Это открытие поставило вопрос о возможности существования биологических форм жизни вне Солнечной системы. Главным критерием потенциальной обитаемости планеты является наличие у нее подходящей атмосферы и жидкой воды на поверхности. Вторым важным критерием является низкая магнитная активность родительской звезды, формирующая космическую погоду на орбите планеты. В противном случае мощные корональные выбросы и потоки жесткого излучения вспышек способны уничтожить зарождающуюся жизнь. Напомним, что на Солнце вероятность супермощных вспышек и корональных выбросов ( $10^{34}$ - $10^{35}$  эрг) оценивается как одно событие за 800–5000 лет (Обридко и Наговицын, 2017, стр. 125). Сегодня главным источником информации о максимально возможных для данной звезды коронарных выбросах и вспышках являются прямые измерения магнитных полей, эру которых в конце 60-х годов прошлого века открыли А.Б. Северный и коллеги в КраО на ЗТШ.

Так как информацию о потенциальном уровне экстремальной активности звезды несут глобальные и локальные магнитные поля, важность всесторонних исследований магнетизма в астрофизике очевидна. Здесь уместно привести редакторскую цитату на странице сайта Institute of Aerospace Medicine (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; DLR): *“Understanding how life appears and finding its evidence elsewhere have become central questions in science”*.

В 70-е годы на смену аналоговому звездному магнитометру для ЗТШ был разработан и изготовлен цифровой двухканальный магнитометр, базирующийся на счете фотонов. Новый магнитометр одновременно регистрировал сканированный щелью контур спектральной линии (в первом канале) и поток с подходящего участка условного континуума (во втором канале). Контроль работы кристалла DKDP, выполнявшего функцию входной четвертьволновой пластины, на новом магнитометре осуществлялся как по любой яркой немагнитной звезде с помощью преобразователя неполяризованного света в 100%-поляризованный по кругу, так и с помощью лабораторного спектра неоновой лампы, помещенной в магнитное поле, силовые линии которого были параллельны оптической оси телескопа. Методика обработки по-прежнему имела недостатки и давала завышенные значения продольного магнитного поля. Но полученный опыт оказался очень важным и был реализован в КраО при разработке и создании следующего поколения приборов с панорамными светоприемниками (ПЗС-детекторы) и методики для высокоточных спектрополяриметрических измерений слабых магнитных полей звезд.

Новая эпоха измерения слабых магнитных полей звезд началась в 80-х годах с появлением в астрофизике панорамных ПЗС-светоприемников. В 1985 году А.А. Боярчук (КраО) и И. Туоминен (Финляндия) организовали приобретение в Англии для ЗТШ первой в СССР астрономической ПЗС-матрицы. В 1986 году в КраО на ЗТШ был получен первый свет с анализатором круговой поляризации (стоксметр), оснащенный вращающейся от экспозиции к экспозиции входной четвертьволновой пластиной, расщепителем световых пучков и ПЗС-матрицей в качестве детектора спектра. Четвертьволновая слюдяная пластина была рассчитана на область 6000–6400 ангстрем. В качестве расщепителя пучков использовался кристалл исландского шпата. Новизна конструкции состояла в том, что в каждой последующей экспозиции на место спектра с определенной круговой поляризацией проецировался спектр с ортогональной круговой поляризацией. Благодаря такому подходу в первом приближении исключаются инструментальные ошибки и неравномерность чувствительности пикселей матрицы. Это было одно из первых применений подобной конструкции, которая стала сегодня в звездной астрофизике стандартом спектрополяриметрических наблюдений. Первый стоксметр по просьбе КраО был изготовлен в САО АН СССР И.Д. Найденовым.

Сегодня на ЗТШ для спектрополяриметрических наблюдений используется эшелный спектрограф ЭСПЛ (Лагутин и др., 2019). Как правило, наблюдения выполняются в спектральной области 5000–6900 Å при спектральном разрешении  $R \sim 51000$ . Экспозиции подбираются таким образом, что-

бы получить отношение сигнал-шум одиночных спектров в максимуме интенсивности в континууме 250–450. Для увеличения результирующей точности выполняется несколько пар экспозиций. Длительность одной экспозиции составляет от 120 секунд для звезд  $0^m$  величины до 1800–3000 секунд для объектов  $5^m$ – $6^m$ , в зависимости от требуемой точности. В КрАО осуществляются регулярные измерения магнитных полей невырожденных звезд разных спектральных классов на разных стадиях эволюции: звезд с конвективными оболочками, магнитных химически пекулярных звезд, пульсирующих звезд, горячих звезд.

## 2 Методы обработки спектрополяриметрических данных

### 2.1 LSD-метод

Распространенные сегодня методики измерения магнитных полей по спектрополяриметрическим наблюдениям являются модификациями метода LSD, в котором, как правило, используется весь доступный массив присутствующих в спектре звезды чистых спектральных линий и бленд для получения средневзвешенных профилей Стокса (Semel et al., 1993; Donati et al., 1997). Это позволило многократно увеличить отношение сигнал/шум и регистрировать слабые магнитные поля в десятые доли гаусса.

В методе LSD для вычисления продольного компонента поля используется формула (Borra and Vaughan, 1977):

$$B_l = 714.53 \times 10^4 \frac{\int \Delta v V_c(v) dv}{\bar{g} \lambda \int [1 - r(v)] dv}, \quad (1)$$

где для средневзвешенных профилей  $\Delta v$  – величина расщепления ( $\Delta \lambda_B = 4.6685 \times 10^{-13} \bar{g} \lambda^2 B_l$  (Å)) энергетических уровней атома в магнитном поле в единицах скорости (км/с);  $\bar{g}$  – средний фактор Ланде магнитного расщепления,  $\lambda$  – результирующая длина волны и  $r(v)$  – неполяризованный контур,  $V_c$  – нормированный к континууму  $V$ -параметр Стокса. Здесь  $2V_c(v) = r_l(v) - r_r(v)$ , где  $r_l(v)$  – левополяризованный по кругу контур, а  $r_r(v)$  – правополяризованный по кругу контур спектральной линии.

С использованием метода LSD выполнены обширные мониторинговые кампании с целью поиска магнитных полей у невырожденных звезд всех температур и классов светимости. Для многих звезд исследована переменность поля с периодом вращения и выполнено картографирование магнитного поля с помощью зееман-доплеровского картирования. Но как и любой метод, LSD имеет свои граничные условия применимости.

Главные ограничения на применимость LSD (Plachinda et al., 2019; Plachinda, 2014):

1. Метод применим только с использованием слабых линий и для анализа относительно слабых полей ( $B \leq 1500$  Гс).
2. Профили параметров Стокса всех используемых спектральных линий должны иметь одинаковую форму.
3. Взаимно ортогональные профили параметров Стокса одной и той же спектральной линии должны иметь одинаковую эквивалентную ширину.
4. Магнитное поле должно быть однородным с глубиной формирования спектральных линий.
5. Средневзвешенные параметры Стокса интегрируются от континуума до континуума, то есть в результирующий профиль, используемый для измерения магнитного поля, включены крылья линий, определяемые с большой погрешностью в области, прилегающей к континууму.

Как известно, в реальности спектральные линии невырожденных звезд формируются в разных физических условиях, которые могут быть обусловлены:

- пространственной неоднородностью температуры;
- пространственной неоднородностью силы тяжести;
- изменением температуры с глубиной;
- изменением микротурбулентности с глубиной;
- изменением плотности и скорости движения масс с глубиной;
- пространственной неоднородностью химсостава;

- стратификацией химических элементов с глубиной;
- неоднородностью магнитного поля по поверхности и с глубиной.

Кроме того, каждая звезда имеет свои собственные особенности и нестационарные процессы в соответствии с ее эволюционным статусом. Индикаторами комплексных физических процессов в звездных атмосферах, в частности, являются значения расщепления энергетических уровней атомов, дающие статистически значимое различие величин магнитного поля, различие форм профилей Стокса разных спектральных линий и разные асимметрии и глубины взаимно ортогонально поляризованных профилей Стокса одной и той же спектральной линии, что по определению исключается в методе LSD.

Таким образом, для анализа сложной магнитной топологии при наличии физических и химических неоднородностей в атмосфере звезды (по поверхности и/или с глубиной), наличии локальных магнитных полей (пятен), быстрой переменности магнитного поля на временных интервалах, сравнимых с длительностью ночного сета наблюдений, метод LSD не пригоден.

## 2.2 SL-метод (метод “центров тяжести” отдельных спектральных линий)

В КрАО для измерения магнитных полей разработана и уже более тридцати лет используется методика SL (Single Line), берущая начало в идеологии методик, которые применяются при обработке солнечных спектрополяриметрических данных (Prysiashnyi et al., 2018). SL-методика также базируется на эффекте Зеемана и подразумевает вычисление расстояния между центрами тяжести левого и правого циркулярно поляризованных компонент каждой спектральной линии в отдельности (Plachinda and Tarasova, 1999). Такой подход позволяет рассчитывать магнитное поле по отдельным спектральным линиям и формировать однородные массивы спектральных линий для получения корректных значений магнитного поля. Несмотря на трудоемкость, одним из важных преимуществ методики SL является способность обнаруживать локальные магнитные поля на поверхности звезд (Plachinda, 2004a).

Для расчета по наблюдаемым спектрам нормализованных профилей Стокса с наперед заданными длинами волн, центральными остаточными глубинами, эффективными факторами Ланде и величиной шага по скорости разработана методика COALA (Plachinda et al., 2019). Метод COALA работает как в применении к слабым линиям, так и в применении к сильным, насыщенным линиям спектра.

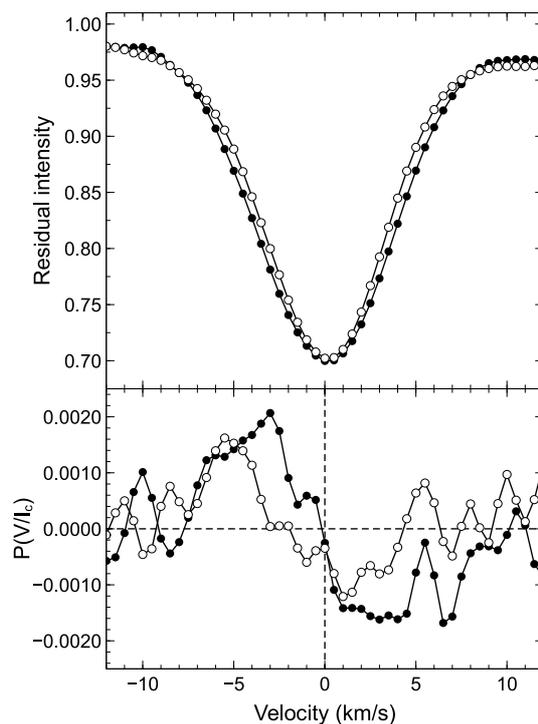
Расчет магнитного поля по отдельным спектральным линиям выполняется по формуле (см., например, Plachinda, 2014):

$$B_l = \frac{714.53 \times 10^4}{g\lambda} \left\{ \left( \frac{\int \Delta v(r^*(v) - r(v)) dv}{\int (r^*(v) - r(v)) dv} \right)_1 - \left( \frac{\int \Delta v(r^*(v) - r(v)) dv}{\int (r^*(v) - r(v)) dv} \right)_2 \right\}, \quad (2)$$

где  $\Delta v$  – эффективная величина расщепления энергетических уровней атома в магнитном поле в единицах скорости (км/с);  $r^*(v)$  – функция ограничения используемой части контура линии поглощения со стороны континуума в случае нормированных к континууму спектров является константой;  $r(v)$  – функция зависимости остаточной интенсивности от длины волны, т. е. функция профиля контура. Индексы 1 и 2 обозначают номер используемых для вычислений двух экспозиций. Эту же формулу можно использовать для вычисления магнитного поля по любой части контура.

В качестве иллюстрации влияния на форму профиля неоднородных физических условий на поверхности звезды можно привести полученные из наблюдений среднеарифметические профили  $I$  и  $V \beta Aq1$  из работы Plachinda et al. (2019) (см. рис. 1) для спектральных не блендированных линий, имеющих остаточную интенсивность в диапазоне  $R_c = 0.68 - 0.72$ .

Весь массив не блендированных спектральных линий в цитируемой работе был разделен на два кластера в силу того, что экспериментальная среднеквадратичная ошибка всего массива измеренных значений поля отличалась со 100 % достоверностью от аналогичной ошибки, определенной методом Монте-Карло с использованием нормального распределения вероятности. То есть разные спектральные линии исходного массива формировались в присутствии разных магнитных полей. Критерий разделения был следующим: линии, которые давали значение поля, отличающееся более чем на  $3\sigma$  от ожидаемого значения на данной фазе периода вращения ( $B_e \sim -4$  Гс), формировали один массив, а остальные линии были выделены в другой массив. Выпадающие значения магнитного поля – все одного положительного знака.



**Рис. 1.** Нормализованные профили Стокса, остаточная интенсивность (верхняя панель) и  $V$ -параметр (нижняя панель). Наблюдения получены 06.10.2014 г. Рисунок из работы [Plachinda et al. \(2019\)](#)

На рис. 1 уширенный контур (сплошные кружки) соответствует среднему значению поля  $\langle B_e \rangle = 44.0 \pm 5.6$  Гс, которое было получено с использованием 12 спектральных линий, попавших в выбранный диапазон усреднения  $R_c = 0.68 - 0.72$ , а контур, обозначенный открытыми кружками, соответствует среднему значению поля  $\langle B_e \rangle = 12.0 \pm 7.9$  Гс, определенному по 5 спектральным линиям из данного диапазона интенсивностей.

Приведенный результат наглядно демонстрирует, что построение усредненного профиля с использованием всех спектральных линий приводит к потере информации о неоднородностях магнитного поля на разных пространственных масштабах. Крымский метод SL свободен от подобных модельных ограничений и позволяет исследовать локальные магнитные поля и другие неоднородности магнитного поля как на поверхности звезд, так и с глубиной звездной атмосферы.

### 3 Звезды с развитыми конвективными оболочками

На сегодняшний день установлено, что главный источник активности на Солнце – магнитное поле. Наблюдаемые явления активности у звезд с конвективными оболочками также являются проявлениями магнитной активности. Наиболее полно результаты более чем полувековых исследований активности звезд поздних спектральных классов Главной последовательности освещены в монографиях [Gershberg \(2005\)](#), [Гершберг \(2015\)](#), [Гершберг и др. \(2020\)](#).

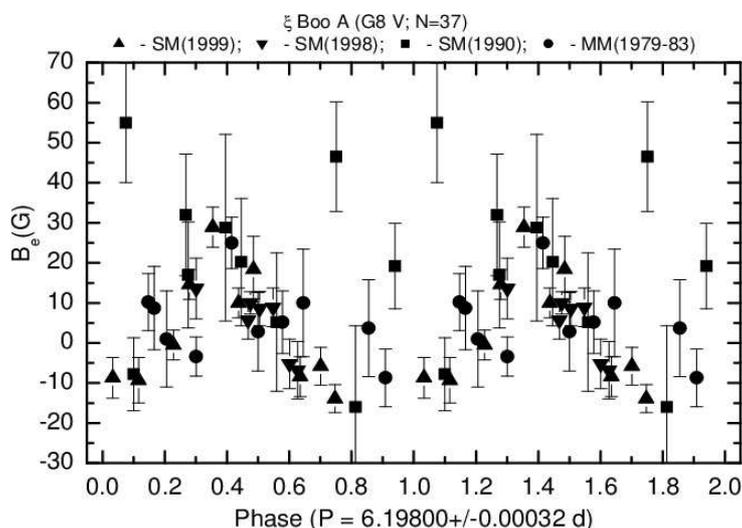
Минимальные ошибки фотографических и ранних фотоэлектрических (водородные магнитометры) методов измерения звездных магнитных полей составляли несколько десятков гаусс. Поэтому до появления методов высокоточной спектрополяризметрии астрономам были доступны для измерения преимущественно сильные поля магнитных звезд с напряженностью от нескольких сотен гаусс. И только отдельные измерения высокого спектрального разрешения позволяли снизить ошибки вплоть до нескольких гаусс и даже долей гаусса. Но для этого требовались многочасовые экспозиции для накопления необходимого уровня сигнала. Например, на 1.9-м телескопе с магнито-оптическим фильтром потребовалось 8 часов наблюдений, чтобы получить для Проциона ( $m_v = 0,34$ , Sp F5) точность измерения магнитного поля 0.8 Гс ([Bedford et al., 1995](#)).

Когда пришла эпоха панорамных светоприемников (ПЗС-матриц), эшелельных спектрографов и ахроматических анализаторов, благодаря одновременному экспонированию множества спектраль-

ных линий от ближней ультрафиолетовой до ближней инфракрасной области, стали общедоступны измерения магнитных полей с точностью до долей гаусса за реальное время наблюдений. В этом случае на 1.8-м телескопе для Проциона точность измерения магнитного поля в 2.2 Гс была достигнута всего за 6 минут (Kim et al., 2007). Краткое перечисление методов прямого измерения магнитного поля на звездах со ссылками на оригинальные работы приведено в обзоре Plachinda (2014).

### 3.1 Крымский проект обзорных измерений магнитного поля у звезд с конвективными оболочками

Регулярные спектрополяризметрические наблюдения звезд с конвективными оболочками разных классов светимости в КрАО начали выполнять в 1989 году на 2.6-м телескопе ЗТШ с использованием стоксметра и длиннощелевого спектрографа АСП-14 в фокусе куде в спектральной области 6200–6265 Å. Разрешение полученных спектров составляло  $R \sim 3 \times 10^4$  (3.0 пикселя), обратная дисперсия 3 Å/мм, отношение сигнал-шум в континууме  $\sim 300 - 400$ .

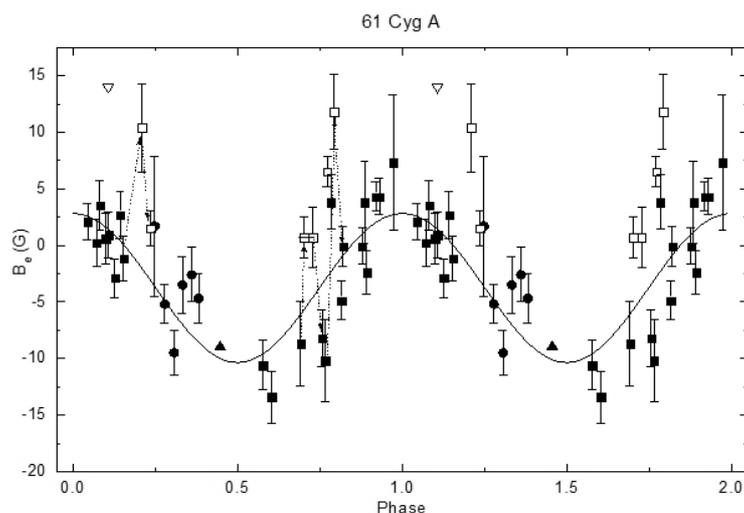


**Рис. 2.** Переменность продольного компонента магнитного поля  $\xi$  Boo A с периодом вращения. Над верхней осью абсцисс указаны обозначения и годы наблюдений: заполненный верхний и нижний треугольник, а также заполненный квадрат – крымские наблюдения со стоксметром, а заполненный кружок – наблюдения с многощелевым магнитометром. Рисунок из работы Plachinda and Tarasova (2000)

Результаты первых обзорных измерений магнитного поля у медленно вращающихся звезд I–IV классов светимости были опубликованы в работах Hubrig et al. (1994), Plachinda and Tarasova (2000), Tarasova et al. (2001), Tarasova (2002), Plachinda (2004a), Plachinda (2004b), Plachinda (2005). В отличие от звезд типа RS CVn с повышенной активностью, где азимутальный и радиальный компонент поля достигает 500 Гс и выше (Donati et al., 2003), у нормальных звезд из крымского обзора продольное магнитное поле оказалось слабым, не превышающим нескольких десятков гаусс. В этом обзоре магнитное поле было обнаружено у 21 звезды спектральных классов F9–M3 всех типов светимости.

Для молодой солнечноподобной звезды  $\xi$  Boo A (Sp G8 V;  $P_{\text{rot}} = 6.198$  дня) и старой солнечноподобной звезды 61 Cyg A (Sp K5 V;  $P_{\text{rot}} = 36.618$  дней) были получены кривые изменения продольного компонента поля с фазой периода вращения. В первом случае амплитуда переменности составила  $\sim 40$  Гс, а во втором случае  $\sim 12$  Гс. Это первые звезды солнечного типа, для которых получены кривые переменности магнитного поля с фазой периода вращения (Plachinda and Tarasova, 2000; Plachinda, 2004a). Графики переменности магнитного поля представлены на рис. 2 и 3.

Также особый интерес представляло изучение магнитного поля сверхгиганта  $\epsilon$  Gem (Sp G8 Ib). В начале 90-х годов оставался открытым вопрос: расширяясь до стадии сверхгиганта, звезды сохраняют очень слабое магнитное поле, сгенерированное путем динамо-механизмов на предыдущих стадиях эволюции, или работа динамо-механизмов продолжается и на стадии сверхгиганта?



**Рис. 3.** Переменность продольного компонента магнитного поля 61 Cyg A с периодом вращения. Открытыми значками показаны наблюдения, которые значительно отклоняются от аппроксимирующей кривой дипольной конфигурации. Точечными стрелками соединены значения, полученные в последовательные даты наблюдений. Квадраты и кружки – крымские наблюдения, треугольники – наблюдения с многоцелевым магнитометром. Рисунок из работы [Plachinda \(2004a\)](#)

Спектрополяризметрические наблюдения  $\epsilon$  Gem были выполнены в течение 14 ночей с 1994 по 2002 год. Для 5 дат зарегистрировано значимое магнитное поле в диапазоне от  $-10$  до  $+42$  Гс. Тестирование на возможное влияние инструментальных эффектов (“нулевое” поле) для всех дат дало отрицательный результат, что подтверждает достоверность полученных значений ([Plachinda, 2004b](#)). Сравнительно большое поле у  $\epsilon$  Gem, а также обнаруженное в крымском обзоре магнитное поле у субгигантов, гигантов и ярких гигантов подтвердили рабочую гипотезу о том, что генерация магнитного поля у конвективных звезд осуществляется на всех фазах эволюции вплоть до достижения вырожденного состояния. В поддержку сформулированной выше гипотезы говорят и те факты, что у молодых звезд типа Т Тельца было обнаружено сильное, до нескольких килогаусс, магнитное поле в аккреционной колонке ([Donati et al., 1997](#); [Johns-Krull et al., 1999a, b](#)), а измеренные у активных карликов спектрального класса М модули магнитного поля в пятнах могут достигать 5 кГс ([Saar and Linsky, 1985](#); [Saar, 1994](#); [Johns-Krull and Valenti, 1996](#)).

Таким образом, результаты прямых измерений позволили сделать вывод, что магнитное поле звезд с конвективными оболочками генерируется на всех стадиях эволюции, включая стадию звездообразования. Наиболее вероятный механизм генерации – динамо-процессы.

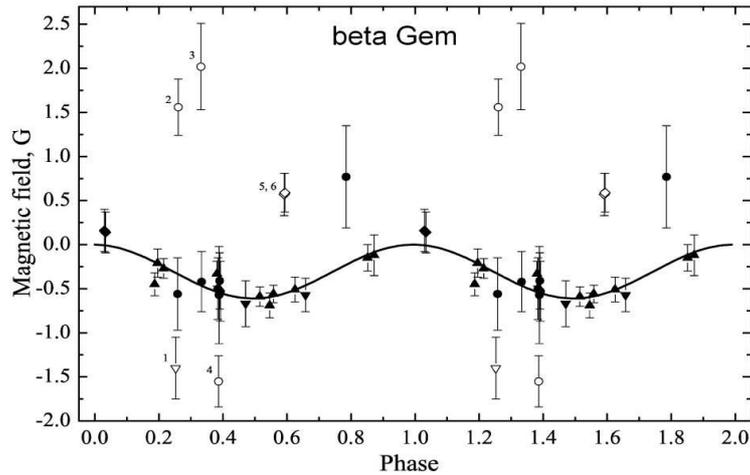
Последующие высокоточные наблюдательные обзоры других авторов, а также детальное изучение магнитного поля у избранных объектов подтвердили наличие магнитного поля у нормальных звезд с конвективными оболочками всех типов светимости. К 20-м годам 21-го века накопилась обширная база зарегистрированных магнитных полей у звезд с конвективными оболочками. Эти результаты позволяют уверенно утверждать: генерация магнитных полей на конвективных звездах происходит на всех стадиях эволюции.

### 3.2 Всплывание силовых трубок при формировании активной области

В КрАО впервые получены результаты, свидетельствующие о всплывании крупных силовых трубок поля при формировании активной области у звезд V–IV–III классов светимости. Зарегистрировано всплывание крупных силовых трубок поля у 61 Cyg A (Sp K5 V),  $\beta$  Gem (Sp K0 IIIb),  $\beta$  Aql (Sp G8 IV) ([Plachinda, 2004a](#); [Baklanova et al., 2011](#); [Butkovskaya et al., 2017a](#)).

В работе [Baklanova et al. \(2011\)](#) для оценки достоверности регистрации всплывания силовых трубок магнитного поля выполнено геометрическое моделирование вклада магнитного потока униполярного пятна в магнитное поле Солнца как звезды в предположении, что перенос излучения в присутствии магнитного поля не искажает геометрическую картину магнитного поля на звезде.

Самосогласованные параметры глобального магнитного поля звезды, размеры пятен и их магнитные потоки были определены с помощью метода наименьших квадратов. Использовался линейный закон потемнения к краю с коэффициентом  $u = 0.55$ , угол между осью вращения и лучом зрения был принят равным  $i = 90^\circ$ , а широта пятна равной  $30^\circ$ . Вклад полутени не учитывался. Для отношения интенсивности излучения в тени пятна к невозмущенной фотосфере, равного 0.4, при размере пятна  $1.5^\circ$  и локальном магнитном поле в пятне  $B_{\text{spot}} = 4000$  Гс, вклад пятна в общее магнитное поле Солнца как звезды составил 1 Гс. Это реальное значение, демонстрирующее работоспособность выбранного метода. Такой подход позволяет получить семейство решений, которое дает представление о размерах пятен и их магнитных потоках, чтобы обеспечить наблюдаемый эффект.

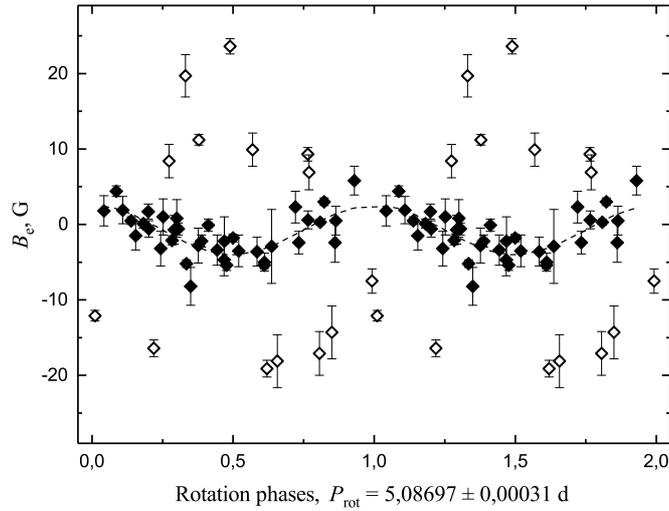


**Рис. 4.** Переменность продольного компонента магнитного поля Поллукса с периодом вращения. Описание рисунка приведено в тексте. Рисунок из работы [Baklanova et al. \(2011\)](#)

Для 61 Cyg A и  $\beta$  Gem были сделаны оценки величины поля при заданном размере пятен. У 61 Cyg A при  $B_{\text{spot}} = 4000$  Гс смоделированный размер пятен при разных исходных параметрах составлял  $4.8^\circ$ – $6.0^\circ$ . На рис. 3 открытыми квадратами показаны значения, которые статистически значимо отклоняются от кривой глобального магнитного поля и, скорее всего, обусловлены существенным вкладом всплывающих силовых трубок активной области (или областей). Следует отметить, что все отклоняющиеся значения имеют один знак, как должно быть в течение одного цикла активности. Стрелочками соединены значения последовательных дат. Таким образом видно, что практически через сутки запаздывающий поток другого знака компенсирует значение потока от всплывающей трубки. Этот эффект хорошо известен из физики Солнца.

У  $\beta$  Gem ( $P_{\text{rot}} = 491.5$  дня) для  $B_{\text{spot}} = 3000$  Гс размер пятен составил  $1.0^\circ$ – $1.55^\circ$ . На рис. 4 заполненными кружками представлены наблюдения, полученные в КрАО; заполненные ромбы – наблюдения, полученные на 1.8-м телескопе в Бохюнсанской астрономической обсерватории (Южная Корея); заполненные треугольники – наблюдения из работы [Auriere et al. \(2009\)](#). Открытыми символами отмечены значения, отклоняющиеся более чем на  $3\sigma$ . Цифрами обозначены даты, для которых в цитируемой работе был выполнен расчет диаметра пятна при заданном  $B_{\text{spot}} = 3000$  Гс. Как и в случае 61 Cyg A, эти отклоняющиеся значения, вероятно, связаны с выходом силовых трубок на поверхность звезды. Но, в отличие от 61 Cyg A, для которой наблюдения были выполнены за период времени значительно более короткий, чем длительность цикла активности, и зарегистрированы отклонения от магнитной кривой, обусловленной вращением звезды, только с положительным знаком, наблюдения  $\beta$  Gem перекрывают многолетний временной интервал; при этом зарегистрированы значимые отклонения обоих знаков.

Для  $\beta$  Aql ( $P_{\text{rot}} \sim 5.1$  дня) все представленные на рис. 5 наблюдения получены в КрАО ([Butkovskaya et al. \(2017a\)](#)). Точки, относящиеся к глобальной составляющей магнитного поля, обозначены заполненными ромбами. Амплитуда переменности глобального магнитного поля с периодом вращения составляет  $\sim 3.5$  Гс. Пунктирной линией показана аппроксимационная кривая, проведенная по заполненным ромбам методом наименьших квадратов. Открытыми ромбами обозначены зна-

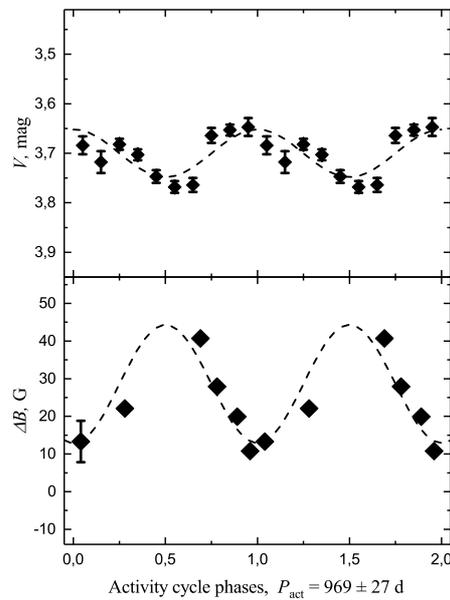


**Рис. 5.** Средние за ночь значения магнитного поля  $\beta$  Aql, свернутые с фазами 5-дневного периода вращения. Описание рисунка дано в тексте

чения магнитного поля в даты, где, по-видимому, существенный вклад в измерения дает локальная составляющая магнитного поля, связанная с выходом на поверхность силовых трубок магнитного потока формирующихся активных областей.

### 3.3 Цикл активности $\beta$ Aql

В КрАО впервые для субгигантов ( $\beta$  Aql, Sp G8 IV) установлено поведение магнитного поля с циклом активности ( $P_{\text{cycle}} = 969$  d) (Butkovskaya et al., 2017a).



**Рис. 6.** На рисунке для  $\beta$  Aql на верхней панели приведены свернутые с фазами 969-дневного цикла активности и усредненные по 10 интервалам фотометрические наблюдения в фильтре V, полученные в 2002–2009 годах в рамках проекта ASAS. На нижней панели – диапазон переменности (размах) магнитного поля на разных фазах цикла активности по крымским наблюдениям

Из рис. 6 следует, что диапазон переменности магнитного поля выше в эпоху минимума блеска. В рамках гипотезы Radick et al. (1998) антикорреляция блеска и магнитной активности может

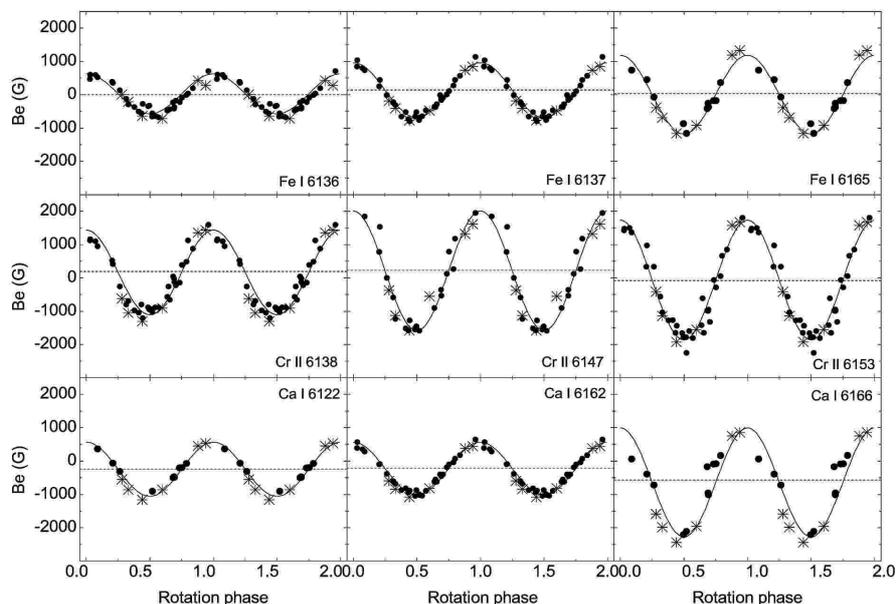
объясняться тем, что у  $\beta$  Aql в максимуме активности величина дефицита излучения в пятнах доминирует над вкладом в блеск звезды факельных площадок. В то время как у Солнца это происходит за счет доминирования излучения факельных площадок, которые дают больший вклад в блеск звезды, нежели результирующая величина дефицита излучения в пятнах.

$\beta$  Aql стала первой звездой, для которой по прямым измерениям установлена, в отличие от Солнца, антикорреляция блеска и амплитуды переменности глобального магнитного поля с фазой цикла активности. Это важный аспект, подчеркивающий необходимость изучения переменности магнитного поля на длительных временных интервалах, перекрывающих циклы активности, как для развития динамо-теории, так и для углубления понимания физики активности звезд в целом.

## 4 Другие звезды

### 4.1 Измерение магнитного поля у магнитных звезд по отдельным линиям

Проблема регистрации локальных магнитных полей остается открытой и для магнитных Ар/Вр звезд с аномалиями химического состава. В классическом представлении глобальные магнитные поля Ар/Вр звезд стабильны на временных масштабах в несколько десятилетий и имеют простую геометрию. В рамках модели наклонного ротатора магнитное поле Ар/Вр звезд математически описывается, как правило, диполем или мультиполем, ось которого наклонена под углом к оси вращения звезды (см., например, [Donati and Landstreet, 2009](#)), и, таким образом, на разных фазах периода вращения звезды наблюдатель видит разные участки ее поверхности. Однако в действительности наблюдаемую конфигурацию поля не всегда удается достаточно точно описать набором мультиполей. Эту проблему, в частности, отмечают [Kochukhov et al. \(2004\)](#) при исследовании магнитной топологии 53 Cam.

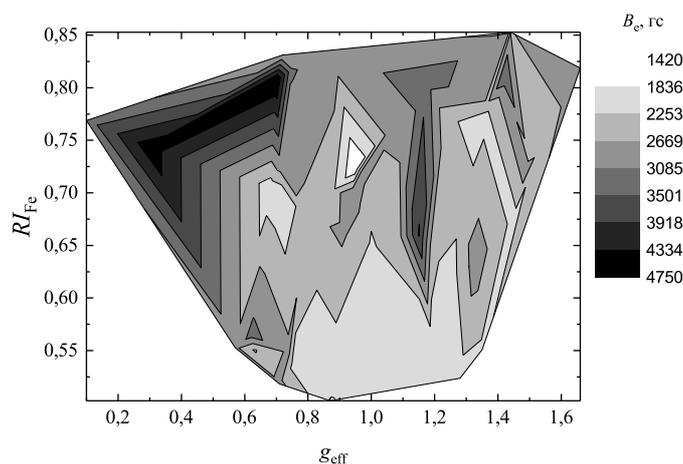


**Рис. 7.** Переменность магнитного поля  $\beta$  CrB с периодом вращения, измеренного по разным спектральным линиям. Закрытые кружки – данные, полученные в КРАО, снежинки – в ВОАО (Южная Корея). Аппроксимирующие кривые, проведенные методом наименьших квадратов, показаны сплошными линиями. Рисунок из работы [Han et al. \(2018\)](#)

Для расчета более точной топологии магнитных полей Ар/Вр звезд требуются измерения магнитного поля по отдельным спектральным линиям и учет неоднородности распределения химических элементов в атмосферах этих звезд как по поверхности, так и с глубиной.

$\beta$  CrB (F2Vp SrCrEuSi). Многолетние высокоточные измерения магнитного поля классической Ар-звезды  $\beta$  CrB, выполненные на 2.6-м телескопе ЗТШ в КРАО и 1.8-м телескопе в Бохюсанской

астрономической обсерватории в Южной Корее, показали, что магнитное поле, измеренное по разным спектральным линиям одних и тех же элементов (см. рис. 7), находящихся в одном и том же состоянии ионизации, может иметь статистически значимо различающиеся средние значения и изменяться с разной амплитудой с периодом вращения звезды (Han et al., 2018). Причина этого эффекта пока не известна. Одним из возможных объяснений может стать быстрое изменение направления полного вектора поля с глубиной формирования спектральных линий в атмосфере звезды.

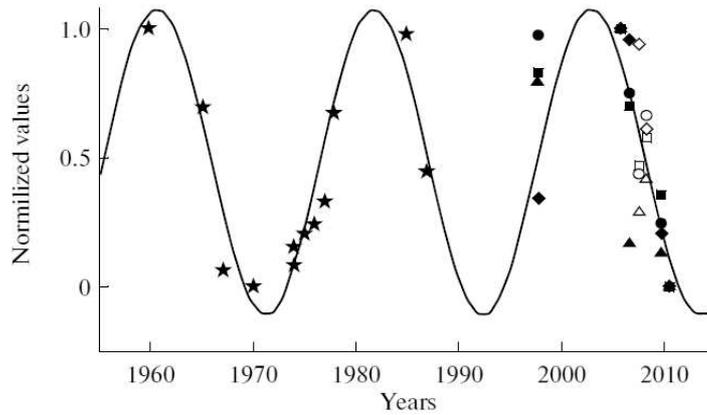


**Рис. 8.** Рассчитанная по линиям Fe ( $N = 47$ ) зависимость продольного магнитного поля от эффективного фактора Ланде  $g_{eff}$  и остаточной интенсивности  $RI_{Fe}$ . Рисунок из работы Butkovskaya and Plachinda (2019)

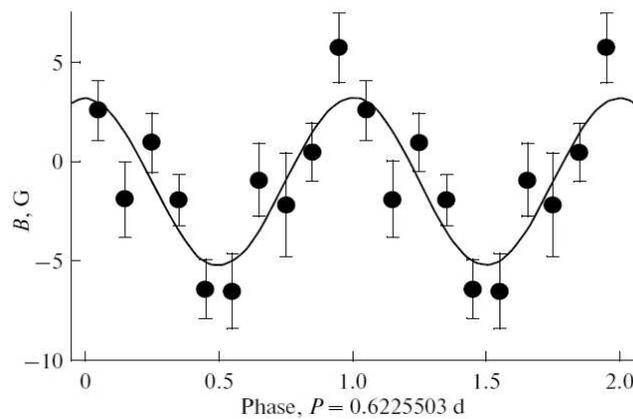
*33 Lib* (F0VspEuGdSr). Неоднородность структуры магнитного поля  $\alpha$ Ar звезды *33 Lib* исследована в работе Butkovskaya and Plachinda (2019). В частности, авторы обнаружили, что разные спектральные линии, в том числе разные линии одного и того же химического элемента (см. пример для линий Fe на рис. 8), демонстрируют значимо различающееся магнитное поле. Как правило, большие значения поля демонстрируют слабые линии с фактором Ланде  $g < 1$ . Это может говорить как о неоднородной структуре магнитного поля в атмосфере звезды, так и о неоднородном распределении химических элементов по поверхности и/или с глубиной, или о присутствии всех этих факторов. Аналогичный вывод сделан в результате изучения магнетизма классической Ar-звезды HD 94660 в работе Bailey et al. (2015).

#### 4.2 Магнитное поле горячей быстро вращающейся звезды $\alpha$ Lyr

Быстро вращающаяся звезда  $\alpha$  Lyr (Sp A0V), которую мы видим с полюса вращения, долгое время являлась общепризнанным фотометрическим и спектрофотометрическим стандартом, а потому интенсивно наблюдалась разными авторами и с разной аппаратурой. Анализируя спектрофотометрические данные из разных источников, Vasil'yev et al. (1989) заподозрили у  $\alpha$  Lyr 22-летний цикл переменности. Эта величина близка к длительности хейловского магнитного солнечного цикла активности, длительность которого, в рамках транспортной модели активности, определяется циклом меридионального течения на поверхности Солнца. Впоследствии наличие заподозренной цикличности у  $\alpha$  Lyr было подтверждено в работах Butkovskaya et al. (2011) и Butkovskaya (2014) по собственным спектроскопическим и спектрополяриметрическим наблюдениям (рис. 9). Используя данные, перекрывающие 50 лет наблюдений, длительность цикла была установлена равной  $7697 \pm 157$  дням, что составляет 21 год. В рамках сегодняшних представлений проводить полную аналогию между магнитным циклом Хэйла на Солнце и обнаруженным циклом не представляется возможным, а гидродинамические расчеты подобного циклического явления для горячих звезд в литературе отсутствуют. Поэтому Butkovskaya et al. (2011), следуя работе Merezhin (2001), остановились на предположении, что механизмом, который мог бы обеспечить многолетнюю цикличность, является меридиональное течение.



**Рис. 9.** На рисунке до 1990 года для  $\alpha$  Лyr представлены нормализованные величины внеатмосферного потока, приведенного к длине волны 5556 Å, полученные разными авторами (Vasil'yev et al., 1989), а после 1990 года показаны нормализованные величины усредненных по годам эквивалентных ширин спектральных линий Mg I 5167.321 Å (кружки), Mg I 5172.684 Å (треугольники), Mg I 5183.604 Å (ромбики), Fe II 5169.033 Å (квадратики). Заполненные символы – наблюдения, выполненные в Крымской астрофизической обсерватории на 2.6-м телескопе, а открытые символы – наблюдения, выполненные в Южной Корее в обсерватории Бохьюнсан (Bohyunsan) на 1.8-м телескопе. Рисунок из работы Butkovskaya (2014)

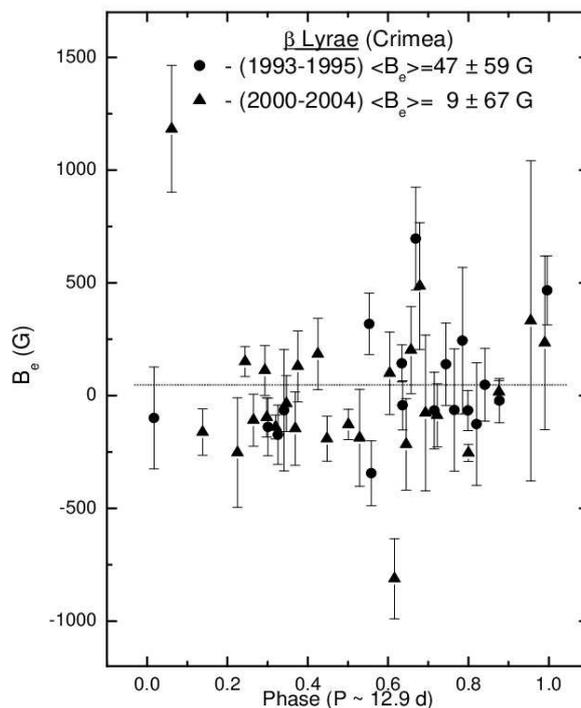


**Рис. 10.** Переменность продольного компонента магнитного поля  $\alpha$  Лyr с периодом вращения. 1312 измерений с 1997 по 2010 год осреднены по 10 бинам. Рисунок из работы Butkovskaya (2014)

В связи с дефицитом данных по магнитным полям у нормальных А-звезд Главной последовательности в КраО были выполнены многолетние высокоточные спектрополяриметрические наблюдения  $\alpha$  Лyr, показавшие присутствие глобального магнитного поля (см. рис. 10).

#### 4.3 Магнитное поле тесной затменной двойной $\beta$ Лyr

$\beta$  Лyr (Sp B8.5Ib-II) – тесная затменная переменная, ставшая прототипом целого класса переменных звезд. Skulsky (1982) заподозрил существование магнитного поля у  $\beta$  Лyr и его переменность с фазами орбитального периода. Предполагалось также, что из-за близости компонент период теряющего массу яркого компонента может быть синхронизован с орбитальным периодом. Скульский обнаружил, что магнитное поле  $\beta$  Лyрае изменяется с фазами орбитального периода с амплитудой 470 Гс вокруг среднего значения –1200 Гс.



**Рис. 11.** Переменность магнитного поля  $\beta$  Лир с фазами орбитального периода. Рисунок из работы Skulsky and Plachinda (2004)

Исследования магнетизма этой двойной системы были продолжены в КрАО с 1993 по 2004 год (Skulsky and Plachinda, 2004) (рис. 11). Несмотря на большой массив данных ( $N = 44$ ) и наличие статистически значимых средних за ночь значений магнитного поля, установить характер переменности магнитного поля на этом временном интервале не удалось – подавляющее большинство измерений в пределах полученной точности лежало вблизи нуля. Неоднозначность поведения магнитного поля  $\beta$  Лир в разные годы требует дальнейшего исследования. Гипотетическими причинами могут стать: а) сложная геометрия поля на ярком, теряющем массу компоненте; б) отличие периода вращения яркого компонента от орбитального; в) физическая переменность магнитного поля.

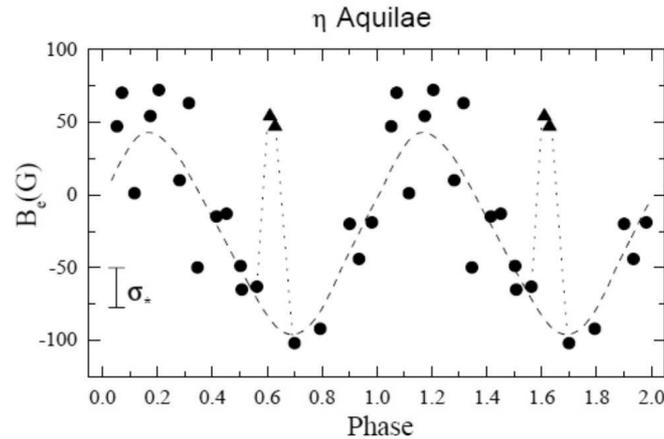
## 5 Переменность магнитного поля с периодом пульсаций

Современные наблюдательные данные и результаты теоретических исследований показали, что магнитные поля оказывают фундаментальное влияние на эволюцию массивных звезд, их вращение, структуру, динамику и истечение звездного ветра. Поэтому в последнее десятилетие значительно возросло количество исследований, посвященных магнитным полям массивных звезд. Отдельный интерес представляют особенности магнитных полей массивных пульсирующих переменных. Поскольку у этих звезд обнаружены магнитные поля, то возникает вопрос: как ведет себя магнитное поле, вмороженное в пульсирующую атмосферу с ее крупномасштабными движениями, ударными волнами и т. п.? С 1990-х годов в КрАО было выполнено несколько долгосрочных проектов исследования магнитных полей пульсирующих звезд. Уникальность крымских исследований прежде всего в том, что получены длительные временные ряды измерений магнитного поля, неоднократно перекрывающие пульсационные циклы.

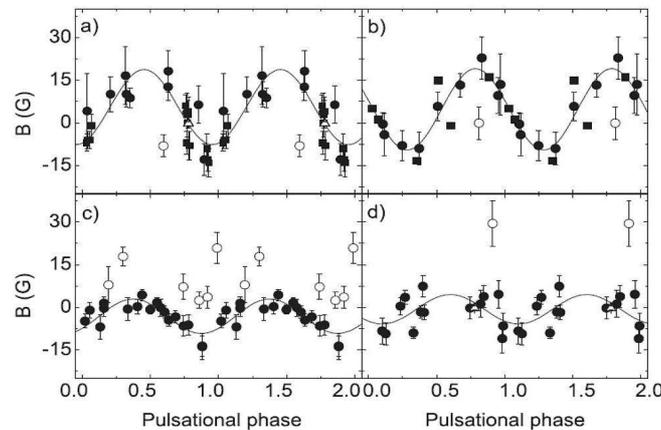
### 5.1 Классическая цефеида $\eta$ Aql

Классические цефеиды – радиально пульсирующие желтые сверхгиганты, пульсации которых вызваны накоплением, с последующим прорывом наружу, энергии в слое ионизованного гелия из-за изменения его непрозрачности. Первое исследование переменности магнитного поля с периодом

пульсаций было выполнено в КрАО для классической цефеиды  $\eta$  Aql (Sp F6Iab) в конце 90-х годов. Plachinda (2000) обнаружил с достоверностью 95 % по критерию Фишера, что магнитное поле пульсирующего сверхгиганта изменяется в диапазоне от  $-100$  до  $50$  Гс с фазами 7.176726-дневного периода пульсаций, причем в соседние даты на фазе 0.6 наблюдаются резкие, сопровождающиеся сменой знака отклонения значений магнитного поля от общей кривой, которые могут быть связаны с прохождением ударных волн (рис. 12). Спектрополяриметрические наблюдения  $\eta$  Aql были продолжены в КрАО в 2002–2012 годах. Новые исследования подтвердили переменность магнитного поля цефеиды с периодом пульсаций, а также выявили, что амплитуда пульсационной переменности и фазы экстремумов поля изменяются от года к году (рис. 13).



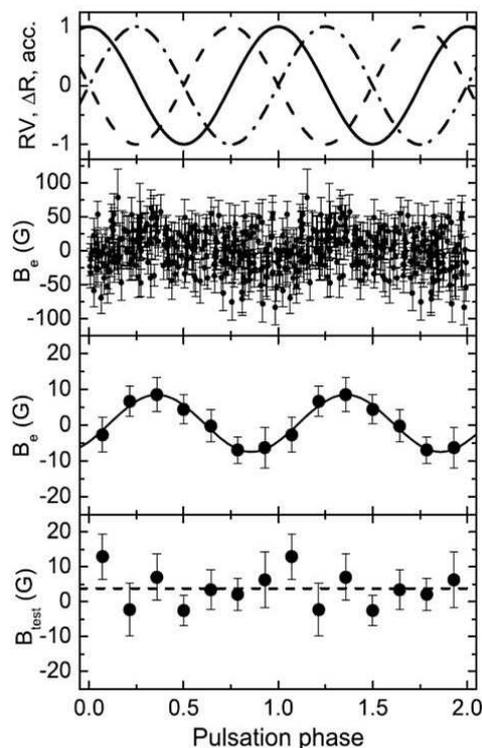
**Рис. 12.** Переменность продольного магнитного поля  $\eta$  Aql с фазами 7.176726-дневного периода пульсаций. Рисунок из работы Plachinda and Tarasova (2000)



**Рис. 13.** Переменность продольного магнитного поля  $\eta$  Aql с фазами 7.176726-дневного периода пульсаций в 2002–2012 годах: а) заполненные и открытые кружки: наблюдения 2002 года в КрАО, квадраты: данные из работы Wade et al. (2002), треугольники: данные из Grunhut et al. (2010); б) заполненные и открытые кружки: наблюдения 2004 года в КрАО, квадраты: данные из работ Borra et al. (1981) и Borra et al. (1984); в) заполненные и открытые кружки: наблюдения 2010 года в КрАО; д) заполненные и открытые кружки: наблюдения 2012 года в КрАО, треугольники: данные Grunhut et al. (2010). Аппроксимационные кривые показаны сплошными линиями. Рисунок из работы Butkovskaya (2014)

## 5.2 $\gamma$ Peg – низкоамплитудная пульсирующая переменная типа $\beta$ Cep

В отличие от высокоамплитудной классической цефеиды  $\eta$  Aql,  $\gamma$  Peg (Sp B2IV) – одна из самых низкоамплитудных пульсирующих переменных типа  $\beta$  Cep. Переменность магнитного поля  $\gamma$  Peg с



**Рис. 14.**  $\gamma$  Peg. Верхняя панель: кривые лучевых скоростей (сплошная линия), ускорения (штрих-пунктирная линия) и изменения радиуса (пунктирная линия). На следующих трех панелях представлены значения магнитного поля, рассчитанные по отдельным экспозициям; значения магнитного поля, усредненные по 7 интервалам (бинам) пульсационного периода (аппроксимационная синусоида, проведенная методом наименьших квадратов показана сплошной линией); усредненное по 7 бинам тестовое (“нулевое”) поле (аппроксимационная прямая показана сплошной линией). Рисунок из работы [Butkovskaya and Plachinda \(2007\)](#)

периодом пульсаций была впервые обнаружена [Butkovskaya and Plachinda \(2007\)](#) благодаря многолетним спектрополяризметрическим наблюдениям (рис. 14). Только имея множество наблюдательных дат, которые перекрывают  $\sim 3.8$ -часовой период пульсаций, удалось зарегистрировать слабую пульсационную переменность магнитного поля с полной амплитудой  $\sim 7$  Гс.

### 5.3 BW Vul – влияние мощных ударных волн на магнитное поле

BW Vul (Sp B2III) – еще одна пульсирующая переменная типа  $\beta$  Cep. BW Vul пульсирует в радиальной моде, но, в отличие от низкоамплитудной  $\gamma$  Peg, имеет наибольшие в этом классе звезд амплитуды изменения блеска и лучевых скоростей. В течение пульсационного цикла в атмосфере звезды образуются мощные ударные волны, заметно искажающие форму и приводящие к разрывам кривой лучевых скоростей. Поведение магнитного поля BW Vul с периодом пульсаций было исследовано в работе [Butkovskaya et al. \(2017b\)](#) по наблюдениям из открытой базы данных 3.6-м телескопа CFHT (ESPADONS). Низкое отношение сигнал/шум поляризованных спектров не позволило с необходимой точностью оценить величину магнитного поля. Но фазовые кривые магнитного поля, построенные по разным спектральным линиям, позволили сделать вывод, что магнитное поле демонстрирует сложное поведение с периодом пульсаций. На ряде кривых было заметно существенное усиление магнитного поля на фазах предполагаемого прохождения ударных волн, причем кривые, построенные по разным спектральным линиям, демонстрировали изменение в противофазе. Здесь следует отметить, что похожее сложное поведение было зарегистрировано и у 1 Mon – переменной типа  $\delta$  Scu ([Baklanova et al., 2017](#)).

## 6 Заключение

В настоящем обзоре изложена более чем полувековая история формирования и работы крымской научной школы высокоточных спектрополяриметрических исследований магнитных полей звезд. Фундамент исследований звездного магнетизма в Крыму был заложен А.Б. Северным, В.Е. Степановым и Д.Н. Рачковским.

С 80-х годов 20-го века в КраО выполняются регулярные спектрополяриметрические наблюдения невырожденных звезд разных спектральных классов и типов светимостей: горячих звезд, звезд с конвективными оболочками, классических магнитных химически пекулярных звезд, пульсирующих звезд и др. В обзоре приведен ряд результатов исследования магнитных полей разных объектов, впервые полученных в КраО в разные годы.

В настоящее время исследование магнитных полей звезд является одним из важных научных направлений в КраО. Современный набор инструментов (эшельный спектрограф ЭСПЛ, ПЗС-матрица, анализатор круговой поляризации – стоксметр) позволяет выполнять спектрополяриметрические наблюдения ярких звезд до  $5-6^m$ . Поляриметрический режим спектрографа ЭСПЛ в фокусе куде включен Национальным комитетом по тематике российских телескопов (НКТРТ) в список научных программ, поддерживаемых на 2.6-м телескопе ЗТШ. В КраО отдается предпочтение долгосрочным наблюдательным программам, позволяющим исследовать переменность магнитного поля на разных временных интервалах (часы, дни, годы).

Новый век выдвигает новые научные вызовы: в связи с массовым открытием экзопланет становится актуальной задача поиска жизни в других планетных системах. Одним из важных критериев возможности зарождения и эволюции жизни на планете является достаточно низкий уровень активности родительской звезды, ответственным за которую является магнитное поле. Это делает прямые измерения магнитных полей необходимым инструментом не только при изучении физики звезд, но и при поиске потенциально обитаемых планет.

## Литература

- Гершберг Р.Е., 2015. Активность солнечного типа звезд главной последовательности. Симферополь: Антиква. [Gershberg R.E., 2015. Solar-Type Activity in Main-Sequence Stars. Simferopol: Antikva. (In Russ.)]
- Гершберг Р.Е., Клиорин Н.И., Пустильник Л.А., Шляпников А.А., 2020. Физика звезд средних и малых масс с активностью солнечного типа. Москва: ФИЗМАТЛИТ. [Gershberg R.E., Kleeorin N.I., Pustil'nik L.A., Shlyapnikov A.A., 2020. Physics of middle- and low-mass stars with the solar-type activity. Moscow: FIZMATLIT. (In Russ.)]
- Лагутин А., Плачинда С., Шаховской Д., и др., 2019. Изв. Крым. Астрофиз. Обсерв. Т. 115. № 1. С. 53–62. [Lagutin A.F., Plachinda S.I., Shakhovskoy D.N., et al., 2019. Izv. Krym. Astrofiz. Observ., vol. 115, no. 1, pp. 53–62. (In Russ.)]
- Обридко В.Н., Наговицын Ю.А., 2017. Солнечная активность, цикличность и методы прогноза. Спб.: Изд-во ВВМ. [Obridko V.N., and Nagovitsyn Yu.A., 2017. Solar activity, cyclicity and prognosis methods. St. Petersburg: ВВМ. (In Russ.)]
- Северный А.Б., Кувшинов В.М., Никулин Н.С., 1974. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 50. С. 3. [Severny A.B., Kuvshinov V.M., and Nikulin N.S., 1974. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 50, p. 3. (In Russ.)]
- Aurière M., Wade G.A., Konstantinova-Antova R., et al., 2009. *Astron. Astrophys.*, vol. 504, p. 231.
- Bailey J.D., Grunhut J., and Landstreet J.D., 2015. *Astron. Astrophys.*, vol. 575, p. A115.
- Baklanova D., Plachinda S., Mkrtychian D., Han I., Kim K.-M., 2011. *Astron. Nachr.*, vol. 332, p. 939.
- Baklanova D., Mkrtychian D., Plachinda S., Baklanov A., 2017. In Balega Y.Y., Kudryavtsev D.O., Romanyuk I.I., Yakunin I.A. (Eds), *Stars: From Collapse to Collapse, Proceedings of a Conference Held at Special Astrophysical Observatory, 2016*. Astron. Soc. Pac., San Francisco: ASP, p. 255.
- Bedford D.K., Chaplin W.J., Davies A.R., et al., 1995. *Astron. Astrophys.*, vol. 293, p. 377.
- Borra E.F. and Vaughan A.H., 1977. *Astrophys. J.*, vol. 216, p. 462.
- Borra E.F., Fletcher J.M., Poeckert R., 1981. *Astrophys. J.*, vol. 247, p. 569.
- Borra E.F., Edwards G., Mayor M., 1984. *Astrophys. J.*, vol. 284, p. 211.
- Butkovskaya V.V., Plachinda S.I., 2007. *Astron. Astrophys.*, vol. 469, p. 1069.

- Butkovskaya V., Plachinda S., Valyavin G, Baklanova D., Lee B.-C., 2011. *Astron. Nachr.*, vol. 332, p. 956.
- Butkovskaya V.V., 2014. *Bull. Crim. Astrophys. Observ.*, vol. 110, p. 80.
- Butkovskaya V.V., Plachinda S.I., Bondar' N.I., Baklanova D.N., 2017a. *Astron. Nachr.*, vol. 338, p. 896.
- Butkovskaya V.V., Plachinda S.I., Pankov N.F., 2017b. *Astron. Nachr.*, vol. 338, p. 938.
- Butkovskaya V.V. and Plachinda S.I., 2019. *Kinem. Phys. Celest. Bodies*, vol. 35, p. 95.
- Donati J.-F., Semel M., Carter B.D., et al., 1997. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 291, p. 658.
- Donati J.-F., Collier Cameron A., Semel M., et al., 2003. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 345, p. 1145.
- Donati J.-F., Landstreet J.D., 2009. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 47, p. 333.
- Gershberg R.E., 2005. *Solar-Type Activity in Main-Sequence Stars*. Berlin: Springer.
- Grunhut J.H., Wade G.A., Hanes D.A., Alecian E., 2010. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 408, p. 2290
- Johns-Krull C.M. and Valenti J.A., 1996. *Astrophys. J.*, vol. 459, p. L95.
- Johns-Krull C.M., Valenti J.A., Hatzes A.P., and Kanaan A., 1999a. *Astrophys. J.*, vol. 510, p. L41.
- Johns-Krull C.M., Valenti J.A., and Koresko C., 1999b. *Astrophys. J.*, vol. 516, p. 900.
- Han Inwoo, Valyavin G., Galazutdinov G., et al., 2018. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 479, p. 1427.
- Hubrig S., Plachinda S.I., Hunsch M., and Schroder K.-P., 1994. *Astron. Astrophys.*, vol. 291, p. 890.
- Kim K.-M., Han I., Valyavin G., et al., 2007. *Publ. Astron. Soc. Pacific.*, vol. 119, p. 1052.
- Kochukhov O., Bagnulo S., Wade G.A., et al., 2004. *Astron. Astrophys.*, vol. 414, p. 613.
- Merezhin V.P., 2001. *Vega: The Analysis and Interpretation of Observation Data*. Kazan.
- Plachinda S.I., 2000. *Astron. Astrophys.*, vol. 360, p. 642.
- Plachinda S.I., 2004a. *Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity*, Proc. IAU Symp. No. 223. Cambridge Univ. Press, p. 689.
- Plachinda S.I., 2004b. In Videen G., Yatskiv Ya.S., Mishhenko M.I. (Eds), *Photopolarimetry in Remote Sensing*. Kluwer Academic Publishers, p. 351.
- Plachinda S.I., 2005. *Astrophysics*, vol. 48, p. 9.
- Plachinda S.I., 2014. *Bull. Crim. Astrophys. Observ.*, vol. 110, p. 17.
- Plachinda S.I., and Tarasova T.N., 1999. *Astrophys. J.*, vol. 514, p. 402.
- Plachinda S.I., and Tarasova T.N., 2000. *Astrophys. J.*, vol. 533, p. 1016.
- Plachinda S., Shulyak D., Pankov N., 2019. *Astron. Astrophys. Trans.*, vol. 31, p. 323, [arXiv:1910.01501](https://arxiv.org/abs/1910.01501).
- Prysiashnyi A.I., Stodilka M.I., Shchukina N.G., 2018. *Kinem. Phys. Celest. Bodies*, vol. 34, p. 277.
- Rachkovsky D.N., 1962. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.* vol. 28, p. 259.
- Radick Richard R., Lockwood G.W., Skiff B.A., Baliunas S.L., 1998. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, vol. 118, p. 239.
- Saar S.H., 1994. In Rabin D.M. et al. (Eds), *Infrared Solar Physics*, IAU Symp. No. 154. Dordrecht: Kluwer, p. 493.
- Saar S.H., and Linsky J.L., 1985. *Astrophys. J.*, vol. 299, p. L47.
- Semel M., Donati J.-F., and Rees D.E., 1993. *Astron. Astrophys.*, vol. 278, p. 231.
- Severny A., 1970. *Astrophys. J.*, vol. 159, p. L73.
- Skulsky M.Yu., 1982. *Pis'ma Astron. Zh.*, vol. 8, p. 238.
- Skulsky M.Yu., and Plachinda S.I., 2004. *The A-Star Puzzle*. IAU Symposium No. 224. Cambridge Univ. Press, p. 119.
- Tarasova T.N., 2002. *Astron. Rep.*, vol. 46, p. 474.
- Tarasova T.N., Plachinda S.I., and Rumyantsev V.V., 2001. *Astron. Rep.*, vol. 45, p. 475.
- Vasil'yev I.A., Merezhin V.P., Nalimov V.N., Novosyolov V.A., 1989. *Inf. Bull. Var. Stars*, no. 3308.
- Wade G.A., Chadid M., Shorlin S.L.S., Bagnulo S., and Weiss W.W., 2002. *Astron. Astrophys.*, vol. 392, p. L17.

# Investigations of space magnetism at the Crimean Astrophysical Observatory.

## II. Direct spectropolarimetric measurements of stellar magnetic fields

*S. Plachinda, V. Butkovskaya*

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409  
*psi@craocrimea.ru*

**Abstract.** The research on stellar magnetism in the Crimea was initiated by pioneer works of A.B. Severny, V.E. Stepanov, and D.N. Rachkovsky. Today, the study of stellar magnetic fields is a key field of research at the Crimean Astrophysical Observatory (CrAO). The 2.6 m Shajn telescope equipped with the echelle spectrograph ESPL, CCD, and Stokesmeter (a circular polarization analyzer) allows us to study the magnetic field of bright stars up to  $5^m$ – $6^m$ .

The Single Line (SL) technique is developed for measuring magnetic fields at CrAO. This technique is based on the calculation of Zeeman effect in individual spectral lines. A key advantage of the SL technique is its ability to detect local magnetic fields on the surface of stars.

Many results in the field of direct measurements of stellar magnetic fields were obtained at CrAO for the first time. In particular, the magnetic field on supergiants ( $\epsilon$  Gem), as well as a number of subgiants, giants, and bright giants was first detected. This, and investigations of other authors, confirmed the hypothesis that a magnetic field is generated at all stages of the evolution of late-type stars, including the stage of star formation. The emergence of large magnetic flux tubes at the surface of stars of V-IV-III luminosity classes (61 Cyg A,  $\beta$  Gem,  $\beta$  Aql) was first registered. For  $\beta$  Aql, the behavior of a magnetic field with an activity cycle in subgiants was first established. Using long-term Crimean spectroscopic and spectropolarimetric observations of  $\alpha$  Lyr, the 22-year variability cycle of the star, supposedly associated with meridional flows, is confirmed. Magnetic field variability with the pulsation period was first detected for different types of pulsating variables: the classical Cepheid  $\beta$  Aql, the low-amplitude  $\beta$  Cep-type variable  $\gamma$  Peg, and others.

In this review we cover more than a half-century history of the formation of the Crimean scientific school for high-precision direct measurements of stellar magnetic fields.

**Key words:** Magnetic fields, polarization, instrumentation: polarimeters, stars: atmospheres, stars: magnetic fields