

УДК 524.354.7-337

## ОБНАРУЖЕНИЕ РЕГУЛЯРНОЙ МАЛОАМПЛИТУДНОЙ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ МАГНИТНОГО БЕЛОГО КАРЛИКА WD 0009+501. О ВОЗМОЖНОСТИ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ НА БАЗЕ ТЕЛЕСКОПОВ МЕТРОВОГО КЛАССА СПЕЦИАЛЬНОЙ И КРЫМСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБСЕРВАТОРИЙ

© 2015 А. Ф. Валеев<sup>1,2\*</sup>, К. А. Антонюк<sup>3,4</sup>, Н. В. Пить<sup>3</sup>, В. Я. Соловьев<sup>2</sup>,  
Т. Е. Бурлакова<sup>1</sup>, А. С. Москвитин<sup>1</sup>, А. О. Граужанина<sup>2</sup>, Д. Р. Гадельшин<sup>1</sup>, Д. Шуляк<sup>5</sup>,  
Т. А. Фатхуллин<sup>1</sup>, Г. А. Галазутдинов<sup>1,6,7</sup>, Е. В. Малоголовец<sup>1</sup>, Г. М. Бескин<sup>1,2</sup>,  
С. В. Карпов<sup>1</sup>, В. В. Дьяченко<sup>1</sup>, Д. А. Растегаев<sup>1</sup>, А. Х. Рзаев<sup>1</sup>, Г. Г. Валявин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

<sup>3</sup>Крымская астрофизическая обсерватория, Научный, 298409 Россия

<sup>4</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, 117997 Россия

<sup>5</sup>Институт астрофизики Гёттинггенского университета им. Георга Августа,  
Гёттингген, 37077 Германия

<sup>6</sup>Католический университет Севера, Антофагаста, Чили

<sup>7</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 25 марта 2015 года; принята в печать 27 мая 2015 года

Приводятся результаты фотометрических наблюдений слабомагнитного белого карлика WD 0009+501. Наблюдения проводились в течение двух лет на телескопах метрового класса Специальной и Крымской астрофизических обсерваторий. В результате этих наблюдений обнаружена регулярная переменность блеска в фильтре  $V$  с периодом  $P \approx 8$  часов. Амплитуда переменности постоянна на временах более двух лет и составляет  $11 \pm 1$  mmag. Различие амплитуды переменности по наблюдениям на разных телескопах составляет 1–3 mmag. Результат интерпретируется в рамках вращательно-модулированной переменности магнитных свойств атмосферы этой звезды. Обсуждается также возможность переменности за счет присутствия планетных спутников у звезд этого класса. Результаты мониторинга использованы для выяснения потенциалов телескопов для проведения на них исследований экзопланет. Для всех телескопов, задействованных в программе, построены и исследованы зависимости, связывающие характерные времена экспозиций, звездные величины объектов и предельный уровень ожидаемых амплитуд переменности. По результатам исследования сформулирована программа мониторинга экзопланет на данных телескопах на ближайшие несколько лет.

Ключевые слова: *белые карлики — звёзды: магнитное поле — планетные системы — звёзды: индивидуальные: WD 0009+501*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В работе приводятся и обсуждаются результаты фотометрического мониторинга магнитного белого карлика WD 0009+501 (LHS 1038,  $V = 14^m4$ ). Эта звезда интересна тем, что у нее ожидается

регулярная фотометрическая переменность в силу ее магнитных свойств [1] и обнаруживаются признаки этой переменности с некоторой долей неопределенности [2]. Неопределенность обусловлена тем, что количество накопленного фотометрического материала по WD 0009+501 недостаточно для однозначного определения характера этой переменности: ее регулярности, формы и т.д. Эта

\*E-mail: azamat@sao.ru

## Журнал наблюдений WD 0009+501

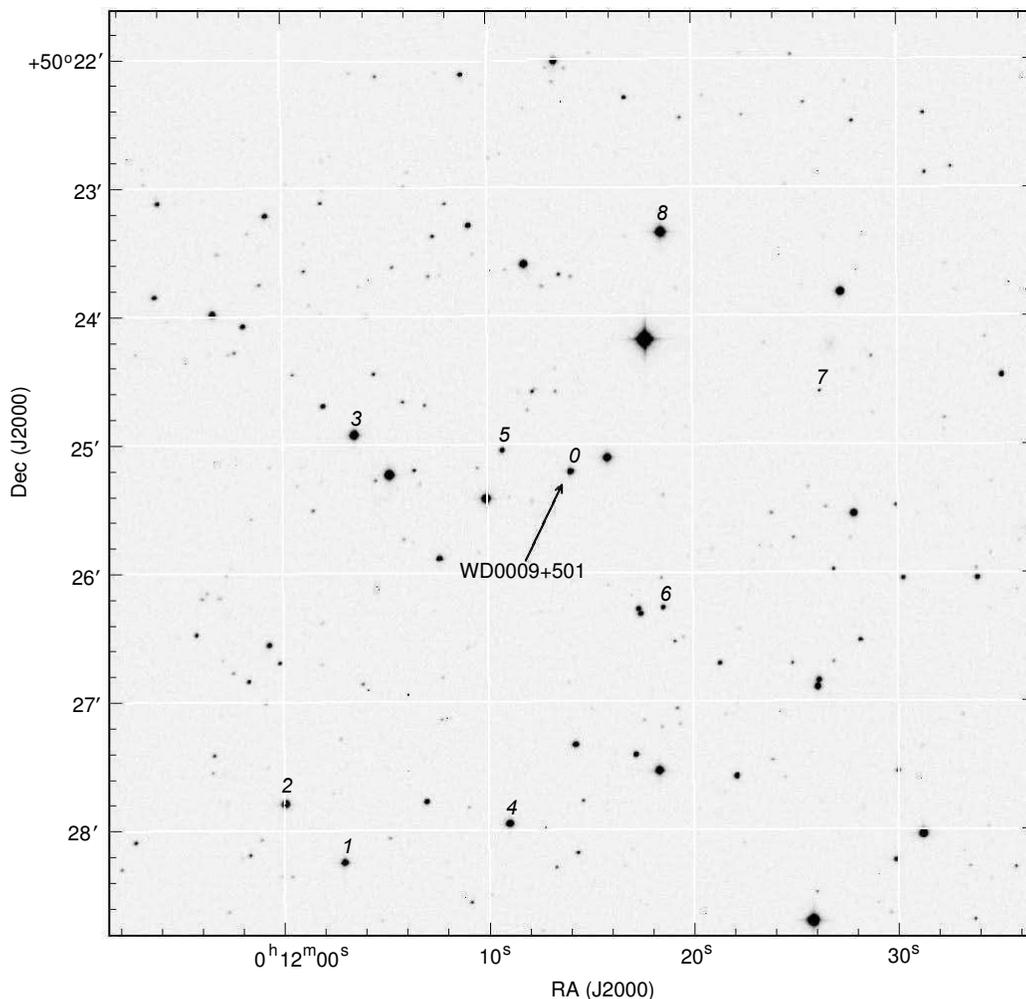
Date	Number of exposures	Exposure time, s	Sky condition	Telescope	Date	Number of exposures	Exposure time, s	Sky condition	Telescope
Sep 06, 2012	212	90	good	SAO 1-m	Oct 20, 2013	5	180	moderate	CrAO 1-m
Oct 06, 2012	150	60	good	SAO 1-m	Oct 21, 2013	5	180	moderate	CrAO 1-m
Aug 27, 2013	81	150	moderate	SAO 1-m	Oct 29, 2013	5	180	moderate	CrAO 1-m
Sep 1, 2013	5	180	moderate	CrAO 1-m	Oct 31, 2013	153	180	good	CrAO 1-m
Sep 9, 2013	5	180	bad	CrAO 1-m	Feb 2, 2014	20	180	bad	CrAO 1-m
Sep 12, 2013	5	180	moderate	CrAO 1-m	Feb 3, 2014	64	180	bad	CrAO 1-m
Sep 13, 2013	160	180	good	CrAO 1-m	Feb 6, 2014	75	180	bad	CrAO 1-m
Sep 27, 2013	5	180	moderate	CrAO 1-m	Oct 13, 2014	150	90	good	SAO 1-m
Oct 7, 2013	5	180	bad	CrAO 1-m	Oct 14, 2014	150	60	good	SAO 1-m
Oct 9, 2013	5	180	moderate	CrAO 1-m	Dec 16, 2014	42	300	good	A-K
Oct 10, 2013	5	180	moderate	CrAO 1-m	Dec 19, 2014	60	300	good	A-K
Oct 11, 2013	5	180	moderate	CrAO 1-m	Dec 22, 2014	25	300	good	A-K
Oct 12, 2013	100	180	good	CrAO 1-m	Jan 2, 2015	46	300	good	A-K
Oct 13, 2013	5	180	bad	CrAO 1-m					

неопределенность, а также фундаментальная важность исследования фотометрической переменности у магнитных белых карликов [1, 2] послужили основой для проведения фотометрического мониторинга WD 0009+501. Описываемые и анализируемые в статье наблюдения выявили наличие низкоамплитудной регулярной переменности у данной звезды, а также форму этой переменности, что является основным результатом работы.

Значительный объем полученных данных и общий методический уровень наблюдений оказались также интересными для обсуждения возможности проведения регулярного мониторинга экзопланет на программных телескопах. Наш интерес к этой теме обусловлен следующим. На сегодняшний день найдено более трех тысяч кандидатов в экзопланеты [3] и подтверждено наличие около двух тысяч экзопланет, вращающихся вокруг звезд разных типов [4]. Планеты открыты фотометрически или спектроскопически в ходе ряда наземных [5] и космических проектов (проекты Kepler [6] и CoRoT [7]). Благодаря этим проектам стали известны физические свойства значительной части подтвержденных планет. Удивительное разнообразие их свойств [3, 8] подтолкнуло научное сообщество к проведению массовых исследований экзопланет методами наземной астрономии. Сегодня эти исследования переживают настоящий бум, что аргументирует их актуальность, новизну

и нашу мотивацию включиться в эти исследования через проект, поддержанный Российским научным фондом. В рамках проекта предлагается организация и проведение ряда спектроскопических, спекл-интерферометрических и фотометрических наблюдательных программ средствами наземной наблюдательной астрофизики с использованием ряда российских и зарубежных телескопов разных апертур. Цель этих программ, прежде всего, — детальное исследование открытых и поиска новых планет в системах с уже известными одиночными гигантскими планетами методами возмущений времен их транзитов (подробности см., например, в [9]). Параллельно, самостоятельным блоком, проект предусматривает поиск глубоких планетных транзитов у белых карликов и случайных микролинзирования с помощью широкоформатного обзора неба MiniMegaTortora [10]. В рамках проверки идеи о зарождении жизни на планетах в зоне обитаемости проект предусматривает спектроскопическое исследование динамики и химического состава диффузных межзвездных полос (DIB) [11].

В соответствии с вышесказанным, во второй части настоящей работы мы представляем в качестве сопутствующего результат небольшого методического исследования для проведения совместных фотометрических наблюдений транзитов экзопланет с использованием телескопов метрового класса Специальной и Крымской астрофизических обсер-



**Рис. 1.** Карта окрестностей WD 0009+501. Помимо исследуемого объекта, помеченного цифрой 0, обозначены звезды, относительно которых измерялась звездная величина объекта.

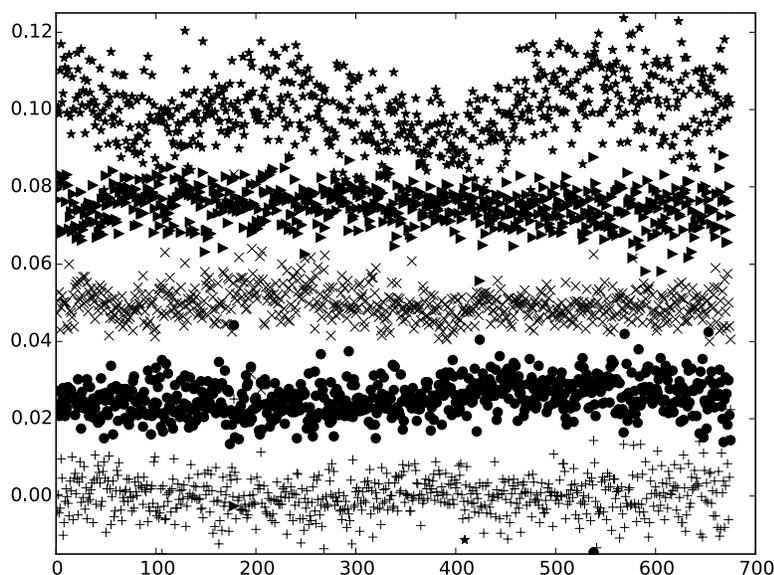
ваторий (САО РАН, КрАО). В исследование также был вовлечен 0.3-м частный телескоп Астротел-Кавказ. Основным вопросом является выяснение пределов детектирования низкоамплитудных фотометрических сигналов от звезд и идентичности их воспроизведения на разных временных интервалах и разных телескопах. В этой части исследования данные наблюдений WD 0009+501 использованы как тестовые.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ

Фотометрические наблюдения WD 0009+501 проводились в разное время между 2012 и 2015 гг. на четырех телескопах: 1-м телескопе САО РАН, 1-м телескопе КрАО, 1.25-м MONET-телескопе обсерватории Макдональд (США) и Института астрофизики г. Гёттинген (Германия) и частном телескопе Астротел-Кавказ (А-К), установленном на Северокавказской астрономической станции

Казанского (Приволжского) федерального университета (КФУ). К сожалению, по погодным условиям та часть наблюдений, которая выполнялась на 1.25-м телескопе, оказалась непригодной для использования в данном исследовании. Журнал остальных наблюдений с оценкой качества погодных условий приведен в таблице. Все наблюдения проводились в широкополосном фильтре *V* системы Джонсона. Перед каждой ночью наблюдений экспонировался закатный рассеянный свет для коррекции «плоского поля». Обработка фотометрических данных проводилась программами, написанными на языке Python, с использованием стандартного пакета редукции астрофизических данных IRAF.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IRAF распространяется Национальными обсерваториями оптической астрономии под управлением Ассоциации университетов для исследований в области астрономии в кооперации с Национальным научным фондом (США).



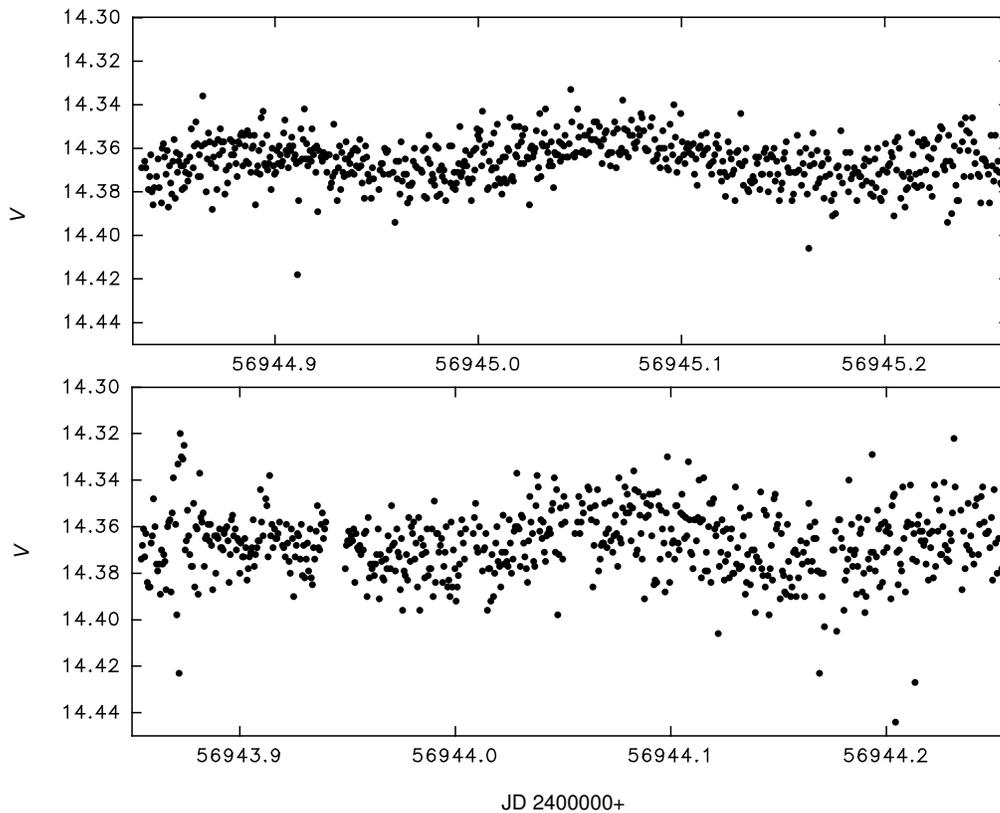
**Рис. 2.** Инструментальные потоки от четырех опорных звезд (1, 2, 3, 4) и от WD 0009+501 (заполненные звездочки вверху) 14 октября 2014 г. По горизонтальной оси — порядковый номер экспозиции. Экспозиции равномерно распределены в течение всей ночи.

Была проведена апертурная фотометрия с размером апертуры, максимально охватывающим поток от объектов. Фотометрические измерения исследуемого объекта выполнены относительно нескольких наиболее ярких звезд сравнения, находящихся вблизи WD 0009+501. Карта окрестностей исследуемого объекта с опорными звездами сравнения 1–7 приведена на рис. 1. Этого набора оказалось достаточно, чтобы обеспечить приемлемую точность привязки. Несмотря на то, что выбранные опорные звезды расположены на различных расстояниях от самого объекта, все они, включая и самые удаленные (1, 2, рис. 1), показывают одинаковые кратковременные флуктуации и монотонное изменение прозрачности. Это видно на рис. 2, где приведены изменения инструментальных потоков от объекта (вверху) и некоторых опорных звезд в течение одной из наиболее ясных ночей наблюдений на 1-м телескопе САО РАН 14 октября 2014 г. На рисунке из всех данных наблюдений вычтена общая кривая изменения прозрачности за ночь. Потоки от разных звезд разнесены на рисунке на одинаковое расстояние друг от друга для наглядности сравнения их изменения за наблюдательную ночь. Как можно видеть, все опорные звезды изменяются относительно одинаково в течение ночи. Две из четырех опорных звезд (вторая и третья снизу), похоже, обнаруживают небольшие признаки собственной переменности. Несмотря на это, общее усреднение всех данных достаточно надежно убирает вклад возможной нерегулярной переменности опорных звезд до амплитуд ниже 1 mmag. Изменение же

инструментальной величины исследуемого объекта в течение ночи качественно отличается от опорных звезд, что, как мы показываем ниже, является результатом его собственной переменности. Окончательное измерение звездной величины объекта проводилось относительно средней звездной величины используемых опорных звезд.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Даже простой визуальный просмотр непрерывных рядов обработанных наблюдений WD 0009+501, полученных на 1-м телескопе САО в ночи 13–14 октября 2014 г. (рис. 3), обнаруживает наличие переменности с амплитудой около 0<sup>m</sup>01. Наличие этой переменности ожидалось нами вследствие магнитной природы исследуемого объекта [12], его невысокой температуры [13] и неизбежной в таком случае низкоамплитудной фотометрической переменности, индуцированной собственным вращением [1]. Согласно [14], WD 0009+501 вращается с периодом около 8<sup>h</sup>. За полный оборот звезда последовательно обращается к наблюдателю обоими полюсами своего магнитного поля, которое в первом приближении является дипольным [14]. В работе [1] показано, что температуры атмосфер холодных магнитных белых карликов с внешней конвективной оболочкой (исследуемый объект принадлежит именно к таким звездам) модулируются их магнитными полями таким образом, что наиболее намагниченные части поверхности, например, магнитные полюса, выглядят более холодными, чем менее намагниченные

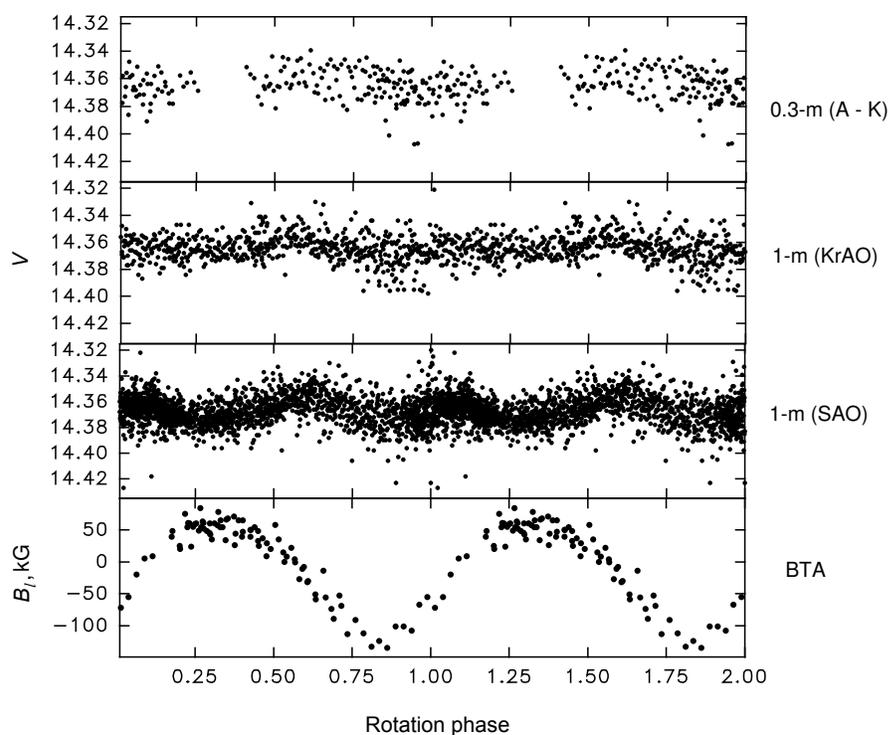


**Рис. 3.** Примеры непрерывных рядов наблюдений WD 0009+501, полученных на 1-м телескопе САО в ночи 13 октября 2014 г. (внизу) и 14 октября 2014 г. (вверху).

(области магнитного экватора). В результате мы ожидали наличие у WD 0009+501 двухмодовой фотометрической переменности. Одна мода возникает в результате прохождения одного магнитного полюса по лучу зрения, другая — в результате прохождения второго. Как можно видеть из рис. 3, именно такая картина и обнаруживается в данных наблюдений за 13–14 октября 2014 г.: полный цикл последовательного прохождения обеих мод равен точно восьми часам, что соответствует периоду вращения WD 0009+501.

Подобная картина наблюдается и во все другие ночи наблюдений этого белого карлика на всех телескопах. Между тем несколько отдельных ночей с плохими наблюдательными условиями (2, 3 и 6 января 2014 г. в КрАО) кроме этой двухмодовой структуры обнаруживают также наличие дополнительного, более длинного, тренда с несколько большей амплитудой, но не вполне понятной природы. Другие наблюдательные данные с телескопов САО и А-К, а также с телескопа КрАО за 2013 г. подобных трендов не обнаруживают. Это указывает на вероятное присутствие в ночах наблюдений 2014 г. в КрАО искажающего погодного либо аппаратного фактора. Тем не менее в этой статье мы не можем с уверенностью исключить наличия

у WD 0009+501 сопутствующего дополнительно источника долгопериодической и спорадической переменности. Более того, наблюдения других авторов [2] также указывают на то, что кроме периода вращения  $P = 8^h$  исследуемая звезда может показывать и более долгопериодическую переменность (более двух суток [2], хотя, по нашему мнению, этот период, скорее всего, является результатом скважности их наблюдений). Предположение о наличии дополнительной переменности с периодом 2–3 дня не подтверждается наблюдениями на 1-м телескопе САО РАН. Однако мы не можем исключить более длинного периода, либо наличия неперидического сигнала. В этой связи нами выбрана следующая стратегия. Учитывая тот факт, что наблюдения в КрАО, выполненные в 2014 г. (три ночи, см. таблицу), проводились в зимний период в неблагоприятных погодных условиях, в этой работе мы решили эти ночи не рассматривать, ограничившись рассмотрением лишь тех ночей, которые в таблице идут с оценкой качества неба как «среднее» или «хорошее». Рассмотрение этих ночей по данным со всех телескопов не подтверждает наличия иной переменности, кроме восьми часов. Эта же периодичность прослеживается и в ночах с «плохим» качеством, а также в данных наблю-



**Рис. 4.** Изменение потока в фильтре  $V$  (три верхние панели) и продольного магнитного поля  $B_l$  (нижняя панель) WD 0009+501 в зависимости от фазы вращения.

дений [2], что позволяет рассматривать этот период как регулярный. Мы продолжим мониторинг WD 0009+501 для выяснения истинной природы заподозренного долгопериодического тренда в будущих работах. Обнаружение у WD 0009+501 сопутствующей долговременной переменности может дать целый ряд новых интереснейших возможностей для теории формирования крупномасштабных магнитных полей белых карликов.

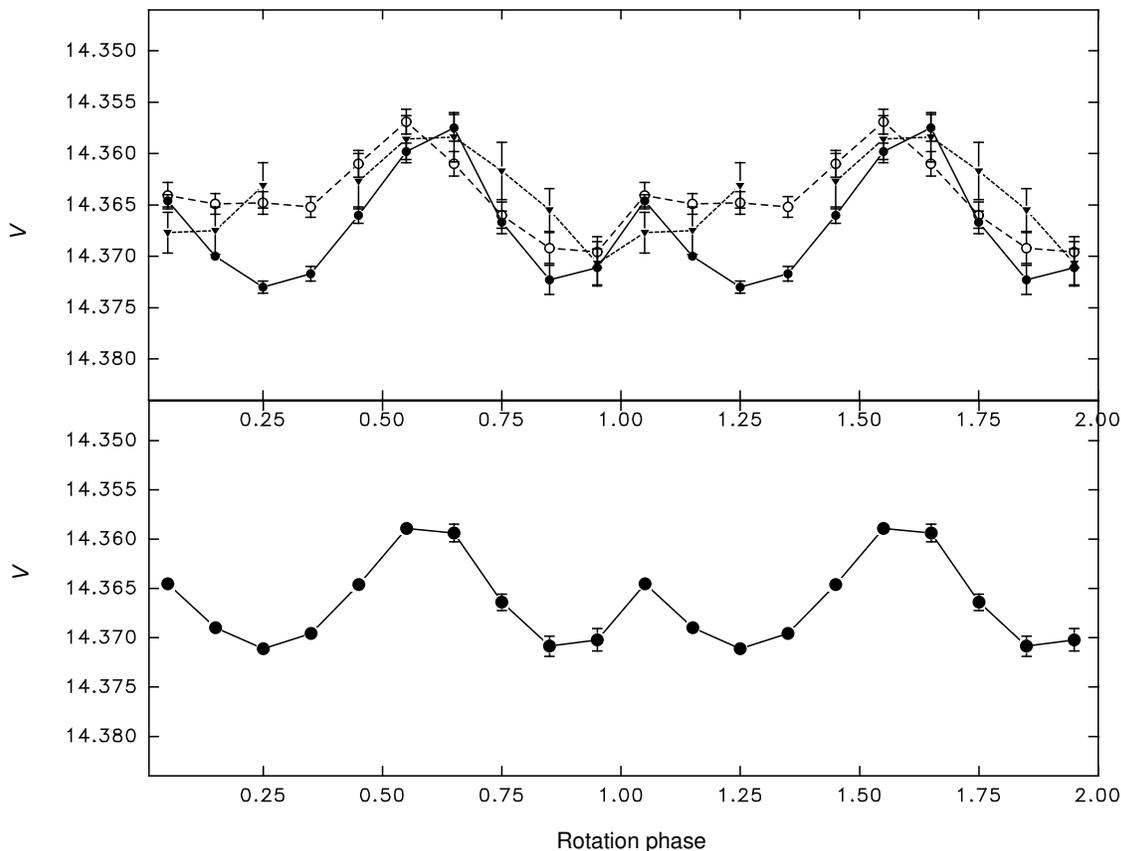
### 3.1. Анализ периода вращения WD 0009+501

Период вращения WD 0009+501 составляет  $0.334 \pm 0.01$  дня. Валявин и др. [14] сужают поиск в пределах диапазона уже известной неточности. Применение метода Лафлера–Кинмана [15] к поиску периода обнаруживает значительное количество (порядка тысячи) практически равновероятных узких пиков, обозначающих возможные периоды на периодограмме внутри обозначенного диапазона. Выделить на данном этапе какой-либо из этих пиков не представляется возможным ни с привлечением какой-либо дополнительной информации, ни с использованием процедуры «гармонического отбеливания»: свертка фазовых кривых изменения потока с любым из этих периодов дает практически идентичные результаты. Это вполне стандартная ситуация, которая складывается при анализе далеко отстоящих друг от друга коротких

наблюдательных рядов. Однозначное определение периода из всей совокупности возможно при одновременном проведении дополнительных спектрополяриметрических (аналогично [14]) и фотометрических наблюдений. Разные методики и априорная информация о связи спектрополяриметрии с фотометрией устранят неопределенность, и этому будет посвящено наше следующее специальное исследование. В этой работе мы ограничимся лишь иллюстрацией результата по одному из формальных периодов ( $P = 0^d.3339951$ ) из рассматриваемого диапазона неточности, не сужая сам этот диапазон.

### 3.2. Фазовое изменение блеска WD 0009+501

На рис. 4 приведены фазовые кривые изменения блеска звезды с вращением во всех трех вариантах наблюдений. Кроме того, на нижней панели рисунка приведено фазовое изменение продольной компоненты интегрального магнитного поля звезды [14] с тем же периодом. Как можно убедиться, однотипная фотометрическая переменность обнаруживается всеми телескопами с разной степенью точности. Сравнительный анализ точности приводится в следующем разделе. В этом же разделе резюмируем основные заключения относительно особенностей и природы фотометрической переменности WD 0009+501.



**Рис. 5.** Верхняя панель: изменение потока в фильтре  $V$  в зависимости от фазы вращения. Усреднено по 0.1 фазы. Закрашенные кружки и сплошная линия иллюстрируют переменность потока по данным с 1-м телескопа САО РАН. Светлые кружки и штриховая линия соответствуют данным с 1-м телескопа КраО. Треугольники и пунктирная линия соответствуют данным с 0.3-м телескопа Астротел-Кавказ. Нижняя панель иллюстрирует изменение потока, усредненное по данным со всех телескопов.

Наблюдения на всех трех телескопах в течение более двух лет показали наличие регулярной фотометрической переменности WD 0009+501 с периодом вращения. Амплитуда переменности в фильтре  $V$  системы Джонсона — около  $0^m01$ . Характер переменности с наличием двойной волны за цикл вращения указывает на связь интегрального потока от звезды с ее поверхностным магнитным полем. Согласно [14], за полный оборот WD 0009+501 наблюдатель последовательно видит оба полюса магнитосферы. Магнитное поле на этих полюсах оценено примерно в 300 кГс [14], и такого поля достаточно [1], чтобы подавить внешнюю конвекцию в этих областях. В результате на полюсах магнитосферы WD 0009+501 образуются темные пятна, которые и создают фотометрическую переменность.

На рис. 5 приведено фазовое изменение потока от WD 0009+501, усредненное по интервалам 0.1 фазы. Верхняя панель рисунка иллюстрирует фазовое изменение по данным разных телескопов. Нижняя панель представляет суммарный результат

по всем имеющимся данным. Во всех случаях бары ошибок рассчитывались как ошибка среднего по ансамблю индивидуальных измерений в каждом интервале. Сравнение результатов на обеих панелях обнаруживает идентичность воспроизведения характера переменности во всех фазах с точностью от 1 до 3 mmag. Если исключить различия в области фаз от 0.2 до 0.3, то результаты совпадают на уровне 1 mmag. Скорее всего, различия связаны с неудачным совпадением плохих погодных условий в наблюдениях на крымском телескопе в эти моменты и недостаточного количества данных (в частности, в наблюдениях с телескопом А-К). Формальная ошибка из усреднения всех данных в этом интервале фаз получается на уровне около 0.5 mmag. Однако эта ошибка не отражает реальную ситуацию с идентичностью воспроизведения результата. В этой точке следует доверять данным с 1-м телескопа САО РАН.

Из рис. 5 также видно, что в то время как минимумы блеска во всех случаях находятся на одинаковом уровне  $V = 14^m371-14^m373$ , макси-

мумы блеска имеют разные уровни. Если предположить наличие связи [1] между исходящим от звезды световым потоком и ее магнитным полем, такое изменение интегрального потока указывает на то, что магнитосфера WD 0009+501 имеет более сложную геометрию, чем простой симметричный диполь. Однако мы пока не имеем возможности исследовать эти детали и оставляем их для отдельного рассмотрения совместно с новыми спектрополяриметрическими данными. В этой работе мы ограничиваемся лишь констатацией факта детектирования регулярной, модулированной вращением, фотометрической переменности у WD 0009+501 и описываем форму этой переменности. Двухмодовая форма обнаруженной фотометрической переменности и ее связь с особенностями магнитной переменности WD 0009+501 являются новыми результатами в исследовании этого объекта. Подобное явление было обнаружено до этого только у WD 1953-01, что позволило сделать вывод о существовании магнитоиндуцированной фотометрической переменности у белых карликов [1]. Настоящая работа независимо подтверждает этот вывод на примере другого магнитного объекта этого класса. И это заключение является основным результатом проведенного исследования.

#### 4. О ВОЗМОЖНОСТИ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ С ПОМОЩЬЮ ВОВЛЕЧЕННЫХ В ПРОГРАММУ ТЕЛЕСКОПОВ

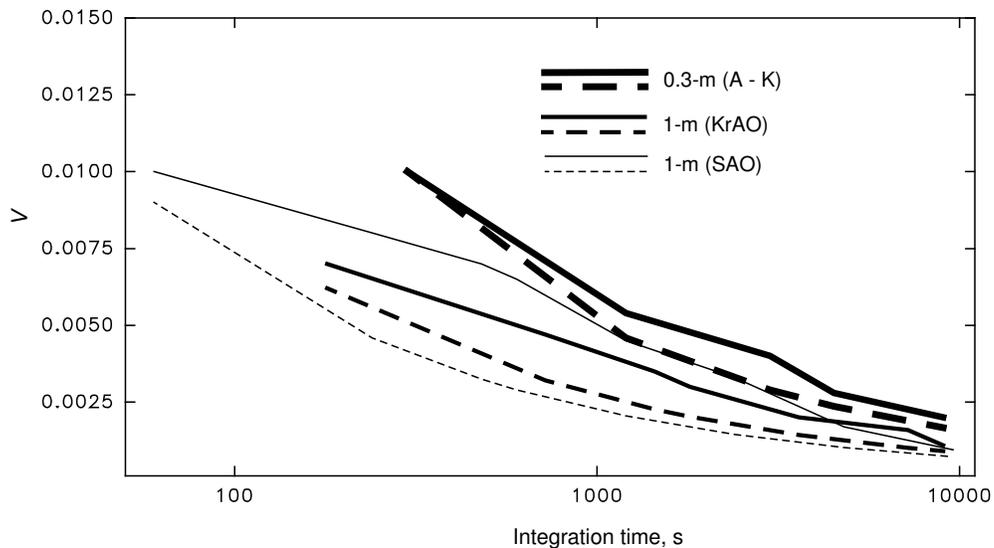
Магнитная природа переменности WD 0009+501 вполне хорошо объясняет полученный наблюдательный результат, не требуя привлечения других объяснений. Между тем в этом разделе мы хотим представить на обсуждение еще одну интересную возможность. Согласно [16], крупномасштабные магнитные поля на поверхности белых карликов могут генерироваться их возможными спутниками звездных или даже планетных размеров. В спектрах магнитных белых карликов не замечено признаков спектральной двойственности. Это исключает присутствие в качестве спутников обычных звезд главной последовательности и большинства иных звезд. Тем не менее, близко расположенные коричневые карлики или планеты юпитерианских масс могут играть роль таких генераторов. Поэтому магнитные белые карлики привлекательны для поиска у них подобных объектов. Этот поиск может идти в направлении, например, обнаружения следов кратковременных (минуты—десятки минут) транзитов этих гипотетических спутников на фоне родительского белого карлика. Перспективен также поиск аномалий в периодичности осевого вращения у магнитных белых карликов и т. д. Эта возможность связывает фотометрические

исследования магнитных звезд (в общем случае не только белых карликов) с исследованиями экзопланет, и в этом разделе мы анализируем наши возможности в контексте проведения наблюдений транзитов планет на фоне дисков их родительских звезд.

Большой массив накопленных данных по WD 0009+501 позволяет проанализировать для всех трех телескопов программы точность регистрации фотометрических событий разной амплитуды в зависимости от времени и яркости объекта. В качестве основного теста мы выбрали исследуемый объект WD 0009+501. Обычно для этой цели используют звезды поля, не демонстрирующие значительной переменности. Однако в нашем исследовании мы используем для этой цели именно сам объект, переменность которого нами изучена с высокой точностью и может быть учтена. Кроме того, в разное время и в зависимости от обстоятельств в обработке данных наблюдений не всегда использовались все обозначенные выше опорные звезды. Иногда (например, в наиболее ранних наблюдениях на 1-м телескопе САО РАН) использовалась лишь группа опорных звезд, расположенных близко к объекту. По этой причине именно объект является для нас тем единым стандартом, с помощью которого мы можем сравнить все три телескопа. Это отступление от общепринятой методики никак не ухудшает конечный результат, потому что характер переменности объекта в наблюдательные ночи изучен с необходимой точностью.

Анализ представлен на рис. 6, где приведены кривые изменения накопленной точности в зависимости от времени интегрирования для разных телескопов программы. Сплошные линии иллюстрируют экспериментальную точность регистрации фотометрических событий для звезд характерных величин  $V = 14^m5$ , штриховые — теоретически возможную пуассоновскую точность. В нашем анализе точность регистрации также определялась ошибкой среднего, полученной по совокупности индивидуальных измерений за единицу времени и с вычитанием трендов восьмичасовой переменности. Как можно видеть, для всех телескопов экспериментальная точность на 10–30% хуже теоретической. Это объясняется целым набором факторов: качеством используемых фотометров (главным образом фильтров), приемников излучения, состоянием атмосферы и особенностями обработки данных. В целом результат является близким к стандартному, хотя и может быть улучшен в рамках стандартной концепции фотометра со стеклянными фильтрами. Ниже мы обсуждаем этот вопрос.

Приходим к следующим выводам.



**Рис. 6.** Точность регистрации амплитуды изменения фотометрических событий в зависимости от времени накопления для разных телескопов программы. Сплошные линии иллюстрируют экспериментальную точность регистрации фотометрических событий для звезд характерных величин  $V = 14^m.5$ , штриховые — теоретически возможную пуассоновскую точность.

- Все телескопы программы способны наблюдать стандартные транзиты планет-экзоюпитеров у звезд ярче  $V = 15^m$ . Характерные глубины транзитов планет  $0^m.01$  позволяют проводить наблюдения на телескопах метрового класса с эффективным временным разрешением менее двух минут в зависимости от яркости звезды и погодных условий. Временное разрешение 0.3-м телескопа хуже, пропорционально отношению площади его апертуры к площади апертуры метрового телескопа. Тем не менее с учетом того факта, что характерные времена длительности транзитов юпитеров находятся в пределах от одного до нескольких часов, все три инструмента эффективны для исследования экзоюпитеров.
- Метровые телескопы позволяют также проводить исследования экзопланет-нептунов, характерные глубины транзитов которых находятся в пределах  $0^m.001$ – $0^m.06$ . Временное разрешение телескопов в этом случае находится в пределах от десятков минут (для ярких звезд) до часа и более (для звезд  $V = 15^m$ ). По этой причине мы считаем, что эффективные наблюдения транзитов экзопланет в рамках нашего инструментария возможны лишь для звезд ярче  $V = 13^m.5$ .
- Хорошая воспроизводимость результатов, полученных на различных телескопах, позволяет также проводить совместные наблюдения некоторых крупных экзопланет-суперземель, глубины транзитов которых находятся на уровнях менее  $0^m.001$ . Эффективность таких исследований, однако, вызывает сомнение и в любом случае

представляет предельную задачу при текущем состоянии инструментов. Между тем некоторые технические улучшения телескопов откроют путь к постановке задачи исследования суперземель с глубинами транзитов  $0.5$ – $1$  mmag.

Мы считаем, что на 1-м телескопе САО РАН в первую очередь надо провести ревизию качества используемых фильтров. В частности, ухудшение стабильности воспроизведения результата на уровне ниже 1 mmag частично связано с наличием вторичных отражений из-за деградации их просветляющих покрытий. Приобретение новых фильтров с соответствующими покрытиями, либо обновление покрытий улучшит ситуацию. На всех телескопах желательно провести замену используемых светоприемников. Наличие значительного количества нерабочих столбцов в их матрицах в совокупности с ошибками гидирования играет деструктивную роль, когда эти нерабочие области «наезжают» на опорные звезды или даже на объект исследования. Приобретение ПЗС с меньшим шумом считывания и большей квантовой эффективностью увеличит общую эффективность наблюдений. В пределе результат, который получен нами для характерной звездной величины  $V = 14^m.5$ , может стать типичным для звезд вплоть до  $V = 15^m.0$ . Повышение точности ведения (и/или гидирования) телескопа также играет роль. В частности, техническая реконструкция и автоматизация 1-м телескопа САО РАН, проведенные в течение последних двух лет, весьма заметно сказались на улучшении качества наблюдательного материала. Здесь

сыграло роль именно улучшение точности ведения инструмента. В результате наши наблюдения на этом телескопе в конце 2014 г. значительно превосходят по качеству все предыдущие. Таким образом, мы считаем, что проведение вышеобозначенных мероприятий способно значительно улучшить существующий уровень наблюдений. Это позволит телескопам участвовать в исследованиях планет, близких по размеру к планетам земной группы у карликовых K–M-звезд.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мы представили результаты фотометрического исследования магнитного белого карлика WD 0009+501 и методического исследования возможностей совместных фотометрических наблюдений экзопланет с использованием 1-м телескопов САО РАН и КрАО и 0.3-м частного телескопа Астротел-Кавказ. В результате получены надежные доказательства существования у звезды регулярной, модулированной вращением фотометрической переменности на уровне  $V = 0^m01$ . Представлена наиболее вероятная интерпретация эффекта: переменность обусловлена неоднородностями в распределении магнитного поля звезды по причинам, описанным в работе [1].

Результаты методического исследования по регистрации предельных фотометрических сигналов от звезд определяют область использования телескопов программы в исследованиях экзопланет, начатых в САО РАН в 2014 г. [17–19]. Первые тестовые наблюдения наиболее крупных планет-горячих юпитеров нами уже проведены [20] и согласуются с выводами, сделанными в этой работе. Сделанные в предыдущем разделе замечания относительно гипотетического механизма генерации магнитных полей у звезд-белых карликов их планетными системами делают также интересным проведение комбинированных исследований одиночных магнитных белых карликов на предмет поиска у них транзитов планетных систем [21, 22]. Наши ближайшие задачи — это фотометрические исследования транзитов (форм и времени наступления/окончания) планет-экзоюпитеров и экзонептунов у звезд разных классов светимости, а также исследование аномалий вращения магнитных белых карликов. Целями являются индивидуальные звезды с  $V < 15^m0$ .

## БЛАГОДАРНОСТИ

Фотометрические наблюдения и интерпретация переменности WD 0009+501 поддержаны фондом РФФИ (грант 15-02-05183). Методическое

исследование телескопов в приложении к проведению на них программ изучения экзопланет поддержано Российским научным фондом (проект 14-50-00043, направление «Экзопланеты»). Наблюдения на 1-метровом телескопе САО проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.619.21.0004, идентификатор проекта RFMEFI61914X0004).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. Valyavin, D. Shulyak, G. A. Wade, et al., *Nature* **515**, 88 (2014).
2. C. S. Brinkworth, M.R. Burleigh, K. Lawrie, et al., *Astrophys. J.* **773**, 47 (2013).
3. N. Batalha, *Proc. National Academy of Sciences* **111**, 12647 (2014).
4. M. Yildiz, O. Çelik Orhan, C. Kayhan, and G. E. Turkoglu, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **445**, 4395 (2014).
5. M. Mayor and D. Queloz, *Nature* **378**, 355 (1995).
6. A. Dupree, in *Proc. Joint Fall 2009 Meet. of the New England Section of the APS and AAPT, Durham, USA, 2009*, abstract F1.002.
7. A. Baglin, M. Auvergne, P. Barge, et al., *AIP Conf. Proc.* **895**, 201 (2007).
8. C. D. Dressing and D. Charbonneau, arXiv:1501.01623.
9. J. Miralda-Escudé, *Astrophys. J.* **564**, 1019 (2002).
10. A. Biryukov, G. Beskin, S. Karpov, et al., *Baltic Astronomy* **24**, 100 (2015).
11. G. Galazutdinov, J. Krelowski, Yu. Beletsky, and G. Valyavin, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **127**, 356 (2015).
12. G. D. Schmidt and P. S. Smith, *Astrophys. J.* **448**, 305 (1995).
13. P. Bergeron, S. K. Leggett, and M. T. Ruiz, *Astrophys. J. Suppl.* **133**, 413 (2001).
14. G. Valyavin, S. Bagnulo, D. Monin, et al., *Astron. and Astrophys.* **439**, 1099 (2005).
15. J. Laffler and T. D. Kinman, *Astrophys. J. Suppl.* **11**, 216 (1965).
16. C. A. Tout, D. T. Wickramasinghe, J. Liebert, et al., *AIP Conf. Proc.* **1314**, 190 (2010).
17. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *Astrophysical Bulletin* **69**, 224 (2014).
18. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *ASP Conf. Ser.*, **494**, 305 (2015).
19. A. Grauzhanina, G. Valyavin, D. Gadelshin, et al., *ASP Conf. Ser.*, **494**, 289 (2015).
20. G. Valyavin, A. Valeev, D. Gadelshin, et al., *Astrophysical Bulletin* **70**, 315 (2015).
21. G. Valyavin, *ASP Conf. Ser.* **494**, 107 (2015).
22. L. Fossati, S. Bagnulo, C. A. Haswell, et al., *IAU Symp.*, No. 305 (in press).

## Detection of Regular Low-Amplitude Photometric Variability of the Magnetic Dwarf WD 0009+501. On the Possibility of Photometric Investigation of Exoplanets on the Basis of 1-Meter Class Telescopes of the Special and Crimean Astrophysical Observatories

A. F. Valeev, K. A. Antonyuk, N. V. Pit, V. Ya. Solovyev, T. E. Burlakova, A. S. Moskvitin, A. O. Grauzhanina, D. R. Gadelshin, D. Shulyak, T. A. Fatkhullin, G. A. Galazutdinov, E. V. Malogolovets, G. M. Beskin, S. V. Karpov, V. V. Dyachenko, D. A. Rastegaev, A. Kh. Rzaev, and G. G. Valyavin

We present the results of photometric observations of the weak magnetic white dwarf WD 0009+501. The observations were carried out for two years with the 1-m telescopes of the Special and Crimean Astrophysical Observatories. As a result of these observations, we detected regular  $V$ -band luminosity variations with a period of  $P \approx 8$  hours. The amplitude of the variability is stable on time-scales greater than two years and amounts to  $11 \pm 1$  mmag. The difference in the variability amplitude from observations with different telescopes is 1–3 mmag. The result is interpreted within the concept of a rotation-modulated variability of magnetic properties of the star's atmosphere. We also discuss a possible variability due to the presence of planetary companions around stars of this type. The results of monitoring were used to explore the capabilities of the telescopes for exoplanet investigation. We studied the dependences between the characteristic times of exposures, magnitudes of the objects, and a threshold level of the expected variability amplitudes for all the telescopes involved in our program. A program of exoplanet monitoring with the mentioned telescopes was drawn up for the next few years based on the results of the study.

Keywords: *white dwarfs—stars: magnetic field—planetary systems—stars: individual: WD 0009+501*