

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук
(САО РАН)

УДК 520; 523.3; 523.9; 524
№ АААА-А18-118012390325-5



ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
по проекту «ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
СР-ЗВЕЗД С МЕДЛЕННЫМ ВРАЩЕНИЕМ» программы ОФН-17 «Активные
процессы в галактических и внегалактических объектах»
(Заключительный)

Отчет принят на заседании ученого совета САО РАН 26 декабря 2017 года
(протокол №359).

Нижний Архыз
2017

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы

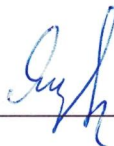
с.н.с., к.ф-м.н.



Е. А. Семенко (введение, разделы 1-2,
заключение)

Исполнители темы

н.с, к.ф-м.н.



И. А. Якунин (раздел 1)

Нормоконтролер



Узденова Ш.А.

РЕФЕРАТ

Отчет 19 с., 8 рис., 1 прил.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ, ЗВЕЗДНЫЕ АТМОСФЕРЫ

Цель работы – осуществление научной и научно-технической деятельности, в том числе проведение фундаментальных, поисковых и прикладных исследований, в области астрономии и астрофизики.

В рамках программ «Спектроскопия и спектрополяриметрия пульсирующих А-звезд» и «Изучение особенностей строения магнитных полей СР-звезд с медленным вращением» на телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН в течение 2015-2017 г.г. были проведены наблюдения и выполнен анализ спектров звезд HD 73045, HD 118660 и HD 201174, которые относятся к категории переменных А-звезд с аномалиями химического состава.

Измерения лучевой скорости звезды HD 73045 по спектрам, полученным на БТА в течение 4 часов непрерывных наблюдений в 2015 г., обнаружили колебания положения линии водорода $H\alpha$ с неизвестным периодом и невыясненным происхождением.

Изучение серии спектров, полученных в течение одной ночи наблюдений со спектрографом ОЗСП на телескопе БТА, показало присутствие значимой спектральной переменности звезды HD 118660. Наблюдаемые искажения профилей характерны для звезд типа δ Sct. Природа пульсаций этой звезды спектральными методами была подтверждена нами впервые.

Итогом анализа длительных рядов наблюдений звезды HD 201174 стало точное определение периода вращения звезды по изменениям значения продольного магнитного поля. Найденное значение $P_{\text{rot}} = 2.43002$ сут. Впервые выполнена оценка основных параметров диполя, описывающих строение магнитного поля этой звезды.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. СПЕКТРОСКОПИЯ И СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЯ ПУЛЬСИРУЮЩИХ А-ЗВЕЗД.....	8
1.1 Анализ спектральной переменности звезды HD 73045.....	8
1.2 Изучение спектральной переменности звезды HD 118660.....	13
2. ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СР-ЗВЕЗД С МЕДЛЕННЫМ ВРАЩЕНИЕМ.....	15
2.1. Магнитное поле звезды HD 201174 и его строение в дипольном приближении	15
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	17
ПРИЛОЖЕНИЕ А	19
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ	19

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

БТА – Большой телескоп альт-азимутальный

ОЗСП – Основной звездный спектрограф

СР – химически пекулярный (chemically peculiar)

LSD – Least-Squares Deconvolution

SNR – отношение сигнал/шум (signal-to-noise ratio)

ВВЕДЕНИЕ

Изучение звездных атмосфер методами астрофизики занимает важнейшее место в современной науке. Эти исследования, помимо расширения наших знаний об устройстве и эволюции самих звезд, позволяют проводить уникальные работы по изучению свойств плазмы в условиях, которые нельзя реализовать в наземных лабораториях. Наблюдаемые проявления нестационарных процессов, которые протекают в недрах звезд или в их атмосферах, приводят к возникновению феномена переменных звезд. Последний заключается в периодическом или квазипериодическом изменении блеска звезды, ее лучевой скорости, магнитного поля (при его наличии), глубины и профилей спектральных линий.

В области эффективных температур 7000-15000 К встречаются звезды, часто с отклонениями в содержании химических элементов в ту или иную сторону по сравнению с Солнцем, которые демонстрируют переменность наблюдаемых характеристик. У более холодной группы пекулярных звезд с эффективной температурой до 9000 К переменность блеска и лучевой скорости может проявляться в виде пульсаций. Изучение распространения колебаний в веществе звезд является основной целью астросейсмологии. Природа колебаний блеска и лучевых скоростей звезд разного типа в общих чертах понятна, но даже в настоящее время среди одних и тех же подклассов выделяются новые типы переменных звезд [1]. Это не позволяет точно оценить частоту встречаемости переменных химически пекулярных звезд среди звезд в том же диапазоне эффективных температур. В настоящее время считается, что только 10-15% А- и В-звезд Главной последовательности относятся к химически пекулярным или CP-звездам, значительная часть которых обнаруживает присутствие магнитного поля и показывает сильную спектральную и фотометрическую переменность, тогда как у остальных представителей CP-звезд колебания блеска могут быть крайне слабо выраженными, а магнитное поле и вовсе не обнаруживается с точностью в десятки гаусс.

Одновременное присутствие звезд с богатым и разнообразным набором физических параметров в одном и том же диапазоне температур позволяет изучать особенности механизмов, ответственных за наблюдательные проявления звездной переменности.

Цель наших исследований заключается в проверке методами спектроскопии присутствия пульсаций у звезд, которые ранее были классифицированы другими исследователями, как переменные по изменениям блеска. Особый интерес представляют звезды с коротким периодом пульсаций (γ Orp и переменные типа δ Щита) или со значимой переменностью спектральных линий и сильным магнитным полем там, где оно обнаружено. Для этого в течение 2015-2016 г.г. было инициировано изучение двух звезд: HD 73045 (раздел 1.1) и HD 118660 (раздел 1.2). Обе звезды наблюдались на БГА в разное время в режиме продолжительного

мониторинга (время мониторинга до 4 часов) на спектрографе ОЗСП с использованием поляриметрической приставки в сочетании с резателем изображений. Обработка наблюдательного материала была выполнена стандартным образом в системе ESO-MIDAS. Анализ спектров на предмет переменности профилей проведен с применением программ из состава системы IRAF и ряда программ, написанных авторами исследования на языке Python. Одновременно, обнаружение слабого магнитного поля у пульсирующих звезд типа δ Щита европейскими учеными [4], побудило нас обратить внимание на изучение звезд, у которых обнаружено магнитное поле, но эффективная температура еще позволяет ожидать существования короткопериодических пульсаций. С этой целью в 2017 г. была начата программа исследования строения магнитных полей у ряда звезд, которые показывают переменность блеска и формы спектральных профилей. Для изучения была выбрана звезда HD 201174 (раздел 2.1), эффективная температура которой находится у верхней границы температур пульсирующих звезд.

1. СПЕКТРОСКОПИЯ И СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЯ ПУЛЬСИРУЮЩИХ А-ЗВЕЗД

1.1 Анализ спектральной переменности звезды HD 73045

Звезда HD 73045 была предложена для изучения коллегами из Института наблюдательных наук им. Арьябатты (Индия). Эта звезда рассматривалась в качестве объекта исследований в рамках совместного индо-российского проекта, выполнявшегося в течение 2012-2014 г.г., но из-за нехватки наблюдательного материала ее изучение не было закончено и не вошло в итоговую выборку звезд, изученных в проекте [3].

HD 73045 ($m_V = 8.6$, спектральный класс Am) относится к химически пекулярным звездам с усиленными линиями металлов. Данный объект исследования представляет собой переменную звезду с пульсациями блеска, характерными для звезд типа δ Щита с основным периодом 1.5 часа. Однако анализ длительных рядов фотометрических наблюдений, в том числе и с космического аппарата Kepler, показал существование периода изменения блеска $P = 13.01$ сут. и нескольких близких гармоник (6.5 и 19.73 сут.). Объяснить такие изменения в рамках принятой теории звездных пульсаций нельзя. Ключ к разгадке может заключаться в двойственности, где HD 73045 – один из компонентов относительно широкой двойной (или даже кратной) системы. Указания на двойственность звезды в литературе имеются: в работе [2] говорится, что HD 73045 – двойная система типа SB1 с возможным орбитальным периодом в пределах от 50 до 800 дней. Анализ фотометрических данных показывает интересную особенность: кривая блеска звезды, основанная на данных со спутника Kepler показывает модуляцию, соответствующую периоду 13.01 сут. Такое же значение периода ранее уже было найдено другими авторами и в данном случае получило независимое подтверждение. В то же самое время, HD 73045 наблюдалась и аппаратом STEREO, период наблюдений охватывает 2008-2014 г.г. Данные этого спутника показали существование более короткого периода изменения блеска – 1.25 сут. Этот, более короткий период, может характеризовать вращение звезды и возникать вследствие неравномерного распределения химических элементов по поверхности звезды. Пятна химического состава в основном характерны для A/B-звезд с сильным магнитным полем. Наша часть работы в рамках более широкого изучения звезды заключалась в проверке присутствия магнитного поля на поверхности звезды и в поиске значимой спектральной переменности, которую можно было бы ассоциировать либо с вращением звезды, либо с пятнами в ее атмосфере.

В марте 2015 г. (3.03, 5.03 и 8.03) были проведены первые наблюдения звезды в режиме спектрополяриметрии на телескопе БТА. Аналогичные по типу данные были получены год спустя, 21 марта 2016 г., на том же приборе. Весь полученный спектральный материал был обработан одинаковым образом с применением одного и того же набор программ.

Три момента наблюдений (JD2457085.435, JD2457087.422 и JD2457469.220) не показали присутствия магнитного поля с точностью до 40 Гс при использовании трех методов измерения, оценивающих как позиционные сдвиги поляризованных спектров с аппроксимацией линий функциями Гаусса, так и тех, где извлекается информация из V-параметра Стокса (регрессионный метод Баньюло, Least-Squares Deconvolution). Спектры звезды богаты узкими линиями, что позволяет для анализа использовать более 200 линий в одном спектре. Пример параметров V и I Стокса для звезды HD 73045 по нашим наблюдениям представлен на рис. 1.

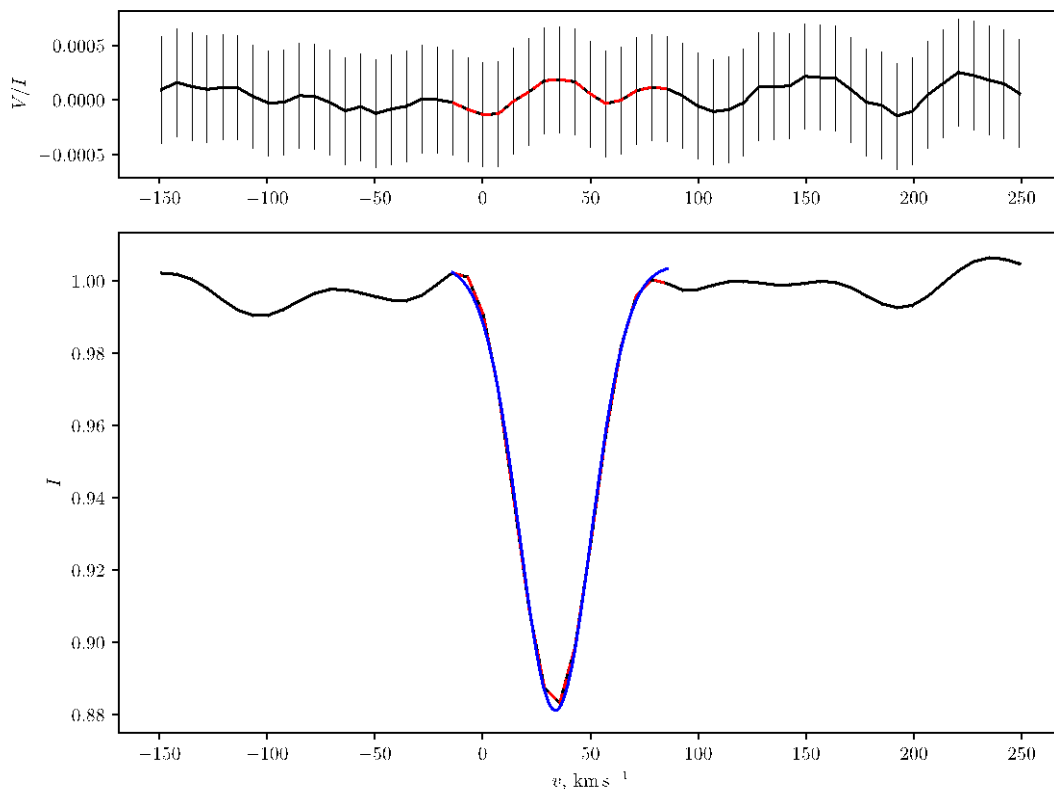


Рис. 1. Нормированный V и средний I параметры Стокса звезды HD 73045 по данным наблюдений на ОЗСП. Продольное поле составляет -5 ± 40 Гс. Синим цветом показана функция, аппроксимирующая средний профиль.

Наблюдения в виде серии спектров длиной почти 4 часа были проведены 8 марта 2015 г. Измерение лучевых скоростей в спектрах серии показало переменность лучевой скорости линии водорода H_{α} , которая может быть вызвана как процессами, связанными с самой звездой, так и инструментальной нестабильностью спектрографа. Отследить дрейф шкалы длин волн спектрографа можно получив в течение ночи нескольких спектров, измерив их относительное смещение и проинтерполировав эту величину на моменты времени наблюдений. В качестве реперов можно использовать и теллурические линии. После учета смещения шкалы по линиям водяного пара (рис. 2, левый график), связанным с наличием в атмосфере Земли воды, переменность лучевой скорости все равно остается (рис. 2, правый график). Период изменения

лучевой скорости по нашим данным ожидается в пределах 7 часов. Таким образом, полученных нами данных недостаточно для уверенного заключения о природе спектральной переменности.

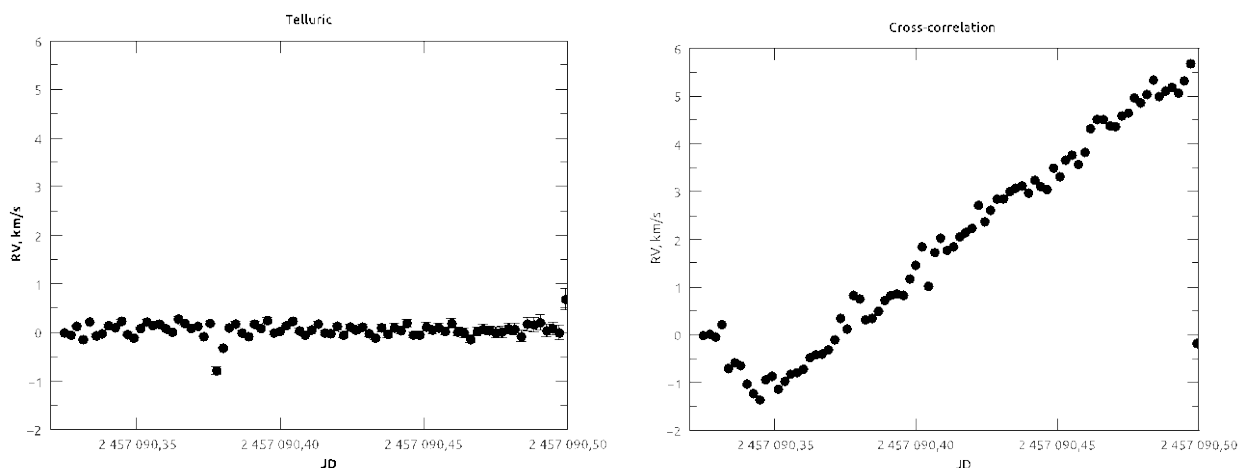


Рис. 2. Изменение лучевой скорости теллурических линий (слева) и линии H α в спектрах HD 73045 после учета эффектов инструментальной нестабильности спектрографа ОЗСП.

С другой стороны, мы изучили, как меняются средние LSD-профили со временем методом динамических спектров. В этом методе рассматривается остаточный сигнал после вычитания усредненного спектра. Такой подход позволяет исключить крупные фрагменты спектральных линий и выделить слабые детали их профилей. Динамический спектр звезды HD 73045 по данным наблюдений на ОЗСП 8 марта 2015 г. представлен на рис. 3-4. Хорошо видно, что в среднем профиле, несмотря на его узость, наблюдается изменение глубины. Впрочем, установить период этих изменений все равно не представляется возможным. Работа по исследованию звезды была продолжена в сотрудничестве с индийскими и бельгийскими учеными в последующие годы с привлечением данных наблюдений со спектрографа HERMES, работающего на о. Ла Пальма (Испания). Анализ спектров высокого разрешения на данный момент практически завершен и готовится совместная статья для подачи в журнал *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Предварительные результаты представлялись на конференции, посвященной проекту VINA в г. Наинитал (ARIES) в ноябре 2016 г.

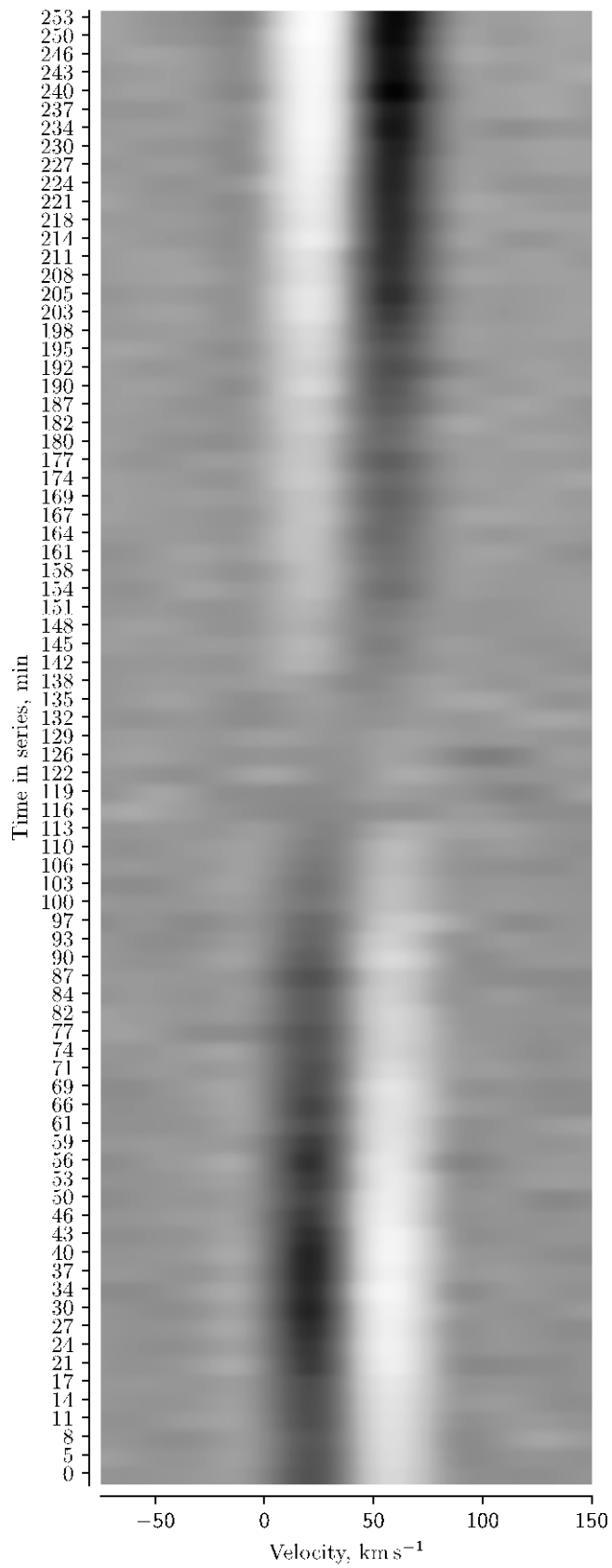


Рис. 3. Динамический спектр звезды HD 73045 по данным наблюдений на спектрографе ОЗСП в марте 2015 г.

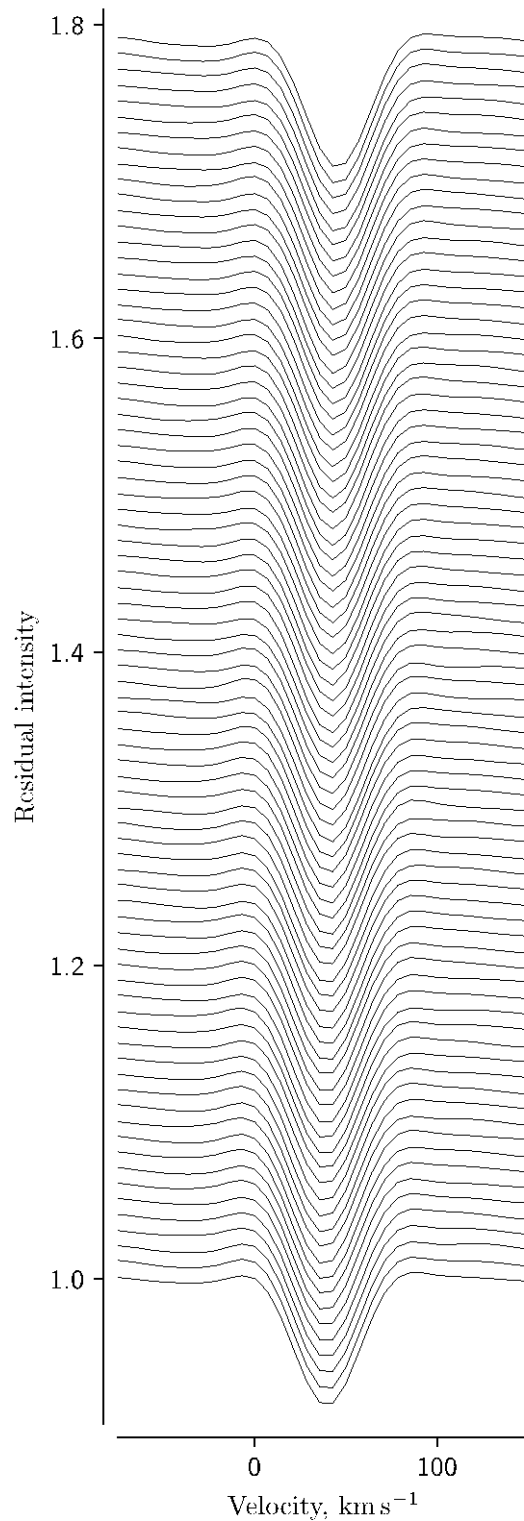


Рис. 4. Средний LSD-профиль спектров звезды HD 73045 по данным наблюдений на спектрографе ОЗСП в марте 2015 г. (по времени получения снизу-вверх аналогично рис. 3).

1.2 Изучение спектральной переменности звезды HD 118660

В работе по изучению физических параметров выборки переменных звезд типа \square Щита [3] HD 118660 привлекла внимание сильной переменностью отдельных линий в спектрах,

полученных последовательно с интервалом 3 минуты. Характер изменения профилей типичен для пульсирующих звезд, но у звезд типа Am, к которым относится HD 118660 амплитуда спектральной переменности обычно очень мала. Мы провели наблюдения звезды, получив на БТА со спектрографом ОЗСП серию из 20 спектров, следующих непрерывно друг за другом. Анализ наблюдательных данных для выборки из 15 линий (звезда быстро вращается ($v \sin i = 110$ км/с) и немногочисленные линии сильно уширены) методами кросс-корреляции и сравнением индивидуальных профилей со средним не показали какой-либо значимой переменности (рис. 5, левый график). Различия в интенсивности в области ядра линий объясняются слабыми накоплениями, что связано с требованиями к продолжительности индивидуальных экспозиций и неблагоприятными погодными условиями в ночь наблюдений. На рис. 5 правый график содержит профили линии Fe II 4508.28 Å отмеченные зеленой сплошной линией и усредненный профиль по всей серии – красная сплошная линия.

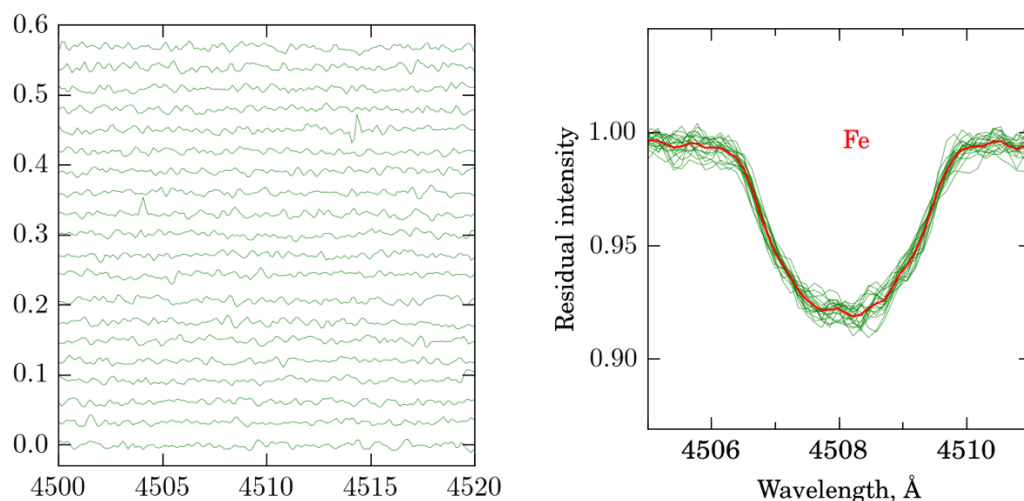


Рис. 5. Левый график – разности (со смещением) между индивидуальными спектрами HD 118660 и средним по серии в порядке увеличения времени с начала серии снизу вверх. По оси абсцисс – шкала длин волн в ангстремах. Правый график содержит индивидуальные профили линии Fe II 4508.28 Å (зеленые линии) и средний профиль, рассчитанный для всей серии (красная линия).

Улучшить результаты можно применением метода LSD к спектрам со слабым накоплением. Для этого нами была отобрана маска линий адекватная спектральному классу звезды (A9) и восстановлены средние профили I-параметра Стокса. В динамическом спектре звезды (рис. 6) после вычитания усредненного профиля отчетливо проступили «бегущие» структуры в профиле линий, распространяющиеся с течением времени в профиле слева-направо. Такой характер искажений является характерным для пульсирующих звезд типа δ Щита. Таким образом, нами впервые спектральным методом подтверждена природа пульсаций звезды HD 118660. Надо отметить, что эта звезда из-за своего блеска ($m_V=6.5$) представляет особый интерес

для астросейсмологических исследований, будучи одним из самых ярких пульсаторов такого типа на небе. В мае 2017 г. по заявке индийских коллег были проведены дополнительные наблюдения на БТА, уже со спектрографом НЭС. Новые материалы после завершения анализа будут включены в совместную статью. Предварительные результаты исследования были представлены в виде стендового доклада на конференции VINA в Индии в 2016 г.

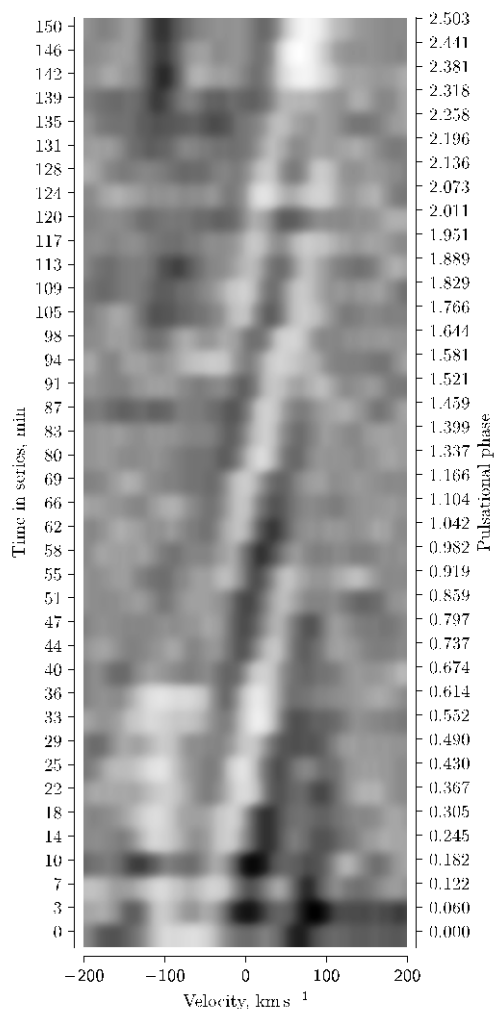


Рис. 6. Динамический спектр звезды HD 118660 по данным наблюдений на ОЗСП. Волнообразные структуры в профиле характерны для пульсирующих звезд типа δ Щита.

2. ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СР-ЗВЕЗД С МЕДЛЕННЫМ ВРАЩЕНИЕМ

2.1. Магнитное поле звезды HD 201174 и его строение в дипольном приближении

Магнитное поле химически пекулярной звезды HD 201174 было впервые обнаружено в наблюдениях со спектрографом ОЗСП 6-м телескопа в 2006 г. С тех пор звезда регулярно наблюдалась методами спектрополяриметрии. Цель этого мониторинга – определение периода вращения звезды, основных параметров продольного магнитного поля звезды и, как следствие, определение геометрии ее глобального магнитного поля.

К настоящему времени накоплен большой массив измерений продольного магнитного поля звезды. Мы использовали только результаты, полученные с применением классического позиционного метода, в котором величина зеемановского уширения спектральных линий определяется положением зеемановских компонентов в циркулярно-поляризованных спектрах, и по методу, предложенному Баньюло, в котором измеряется непосредственно сигнал круговой поляризации. Всего для анализа отобрано 42 измерения, последние из которых были выполнены в 2017 г. Оба набора данных дают в качестве наиболее вероятного значение периода вращения 2.43002 сут. (рис. 7).

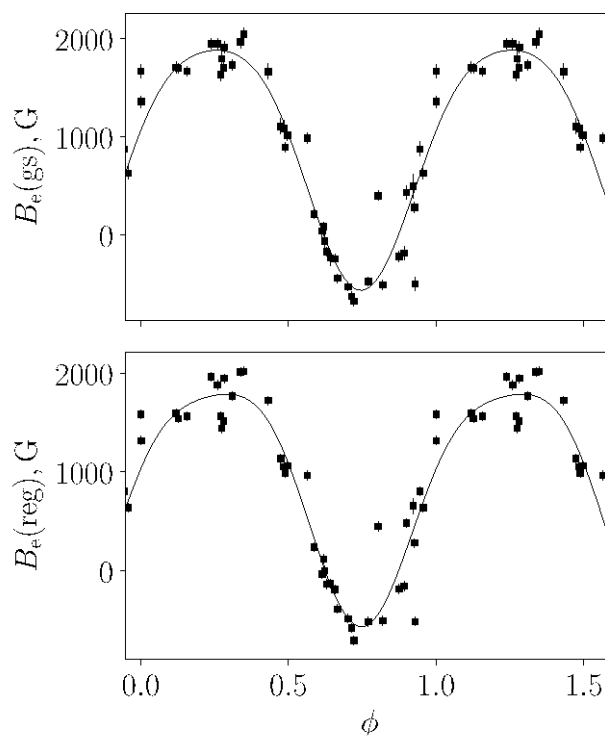


Рис. 7. Кривые переменности продольного магнитного поля звезды HD 201174, измеренного двумя методами, с фазой периода вращения $P = 2.43002$ сут.

Обращает на себя внимание высокая точность одиночных измерений и значительное рассеяние данных относительно аппроксимирующей гармонической функции. Точность измерений достигается за счет большого количества линий (порядка 200) на участке спектра 4460-4970 Å и слабого уширения линий вращением, $v \sin i = 29 \pm 3$ км/с. Рассеяние с одной стороны объясняется точностью определения периода, а с другой – многочисленными признаками эффекта кроссовер, когда зеемановская картина определяется сразу несколькими полюсами, одновременно наблюдаемыми в данный момент времени.

Принимая во внимание границы изменения магнитного поля звезды и ее проекцию скорости вращения на луч зрения, можно оценить геометрию глобального магнитного поля в дипольном приближении. Наилучшее согласие с наблюдениями достигается в модели, где магнитное поле на полюсе диполя достигает 7 кГс, ось вращения звезды наклонена к лучу зрения на угол $i = 45^\circ$, а угол β между осью вращения звезды и осью диполя составляет 60° . Данная модель не просто хорошо описывает наблюдения, но и хорошо объясняет почти постоянное присутствие кроссовер-эффекта в поляризованных спектрах. Модель магнитного поля звезды представлена на рис. 8. Левая часть рисунка показывает распределение величины продольного магнитного поля по диску звезды, тогда как на правой представлена ориентация силовых линий магнитного поля.

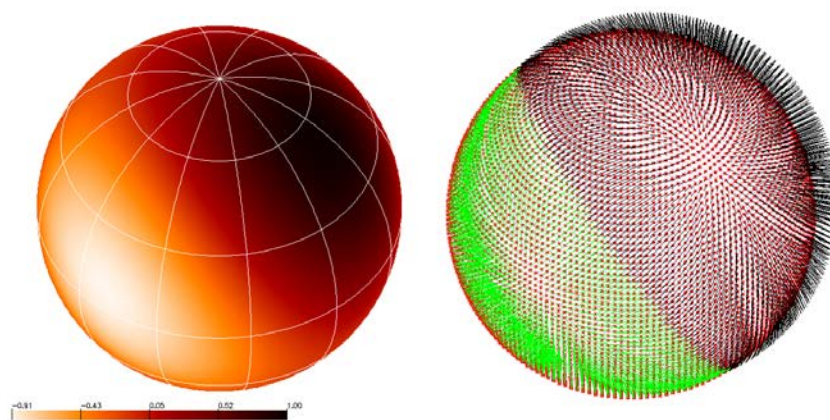


Рис. 8. Модель строения магнитного поля звезды HD 201174. Звезда изображена в фазе, когда угол между осью диполя и лучом зрения составляет 110° . Визуализация создана с помощью программы `Field_plot`, написанной О. Kochukhov для языка IDL.

Результаты исследования были представлены на конференции «Stars with a stable magnetic field: from pre-main sequence to compact remnants», которая проходила с 28 августа по 1 сентября 2017 г. в г. Брно (Чехия)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы выполнили изучение спектральной переменности двух звезд – HD 73045 и HD 118660, которые относятся к пульсирующим переменным типа δ Щита. В случае HD 73045 были выявлены изменения в форме профиля линии H β колебания лучевой скорости линии с амплитудой около 7 км/с. Правильность учета эффектов нестабильности оборудования была проверена путем измерения лучевой скорости теллурических линий, которые формируются в атмосфере Земли. Характер наблюдаемых изменений лучевой скорости звезды подразумевает существование периода около 7 часов. Проверить это предположение можно только в новых наблюдениях большей продолжительности.

Звезда HD 118660 в ранних наблюдениях показала переменность отдельных профилей, которую можно связать с существованием пульсаций в атмосфере звезды. До того звезда была известна, как переменная типа δ Щита, однако методами спектроскопии с высоким временным разрешением детально не изучалась. Мониторинг звезды на спектрографе ОЗСП в течение 2.5 часов не показал значимой переменности в отдельных линиях по причине слабых накоплений (SNR=200) одиночных спектров. Применение метода LSD позволило повысить итоговое отношение сигнал/шум за счет усреднения многих линий, что в конечном итоге привело к обнаружению характерных искажений в среднем профиле, свойственных переменным звездами типа δ Щита. Таким образом, для этой яркой переменной звезды впервые было подтверждено присутствие пульсаций в спектрах.

Опираясь на многолетние ряды наблюдений звезды на телескопе БТА в режиме спектрополяриметрии, был установлен период вращения звезды HD 201174: $P_{\text{rot}} = 2.43002$ сут. Наблюдаемые характеристики звезды и известная величина вращательного уширения позволили построить модель общего магнитного поля звезды в дипольном приближении. Основные параметры модели следующие: $B_d = 7000$ Гс, $i = 45^\circ$, $\beta = 60^\circ$. В таком случае удастся достичь хорошей точности в описании продольного магнитного поля звезды, принимающего значения от -600 Гс до $+2000$ Гс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Balona L. A., Engelbrecht C. A., Joshi Y. C., Joshi S., Sharma K., Semenko E., Pandey G., Chakradhari N. K., Mkrtychian David, Hema B. P., Nemeč J. M. / The hot γ Doradus and Maia stars // MNRAS, 2016, 460, 1318-1327.
2. Budaj, J. / On the nature of the Am phenomenon or on a stabilization and the tidal mixing in binaries. Orbital periods and rotation // Astron. Astrophys., 1996, 313, 523-531.
3. Joshi S., Semenko E., Moiseeva A., Sharma K., Joshi Y. C., Sachkov M., Singh H. P., Kumar Y. B. / High-resolution spectroscopy and spectropolarimetry of selected γ -Sct pulsating variables // MNRAS, 2017, 467, 633-645.
4. Neiner C., Lampens P. / First discovery of a magnetic field in a main-sequence δ Scuti star: the Kepler star HD 188774 // MNRAS, 2015, 454, L86-L90.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

В ИНОСТРАННЫХ РЕФЕРИРУЕМЫХ НАУЧНЫХ ЖУРНАЛАХ

1. Joshi S., Semenko E., Moiseeva A., Sharma K., Joshi Y. C., Sachkov M., Singh H. P., Kumar Y. B. / High-resolution spectroscopy and spectropolarimetry of selected δ Sct pulsating variables // MNRAS, 2017, 467, 633.

СПИСОК ДОКЛАДОВ НА КОНФЕРЕНЦИЯХ

1. Semenko E. / High-resolution spectroscopy of pulsating A-stars // 1st BINA Workshop, ARIES, Nainital, Manora Peak, 15-18 November 2016.
2. Semenko E., Semenova E. / Physical properties of several young magnetic stars // Stars with a stable magnetic field: from pre-main sequence to compact remnants, Masaryk University, Brno, Czech Republic, 28 August – 1 September 2017.