## ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

# Пузин Василий Борисович

# ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ И СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВЕЗДЫ FK COM И ПОИСК КАНДИДАТОВ В ЗВЕЗДЫ ТИПА FK COM

01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель д.ф.-м.н. И.С. Саванов

### ОГЛАВЛЕНИЕ

введение	4
ГЛАВА 1. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВЕЗДЫ FK	
СОМ	25
1.1 Введение	25
1.2 Наблюдательные данные	26
1.3 Анализ переменности блеска	28
1.4 Циклы активности	33
1.5 Положения активных долгот и флип-флоп	35
1.6 Выводы к ГЛАВЕ 1	40
ГЛАВА 2. СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	
ЗВЕЗДЫ FK COM	42
2.1 Введение	42
2.2 Наблюдательные данные и измерения магнитных полей	42
2.3 Анализ возможной переменности магнитного поля	46
2.3.1 Анализ данных наблюдений в 2012 году.	46
2.3.2 Анализ данных наблюдений в 2014 и 2015 годах.	49
2.4 Выводы к ГЛАВЕ 2	53
ГЛАВА 3. ПОИСК И УСТАНОВЛЕНИЕ КАНДИДАТОВ В ЗВЕЗДЫ	
ТИПА FK СОМ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ	
КЕПЛЕР	54
3.1 Введение	54
3.2 Наблюдательные данные	56
3.3 Анализ переменности блеска	59
3.4 Положения активных долгот и флип-флоп	64

3.5 Циклы активности	
3.6 Выводы к ГЛАВЕ 3	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	72
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	75
ПРИЛОЖЕНИЕ А	89
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	101

#### введение

Большинство явлений на Солнце связаны с активностью его магнитного поля, которое отвечает за турбулентность во внешней конвективной зоне, формирует пятна в фотосфере, высоко-корональные петли, флоккулы и факелы. Изучение солнечной активности является важным для понимания процессов образования и изменения магнитного поля Солнца.

Исследование активности звезд, связанной с магнитным полем, позволяет тестировать теорию солнечного динамо с входными параметрами, не ограничиваясь только солнечными.

Активность, подобная солнечной, первоначально была обнаружена у красных карликовых звезд типа UV Кита (UV Ceti). Изменения кривой блеска вне затмений в двойных системах типа BY Дракона (BY Dra) Крон [73] объяснил наличием пятен на поверхности звезды. В работах [23], [25], [46] было подтверждено наличие пятен у звезд типа RS CVn на основе анализа переменности кривых блеска.

В работах ряда авторов ([34], [80], [82], [88], [112], [126], [128], [131], [132]) на основании корреляции магнитной активности со скоростью вращения, подтвердилась гипотеза, высказанная Скуманичем [113], что вращение играет важную роль в генерации звездной активности. Было обнаружено, что холодные звезды с более быстрым вращением показывают более высокий уровень магнитной активности и являются лучшими кандидатами для изучения и тестирования звездного динамо. К таким объектам относятся следующие типы звезд:

- красные карлики спектрального класса М (М карлики);
- молодые одиночные звезды на стадии эволюции до Главной последовательности (ГП) (звезды типа T Tau);
- молодые одиночные звезды солнечного типа;

- тесные двойные системы с быстровращающимся компонентом (звезды типа RS CVn, звезды типа BY Dra, звезды типа W UMa, звезды типа Алголь);
- одиночные быстровращающиеся гиганты (звезды типа FK Com).

Среди всего многообразия активных звезд, большой интерес представляют исследования звезд типа FK Com.

#### Звезды типа FK Com (FK Comae Berenices, FK Волосы Вероники)

Звезды типа FK Com впервые были выделены в качестве новой группы активных звезд в начале 80-х годов прошлого столетия в ряде исследований [18, 19, 20]. Звезды типа FK Com – это одиночные быстровращающиеся гиганты спектрального класса G-K. Несмотря на быстрое вращение ( $v \sin i =$ 60-170 км с<sup>-1</sup>), эти звезды не показывают существенных периодических изменений радиальной скорости. Переменность блеска звезд типа FK Com составляет около 0<sup>m</sup>.1-0<sup>m</sup>.3. Она вызвана существованием на их поверхности холодных пятен. Фотометрическая переменность звезд FK Com похожа на переменность звезд типа RS CVn, хотя последние имеют двойственную структуру. Другой тип активности звезд типа FK Com связан с переменностью хромосферных эмиссионных линий Н и К CaII, а так же водородных линий бальмеровской серии. Природа объектов с такими свойствами остается до конца невыясненной. Гипотезы их образования предполагают проявления действия процессов, связанных со слиянием компонент в тесной двойной системе, с резким гипотетическим выносом углового момента из недр звезды, с передачей момента вращения из околозвездного окружения (см. обсуждения в работах [28], [124]). Присутствие линии Li [36] и наличие инфракрасного избытка в спектрах этих звезд не являются весомыми аргументами в пользу какой-либо гипотезы о происхождении звезд типа FK Com [28]. Несмотря на то, что звезды FK Com изучаются с помощью наземной фотометрии и спектроскопии, а также многочисленных космических наблюдений во всех диапазонах (от гамма- до радиодиапазона [8, 9, 10, 33, 79, 99, 101, 130, 131]), вопрос об их эволюционном статусе до сих пор открыт.

Звезды типа FK Com являются крайне малочисленной группой переменных звезд. С уверенностью к ним относятся всего лишь три звезды: FK Comae Berenices (прототип), V1794 Cyg (HD 199178) и ET Dra (BD +70 959). Другие звезды, ранее отнесенные к данной группе, либо имеют более медленное вращение и умеренную активность, либо обладают двойственностью, и поэтому были исключены из нее.

Результаты наиболее детальных исследований звезды FK Com приводятся в серии статей Корхонен и Ола с соавторами [62, 64, 66, 67, 63, 85, 127], опубликованных в 1999-2015 годах.

Результаты изучения звездной активности и магнетизма можно найти в обзорах, опубликованных Штрассмайером [118, 120], Бердюгиной [15], Алексеевым [6], Ковари и Ола [71]. В последующем изложении мы будет руководствоваться ссылками и данными из этих литературных источников.

#### Наблюдательные инструменты исследования звездных пятен

С момента обнаружения первых признаков наличия холодных пятен в фотосферах звезд фотометрия остается наиболее распространенным инструментом исследования звездной активности. Первые регулярные наблюдения запятненных звезд начались в 70-х годах прошлого столетия. Сейчас использованием они продолжаются с автоматизированных фотометрических телескопов, основная цель и задача которых - выполнение высокоточных фотометрических наблюдений и построение однородных и длинных временных рядов данных. В настоящее время во всем мире действует несколько десятков автоматизированных телескопов апертурой от 20 см до 120 см, которые проводят фотометрические наблюдения с точностью порядка 0<sup>m</sup>.002-0<sup>m</sup>.005. В последнее время, с запуском космических обсерваторий фотометрической направленности (HIPPARHOS, COROT, Gaia, Kepler и др.) архивы наблюдательных данных пополнились огромными объемами уникальных, высокоточных фотометрических наблюдений. Высокая точность наблюдений, получаемых при помощи космических телескопов, даёт уникальный наблюдательный материал для широкого круга исследований активности звезд. В частности, помимо изучения систем с экзопланетами и свойств самих экзопланет, данные наблюдений с космическим телескопом Кеплер можно использовать для определения периодов вращения, циклов активности и других параметров, характеризующих магнитную активность звезд.

Мощным инструментом современной астрофизики являются спектральные наблюдения. Для изучения звездных пятен и детального анализа звездной активности требуются спектральные инструменты высокого разрешения ( $R = \lambda/\Delta\lambda \approx 50000$  и выше), оснащенные высокочувствительной приемной аппаратурой. В основном такие инструменты установлены на крупных телескопах с апертурой 8-10 метров. Имеющиеся телескопы с апертурой 2-4 метра, оснащенные эшелле спектрографами высокого разрешения, не позволяют проводить в полном объеме исследования звезд слабее  $10^{m}-12^{m}$ .

Для изучения магнитных полей используются поляриметрические и спектрополяриметрические инструменты. Измерение поляризации излучения в спектрах звезд является довольно сложной задачей. В значительной степени она ограничена инструментальными возможностями, так как для таких исследований необходима точность на уровне 10<sup>-3</sup>-10<sup>-4</sup>. Проблема заключается звезд наиболее доступно изучение также В TOM, что для лишь крупномасштабного магнитного поля, так как наблюдаемые параметры Стокса относятся ко всему диску звезды, в отличие от наблюдений для Солнца, которые можно проводить для локальных областей его поверхности. Спектрополяриметрическими приборами умеренного и высокого разрешения оснащены только крупнейшие телескопы [109].

Благодаря развитию астрономического приборостроения, в настоящее время астрономы могут проводить наблюдения магнитно-активных звезд на интерферометрах со сверхвысокой базой. Появилась уникальная возможность напрямую регистрировать пятна на поверхности звезд [61, 97].

В принципе, спектроинтерферометр, оснащенный поляриметром, позволяет измерять локальные магнитные поля на поверхности исследуемой звезды [50, 51, 98, 133], что может дать ключевую информацию для понимания звездного магнетизма. Прямые наблюдения звезд с магнитной активностью при помощи интерферометров в ближайшем будущем могут быть основным источником информации для построения моделей звездного магнетизма.

Изучение запятненных звезд при помощи гравитационного микролинзирования [44, 45] потенциально может быть использовано, например, для уточнения температуры пятен, их площади, распределения атмосфер. Применение яркости В моделях гравитационного микролинзирования в настоящее время менее востребовано, чем методы, перечисленные выше.

Исследования прохождений планет по диску звезды (транзитов) предоставляют уникальную возможность изучения пятен на ее поверхности [110]. Затмение пятна на поверхности звезды приводит к появлению «эмиссионной» детали на кривой блеска транзита. При моделировании этих

деталей становится возможным определять такие параметры пятен, как их размеры, температуры и положения на поверхности звезды. В свою очередь, мониторинг этих параметров открывает возможности, например, к изучению свойств вращения (дифференциального вращения) звезды, структуры пятен. Такие исследования могут проводиться только на основе анализа фотометрических данных высокой точности, в частности, получаемых в ходе наблюдений с космическим телескопом Кеплер [125].

#### Методы исследования магнитно-активных запятненных звезд

Фотометрические методы \_ основные метолы исследования активности запятненных звезд. Эти методы дают информацию о периодах осевого вращения, циклах активности, распределении холодных областей на поверхности звезды на основании анализа фотометрических кривых блеска. Для поверхностных температурных неоднородностей анализа по фотометрическим данным чаще всего применяются два следующих метода (LCM и LCI).

Метод LCM (Light Curve Modelling) – это метод прямого подбора пятен на поверхности звезды, распределение которых наиболее точно описывает кривую блеска. Форма холодных областей часто заранее определена и изменяется только площадь фигуры заданной формы (в большинстве случаев это круг). Численные методы, применяющиеся в случае LCM, были разработаны и улучшены в работах [21, 32, 58, 95, 118]. Недостаток метода LCM заключается в том, что решение не единственно, заранее обозначена форма пятна, вводится множество свободных параметров. Как разновидность этого метода, можно рассматривать подход, развитый Алексеевым (см., например, [5, 6]) в рамках «зонной» модели расположения пятен.

Метод LCI – Light Curve Inversion применяется для восстановления поверхностных температурных неоднородностей по наблюдаемым кривым блеска без привлечения информации о форме и числе пятен (применяется

методика решения обратной задачи, подобно той, что используется при допплеровском картировании). Чаще всего этот метод используется в двухтемпературном приближении. Предполагается, что свой вклад в интенсивность излучения от каждой элементарной площадки поверхности звезды вносят два компонента (горячая фотосфера и холодное пятно) в зависимости от доли площадки, занятой пятнами. Методом LCI строятся карты поверхностных температурных неоднородностей, на которых с большой вероятностью определяется лишь долгота положения активной области. Численные методы, применяющиеся в случае LCI, были разработаны и улучшены в ряде работ [13, 27, 78, 81, 96]. Метод LCI информативнее обычного анализа кривых блеска и дает более детальную информацию о поверхностных температурных неоднородностях (вследствие учета при моделировании значения угла наклона оси вращения звезды к лучу зрения и эффекта потемнения диска звезды к краю и др.).

Спектральные методы – одни из самых информативных при астрофизических исследованиях. Классический спектральный анализ применяется для изучения основных характеристик фотосфер активных звезд. При исследовании пятенной структуры широко применяется метод допплеровского картирования. Для изучения магнитного поля используются спектрополяриметрические методы.

Методом допплеровского картирования восстанавливаются карты распределения пятен на поверхности звезды с помощью решения обратной задачи восстановления распределения пятен по поверхности звезды из анализа набора спектральных линий, полученных для различных фаз вращения звезды. При быстром вращении звезды профиль линии значительно уширяется. Холодное пятно на поверхности звезды будет давать вклад в широкую линию в виде относительно узкой детали («бугорка», псевдоэмиссии), которая будет перемещаться по профилю линии с фазой вращения звезды. Метод допплеровского картирования разработан и улучшен в большом количестве

работ (см. [29, 112, 16, 37, 48, 50, 62, 91, 94, 117, 129]), в которых авторы реализовывали и тестировали различные подходы к решению обратной задачи восстановления распределения пятен на поверхности звезды.

К спектрополяриметрическим методам относится метод зеемандопплеровского картирования, основанный на анализе спектрополяриметрических наблюдательных данных с высоким разрешением. Этот метод позволяет получить информацию о распределении как пятен, так и магнитного поля по поверхности звезды. Широкое распространение получил подход с использованием техники LSD – Least Squares Deconvolution (деконволюция методом наименьших квадратов). Она используется для характеристик, обнаружения, описания a также лля летального картографирования распределения температуры и магнитного поля по поверхности звезды [31]. Подробно техника LSD рассмотрена в работах Донати [31] и Кочухова [59].

Широко применяется метод определения продольной компоненты магнитного поля из соотношения параметров Стокса V/I [11]. Измерения магнитного поля в нашей работе будет проводиться на основе этой техники.

Помимо этих основных существует ряд методов, реже используемых при изучении активных звезд. Перечислим некоторые из них.

Метод моделирования молекулярных полос применяется для исследований звезд, в холодных пятнах которых могут образовываться молекулярные полосы. При сравнении полученных на основании модельных расчетов спектров с наблюдаемыми, определяются параметры магнитного поля. Подробно метод моделирования молекулярных полос рассмотрен в работах [47, 83, 87].

Метод отношения глубин линий дает возможность определения температуры пятен (предполагается, что точность метода может достигать 10 К) и площади запятненной поверхности [39]. Этот метод был разработан

Каталано и др. [22] и основан на анализе отношения глубины пар линий, имеющих различную чувствительность к изменениям температуры.

#### Параметры звездных пятен

Переменность блеска активных звезд вызвана вращательной модуляцией холодных пятен (областей) на их поверхности. Исследования активных звезд различными методами позволили установить следующие параметры звездных пятен.

Размер звездных пятен варьируется в широком диапазоне. Наибольшие по размеру пятна найдены у звезд типа Т Таи и RS CVn, площадь пятен для них может достигать 50 % от всего видимого диска звезды, как, например, у звезды типа Т Tau V410 Tau [102]. Фотометрическая переменность магнитноактивных звезд вызвана вращательной модуляцией пятен на их поверхности, амплитуда переменности блеска для самых активных звезд достигает 0<sup>m</sup>.65 [114, 115, 121]. Значение амплитуды переменности зависит от размера, положения на поверхности звезды и температуры пятен. Звезда XX Tri (HD 12545) спектрального класса K0 III, принадлежащая к типу звезд RS CVn, длительное время считалась одним из «рекордсменов» и по величине переменности, и по запятненности (максимальная переменность блеска в фильтре V равна 0<sup>m</sup>.63). Однако, согласно результатам [57] и [107] у звезды из переменных звезд обзора ASAS (ASAS 063656-0521.0) в отдельные сезоны наблюдений обнаружена переменность в фильтре V до 0<sup>m</sup>.8. Пятна занимают 44 % ее поверхности [107].

*Температура пятен* различна для звезд разных спектральных классов. Установлена зависимость температуры пятна от температуры фотосферы (см. рис. 7 из обзора [15]), из которой следует, что более горячие звезды обладают большим контрастом пятен (разницей между температурой фотосферы и температурой пятна). Контраст изменяется от 2000 К для звезд G0 до 200 К для звезд класса M4. Распределение пятен по поверхности неоднородно. Однозначного общего закона распределения пятен на поверхности звезд не существует. Анализ допплеровских карт распределения пятен указывает на то, что для большинства звезд характерно приполярное и высокоширотное расположение активных областей [15], [119].

*Магнитные поля пятен* - зависимость величин измерений магнитного поля пятен от эффективной температуры звезд представлена, например, в обзоре [15]. Для холодных звезд (3000 К - 4000 К) магнитное поле пятен составляет 3-5 кГс. Более горячие звезды имеют меньшие значения магнитных полей пятен. Результаты измерений магнитных полей солнечных пятен (тени и полутени) согласуются с зависимостью из обзора [15].

Время жизни пятен, согласно имеющимся к настоящему времени исследованиям, пропорционально их размерам [41]. Ряд наблюдений свидетельствует о том, что большие пятна могут существовать достаточно долго (в течение нескольких лет, даже десятилетий). Например, в [42] показано, что активная область на поверхности звезды V410 Tau существовала около 20 лет. Однако, неясно, является ли данная область единым образованием или могла состоять из набора более мелких пятен, время жизни которых остается неизвестным и может быть существенно меньше времени жизни всего образования.

Циклы активности звезд подробно исследовались многими авторами ([56], [70], [86], [100]). Наше Солнце обладает хорошо известными циклами пятенной активности в 11 лет и магнитной активности – в 22 года. Обзор исследований циклов активности у звезд различных спектральных классов можно найти в [70, 65], серии статей [84, 86]. Основой исследований служат результаты многолетних наблюдений фотосферной и хромосферной активности сначала у десятков, а затем и у нескольких сотен звезд (наиболее известен обзор, начатый в 1968 г. Вилсоном [132] и продолженный до нашего времени).

Эффект флип-флоп впервые был обнаружен у звезды FK Com [53]. Он заключается в быстрой смене положения долготы активной области примерно на 180°. После открытия эффект флип-флоп был установлен для более десятка холодных звезд, а также у Солнца [35]. Среднее время между переключениями называется циклом флип-флоп, характерное время этих циклов составляет от нескольких лет до десятилетия. Конкретно для FK Com цикличность переключений активных долгот оценивается равной 5.2 года [65]. В [68] наиболее предсказано переключение активной долготы В момент, соответствующий наибольшей запятненности звезды. Позднее это было подтверждено в работе [108] по исследованию активности звезды HD 291095. К настоящему времени эффект флип-флоп остается всё ещё мало изученным и не имеет однозначного объяснения. В частности, для объяснения этого явления, например, авторы [35] предложили модель не-осесимметричного действующего совместно с переменным осесимметричным динамо, магнитным полем.

Рассмотрим более подробно свойства звезд типа FK Com.

#### Звезда FK Com

FK Comae Berenices (HD 117555) (далее FK Com) - одиночная звезда спектрального класса G5 III–G4 III с сильной хромосферной активностью [62, 63]. Это быстровращающийся гигант, значение проекции скорости его вращения на луч зрения составляет  $v \sin i=159-162$  км с<sup>-1</sup>. Установлено, что FK Com обладает сильным дифференциальным вращением, параметр дифференциального вращения равен  $\Delta\Omega$ =0.08 рад. сут<sup>-1</sup>. Эффективная температура фотосферы звезды составляет 5000±270 К. Фотосфера покрыта холодными пятнами (областями) с температурой на 600-1200 К ниже, чем у остальной поверхности. Радиус FK Com равен примерно 4 R<sub>☉</sub>. Логарифм ускорения свободного падения равен lg g=3.5. Среднее значение блеска звезды в фильтре V составляет 8<sup>m</sup>.245. Период вращения, установленный на основе анализа длинных рядов фотометрических наблюдений, имеет значение: P=2<sup>d</sup>.4002466+0<sup>d</sup>.0000056*E*. Данные, приведенные выше, собраны из цикла работ [62, 64, 66, 67, 63, 85, 127].

#### Фотометрическая и спектральная активность звезды FK Сот

исследованиям FK Фотометрическим звезды Com посвяшены многочисленные работы. На основании 25 летних фотометрических наблюдений было замечено резкое изменение долготы активной области, примерно на 180 градусов, в дальнейшем названное эффектом "флип-флоп" [53]. Эффект переключения долгот активных областей, был обнаружен у другой звезды типа FK Com – V1794 Cyg, а также у некоторых звезд других типов [54, 55]. В работах различных авторов были найдены циклы активности FK Com, которые имели различные величины - от нескольких лет до десятилетия, но однозначной величины циклов активности установлено не было [40, 84, 85]. Спектр звезды обладает эмиссионными линиями H и K Call, бальмеровской водородными линиями серии, которые показывают значительную переменность.

#### Магнитная активность звезды FK Com

В [69] впервые были проведены исследования магнитного поля звезды, согласно которым было установлено, что продольная компонента магнитного поля  $\langle B_z \rangle$  изменяется с фазой вращения -максимум  $\langle B_z \rangle = 272 \pm 24$  Гс зарегистрирован на фазе 0.08, минимум  $\langle B_z \rangle = 60 \pm 17$  Гс - на фазе 0.36. Сопоставляя данный результат с анализом построенной ими карты поверхностных температурных неоднородностей, авторы высказали предположение о наличии на её поверхности активных областей разных полярностей – положительной, соответствующей фазе 0.3, и отрицательной, наблюдаемой на фазе 0.1.

#### Звезды V1794 Cyg, ET Dra

Звезда V1794 Cygni (HD 199178) идентифицирована, как звезда типа FK Com [20]. Как и FK Com, эта звезда является одиночным

быстровращающимся гигантом спектрального класса G5 (III-V). Проекция скорости вращения на луч зрения для нее составляет  $v \sin i = 80$  км с<sup>-1</sup> [47]. В работе [17] период фотометрической переменности HD 199178 установлен равным Р~3<sup>d</sup>.337. Для звезды характерно дифференциальное вращение, параметр дифференциального вращения составляет  $\Delta\Omega=0.066$  рад. сут<sup>-1</sup>. Температура фотосферы звезды HD 199178 определена равной  $T_{3bb} = 5375 \pm 75$  К. Величины циклов активности звезды, равные 9.07 и 2.84 лет, были получены в [52] на основе анализа переменности амплитуды блеска. Результаты картирования поверхности HD 199178 указывают на наличие значительного полярного пятна и нескольких небольших пятен на низких широтах. В [106] было показано, что пятна на поверхности HD 199178 имеют тенденцию концентрироваться вблизи двух предпочтительных долгот, разделенных на 0.5 по фазе (180° по долготе). Переключение между этими двумя долготами происходит квазипериодически на временных масштабах 2.1-2.4 и 4.1 года. Отмечается, что, возможно, две активные области движутся по поверхности звезды, приближаясь друг к другу и иногда сливаются в единое образование. Обнаруженный цикл переменности в изменениях блеска звезды с периодом, примерно равным  $\approx 8.0$  годам, может быть напрямую связан с пятенной активностью.

Звезда ЕТ Dra является наименее изученной звездой типа FK Com. Спектральный класс звезды - K5 IV. Проекция скорости вращения на луч зрения по разным источникам составляет  $v \sin i = 23-40$  км с<sup>-1</sup> [7, 111]. Период переменности блеска равен 13.9 суток. Температура фотосферы равна  $T_{3\phi\phi}$ =4820 К. Эта звезда показывает аномально высокое отношение величин потоков излучения в рентгеновском и оптическом диапазонах [51].

#### Актуальность темы исследования.

Исследования звездной активности и магнетизма принадлежат к одной из основных задач современной астрофизики. В последние десятилетия произошел значительный прогресс в получении наблюдательных данных высокого (высокоточные фотометрические наблюдения качества С поверхности Земли и с космическими телескопами, спектральные и спектрополяриметрические наблюдения с высоким отношением сигнала к шуму), а также в методах их обработки и интерпретации (методы восстановления карт поверхностных температурных неоднородностей из анализа кривых блеска, методы допплеровского и зееман-допплеровского картирования и др.).

Не смотря на уже имеющиеся результаты наблюдений звезд типа FK Com (выполненных различными методами и в разных спектральных диапазонах), эти объекты все еще остаются предметом многочисленных исследований, направленных на глубокое изучение природы их активности.

Во многом активность FK Com подобна активности звезд типа RS CVn. Фотометрическая переменность FK Com связана с вращательной модуляцией её излучения, обусловленной наличием на её поверхности холодных пятен. Именно исследования фотометрической переменности FK Com привели к открытию явления смены активных долгот - эффекта флип-флоп [53]. По результатам фотометрических и спектральных наблюдений, которые допплеровского основой проведения послужили для картирования поверхности FK Com, было сделано заключение о том, что явление флип-флоп происходит вследствие быстрого переключения активности с одной долготы на другую, как правило, отстоящую от первой примерно на 180 градусов.

В диссертации представлены оригинальные данные для активной звезды FK Com, полученные соискателем на протяжении последних лет, а также результаты анализа данных для кандидатов в звезды типа FK Com,

полученных из высокоточных фотометрических наблюдений на космическом телескопе Кеплер.

#### Цели и задачи диссертационной работы.

Целью данной работы является исследование звезды FK Com на основании фотометрических и спектрополяриметрических наблюдений, а также поиск и установление кандидатов в звезды типа FK Com. Для достижения поставленной цели необходимо было выполнить следующие задачи:

- Провести новые фотометрические наблюдения звезды FK Com на телескопах Звенигородской, Терскольской и Коуровской обсерваториях. Создать архив всех фотометрических данных, доступных на момент выполнения работы.
- 2. Используя методы восстановления распределения температурных неоднородностей на поверхности звезды по фотометрическим данным, получить данные о распределении долгот активных областей за период имеющихся наблюдений. Из анализа полученных карт распределения запятненных областей и фотометрических рядов определить и проанализировать изменение площадей холодных областей, миграцию активных областей по долготе, изменения амплитуды переменности блеска и среднего значения блеска звезды. Установить циклы активности звезды.
- Провести спектрополяриметрические наблюдения на Основном звездном спектрографе БТА 6-метровом телескопа САО РАН. Получить значения продольной компоненты магнитного поля <B<sub>z</sub>> и проанализировать полученные данные.
- 4. Из доступных данных наблюдений космического телескопа Кеплер отобрать кандидатов в звезды типа FK Com по значениям периода вращения, амплитуды переменности, температуры и ускорения свободного падения. Проанализировать фотометрическую

переменность и установить величину дифференциального вращения, долготы активных областей, наличие эффекта флип-флоп, циклы активности.

#### Научная, методическая и практическая новизна работы.

- Получены новые фотометрические данные для звезды FK Com. Однородная методика анализа обобщенного массива данных позволила уточнить характер изменений положения холодных областей на поверхности звезды и эффекта флип-флоп. Уточнены циклы активности звезды на основании анализа увеличенного во временном отношении массива данных.
- По новым спектрополяриметрическим данным сделано предположение о вековых изменениях продольной компоненты магнитного поля <B<sub>z</sub>> звезды FK Com.
- 3. Новые данные о фотометрической и спектрополяриметрической переменности FK Com могут быть использованы для выбора и ограничения различных теоретических моделей, характеризующих магнитную активность звезд, в том числе, объясняющих эффект переключения долгот и наблюдаемые циклы активности. Большой оригинальный массив фотометрических наблюдений будет пополняться и использоваться в дальнейших исследованиях.
- В результате проведенного по единой методике анализа фотометрических данных из архива космического телескопа Кеплер найдены 4 кандидата в звезды типа FK Com.

#### Научная, методическая и практическая значимость работы.

 По единой методике проведен анализ всего доступного к настоящему времени массива данных фотометрических наблюдений FK Com, построены карты поверхностных температурных неоднородностей этой звезды.

- Анализ результатов определений положений активных областей на поверхности FK Com привел к заключению, о существовании двух систем активных областей на её поверхности. Установлено, что положения каждой из этих систем претерпевают циклические изменения.
- 3. Проанализированы временные ряды блеска FK Com в фильтрах U, B и V, амплитуды переменности блеска, суммарной площади пятен на поверхности звезды и среднего значения блеска каждого из рассматриваемого нами сетов. На основе проведенного анализа для существенно увеличенного набора фотометрических данных определены значения величин длительности циклов активности FK Com.
- Получены новые спектрополяриметрические данные, на основании которых сделаны оценки величин продольной компоненты магнитного поля <B<sub>z</sub>>. Высказано предположение о существовании вековых изменений среднего значения продольной компоненты магнитного поля звезды FK Com.
- 5. На основании анализа данных наблюдений космического телескопа Кеплер найдены кандидаты в звезды типа FK Com. Для этих кандидатов вычислены значения дифференциального вращения и определены долготы холодных областей, а также обнаружено наличие эффекта флип-флоп и выявлены циклы активности, характерные для звезд типа FK Com.

#### Положения, выносимые на защиту:

 Результаты анализа полного набора имеющихся фотометрических данных для FK Com (нового наблюдательного материала в 2013-2015 годах и данных литературных источников), выполненного по единой методике. Результаты анализа временных рядов для блеска звезды в фильтрах U, B и V, амплитуды переменности блеска, суммарной площади пятен на поверхности звезды и среднего значения блеска каждого из рассматриваемого нами сетов наблюдений.

- 2. Вывод о существовании двух систем активных областей на поверхности FK Com, сделанный на основе анализа определений положений активных областей на её поверхности. При этом установлено, что положения каждой из этих систем претерпевают циклические изменения. Характерное время изменения положения первой из систем составляет порядка 3330 суток (9.12 года). Изменения положений второй активной области носят сложный характер, наилучшим образом они объясняются комбинацией времен переменности в 4140 суток (11.3 года) и 730 суток (2 года). В итоге было выделено 15 событий, рассматриваемых нами как переключение между системами активных областей.
- Результаты определений величины доли поверхности звезды FK Com, покрытой пятнами - в среднем она составляет 17% от полной видимой поверхности звезды и меняется в пределах от 9% до 25%.
- 4. Результаты спектрополяриметрических наблюдений, на основании которых получены оценки величин продольной компоненты магнитного поля FK Com в 2012-2015 гг. и которые интерпретируются в рамках предположения о вековых изменениях среднего значения продольной компоненты магнитного поля звезды.
- 5. На основании анализа данных наблюдений космического телескопа Кеплер установлены четыре кандидата в звезды типа FK Com. Результаты определений значений дифференциального вращения, долгот активных областей, наличия эффекта флип-флоп и циклов активности для этих объектов.

#### Степень достоверности и апробация результатов.

Фотометрические данные, использованные в диссертационной работе, собраны из литературных источников, а новые выполнены на обсерваториях –

пик Терскол (Терскольский филиал ИНАСАН), Звенигородской обсерватория (30)ИНАСАН), Коуровской астрономической обсерватории УрФУ. Спектрополяриметрические данные, используемые в диссертации, получены на ОЗСП 6-м телескопа БТА САО РАН (в рамках времени выделенного Комитетом по тематике больших телескопов (КТБТ)), оснащенном высокочувствительной ПЗС-камерой и широко используемом сотрудниками САО РАН и пользователями по многим научным программам. Спектры обрабатывались с помощью стандартного пакета программ, разработанного и применяемого в САО РАН. Данные для поиска и установления кандидатов в звезды типа FK Com взяты из общедоступного архива наблюдений космического телескопа Кеплер MAST и NExA.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на российский и международных астрономических конференциях и семинарах:

- Конкурс молодых ученых. ИНАСАН. «Пятенная активность звезд типа FK Comae». Ноябрь, 2013 г.
- 43-я студенческая научная конференция «Физика Космоса». Коуровская обсерватория. «Фотометрические и спектральные наблюдения переменных звезд типа FK Com». Февраль, 2014 г.
- 3. XI Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН. «Применение архива наблюдений космического телескопа Кеплер для астрофизических задач по поиску переменных звезд типа FK Com». Апрель, 2014 г.
- Международная конференция, посвященная 175-летию Пулковской обсерватории «Звёздные атмосферы: фундаментальные параметры звезд, химический состав и магнитные поля». ГАО РАН. «Спектральные и фотометрические исследования и поиск звезд типа FK Com». Июнь 2014 г.

- Международная конференция «Physics and Evolution of Magnetic and Related Stars". SAO RAS. «Measurement of magnetic field of FK Com». Август, 2014г.
- Конкурс молодых ученых. ИНАСАН. «Исследование и поиск звезд типа FK Com». Ноябрь, 2014 г.
- 44-я студенческая научная конференция «Физика Космоса». Коуровская обсерватория. «Фотометрические исследования звезд типа FK Com». Февраль, 2015 г.
- XIII Конференция молодых ученых, посвященная дню космонавтики «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН. «Фотометрическая активность и магнитное поле звезды FK Com – анализ данных 2013-2015 годов». Апрель, 2016 г.
- 9. Международная астрономическая конференция «Stars: from collapse to collapse». SAO RAS. «Activity of the star FK Com: analysis of photometric and spectropolarimetric data of 2012-2016». Октябрь, 2016 г.
- Конкурс молодых ученых. ИНАСАН. «Поиск кандидатов в звезды типа FK Com по наблюдениям космического телескопа Кеплер. II. Аналоги звезды HD 199178». Октябрь, 2016 г.

#### Публикации.

Автор имеет 10 опубликованных научных работ в рецензируемых журналах (рекомендованных ВАК и индексируемых WoS), из них 3 по теме диссертации.

 Пузин В.Б., Саванов И.С., Дмитриенко Е.С. О возможности установления кандидатов в звезды типа FK Com по наблюдениям с космическим телескопом Кеплер // Астрономический журнал. – 2014. – Т. 91. – №7 – С. 550.

- Пузин В.Б., Саванов И.С., Романюк И.И., Семенко Е.А., Дмитриенко Е.С. Изучение магнитного поля FK Com // Астрофизический бюллетень. – 2014. – Т. 69. – №3. – С.341-344.
- Пузин В.Б., Саванов И.С., Дмитриенко Е.С., Романюк И.И., Семенко Е.А., Якунин И.А., Бурданов А.Ю. Пятна и циклы активности звезды FK Com анализ данных 2013-2015 гг. // Астрофизический бюллетень. 2016. Т. 71. № 2. С.204-214.

#### Личный вклад автора.

Диссертационная работа и положения, выносимые на защиту, представляют результаты исследований автора работы. Автор работы принимал активное участие в постановке целей и задач проведенных исследований. Новые наблюдательные данные получены лично автором или при его непосредственном участии. Работа по обработке наблюдений, анализу полученных данных, интерпретации полученных результатов выполнена автором или при его активном участии. Вышеизложенные доклады на конференциях и публикации подготовлены самостоятельно или на равных правах с другими соавторами.

#### Структура и объем диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Общий объем диссертационной работы 106 страниц, из них 74 страницы текста, включая 12 рисунков, 7 таблиц, 6 формул. Список литературы включает 133 наименования на 14 страницах. Приложения занимают 18 страниц и содержат 2 таблицы и 1 рисунок.

#### ГЛАВА 1. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВЕЗДЫ FK COM

#### 1.1 Введение

Прототип группы, FK Com, является активной звездой позднего спектрального класса, которая интенсивно изучается в ходе наземных фотометрических и спектральных наблюдений, а также многочисленных ультрафиолетовых гамма-наблюдений (обзоры космических И наблюдательных данных приводятся в [40, 63]. Основные свойства звезды FK Com были представлены во ВВЕДЕНИИ, ниже они кратко перечислены. Спектральный класс FK Com оценивается как G5 III, проекция скорости вращения звезды на луч зрения составляет 160 км с<sup>-1</sup>. Эфемерида для FK Com рассчитана на основании анализа 25 летних фотометрических наблюдений и установлена как  $HJD = 2439252^{d}.895 + (2^{d}.4002466 \pm 0^{d}.0000056)E$  [53]. Активность FK Com во многом подобна активности звезд типа RS CVn. Фотометрическая переменность связана с вращательной модуляцией излучения звезды, поверхность которой покрыта холодными пятнами. Именно исследования фотометрической переменности FK Com привели к открытию явления быстрой смены положения активных областей – флип-флопов [53]. По фотометрических и спектральных наблюдений, результатам которые послужили основой для проведения допплеровского картирования поверхности FK Com, было сделано заключение о том, что явление флип-флоп происходит вследствие быстрой смены положения активной области с одной долготы на другую, как правило, отстоящую от нее примерно на 180 градусов. Такое объяснение можно считать общепринятым [40], альтернативным ему является мнение авторов [63], считающих что флип-флоп происходит вследствие миграции пятен по поверхности звезды. Анализ допплеровских карт и фотометрических данных позволил установить, что вращение (коэффициент поверхности FK Com дифференциальным является

дифференциального вращения по разным оценкам составляет ≈0.012-0.03). Зарегистрированные циклы активности FK Com лежат в интервале времени от 4.5 до 6.1 лет [78].

#### 1.2 Наблюдательные данные

Новый наблюдательный материал для исследования фотометрической переменности FK Com был получен в 2013-2015 годах (ПРИЛОЖЕНИЕ А, таблица 1). Наблюдения звезды были выполнены на трех обсерваториях: обсерватории пик Терскол (Терскольский филиал ИНАСАН), Звенигородской обсерватории (ЗО ИНАСАН) и Коуровской астрономической обсерватории УрФУ.

Наблюдения на обсерватории пик Терскол проводились на телескопе Цейс-600 в фильтрах V и R. Регистрация изображений осуществлялась на ПЗС приемник KAF-1001E (размер чипа которого составляет 1024х1024 пиксела, размер пиксела равен - 24х24 микрона).

Звенигородской Наблюдения на обсерватории выполнялись на телескопе Цейс-600 в фильтре V и на роботизированном телескопе Veloce RH 200 в фильтре B, V, R. В обоих случаях в качестве приемника излучения использовалась ПЗС-камера Apogee ALTA U3041 (размер чипа камеры 2048x2048 составляет пикселов, размер пиксела равен 15х15 микрон).

Для наблюдений в Коуровской обсерватории применялся телескоп МАСТЕР-II-Урал. Телескоп оснащен блоком фильтров системы Джонсона, при наблюдении использовались фильтры R и V. Регистрация осуществлялась на ПЗС детектор Apogee ALTA U16M (размер чипа составляет 4096х4096 пикселов, каждый пиксел имеет размер 9х9 микрон).

Полученные фотометрические наблюдения подверглись процессу стандартной обработки, который включал в себя следующие процедуры: вычитание кадров подложки (bias), вычитание темнового тока, учет плоского поля. Обработка производилась с использованием программного пакета MaxIm DL. Для дифференциальной фотометрии звезды FK Com в качестве стандарта использовалась звезда HD 117567 (F2, V=7<sup>m</sup>.616), находящаяся поблизости от исследуемого объекта. Данный объект использовался в качестве стандарта во всех работах, посвященных фотометрическим исследованиям звезды FK Com.

На основе нового наблюдательного материала и данных литературных источников по единой методике проведен анализ полного набора имеющихся фотометрических данных. Это существенно отличает настоящее исследование от [40], в котором рассматривался максимально доступный до 2013 года наблюдательный материал, и в котором был применен лишь строго математический периодограммный анализ. Исследования работе В Корхонен [63], близкие по методике к нашему исследованию (имеющие в своей основе построение карт поверхностных температурных неоднородностей по фотометрическим и спектральным наблюдениям), проводились лишь по избранным (новым доступным на момент проведения их исследований) данным, но не по всей их совокупности.

Собранные данные образуют каталог фотометрических наблюдений FK Com в период с 07.05.1966, по 27.10.2015 (Юлианские даты 2439253.438 -2457322.767) в фильтрах U, B, V, R (соответственно 2650, 3773, 7070 и 2064 измерений). Наблюдения, выполненные в рамках данного исследования, начаты с 28.06.2013 (HJD=2456472.255), эти данные представлены в таблице 1, **ПРИЛОЖЕНИЯ А**. Каталог дополнен фотометрическими данными, любезно предоставленными Хеккертом [43].

Поскольку наибольшее число измерений для FK Com было получено в фильтре V, то описанные ниже исследования будут преимущественно основаны именно на них.

#### 1.3 Анализ переменности блеска

Все имеющиеся фотометрические данные для FK Com (рисунок 1.1 (а)) были разбиты на 218 сетов таким образом, что в течение каждого интервала форма кривой блеска не менялась, а на соответствующей фазовой кривой по возможности отсутствовали пробелы данных. Фазы вращения были рассчитаны по эфемериде (*HJD*=2439252<sup>d</sup>.895+(2<sup>d</sup>.4002466±0<sup>d</sup>.0000056)*E* которая использовалась в работе Корхонен [63]. Для каждой из 218 индивидуальных кривых блеска решалась обратная задача восстановления крупномасштабных температурных неоднородностей на поверхности звезды по ее кривой блеска с помощью программы iPH [108]. Основу программы составляет метод статистического подхода к решению обратных задач, разработанный и описанный в работе Теребижа [123].

обратной Решение задачи находилось В двухтемпературном приближении, при котором интенсивность излучения от каждой элементарной площадки на поверхности звезды складывается из двух компонент: излучение от фотосферы  $(I_n)$  и от холодного пятна  $(I_s)$ . При моделировании поверхность звезды была разделена на элементарные площадки размером 6°х6° градусов. Выбор размера ячейки обусловлен компромиссом между скоростью расчета и пространственным разрешением получаемых карт. Модель предполагает, что интенсивность каждой ячейки содержит вклад от обеих компонент (горячей фотосферы и холодного пятна), и, таким образом, зависит от доли поверхности покрытой пятном (фактор заполнения *f*). Интенсивность в каждой ячейки вычисляется согласно выражению:

$$I = f \times I_p + (1 - f) \times I_s$$
 (1.1)

где, 0 < f < 1,  $I_p$  – интенсивность излучения фотосферы,  $I_s$  – интенсивность излучения пятна.



Рисунок 1.1. Полная кривая блеска FK Com в фильтре V (а). Положения активных долгот в фазах вращения: заполненные кружки – более активная область, полые – менее активная (б). Изменения запятненности поверхности FK Com (в). Изменения амплитуды колебаний блеска (г).

В результате были получены распределения факторов заполнения по видимой поверхности звезды, которые наилучшим образом описывают кривую блеска. Информация о форме и количестве пятен этим методом не восстанавливается.

Входной набор астрофизических данных включает в себя набор фотометрических потоков, рассчитанных по атмосферным моделям из сетки Куруца [76] в зависимости от температуры и ускорения силы тяжести. Закон линейного потемнения к краю диска рассчитан на основе данных [30].

Согласно работе Корхонен [63], в расчетах были приняты значения 5000 К и 4000 К для температур фотосферы и пятна, соответственно. В вычислениях использовалась оценку максимального блеска звезды V=8<sup>m</sup>.04, а также величина угла наклона оси вращения звезды к лучу зрения i=60 градусов [63]. Примеры восстановления температурных неоднородностей на поверхности активных звезд представлены на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2. Пример построенных карт поверхностных температурных неоднородностей для звезды FK Com по кривым блеска 180, 181 и 182 сета (сверху вниз). НJD рассчитан на середину сета.

По построенным картам температурных неоднородностей (ПРИЛОЖЕНИЕ Б, рисунок 1) определены долготы, соответствующие максимальным значениям f (ПРИЛОЖЕНИЕ A, таблица 2). Распределение параметра f на картах содержит более достоверную информацию о положении поверхностных неоднородностей, (в первую очередь долгот), чем просто анализ фаз, соответствующих минимумам на кривых блеска (см. также работы [63, 108]). В большинстве случаев имеются концентрации пятен на двух долготах (одна из них является более ярко выраженной, положение второй определяется с большей погрешностью), которые регистрировались как две независимые активные области. Точность определений положений активных долгот в среднем составляет величину порядка 6°-12° на поверхности звезды (или 0.02-0.04 в единицах фазы).

Положения активных долгот представлены на рисунке 1.1 (б). Можно заключить, что перемещение долгот по поверхности звезды имеет достаточно сложный характер. Установленные положения активных долгот, определенные на основании данных фотометрических наблюдений в 1966 – 1992 годах, имеют хорошее согласие с измерениями положений фаз минимумов из статьи [53]. Для измерений по более поздним данным имеется хорошее, но не полное согласие (результаты исследований Корхонен и соавторов [63] и еще более поздние исследования [40] для интервала 1995-2010 гг.). Это вполне очевидно и является следствием различия методик определений долгот с активными областями – в нашем исследовании определялись положения пятен по температурным картам, а авторы [40] определяли положения активных областей из анализа фаз минимумов на фотометрических кривых.

Следует признать, что данные для четырех последних сетов (214 - 218) обладают существенными пробелами на фазовой кривой, однако, объединение данных различных сетов не представляется возможным вследствие изменений формы кривых блеска.

К определениям положений активных долгот по построенным картам для этих сетов следует относиться с осторожностью, они носят большей частью иллюстративный характер, однако, не противоречат общему ходу миграции активной области по поверхности звезды. При этом, роль новых наблюдений становится значительной при исследовании долговременной переменности блеска и циклов активности FK Com (см. ниже).

Доля видимой поверхности звезды FK Com, покрытая пятнами, в среднем составляет Sp=17%, она меняется в пределах от 9% до 25% (рисунок 1.1 (в)). Периодичность изменения Sp будет обсуждаться в следующем параграфе. Во время наблюдений около HJD=2448400 величина Sp уменьшалась до минимального значения в 9%, а максимальное значение в 25% было достигнуто около HJD=2452200 и HJD=2454600 при минимальном блеске звезды. Подобное поведение параметра Sp было отмечено раннее при анализе звезды V410 Tau [102]. Как и в случае V410 Tau, минимальное значение величины Sp достигается, когда амплитуда переменности блеска звезды имеет свое максимальное значение (рисунок 1.1 (д)). В целом, кривая изменения Sp в первом приближении является как бы зеркальным отражением кривой изменения амплитуды колебаний блеска звезды.

Построенные карты поверхностных температурных неоднородностей представлены в **ПРИЛОЖЕНИИ Б** (рисунок 1). Данные о положениях активных областей и доли запятненной видимой поверхности звезды для каждого из 218 сетов, представлены в **ПРИЛОЖЕНИИ А** (таблица 2).

Переменность кривой блеска звезды, представленная на рисунок 1.1 (а), обладает ярко выраженной модуляцией на различных промежутках времени - от 2 дней (период вращения) до сотен суток – нескольких лет (см. ниже).

#### 1.4 Циклы активности

Изучение долговременной переменности звезды FK Com и установление циклов ее активности являлись предметом многочисленных исследований (см. работы [40, 63, 84, 85]. Отметим, что данные, различающиеся по временным интервалам наблюдений и приводящие к нахождению разных значений характерных времен циклов активности, не позволяют получить однозначные оценки продолжительности того или иного цикла. Например, по данным работы Ола [85] для изменений положений активных областей были установлены квазипериодические циклы в  $5.8\pm0.4$  года и  $5.2\pm0.4$  года. Периодограммный анализ изменений площади пятен на поверхности FK Com указал на величину  $6.35\pm0.41$  лет [63].

Авторы работы [89] установили, что для интервала наблюдений 1990-2005 гг. в фотометрическом поведении звезды доминировал цикл с 5.8 Согласно продолжительностью около лет. работе Ола [84] продолжительность фотометрической цикла активности составляет 4.5 - 6.1 год.

В настоящей работе проведено независимое от выполненных ранее другими исследователями установление свойств переменности звезды и вычислены амплитудные спектры для ряда параметров, характеризующих её переменность (применялась стандартная программа LNP-TEST из библиотеки IDL). Результаты вычислений представлены на рисунке 1.3. Были проанализированы временные ряды для блеска звезды в фильтрах U, B и V, а также для среднего за сет значения блеска, амплитуды переменности блеска и суммарной площади пятен на поверхности звезды (запятненности) Sp для каждого из рассматриваемых сетов в фильтре V. Графики всех спектров мощности имеют широкие пики, соответствующие нескольким наборам характерных времен переменности. Циклы с характерными временами около





Рисунок 1.3. Амплитудные спектры мощности для данных о переменности запятненности (*Площадь*), амплитуды переменности блеска в фильтре V (*Амплитуда*), средних значений блеска (*Средний блеск*), фотометрической переменности FK Com в фильтре U, B, V. Заштрихованными областями выделены диапазоны возможных периодов переменности.

Наиболее достоверными являются результаты, полученные из рассмотрения спектров мощности в случае фильтра V (он построен по 7070 наблюдательным точкам, в то время, как данные в U и B фильтрах, получены

по 2650 и 3773 измерениям, соответственно). Наиболее ярко выражена переменность, соответствующая 2100 и 2650 суткам (5.7 и 7.3 года).

Отметим, что период в 5.4 года ранее был установлен в [53] для средних по сезонам наблюдений значений блеска звезды. Переменность на временах порядка 350-400 суток, вероятнее всего, отражает сезонную скважность наблюдений, однако обращают на себя внимание пики на спектрах мощности для среднего блеска и Sp в случае периода в 470 суток (1.29 года). Подобный пик наблюдается для зависимостей от времени блеска в фильтре V и амплитуды его переменности.

#### 1.5 Положения активных долгот и флип-флоп

Нами был выполнен анализ распределения факторов заполнения f в зависимости времени поверхности OT И ОТ долготы на звезды (см. рисунок 1.1 (б), на котором представлены положения двух активных областей на поверхности звезды). На рисунке хорошо прослеживается только положение основной – наиболее активной - долготы, при этом на первый взгляд отсутствуют указания на ярко выраженную переменность положений более активной и менее активной долгот (флип-флоп). В целом, полученные измерения согласуются с результатами, приведенными в работах [40] и [63] (рисунок 8 и 5 в этих источниках, соответственно). Однако, вследствие того, что в нашем исследовании выбиралось отличное от [63] разбиение дат по сетам наблюдений (когда использовались сеты с наименьшими из имеющихся длительностями наблюдений), стало возможным более подробно проследить эволюцию положений активных долгот. На рисунке 1.4 представлены данные, характеризующие только положения наиболее активной области (длина вертикальной линии примерно соответствует погрешности определения её положения). Анализ результатов приводит, во-первых, к принципиально

новому заключению о существовании двух систем активных областей на поверхности FK Com (обозначены как А и Б). Во-вторых, установлено, что положения каждой из этих систем претерпевают циклические изменения. Характерное время изменения положения первой из систем (А) составляет порядка 3330 суток (9.12 года). Изменения положений второй активной области (Б) носят сложный характер и наилучшим образом они объясняются комбинацией времен переменности в 4140 суток (11.3 года) и 730 суток (2 года). Отметим, что это не первый случай обнаружения на поверхности звезды двух систем активных областей. В работе [103], по 156 - дневным наблюдениям со спутником CoRoT установлено, что на поверхности карлика HD 181906 спектрального класса F существуют две системы активных областей, разделяющихся по долготе примерно на 100 градусов. Активные области внутри этих систем отстоят друг от друга примерно на 180 градусов. Переключения между системами активных долгот происходили квазипериодически с характерным временем 30-35 суток, менее регулярно в последней трети наблюдений. Время переключений между активными долготами составляло 20-25 или 40-45 суток. Настоящее исследование не является единственным, в ходе которого были установлены долговременные циклические изменения положений активных областей звезд. Так, например, при изучении активной звезды типа RS CVn HR 1099 авторы [14] пришли к выводу о существовании на поверхности этой звезды долгоживущих активных областей, мигрирующих по поверхности с характерным временем в 16±3 лет. Согласно работе [14] в переменности блеска HR 1099 (в фильтре V) и в колебаниях амплитуды этой переменности наблюдаются другие циклы активности – 15 лет и 5.3±0.1 года, соответственно.


Рисунок 1.4. Положения двух систем активных областей на поверхности FK Com (кривые A и Б). Вертикальными линиями представлены имеющиеся в литературе данные о моментах флип-флоп (по результатам работ [63, 67] – пунктирные линии, и по результатам работы [40] – штриховые линии) с присвоенными номерами от 1 до 18 (нижняя ось графика). Положения моментов флип-флоп по данным настоящей работы отмечены черточками на верхней оси и пронумерованы от 1 до 15. Заштрихованной областью показаны интервалы между установленными моментами флип-флоп.

Отметим, что представленные выше выводы касаются цикличности изменений положений систем активных областей на поверхности FK Com, а не характерного времени между переключениями активности долгот. Исследования [40] не привели к заключению о регулярности явления флип-флоп у FK Com. Согласно [85], две активные области с долготами около 90 и 270 градусов мигрируют с квазипериодами в 5.2 и 5.8 года. Наши заключения о существовании двух систем активных областей на поверхности FK Com и о циклических изменениях положения каждой из этих областей позволяют развить новый подход при анализе периодичности явления флип-флоп. На рисунке 1.4 вертикальными линиями (пунктирные и штриховые) представлены имеющиеся в литературе данные о моментах флип-флоп. В совокупности по результатам [63, 67] (пунктирные линии) и [40] (штриховые линии) отмечено 18 таких явлений и им присвоены номера от 1 до 18 (нижняя нумерация). Согласно подходу нашего исследования, признается существование переключения положений активных долгот только в тех случаях, когда происходит переключение между системами активных областей (А и Б), а не просто изменение положения активной области на ≈0.5 по фазе. Следует принять во внимание, что иногда нет возможности однозначно определить, к какой из систем относится активная область, положение которой найдено. Несмотря на данное затруднение, ряд случаев допускает однозначную интерпретацию. Например, предполагается, что, событие под номером 2 (нижняя нумерация), несмотря на видимый сдвиг в положении на 0.5 по фазе, не следует относить к флип-флоп. Группы точек, до линии 2 (нижняя нумерация) и после нее, принадлежат холодным пятнам одной и той же системы активных областей (кривая В). Как следствие, в нашем анализе было выделено 15 событий (верхняя нумерация), рассматриваемых как переключение между системами активных областей (таблица 1.1). Наши данные совпадают с данными, представленными в [40], [63] и [67] в 7 случаях, а в 8 случаях - нет.

Таблица 1.1

Моменты переключения между системами активных областей (флип-флоп).
Звездочками отмечены даты переключений активных долгот из работ
Корхонен [63, 67] и Хакмана [40], совпадающие с моментами флип-флоп, определенные в нашей работе.

N⁰	HJD 2400000+	Nº	HJD 2400000+	Nº	HJD 2400000+
1	45350	6	49450*	11	51270*
2	45750	7	50750*	12	52320*
3	46150*	8	50870*	13	52970
4	46750	9	50970*	14	53180
5	48750	10	51170*	15	56430

Подобно тому, как было сделано в [40], мы применили периодограммный анализ к суммарным данным о положениях активных областей A, B и моментах флип-флоп (рисунок 1.5).

Для исследования характерных времен переключения активных долгот построен искусственный временной ряд, состоящий только из 0 и 1, в котором 0 соответствует моментам, когда более активная долгота лежит на кривой A, а 1 - когда - на кривой B (таблица 2, **ПРИЛОЖЕНИЯ A**). Было установлено, что характерные времена переменности для данных о положениях активных областей составляют 0.9, 1.3, 3.6 и 18 лет. Ни одно из этих значений не совпадает с циклами переменности положений, установленными для каждой из областей A или B. Характерные времена переключений определены равными 1.1, 1.3, 4.2 и 27 лет.

Можно согласиться с выводом из [40] о вероятном отсутствии ярко выраженной регулярности флип-флоп у FK Com (по рассматриваемому в нашем исследовании набору данных). Препятствиями к обнаружению их цикличности явления флип-флопа, несомненно, являются большая скважность наблюдений и высокая вероятность того, что эволюция пятен может происходить на короткой временной шкале. Согласно [40], иногда кривые блеска претерпевают значительные изменения примерно за 10 дней.



Рисунок 1.5. Данные о положениях активной области А (точки) и моментах флип-флоп (сплошная линия).

Наконец, отметим, что заключение о существовании двух систем активных областей на поверхности FK Com и их эволюции естественным образом снимает вопрос (см. в [40]) о том, что различия в положениях активных областей на поверхности звезды в момент переключения могут составлять по фазе не только 0.5, но и другие значения.

### 1.6 Выводы к ГЛАВЕ 1

Получен новый наблюдательный материал исследования ДЛЯ фотометрической переменности FK Com в 2013-2015 годах. На его основе и данных литературных источников по единой методике проведен анализ полного набора имеющихся фотометрических данных для этого объекта. Весь набор данных наблюдений был разбит на 218 индивидуальных кривых блеска, кажлой ИЗ обратная для которых решена задача восстановления температурных неоднородностей на поверхности звезды по ее кривой блеска. По построенным поверхностным картам определены положения активных областей.

Были рассмотрены временные ряды для блеска звезды в фильтрах U, B и V, амплитуды переменности блеска, суммарной площади пятен на поверхности звезды (запятненности) Sp и среднего значения блеска каждого из рассматриваемого нами сетов. Графики всех спектров мощности имеют широкие пики для нескольких наборов характерных времен переменности.

Анализ результатов определений положений активных областей на поверхности FK Com приводит к заключению о существовании двух систем активных областей на поверхности FK Com. Установлено, что положения каждой из этих систем претерпевают циклические изменения. Предлагается признать существование переключения положений активных долгот только в тех случаях, когда происходит переключение между системами активных

областей, а не просто изменение положения активной области на 0.5 по фазе. В итоге было выделено 15 событий, рассматриваемых как переключение между системами активных областей. Из них 7 событий совпадают с данными, представленными в [40], [63] и [67], а в 8 случаях - совпадения нет.

Установлена величина доли поверхности звезды FK Com, покрытая пятнами - в среднем она составляет 17% от полной видимой поверхности звезды и меняется в пределах от 9 до 25 процентов.

Подтверждается вывод из [40] о вероятном отсутствии ярко выраженной регулярности флип-флоп у FK Com. Препятствиями к обнаружению возможной цикличности являются большая скважность наблюдений и высокая вероятность того, что эволюция пятен может происходить на короткой шкале времен.

## ГЛАВА 2. СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВЕЗДЫ FK COM

### 2.1 Введение

Среди многочисленных исследований звезды FK Com особый интерес представляет работа [69], в которой было выполнено сопоставление изменений измеренных величин продольного магнитного поля с положениями областей поверхности активных на звезды, установленными по допплеровским картам и результатам анализа фотометрической переменности звезды. Авторами работы [69] были найдены фазы периода вращения звезды, для которых достигаются максимальное ( $\langle B_z \rangle = 271 \pm 24 \ \Gamma c$ ) и минимальное (<B<sub>z</sub>> = 60±17 Гс) значения продольной компоненты магнитного поля. В качестве объяснения полученных результатов была предложена модель, в наблюдаемая объясняется которой переменность магнитного поля изменением видимого положения двух активных областей, отстоящих друг от друга на 0.2 по фазе. Уникальные свойства звезды и указанные выше обстоятельства побудили провести новые независимые спектрополяриметрические наблюдения этой звезды с целью измерения величины продольной компоненты ее магнитного поля <B<sub>z</sub>>. Такие наблюдения проводились в течение трех сезонов – в 2012, 2014 и 2015 годах.

## 2.2 Наблюдательные данные и измерения магнитных полей

#### Основной звездный спектрограф БТА и анализатор поляризации

Новые спектрополяриметрические данные для исследований магнитного поля звезды FK Com получены на 6-м телескопе БТА специальной астрофизической обсерватории (САО РАН) в рамках времени выделенного Комитетом по тематике больших телескопов (теперь Национальный комитет

по тематике российских телескопов). Исследования звездного магнетизма на основании изучения эффекта Зеемана в спектрах различных звезд на БТА проводятся с использованием Основного звездного спектрографа (ОЗСП).

ОЗСП 6-м телескопа БТА – представляет собой спектрограф с длинной щелью, установленный стационарно в фокусе Нэсмит-2 [1, 2]. Основное назначение прибора – получение однопорядковых спектров ярких точечных и протяженных объектов. ОЗСП является старейшим действующим прибором 6-м телескопа. В течение всего времени эксплуатации основные узлы спектрографа испытали несколько стадий модернизации [2]. В настоящее время спектрограф используется в основном в сочетании с анализатором круговой поляризации для работ по изучению звездных магнитных полей [26].

В режиме поляриметрии возможны наблюдения звезд яркостью до 12-й зв. величины при одновременной регистрации участка спектра шириной 500 Å со средним разрешением R =  $\lambda/\Delta\lambda$  = 15000. Регистрация спектров осуществляется на ПЗС камеру с чипом E2V CCD 42-90 размером 2048х4600 пикселов. Размер пиксела равен 13.5х13.5 микрон. В качестве анализатора магнитного поля используется поворотная, ахроматическая пластинка  $\lambda/4$ . Пластинка имеет два рабочих положения  $\varphi = 0^{\circ}$  и 45°.

Фазовая четверть-волновая пластинка ( $\lambda/4$ ) превращает круговую поляризацию в линейную, вследствие чего лево- и правоциркулярные поляризации превращаются в линейные, ортогональные друг другу. Дихроичный поляризатор, который расположен после четвертьволновой пластинки и диафрагмы, делит свет на два ортогонально поляризованных луча, которые попадают на резатель изображения и далее на щель спектрографа. Поворотом фазовой пластинки меняются местами световые пучки. При двух последовательных экспозициях с положением фазовой пластинки в 0° и 45° регистрируются спектры с противоположенными поляризациями. Регистрация спектров происходит на одинаковых участках ПЗС чипа, что увеличивает точность измерений [26].

Обработка данных, полученных на Основном звездном спектрографе обладает некоторыми особенностями, возникающими при работе научного оборудования. Основные особенности связаны с юстировкой инструмента перед наблюдениями, а также с имеющейся температурной нестабильностью [3]. Чтобы учесть температурные эффекты в течение ночи через каждые 1-1,5 часа снимают спектры калибровочных кадров. Для контроля точности получаемых результатов снимают спектры звезд стандартов. Звезды стандарты магнитного поля – звезды с хорошо известным магнитным полем <B<sub>z</sub>>, к ним относятся звезды  $\gamma$  Equ, 52 Her, 53 Cam. Для учета инструментальных эффектов снимают спектры звезд с нулевым магнитным полем и большим количеством спектральных линий.

### Наблюдательный материал

Наблюдательный материал для определения величины продольного магнитного поля звезды был получен на Основном звездном спектрографе 6-м телескопа САО РАН.

При наблюдениях использовался анализатор круговой поляризации в сочетании с поворотной пластинкой  $\lambda/4$  [26]. Наблюдательная программа включала исследуемый объект – FK Com, для контроля измерений регистрировались спектры стандарта магнитного поля  $\alpha^2$  CVn, а также звезды с общим нулевым магнитным полем.

При наблюдениях спектральное разрешение равнялось R=15000. В 2012 году применялась ПЗС-матрица размером 2000х2000 элементов. Спектры получены в диапазоне 4386 - 4945 Å. Обработка данных проводилась стандартными методами, разработанными в САО РАН [74]. Данные, полученные на ОЗСП с анализатором круговой поляризации, проходили стандартную процедуру обработки: вычитание кадров темнового тока, учет рассеянного света, экстракция одномерных спектров, калибровка по длинам волн, нормировка на континуум. Кроме того, из-за наличия резателя

изображения, на последнем этапе обработки спектров необходимо просуммировать кусочки спектра, полученные от каждой из 7 его частей, расположенных вдоль щели спектрографа.

### Определение продольной компоненты магнитного поля <B<sub>z</sub>>

Для определения величины продольной компоненты магнитного поля <B<sub>z</sub>> для FK Com была выбрана методика, предложенная в [77] и подробно обсужденная в [11]. Ранее, аналогичная методика уже применялась в [104, 105] для анализа поляризационных наблюдений субкарлика Bal 09, полученных на Основном звездном спектрографе 6-м телескопа САО РАН в 2010 и 2012 годах.

По этой же методике были выполнены оценки  $\langle B_z \rangle$  для стандартов магнитного поля ( $\alpha^2$  CVn и  $\gamma$  Equ) и звезд с нулевым общим магнитным полем. Согласно методике [11, 77], величина продольной компоненты магнитного поля определяется при некоторых предположениях, например, о слабом магнитном поле (как правило, менее 10 кГс).

Как и в [104, 105], величина продольной компоненты магнитного поля <В<sub>z</sub>> вычисляется из отношения параметров Стокса V/I [7]:

$$V/I = -g_{eff} \frac{e}{4\pi m_e c^2} \lambda^2 \frac{1}{I_\lambda} \frac{dI}{d\lambda} \langle B_z \rangle \qquad (2.1)$$

где g<sub>eff</sub> – эффективный фактор Ланде, λ – длина волны в Å, <B<sub>z</sub>> – величина продольной компоненты магнитного поля.

В [104, 105] приводились аргументы в пользу того, что при многих спектрополяриметрических измерениях хорошо обоснованным является выбор величины  $g_{eff}$ , близкой к единице, а кроме этого  $g_{eff} = 1.2$  служит хорошим приближением для спектров Ар звезд (стандарты магнитного поля  $\alpha^2$  CVn и  $\gamma$  Equ). Поэтому, в настоящем исследовании  $g_{eff}$  было выбрано равным 1.2. Как и в работе [69], определение параметра  $\langle B_z \rangle$  для FK Com нами было выполнено методом регрессионного анализа. Метод позволяет получить

одновременно оценки ошибок параметров регрессии и, следовательно, погрешность <B<sub>z</sub>>.

По указанной выше методике для звезды с нулевым общим магнитным полем HD 158974 измеренная величина продольной компоненты магнитного поля <B<sub>z</sub>> составляет 7±5 Гс (как и следует ожидать для немагнитной звезды).

Наша программа наблюдений также включала α<sup>2</sup> CVn и γ Equ – яркие магнитные звезды, для которых опубликованы многочисленные измерения продольной компоненты магнитного поля. Как правило, измерения <B<sub>z</sub>> для этих объектов проводятся с целью калибровки и проверки работы поляриметрического инструмента.

## 2.3 Анализ возможной переменности магнитного поля.

### 2.3.1 Анализ данных наблюдений в 2012 году.

Журнал спектрополяриметрических наблюдений FK Com в 2012 году и полученные оценки значения продольной компоненты магнитного поля <B<sub>z</sub>> приведены в таблице 2.1. В таблице приведены даты наблюдений, юлианские даты середины экспозиций, фаза середины экспозиции наблюдения, установленная по эфемеридам из работы [69], и оценки значения <B<sub>z</sub>>.

На рисунке 2.1 графически представлены результаты наблюдений в 2012 году, а также для сравнения результаты из работы [69] для FK Com. Представленные результаты допускают несколько интерпретаций. Среди них наиболее простым является предположение об отсутствии регистрации магнитного поля для изучаемой звезды. Следует учитывать, что погрешности измерений  $\langle B_z \rangle$ , выполненные в настоящем исследовании, примерно в два-три раза больше, чем в работе [69] и составляют величину  $\approx$ 50 Гс. При этом, можно предполагать, что магнитное поле не было зарегистрировано либо потому, что

претерпело значительное уменьшение (см. ниже) так, что его величина лежит ниже точности наших измерений, либо потому, что оно отсутствует.

# Таблица 2.1

Журнал спектрополяриметрических наблюдений FK Com в 2012 году, и полученные значения продольной компоненты магнитного поля <B<sub>z</sub>>.

Дата	HJD	Фаза	<b<sub>z&gt;,</b<sub>
	2400000+		Гс
2012.05.02	56050.26097	0.183	81
2012.05.02	56050.33876	0.216	-61
2012.05.02	56050.47696	0.273	-34
2012.05.03	56050.55856	0.307	-141
2012.05.03	56051.46487	0.685	-104
2012.05.04	56052.28542	0.027	1
2012.05.04	56052.37188	0.063	81
2012.05.04	56052.45314	0.097	17
2012.05.05	56052.55384	0.139	-31
2012.05.05	56053.29417	0.447	-110
2012.05.05	56053.44348	0.509	-8
2012.05.06	56054.37862	0.899	21
2012.07.27	56138.30906	0.866	-10



Рисунок 2.1. Оценки значения продольной компоненты <B<sub>z</sub>> магнитного поля звезды FK Com, полученные по нашим наблюдениям в 2012 году (заполненные кружки) и по измерениям в 2008 году [69] (полые кружки). Вертикальными линиями отмечены границы погрешностей единичного измерения.

Среднее значение продольной компоненты магнитного поля  $\langle B_z \rangle$  для звезды FK Com по измерениям 2012 года составляет -23 Гс, а по данным [69] оно равно 189 Гс. Максимальные и минимальные значения  $\langle B_z \rangle$  лежат в диапазонах: 81 Гс и -141 Гс – в нашем случае и 272 Гс -60 Гс – по данным [69]. Отметим, что промежуток времени между наблюдениями, полученными авторами работы [69], и нашими наблюдениями, выполненными в 2012 году с 6 метровым телескопом составляет 4 года, а поэтому указанное уменьшение  $\langle B_z \rangle$  может обуславливаться возможным вековым изменением, аналогично тому, как это было зарегистрировано у другой хромосферно-активной звезды II Ред (см. рисунок 3 в [60]). Для II Ред авторы работы [60] пришли к заключению о систематическом уменьшении амплитуды переменности  $\langle B_z \rangle$  в течение промежутка времени с 2004 по 2010 год. При этом было установлено значимое отличие от 0 Гс величины  $\langle B_z \rangle$  для наблюдений во временном интервале от начала мониторинга до эпохи 2006.9. Это обстоятельство позволило авторам сделать заключение о присутствии большой магнитной области положительной полярности до указанной эпохи (2006.9) и более симметричного распределения магнитных областей после нее.

Возвращаясь к звезде FK Com, отметим, что есть возможность иначе интерпретировать данные, полученные в 2012 году, если, как и для данных из работы [69], предположить присутствие изменения величин <B<sub>z</sub>> с фазой вращения. Среди данных 2012 года имеются 6 измерений <B<sub>7</sub>> отрицательного знака. Они группируются для значений фаз 0.2-0.7 и, возможно, образуют широкий минимум. В работе [69] было высказано предположение о формировании у FK Com новой активной области, проявляющей себя на кривой блеска, на фазах 0.6-0.8. Именно в этой части фазовой кривой существуют самые значительные различия между нашими данными и измерениями [69], которые можно пытаться связать с развитием и эволюцией новой активной области. Более того, это согласуется с высказанным авторами работы [69] предположением о том, что пятно, доминирующее на поверхности звезды при фазе 0.1, имеет положительную полярность, а наблюдаемый в 2008 году минимум <B<sub>z</sub>> на фазе 0.3 вызван появлением пятна отрицательной полярности. Изменения кривой <B<sub>z</sub>> от 2008 к 2012 году в таком случае могут быть вызваны усилением и приобретением доминирующей роли пятна отрицательной полярности и, как следствие, в целом более симметричного распределения магнитных областей.

## 2.3.2 Анализ данных наблюдений в 2014 и 2015 годах.

Исследование магнитной переменности FK Com продолжено в ходе новых поляриметрических наблюдений, проведенных в 2014 и 2015 году. Как

и ранее (2.3.1), наблюдательный материал для определения величины продольного магнитного поля звезды был получен на Основном звездном спектрографе 6-м телескопа САО. Журнал наблюдений, а также результаты полученных значений продольной компоненты магнитного поля  $\langle B_z \rangle$  приводятся в таблице 2.2. Фаза наблюдений была установлена по эфемеридам из работы [69]. Методика обработки и анализа была полностью аналогична приведенной выше.

Как было отмечено, среднее значение  $\langle B_z \rangle$  для FK Com по измерениям в 2012 году составляет -23 Гс, а по данным работы [69] (полученным 4 годами ранее) оно равняется 189 Гс. По измерениям 2014 года среднее значение  $\langle B_z \rangle$ для FK Com составило 20 Гс, а два измерения, выполненные в 2015 году, привели к оценке  $\langle B_z \rangle$  в 48 Гс. При точности единичного определения  $\langle B_z \rangle$ порядка 50 Гс (эта величина примерно в два-три раза больше, чем в работе [69]) и невысоком числе новых оценок  $\langle B_z \rangle$  (12 в 2014 г. и лишь 2 в 2015 г.) нет возможности рассматривать изменения  $\langle B_z \rangle$  в зависимости от фазы вращения звезды, как было выполнено для наблюдений 2012 года.

На рисунке 2.2 представлены результаты определений средних величин  $\langle B_z \rangle$  полученных в ходе новых исследований в 2012, 2014, 2015 годах, а также, для наглядного сравнения, данные за 2008 год из работы [69]. Помимо средних величин  $\langle B_z \rangle$  на рисунке 2.2 приведены максимальные и минимальные значения измерений продольной компоненты магнитного поля (границы вертикальных линий). Максимальные и минимальные значения  $\langle B_z \rangle$  лежат в диапазонах: 81 Гс и -141 Гс (2012 год), 98 Гс и -47 Гс (2014 год), 74 Гс и 23 Гс (2015 год), и 272 Гс, 60 Гс по данным работы [63] (2008 год). Данные, представленные для FK Сот на рисунке 2.2, подтверждают уменьшение  $\langle B_z \rangle$ , обнаруженное в работе [60], которое аналогично вековым изменениям магнитного поля  $\langle B_z \rangle$ , зарегистрированным для II Ред (см. рисунок 3 в [60]). Напомним, для II Ред авторы [60] пришли к заключению о систематическом уменьшении амплитуды переменности  $\langle B_z \rangle$  в течение шести лет с 2004 до

2010 год. Более того, авторы работы [60] (из анализа спектрополяриметрических наблюдений и построения температурных и магнитных карт поверхности II Peg) сделали вывод о том, что распределение магнитного поля на поверхности звезды II Peg претерпело изменения за промежуток времени, меньший 8 месяцев, что сопоставимо с найденными характерными временами изменений <B<sub>z</sub>> у FK Com.

Таблица 2.2

Журнал спектрополяриметричемких наблюдений FK Com в 2014 и 2015 годах и полученные значения продольной компоненты магнитного поля

Дата	HJD	Фаза	<b<sub>z&gt;,</b<sub>
	2400000+		Гс
2014.05.15	56793.2556	0.733	5
2014.05.15	56793.3133	0.757	50
2014.05.16	56793.3910	0.789	-47
2014.05.16	56793.4709	0.822	18
2014.05.16	56794.2612	0.152	5
2014.05.16	56794.3231	0.177	98
2014.05.17	56794.3814	0.202	-12
2014.05.17	56794.4904	0.247	77
2014.05.18	56795.3336	0.598	65
2014.05.18	56795.3961	0.624	24
2014.05.18	56795.4440	0.644	-32
2014.05.18	56795.5044	0.670	-10
2015.05.26	57168.4222	0.036	23
2015.05.29	57171.3477	0.255	74

<B<sub>z</sub>>.



Рисунок 2.2. Изменения средних величин <B<sub>z</sub>> в 2008 - 2015 годах (данные из работы [69] представлены полым кружком). Помимо средних величин <B<sub>z</sub>> приведены максимальные и минимальные значения измерений продольной компоненты магнитного поля (границы вертикальных линий).

Выполненные нами в 2014 и 2015 годах новые измерения величины <B<sub>z</sub>> для звезды FK Com свидетельствуют о правомерности интерпретации поведения этого параметра, приведенной ранее в работе [4], согласно которой в течение наблюдаемого промежутка времени на поверхности звезды происходило установление более симметричного распределения магнитных областей. Независимое подтверждение данного вывода можно найти у авторов [127], которые делают заключение о том, что в 2009 - 2010 годах FK Com находилась в необычно спокойном состоянии, с очень низким уровнем хромосферной контрастом (более активности И низким пятенным равномерным распределением пятен).

### 2.4 Выводы к ГЛАВЕ 2

Получены новые спектрополяриметрические наблюдения звезды FK Com в 2012, 2014, 2015 годах с целью измерения величины продольной компоненты ее магнитного поля <B<sub>z</sub>>.

Уменьшение параметра  $\langle B_z \rangle$ , обнаруженное нами у FK Com в 2012 году, может быть аналогично зарегистрированному у другой хромосферноактивной звезды II Peg вековому изменению  $\langle B_z \rangle$  [60]. С другой стороны, 6 измерений  $\langle B_z \rangle$  (полученные в 2012 году) отрицательного знака относятся к значениям фаз 0.2 - 0.7, образуя, возможно, широкий минимум. Это позволяет предположить существование переменности величины  $\langle B_z \rangle$  с фазой вращения (аналогично тому, как было сделано в [69]). Изменения в этой части фазовой кривой могут быть связаны с развитием и эволюцией новой активной области. В этом случае уменьшение  $\langle B_z \rangle$  от 2008 к 2012 году может быть вызвано усилением и приобретением доминирующей роли пятна отрицательной полярности и, как следствие, в целом более симметричного распределения магнитных областей.

Спектрополяриметрические наблюдения, выполненные в 2014 и 2015 годах, свидетельствуют в пользу рассматриваемой интерпретации поведения параметра  $\langle B_z \rangle$  с 2008 по 2012 год и указывают на его вероятные вековые изменения. Полученные значения параметра  $\langle B_z \rangle$  в 2014 и 2015 годах не противоречат предположению об установлении более симметричного распределения магнитных областей на поверхности FK Com, высказанному в работе [69].

## ГЛАВА 3. ПОИСК И УСТАНОВЛЕНИЕ КАНДИДАТОВ В ЗВЕЗДЫ ТИПА FK COM ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ КЕПЛЕР

### 3.1 Введение

Как указывалось во **ВВЕДЕНИИ**, звезда FK Com является прототипом одиночных, быстровращающихся, хромосферно-активных звезд спектральных классов G-K. Данный тип звезд крайне малочисленный [20]. Кроме самого прототипа FK Com, в число звезд этого типа входят V1794 Cyg (HD 199178) и ET Dra (BD+70 959). Несмотря на большой интерес к уточнению эволюционного статуса звезд типа FK Com (см., например, [124]) и установлению их возможной связи с переменными типа W UMa, за последние десятилетия не были выявлены другие звезды этого типа.

Высокоточные фотометрические наблюдения на космическом телескопе Кеплер, помимо уникальных возможностей для открытия и исследования экзопланетных систем, предоставили обширнейший наблюдательный материал для изучения фотосферной активности звезд. Анализируя данные архива космического телескопа Кеплер, нами сделана попытка установления кандидатов в звезды типа FK Com на основании исследований их фотометрической переменности.

С этой целью по имеющимся данным архива МАСТ для более чем 40000 объектов из интервала Q3 были выбраны звезды, параметры которых соответствуют звездам типа FK Com (по температурному диапазону, ускорению силы тяжести и периоду вращения). Анализ проводился с целью установления амплитуд переменности блеска (для выявления возможной заметной мромосферной активности) и периодов вращения, а также для оценок параметров дифференциального вращения этих объектов. При возможности планировалось найти положение доминирующей активной области (долготы) на их поверхности, характер его смещений и эволюции.

### Миссия Кеплер

Космические обсерватории дают обширный наблюдательный материал для астрофизических исследований. Данные наблюдений на космических телескопах уникальны по ряду причин: диапазон наблюдений, недоступный с наземных обсерваторий; отсутствие искажений и потерь проницающей силы инструмента, связанных с влиянием земной атмосферы; существенное увеличение времени непрерывных рядов наблюдений; высокая точность единичного измерения. Фотометрические наблюдения звезд с целью поиска внесолнечных планет принадлежат к числу одной из наиболее актуальных задач последнего десятилетия. Такие поисковые исследования требуют выполнения фотометрических наблюдений высокой точности. Вторая важная особенность поиска экзопланет состоит в том, что для него необходимы как можно более длинные и непрерывные фотометрические ряды наблюдений. Наиболее успешная реализация этих двух условий возможна на обсерваториях космического базирования. Для внесолнечных поиска планет фотометрическими методами на околоземную орбиту были выведены несколько космических обсерваторий. На настоящее время самой успешной и результативной была обсерватория Кеплер.

Научной задачей миссии Кеплер являлся поиск экзопланет, изучение структуры и разнообразия планетных систем. Основные цели исследования заключались в определении: количества планет земного типа в зоне обитаемости у широкого спектра звезд; распределения размеров и форм орбит этих планет; количества планет в планетных системах; распределение размеров, масс и отражательной способности планет; а также свойств звезд, у которых обнаружены планетные системы. Данные исследования проводились транзитным методом (планета проходит между звездой и наблюдателем). При таких прохождениях планеты земной группы дают изменение в яркости звезды примерно на 1/10000, продолжительность прохождения составляет от 1 до 16 часов. Для обнаружения и подтверждения наличия планет у звезд нужны длительные ряды однородных наблюдений. Сложность подобных исследований и основные цели миссии наложили высокие требования на создаваемую обсерваторию и приемную аппаратуру телескопа.

Полное описание космической обсерватории Кеплер можно найти на интернет странице миссии www.kepler.nasa.gov. Оптическая схема телескопа выполнена по схеме Шмидта. Апертура главного зеркала 1400мм, апертура телескопа ограничена блендой 950мм. Обсерватория оснащена уникальным 42 ПЗС-чипов фотометром, состоящим ИЗ с общим разрешением 95 мегапикселей. Наблюдения выполнялись в диапазоне 430-890 нм. Поле зрения обсерватории 105 квадратных градусов позволило проводить одновременную фотометрию более чем 100 тысяч звезд от 9 до 16 звездной величины. Космическая обсерватория проработала с марта 2009 года по май 2013 года. За этот период были получены уникальные фотометрические ряды наблюдений для более чем 100000 звезд. В мае 2013 года телескоп вышел из строя, но в 2014 году инженерам удалось восстановить его работоспособность. В мае 2014 года стартовала новая миссия «К2», в ее задачи входит наблюдения ярких звезд различных участков небесной сферы в плоскости эклиптики в течение примерно 75 суток.

Исправленные за инструментальные эффекты кривые блеска общедоступны в архивах MAST и NExA. Все данные обработаны в исследовательском центре NASA Ames Research Center.

## 3.2 Наблюдательные данные

Основные сведения о звезде FK Com были приведены во **ВВЕДЕНИИ** и **ГЛАВЕ 1**. Звезда FK Com интенсивно исследуется с середины прошлого века. FK Com является хромосферно-активным, быстровращающимся гигантом позднего спектрального класса G 5III. Вращение имеет дифференциальный

характер, коэффициент дифференциального вращения по разным данным составляет от 0.012 до 0.03.

Для поиска возможных кандидатов в звезды типа FK Com использовались опубликованные в [92] результаты определений периодов вращения и фотометрической переменности для более чем 40000 звезд по наблюдениям телескопа Кеплер в течение интервала Q3. Интервал Q3 это один из интервалов непрерывных наблюдений телескопа Кеплер с неизменной ориентацией в одном направлении. Длительность интервалов составляет порядка 3 месяцев. Для более чем 18000 звезд были получены оценки параметров их дифференциального вращения. Из данных [92] были выбраны 4 звезды, параметры которых соответствуют параметрам звезды FK Com. Сведения о рассматриваемых объектах приведены в таблице 3.1. В верхней части таблицы указаны: эффективная температура фотосферы, логарифм величины ускорения свободного падения, звездная величина в величинах фотометрической системы обсерватории Кеплер, отношение радиуса звезды к радиусу Солнца, периоды, измеренные в ходе исследований авторов работы [92] по ограниченному набору данных, а также значение  $v \sin i$  посчитанное на основании данных о среднем ( $(P_1+P_2)/2$ ) периоде вращения из [92] и радиусе звезды.

Для этих объектов рассмотрены все имеющиеся фотометрические данные в архиве космического телескопа Кеплер (как правило 17 интервалов наблюдений). В настоящем исследовании использовалась последняя версия исправления кривых блеска за инструментальные эффекты, доступная в архиве. В среднем, в случае каждой звезды для дальнейшего анализа было отобрано в совокупности порядка 64000 единичных измерений за период наблюдений около 1470 суток (порядка 4 лет). Данные для каждого из интервалов наблюдений были нормированы на среднее значение, у каждой звезды все интервалы были объединены в единую кривую блеска. Пример кривой блеска объекта КІС 2996903 приведен на рисунке 3.1.

	KIC 2996903	KIC 4646159	KIC 5785906	KIC 11862915
Τ <sub>эφφ</sub> , Κ	4809	5042	4751	4831
lg g	3.596	3.607	3.665	3.657
kepmag	12.850	11.344	13.055	12.450
$R/R_{\odot}$	3.032	2.997	2.761	2.798
Р <sub>1</sub> , сутки	1.7333	3.2722	7.7395	2.3269
Р2, сутки	1.759	3.145	8.2795	2.3862
$v \sin i$ , км с <sup>-1</sup>	87.7	47.3	17.4	60.1

Основные данные о возможных кандидатах в звезды типа FK Com.



Рисунок 3.1. Пример кривой блеска, нормированной на среднее значение. Верхний график – кривая блеска объекта КІС 2996903, построенная на основе данных, доступных из архива космического телескопа Кеплер. Средний и нижний графики – фрагменты этой же кривой блеска для интервалов времени протяженностью в 180 суток.

### 3.3 Анализ переменности блеска

На рисунке 3.2 представлены рассчитанные амплитудные спектры в области, содержащей главный пик. Графики свидетельствуют о достаточно сложном характере изменений кривых блеска звезд. Происхождение каждого из этих пиков может быть связано, например, с наличием пятен (или групп пятен), расположенных на различных широтах звезды, обладающей дифференциальным вращением [103].



Рисунок 3.2. Амплитудные спектры для звезд КІС 2996903, КІС 4646159, КІС 5785906, КІС 11862915 (в области, содержащей главный пик).

Очевидно, что, не располагая данными о законе дифференциального вращения и данными о широтах расположения пятен, нельзя сделать заключение о величине периода вращения звезды на экваторе. При этом, изменения периодов переменности блеска могут соответствовать изменениям и эволюции (появлению и исчезновению) активных областей, лежащих на различных широтах на поверхности звезды. Подробное обсуждение подобных результатов можно найти также в [93].

Результаты анализа периодограмм представлены в таблице 3.2. Значения периодов, соответствующих пикам на периодограммах, представлены в порядке убывания соответствующих им амплитуд изменений блеска (от P<sub>1</sub> до P<sub>6</sub>). Величина погрешности определения периодов лежит в интервале от 0.001 до 0.01 суток и сопоставима с найденной в [93]. Период, соответствующий максимальной амплитуде (P<sub>1</sub>), интерпретируется как период вращения звезды на широте, соответствующей расположению наибольшего холодного пятна (активной области).

### Таблица 3.2

	KIC 2996903	KIC 4646159	KIC 5785906	KIC 11862915
Р <sub>1</sub> , сутки	1.7328	3.2790	7.631	2.336
Р2, сутки	1.7385	3.2105	7.689	2.3239
Р3, сутки	1.7283	3.2015	7.853	2.3284
Р4, сутки	1.7432	3.2885	7.814	
Р5, сутки		3.2195	7.808	
Р <sub>6</sub> , сутки		3.2620		

Данные о периодах вращения звезд подобных FK Com, полученные из амплитудных спектров.

Значения величины P<sub>1</sub>, установленные в настоящем исследовании и приведенные в таблице 3.1 из работы [93], достаточно хорошо согласуются

между собой. В ряде случаев возможная причина различий, вероятно, связана с тем, что в [86] эта величина определялась лишь по одному интервалу наблюдений, тогда как в нашей работе использовался набор данных, соответствующий большему интервалу времени. Наибольшие различия в  $P_1$  существуют для объектов KIC 5785906 и KIC 4646159, которые имеют очень сложную комбинацию пиков амплитудного спектра в районе  $P_1$ . Значение  $P_2$  было получено в [93] после вычитания периодической составляющей с найденным периодом  $P_1$  из имеющихся данных. Так как в работе [93] рассматривался ограниченный набор данных только для одного сета, то такая процедура, вероятно, еще не вносила искажения, получаемые при расчете амплитудного спектра для более широкого временного диапазона с большим количеством сетов. Строго говоря, указанная процедура правомерна лишь для промежутков времени, не превышающих время жизни или характерное время эволюции активной области (пятна).

Как и в [93], в нашей работе выполнена оценка параметра дифференциального вращения звезды:

$$A_{1} = \frac{abs(P_{2} - P_{1})}{P_{max}}, \qquad P_{max} = \max(P_{1}, P_{2}) \qquad (3.1)$$

Аналогично, можно определить:

$$A_2 = \frac{abs(P_2 - P_1)}{P_{min}}, \qquad P_{min} = \min(P_1, P_2) \qquad (3.2)$$

Фактически параметры A1 и A2 являются верхней и нижней границами для величины параметра дифференциального вращения звезды  $\Delta\Omega$ . В работе [93] величина параметра дифференциального вращения звезды  $\Delta\Omega$ определялась как разница скорости вращения на экваторе ( $\Omega_{3}$ ) и полюсе ( $\Omega_{n}$ ) согласно следующему выражению:

$$\Delta \Omega = \Omega_{\mathfrak{I}} - \Omega_{\mathfrak{I}}, \quad (3.3)$$

Установленные величины A1, A2 и  $\Delta\Omega$  приведены в таблице 3.3. За исключением результата для KIC 4646159, величины A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> (верхние значения) у 3-х звезд не превышают величину A=0.01, рассматриваемую в [93] как предел обнаружения. Если в качестве значений P<sub>1</sub> и P<sub>2</sub> выбрать результаты для двух, наиболее отстоящих друг от друга периодов, то можно предполагать присутствие дифференциального вращения уже у двух объектов (параметр A в таблице 3.3, нижние значения), KIC 4646159 и KIC 5785906. Приведенные в таблице 3.3 параметры дифференциального вращения  $\Delta\Omega$  исследуемых объектов вычислены по периодам, наиболее отстоящим друг от друга.

### Таблица 3.3.

Данные о параметрах дифференциального вращения исследуемых звезд, схожих по параметрам со звездой FK Com.

	KIC 2996903	KIC 4646159	KIC 5785906	KIC 11862915
A <sub>1</sub>	0.0030	0.0209	0.0075	0.0035
	0.0059	0.0265	0.0358	0.0054
A <sub>2</sub>	0.0031	0.0213	0.0076	0.0035
	0.0059	0.0272	0.0371	0.0055
$\Delta \Omega$ , рад сутки <sup>-1</sup>	0.031	0.051	0.023	0.014

Более подробное определение параметров дифференциального вращения этих звезд на основе исследования эволюции положений активных долгот (см. ниже) требует дополнительного анализа с построением карт температурных поверхностных неоднородностей.

Результаты оценки параметров дифференциального вращения звезд ΔΩ (таблица 3.3., разница угловых скоростей вращения на экваторе и на полюсе) позволили сравнить полученные в ходе настоящего исследования данные о дифференциальном вращении с опубликованными в [92], содержащими

определения параметров дифференциального вращения 12300 звезд (рисунок 3.3). Общепринято, что закон дифференциального вращения описывается уравнением вида

$$\Omega(\Theta) = \Omega(eq)(1 - \alpha Sin^2(\Theta))$$
(3.4)

где, *O* – широта



Рисунок 3.3. Зависимость параметра дифференциального вращения ΔΩ (вертикальная ось) от эффективной температуры звезд (горизонтальная ось). Светлые точки – данные из [92]. Данные для 4 исследуемых звезд изображены полыми квадратами, положение FK Com отмечено красным кружком, данные V1793 Cyg нанесены синим кружком, звездой отмечено положение Солнца. Сплошные линии – теоретические предсказания из [12], пунктирная линия – эмпирическая зависимость из [75].

Символы, представляющие на рисунке 3.3 данные для исследуемых нами объектов, лежат ниже теоретической зависимости из [12], но имеют хорошее согласие с эмпирической зависимостью [75]. Отметим, что все указанные выше величины приводятся как оценки и могут рассматриваться в качестве предельных, поскольку нет информации, на какой широте расположены активные области, вызывающие вращательную модуляцию блеска звезд.

## 3.4 Положения активных долгот и флип-флоп

Дальнейший анализ фотометрической переменности рассматриваемых объектов был выполнен либо с доминирующим фотометрическим периодом  $P_1$ , либо со "средним фотометрическим" периодом  $(P_1+P_2)/2$ . Отметим, что подобный подход уже неоднократно применялся ранее, например, при анализе активности звезды HD 199178 [106]. Для каждого объекта из таблицы 3.1 весь наблюдательный материал был разделен на сеты, каждый из которых последовательно охватывает один период вращения звезды. Поскольку полный единичный сет наблюдений включает в себя большое число фотометрических измерений для 50 равноотстоящих фаз. Неполные сеты не рассматривались, если они не давали возможности оценить положения активных долгот. Итоговое количество рассматриваемых сетов находится в интервале от 190 для КІС 5785906 до 811 для КІС 2996903 с учетом отброшенных, неполных сетов.

Для построения карт поверхностных температурных неоднородностей [108] необходимо располагать оценками величин угла наклона вращения звезд к лучу зрения – *i*. Поскольку данные о значениях *i* отсутствуют, применилась методика более грубой оценки положения доминирующей активной области (долготы) на поверхности активной звезды, основанная на анализе положения

минимума на кривой блеска для каждого из сетов, подобно тому, как это было сделано в [40]. Результаты определений представлены на рисунке 4.3. Очевидно, что для всех объектов положения активной долготы не являются постоянными и смещаются по поверхности звезды с течением времени. Отметим, что в целом, характер перемещений положений активных долгот (АД) совпадает с установленным ранее в [40, 63] для FK Com и в [106] для HD 199178. Перемещения характеризуются как монотонными сдвигами на промежутках времени порядка сотен суток, так и сменами положения АД на величину порядка 180 градусов и фазовыми сдвигами на величины 0.2-0.4. В рассматриваемых интервалах наблюдений число смен положений АД для изучаемых звезд различается от одного для KIC 11862915, до семи для КІС 5785906 (у этой звезды также было зарегистрировано пять фазовых сдвигов АД). Можно предположить, что характерное время смен положений АД лежит в интервале от 1500 (порядка 4 лет) до 200 дней (0.54 года). Эти результаты сопоставимы с приведенными в [40], согласно которым для FK Com интервалы времени между флип-флоп составляют от 0.8 до 4.4 лет. У FK Com, согласно [40], для половины из исследованных авторами сегментов присутствует лишь одна АД.

Вопрос о присутствии второй АД на поверхности изучаемых звезд требует дальнейшего изучения (например, при построении карт поверхностных температурных неоднородностей). Однако это не ставит под сомнение существование эффекта смены положения доминирующей активной области (флип-флоп) на поверхности активной звезды.



Рисунок 3.4. Положения активных областей на поверхности исследуемых звезд, схожих по параметрам со звездой FK Com. Вертикальная ось - положение долготы активной области в фазах периода вращения; горизонтальная ось – время в сутках.

### 3.5 Циклы активности

Исследователи фотометрической переменности FK Com [84] указывают на существование для нее циклов активности с характерными временами от 4.5 до 6.1 лет, подобно солнечному 11-летнему циклу активности.

66

Рассматриваемые в настоящей работе данные (полученные с космическим телескопом Кеплер) не позволяют выполнить аналогичное исследование, поскольку, анализируемый интервал наблюдений существенно короче, чем, например, рассматриваемый авторами [63]. Кроме того, исключение в наблюдательных данных долговременных трендов инструментального происхождения не позволяет выполнить анализ долговременной переменности блеска на промежутках времени в несколько лет. По этой причине сделана попытка оценки периодов цикла активности (Р<sub>п.а.</sub>) по изучению амплитудного спектра изменений не самого блеска, а амплитуды его переменности для каждого сета, охватывающего один период вращения звезды. Пример амплитудного спектра для КІС 11862915 представлен на рисунке 3.5 (нижняя диаграмма). На амплитудном спектре имеется широкий пик, соответствующий периоду в 1125 суток (погрешность определения 100-150 суток) и два менее выраженных пика для периодов около 200 и 535 суток (погрешность определения 50 и 100 суток соответственно). Сводка полученных определений периодов циклов активности для исследуемых звезд (периоды в днях для трех наиболее значимых пиков) приводятся в таблице 3.4. Погрешность определения периода соответствует полуширине пика на его полувысоте.

К сожалению, имеющиеся фотометрические данные для FK Com из-за скважности наземных наблюдений не позволяют выполнить аналогичные оценки для P<sub>ц.a.</sub> с величинами около года, хотя данные, представленные на рисунке 7 в [63], могут служить указанием на возможное наличие переменности амплитуды блеска FK Com с такими периодами.



Рисунок 3.5. Верхняя диаграмма – изменение амплитуды переменности блеска для каждого сета, охватывающего один период вращения звезды КІС 2996903. На нижней части рисунка представлен амплитудный спектр, на котором имеются широкий пик, соответствующий периоду в 1125 суток, и два менее выраженных пика для периодов около 200 и 535 суток.

Таблица 3.4

Данные о циклах активности для исследуемых звезд, схожих по параметрам со звездой FK Com.

	KIC 2996903	KIC 4646159	KIC 5785906	KIC 11862915
Р <sub>ц.а.1</sub> , сутки	200	140	175	340
Р <sub>ц.а.2</sub> , сутки	535	245	250	450
Р <sub>ц.а.3</sub> , сутки	1125	600	870	800

68

### 3.6 Выводы к ГЛАВЕ 3

В последние годы значительно возрос интерес к быстровращающимся одиночным гигантам поздних спектральных классов, само существование которых является исключением из общего правила медленного осевого вращения гигантов, предсказываемого теорией звездной эволюции. Природа объектов с такими свойствами остается невыясненной. Гипотезы их образования предполагают проявления действия процессов, связанных со слиянием компонент в тесной двойной системе, с резким гипотетическим выносом углового момента из недр звезды, с передачей момента вращения из околозвездного окружения и проч. (см. обсуждения в [28, 124]). Звезды типа FK Com несомненно, занимают первые места в списке такого рода объектов. Сами гиганты – FK Com и HD 199178, для которых проекция скорости вращения на луч зрения равна 162 км/с и 80 км/с, соответственно, – часто называют «королем» и «вице-королем» вращения [8, 9, 10]. К настоящему времени число открытых быстровращающихся одиночных гигантов поздних Чаше спектральных классов все еше остается невелико. всего рассматриваются 17 объектов из [90] и 10 по данным [122] (но есть предположение, что 3 из них относятся к числу затменных звезд). В итоге в настоящее время список изученных быстровращающихся гигантов включает 23 звезды [28]. Авторы [28] пришли также к важному заключению о необходимости наблюдений звезд данного типа в ИК диапазоне (вплоть до 22 мкм, наблюдения с космическим телескопом WISE), вследствие обнаружения ими ИК избытка в излучении у примерно половины объектов из их списка. При анализе гипотез возникновения звезд данного типа этот факт, бы служить указанием на значительное возможно, МОГ влияние околозвездного окружения на возникновение быстровращающегося гиганта и, в принципе, мог бы свидетельствовать в пользу последней из гипотез, перечисленных выше.

Очевидно, что вопросы об эволюционном статусе звезд типа FK Com, их возможной связи с переменными типа W UMa, а также причины существования быстровращающихся одиночных гигантов поздних спектральных классов, тесно связаны между собой.

По результатам анализа фотометрических наблюдений с космическим телескопом Кеплер были выбраны и исследованы 4 звезды, параметры которых соответствуют звезде FK Com и которые могут рассматриваться как потенциальные кандидаты для включения в число звезд типа FK Com. Наш фотометрический анализ был основан на всех имеющихся для них данных в архиве космического телескопа Кеплер.

В дальнейшем необходимо проведение спектральных наблюдений указанных объектов для установления их одиночного характера, присутствия эмиссионных линий хромосферного происхождения, оценок содержания лития и нахождения скоростей вращения по профилям спектральных линий. Авторы [20] определили звезды типа FK Com, как быстровращающиеся одиночные звезды с сильной хромосферной активностью. Наиболее критичным является установление отсутствия двойственности исследуемых объектов по наблюдениям постоянства их лучевой скорости. При этом, как было показано в [20], отсутствие сильной эмиссии в линии Н<sub>α</sub> не является значимым препятствием к попытке отнести объекты к звездам типа FK Com, поскольку только сама FK Com обладает таким свойством, а два других члена этой группы – нет. Короткие фотометрические периоды и высокая светимость объектов (малые значения величин ускорения силы тяжести) косвенно указывают на высокие значения скорости осевого вращения. Следует отметить, что фотометрическая переменность рассматриваемых звезд на различных шкалах времени – от периода вращения (указывающая на наличия температурных неоднородностей поверхности) до циклов активности в несколько лет – подобны обнаруженным для FK Com и звезд этого типа. У всех 4 объектов наблюдается явное присутствие эффекта переключения активных долгот (флип-флоп). Еще одним значимым аргументом в пользу предположения являются найденные свидетельства того, что вращение этих объектов обладает дифференциальным характером, как и у звезд типа FK Com.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании представлены результаты полученных нами фотометрических и спектрополяриметрических наблюдательных данных, а также интерпретация нашего наблюдательного материала и данных, имеющихся в литературе, для одиночного активного гиганта FK Com.

- 1. На базе расширенного набора фотометрических данных по единой методике были проанализированы все доступные наблюдательные данные (литературные источники и наш новый наблюдательный материал 2013-2015 годов), построены карты поверхностных температурных неоднородностей звезды. Проведен анализ временных рядов для блеска звезды в фильтрах U, B и V; амплитуды переменности блеска; суммарной площади пятен на поверхности звезды и среднего значения блеска каждого из рассматриваемого нами сетов наблюдений. На основе анализа увеличенного набора фотометрических данных получены значения величин циклов активности звезды FK Com.
- 2. На основе анализа определений положений активных областей на поверхности FK Com сделан вывод о существовании двух систем активных областей на её поверхности. Установлено, что положения каждой из этих систем претерпевают циклические изменения. Характерное время изменения положения первой из систем составляет порядка 3330 суток (9.12 года). Изменения положений второй активной области наилучшим образом объясняются комбинацией времен переменности в 4140 суток (11.3 года) и 730 суток (2 года). В итоге было выделено 15 событий, рассматриваемых как переключение между системами активных областей.
- Выполнены определения величины доли поверхности звезды FK Com, покрытой пятнами, которая в среднем составляет 17% от полной видимой поверхности объекта и меняется в пределах от 9% до 25%.

72
- 4. Проведены спектрополяриметрические наблюдения, на основании которых получены оценки величин продольной компоненты магнитного поля FK Com в 2012-2015 гг. Эти оценки интерпретируются в рамках предположения о вековых изменениях среднего значения продольной компоненты магнитного поля FK Com.
- 5. На основании анализа данных наблюдений космического телескопа Кеплер установлены четыре кандидата в звезды типа FK Com. Для выявленных кандидатов получены значения величин дифференциального вращения, долгот холодных областей, а также выявлено наличие эффекта флип-флоп и получены оценки величин циклов активности.

В дальнейшем соискателем планируется применить отработанную методику анализа фотометрических спектрополяриметрических И наблюдений при исследовании еще двух звезд типа FK Com (HD 199178 и ET Dra) и других активных звезд с целью изучения изменений положения холодных областей на поверхности этих объектов, эффекта флип-флоп, уточнения циклов активности звезд, исследования ИХ магнетизма. Разработанную методику анализа фотометрических данных из архива космического телескопа Кеплер планируется применить к другим типам активных звезд.

#### Благодарность

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н. Саванову Игорю Спартаковичу за руководство на всех этапах работы, за помощь в постановке задачи и ее реализации, ценные замечания и полезные советы.

Автор также выражает благодарность соавторам опубликованных работ по теме диссертации (Дмитриенко Е.С. (главы 1-3), Романюку И.И., Семенко Е.А., Якунину И.А. (глава 2), Бурданову А.Ю. (глава 1)),

сотрудникам ИНАСАН за ценные научные и методические указания,

Национальному комитету по тематике российских телескопов (НКТРТ, ранее КТБТ) за предоставленное наблюдательное время,

сотрудникам обсерваторий САО РАН, ТФ ИНАСАН, ЗО ИНАСАН, Коуровской АО УрФУ, помогавшим в организации наблюдений,

команде космического телескопа Кеплер и команде архива MAST за возможность использования данных наблюдений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Васильев А.С., Евзеров А.М., Лобачев М.В. [и др.] // Оптикомеханическая промышленность. - 1977. - Т. 2. - стр. 31.
- 2. Панчук В.Е. // Препринт САО. 2001. 154.
- Панчук В.Е., Юшкин М.В., Емельянов Э.В. // Препринт САО. 2006. -121.
- Пузин В.Б., Саванов И.С., Романюк И.И., Семенко Е.А., Дмитриенко Е.С. Изучение магнитного поля FK Com // Астрофизический биллютень. - 2014. - 3 : Т. 69. - стр. 341-344.
- Alekseev I.Y., Gershberg R.E. On the model of zonal spottedness of red dwarf stars // Astronomicheskii Zhurnal. - 1996. - 4 : Т. 73. - стр. 589-597.
- Alekseev Ilya Yu. Starspots, Activity Cycles, and Differential Rotation on Cool Stars // Solar Physics. - 2004. - 1-2 : T. 224. - ctp. 187-194.
- Ambruster Carol W., Fekel Francis C., Guinan Edward F., Hrivnak J., Bruce. The Extremely Active Single Giant 1E 1751+7046 = ET Draconis: Revised Properties and a Reevaluation of Its Evolutionary Status // The Astrophysical Journal. - 1997. - 2 : T. 479. - ctp. 960-969.
- Ayres T.R., Korhonen H., Harper G.M., Brown A., Redfield S. FK Comae: King of Spin // Bulletin of the American Astronomical Society. - 2004. - T. 36. - ctp. 1356.
- Ayres Thomas R., Harper Graham M., Brown Alexander, Korhonen Heidi, Ilyin Ilya V., Redfield Seth, Wood Brian E. The Remarkable Far-Ultraviolet Spectrum of FK Comae Berenices: King of Spin // The Astrophysical Journal. - 2006. - 1 : T. 644. - ctp. 464-474.
- Ayres Thomas R., Kashyap V., Saar S., Huenemoerder D., Korhonen H., Drake J.J., Testa P., Cohen O., Garraffo C., Granzer T., Strassmeier K., FK Comae Berenices, King of Spin: The COCOA-PUFS Project // The Astrophysical Journal Supplement Series. - 2016. - 1 : T. 223. - ctp. 30.

- Bagnulo S., Szeifert T., Wade G.A., Landstreet J.D., Mathys G. Measuring magnetic fields of early-type stars with FORS1 at the VLT // Astronomy and Astrophysics. - 2002. - T. 389. - ctp. 191-201.
- Barnes J.R., Collier Cameron A., Donati J.-F., James D.J., Marsden S.C., Petit P., The dependence of differential rotation on temperature and rotation // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. - 2005. - 1 : T. 357. - ctp. L1-L5.
- Berdyugina S.V., Pelt J., Tuominen I., Magnetic activity in the young solar analog LQ Hydrae. I. Active longitudes and cycles // Astronomy and Astrophysics. - 2002. - T. 394. - ctp. 505-515.
- Berdyugina Svetlana V., Henry Gregory W., Butterfly Diagram and Activity Cycles in HR 1099 // The Astrophysical Journal. - 2007. - 2 : T. 659. - crp. L157-160.
- Berdyugina Svetlana V. Starspots: A Key to the Stellar Dynamo // Living Reviews in Solar Physics. - 2005. - 1 : Т. 2. - стр. 62.
- Berdyugina Svetlana V. Surface imaging by the Occamian approach. Basic principles, simulations, and tests // Astronomy and Astrophysics. 1998. T. 338. ctp. 97-105.
- Bopp B.W., Africano J.L., Stencel R.E., Noah P.V., Klimke A. Observations of active chromosphere stars // Astrophysical Journal. - 1983. - 1 : T. 275. ctp. 691-703.
- Bopp B.W. Hα Observations of FK Comae // Bulletin of the American Astronomical Society. - 1981. - T. 13. - ctp. 872.
- Bopp B.W., Rucinski S.M. Fundamental Problems in the Theory of Stellar Evolution, Proceedings of IAU Symposium No. 93 // The Rapidly Rotating Giants of the Fk-Comae Type. - 1981. - стр. 177.
- Bopp B.W., Stencel R.E. The FK Comae stars // Astrophysical Journal. -1981. - 2 : T. 247. - ctp. L131-L134.

- Budding E. The interpretation of cyclical photometric variations in certain dwarf ME-type stars // Astrophysics and Space Science. - 1977. - 1 : T. 48. ctp. 207-223.
- Catalano S., Biazzo K., Frasca A., Marilli E. Measuring starspot temperature from line depth ratios. I. The method // Astronomy and Astrophysics. - 2002. -T. 394. - ctp. 1009-1021.
- Catalano S., Rodonò M. Sulle variazioni della curva di luce del sistema RS CVn // Memorie della Società Astronomia Italiana. - 1967. - Т. 38. - стр. 395.
- 24. Chugainov P. F. On the Cause of Periodic Light Variations of Some Red Dwarf Stars // Information Bulletin on Variable Stars. 1971. 520.
- Chugainov P.F. On the Variability of HD 234677 // Information Bulletin on Variable Stars. - 1966. - 122.
- 26. Chuntonov G.A. New equipment for measuring stellar magnetic fields at the 6 v telescope // Proc. Int. Conf. on Magnetic Stars. 2004. crp. 286-291.
- Collier Cameron A. Eclipse mapping of late-type close binary stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 1997. - 3 : T. 287. - crp. 556-566.
- Costa A.D., Canto Martins B.L., Bravo J.P., Paz-Chinchón F., das Chagas M.L., Leão I.C., Pereira de Oliveira G., Rodrigues da Silva R., Roque S., de Oliveira, L.L.A., Freire da Silva D., De Medeiros J.R. Kepler Rapidly Rotating Giant Stars // The Astrophysical Journal Letters. - 2015. - 2 : T. 807. - ctp. L21.
- 29. Deutsch Armin J. A method for mapping the surfaces of some magnetic stars// Astronomical Journal. 1957. Т. 62. стр. 139.
- Diaz-Cordoves J., Claret A., Gimenez A., Linear and non-linear limbdarkening coefficients for LTE model atmospheres // Astronomy and Astrophysics Supplement. - 1995. - T. 110. - ctp. 329.
- Donati J.-F., Semel M., Carter B.D., Rees D.E., Collier Cameron A. Spectropolarimetric observations of active stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 1997. - T. 291. - ctp. 658.

- Dorren J.D. A new formulation of the starspot model, and the consequences of starspot structure // Astrophysical Journal. - 1987. - 1 : Т. 320. - стр. 756-767.
- Drake Jeremy J., Chung Sun Mi, Kashyap Vinay, Korhonen Heidi, Van Ballegooijen Adriaan, Elstner Detlef X-Ray Spectroscopic Signatures of the Extended Corona of FK Comae // The Astrophysical Journal. - 2008. - 2 : T. 679. - ctp. 1522-1530.
- Drake Stephen A., Simon Theodore, Linsky Jeffrey L. A survey of the radio continuum emission of RS Canum Venaticorum and related active binary systems // Astrophysical Journal Supplement Series. - 1989. - T. 71. - ctp. 905-930.
- Elstner D., Korhonen H. Flip-flop phenomenon: observations and theory // Astronomische Nachrichten. - 2005. - 3 : T. 326. - ctp. 278-282.
- Fekel Francis C. Balachandran Suchitra Lithium and rapid rotation in chromospherically active single giants // Astrophysical Journal. - 1993. - 2 : T. 403. - ctp. 708-721.
- 37. Goncharskii A.V., Stepanov V.V., Kokhlova V.L., Yagola A.G., Reconstruction of local line profiles from those observed in an Ap spectrum // Soviet Astron. Lett.. - 1977. - Т. 3. - стр. 147-149.
- Grankin K.N., Ibragimov M.A., Kondrat'ev V.B., Mel'Nikov S.Yu., Shevchenko V.S. Photometric study of the properties of SPOT rotational modulation in weak line T Tauri stars // Astronomicheskij Zhurnal. - 1995. -T. 72. - ctp. 984.
- Gray D.F. The determination of temperature from spectral lines // Stellar surface structure: proceedings of the 176th Symposium of the International Astronomical Union. - 1996. - стр. 227.
- 40. Hackman T., Pelt J., Mantere M.J., Jetsu L., Korhonen H., Granzer T., Kajatkari P., Lehtinen J., Strassmeier K.G. Flip-flops of FK Comae Berenices // Astronomy & Astrophysics. 2013. id. A40 : Т. 553. стр. 1-13.

- Hall D.S., Henry G.W., The Law of Starspot Lifetimes // International Amateur-Professional Photoelectric Photometry Communication. - 1994. -55. - ctp. 51.
- 42. Hatzes Artie P., Doppler Imaging of the Cool SPOT Distribution on the Weak T Tauri Star V410 Tauri // Astrophysical Journal. - 1995. - Т. 451. - стр. 784.
- Heckert Paul A. Two decades of optical photometry of short-period eclipsing RS CVn systems and other active chromosphere systems // The Journal of Astronomical Data. - 2012. - T. 18. - crp. 5.
- Hendry Martin A., Bryce Helen M., Valls-Gabaud David. The microlensing signatures of photospheric starspots // Monthly Notice of the Royal Astronomical Society. -2002. - 3 : Т. 335. - стр. 539-549.
- Heyrovský David, Sasselov Dimitar. Detecting Stellar Spots by Gravitational Microlensing // The Astrophysical Journal. - 2000. - 1 : T. 529. - ctp. 69-76.
- Hoffmeister C. Analyse der Lichtkurven von vier RW Aurigae-Sternen // Veroeffentlichungen der Sternwarte in Sonneberg. - 1965. - 3 : T. 6. - ctp. 97-122.
- 47. Huenemoerder David P, Ramsey Lawrence W. CCD Echelle observations of the active RS CVn system II Pegasi // Astrophysical Journal. - 1987. - 1 : T. 319. - ctp. 392-402.
- Jankov S., Foing B.H., Tomographic imaging of late-type stars from spectroscopic and photometric rotational modulation. I - Principle and mathematical formulation of the method // Astronomy and Astrophysics. -1992. - 2 : T. 256. - ctp. 533-550.
- 49. Jankov S., Vakili F., Domiciano de Souza A.Jr., Janot-Pacheco E. Interferometric-Doppler Imaging of Nonradial Stellar Pulsations // Radial and Nonradial Pulsations as Probes of Stellar Physics. - 2002. - ctp. 172.
- Jankov S., Vakili F., Domiciano de Souza A.Jr., Janot-Pacheco E., Interferometric-Doppler imaging of stellar surface structure // Astronomy and Astrophysics. - 2001. - T. 377. - ctp. 721-734.

- 51. Jetsu L., Anttila R., Dmitrienko E., Grankin K.N., Huovelin J., Mel'Nikov S.Yu., Shevchenko V.S., Tuominen I. The FK Comae-type candidate 1E 1751 + 7046 UBVRI photometry // Astronomy and Astrophysics. 1992. 1 : T. 262. ctp. 188-194.
- Jetsu L., Huovelin J., Tuominen I., Vilhu O., Bopp B.W., Piirola V., Rotational and long-term variations of HD 199178 - A double period activity cycle // Astronomy and Astrophysics. - 1990. - 2 : T. 236. - crp. 423-439.
- Jetsu L., Pelt J., Tuominen I. SPOT and flare activity of FK Comae Berenices: Long-term photometry // Astronomy and Astrophysics. - 1993. - 2 : T. 278. ctp. 449-462.
- 54. Jetsu L., Pelt J., Tuominen I., Time series analysis of V 1794 Cygni long-term photometry // Astronomy and Astrophysics. 1999. T. 351. ctp. 212-224.
- 55. Jetsu L. The active longitudes of λ Andromedae, σ Geminorum, II Pegasi and
   V 711 Tauri // Astronomy and Astrophysics. 1996. T. 314. ctp. 153-164.
- Katsova M.M., Bondar N.I., Livshits M.A., Solar-type activity: Epochs of cycle formation // Astronomy Reports. - 2015. - 7 : T. 59. - ctp. 726-735.
- 57. Kiraga M. ASAS Photometry of ROSAT Sources. I. Periodic Variable Stars Coincident with Bright Sources from the ROSAT All Sky Survey // Acta Astronomica. - 2012. - 1 : T. 62. - ctp. 67-95.
- Kiurkchieva Diana P. Photometry of stars with nonhomogeneous temperature spots // Astrophysics and Space Science. - 1990. - 2 : T. 172. - ctp. 255-262.
- Kochukhov O., Makaganiuk V., Piskunov N. Least-squares deconvolution of the stellar intensity and polarization spectra // Astronomy and Astrophysics. -2010. - А5 : Т. 524. - стр. 1-14.
- Kochukhov O., Mantere M.J., Hackman T., Ilyin I. Magnetic field topology of the RS CVn star II Pegasi // Astronomy & Astrophysics. - 2013. - id.A84 : T. 550. - ctp. 1-19.
- 61. Kochukhov O., Petit P., Strassmeier K.G., Carroll T.A., Fares R., Folsom C.P., Jeffers S.V., Korhonen H., Monnier J.D., Morin J., Rosen L.,

Roettenbacher R.M., Shulyak D. Surface magnetism of cool stars // eprint arXiv:1612.03388. - 2016.

- Korhonen H., Berdyugina S.V., Hackman T., Duemmler R., Ilyin I.V., Tuominen I., Study of FK Comae Berenices. I. Surface images for 1994 and 1995 // Astronomy and Astrophysics. - 1999. - T. 346. - ctp. 101-110.
- Korhonen H., Berdyugina S.V., Hackman T., Ilyin I.V., Strassmeier K.G., Tuominen I. Study of FK Comae Berenices. V. Spot evolution and detection of surface differential rotation // Astronomy and Astrophysics. - 2007. - 2 : T. 476. - ctp. 881-891.
- Korhonen H., Berdyugina S.V., Hackman T., Strassmeier K.G., Tuominen I. Study of FK Comae Berenices --- II. Spot evolution from 1994 to 1997 // Astronomy and Astrophysics. - 2000. - T. 360. - ctp. 1067-1076.
- Korhonen H., Berdyugina S.V., Tuominen I. Spots on FK Com: active longitudes and "flip-flops" // Astronomische Nachrichten. - 2004. - 5 : T. 325. - ctp. 402-407.
- Korhonen H., Berdyugina S.V., Tuominen I., Andersen M.I., Piironen J., Strassmeier K.G., Grankin K.N., Kaasalainen S. Karttunen H. Mel'nikov S.Yu., Shevchenko V.S., Trisoglio M., Virtanen J. Study of FK Comae Berenices. III. Photometry for the years 1993-2001 // Astronomy and Astrophysics. - 2001. - T. 374. - ctp. 1049-1055.
- Korhonen H., Berdyugina S.V., Tuominen I., Study of FK Comae Berenices. IV. Active longitudes and the ``flip-flop" phenomenon // Astronomy and Astrophysics. - 2002. - T. 390. - ctp. 179-185.
- Korhonen H., Elstner D., Photometric observations from theoretical flip-flop models // Astronomy and Astrophysics. - 2005. - 3 : T. 440. - ctp. 1161-1165.
- Korhonen H., Hubrig S., Berdyugina S.V., Granzer Th., Hackman T., Schöller M., Strassmeier K.G., Weber M. First measurement of the magnetic field on FK Com and its relation to the contemporaneous star-spot locations // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2009. - 1 : T. 395. - crp. 282-289.

- Korhonen Heidi. Properties of stellar activity cycles // Astronomy in Focus, as presented at the IAU XXIX General Assembly. - 2016. - T. 29A. - ctp. 354-359.
- Kővári Z., Oláh K. Observing Dynamos in Cool Stars // Space Science Reviews. - 2014. - 1-4 : T. 186. - crp. 457-489.
- Kron Gerald E. A Photoelectric Study of the Dwarf M Eclipsing Variable YY Geminorum // Astrophysical Journal. - 1952. - T. 115. - ctp. 301.
- 73. Kron Gerald E., The Probable Detecting of Surface Spots on AR Lacertae B
  // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 1947. 350 : T.
  59. ctp. 261.
- Kudryavtsev D.O. Reduction of Echelle and long-slit Zeeman spectra in Midas // Baltic Astronomy. - 2000. - Т. 9. - стр. 649-651.
- 75. Küker M., Rüdiger G., Differential rotation and meridional flow on the lower zero-age main sequence: Reynolds stress versus baroclinic flow // Astronomische Nachrichten. - 2011. - 9/10 : T. 332. - ctp. 933.
- 76. Kurucz R.L. 2000, http://www.cfaku5.harvard.edu
- Landstreet J.D. A search for magnetic fields in normal upper-main-sequence stars // Astrophysical Journal. - 1982. - 1. - T. 258. - ctp. 639-650.
- Lanza A.F., Catalano S., Cutispoto G., Pagano I., Rodono M., Long-term starspot evolution, activity cycle and orbital period variation of AR Lacertae // Astronomy and Astrophysics. - 1998. - T. 332. - ctp. 541-560.
- 79. Loyd R. O. Parke France Kevin Fluctuations and Flares in the Ultraviolet Line Emission of Cool Stars: Implications for Exoplanet Transit Observations // The Astrophysical Journal Supplement. - 2014. - 1 : T. 211. - ctp. 25.
- 80. Mekkaden M.V. Rotation and H-alpha emission activity in F8-G3 dwarfs // Astrophysics and Space Science. - 1985. - 2 : Т. 117. - стр. 381-385.
- Messina S., Guinan E.F., Lanza A.F., Photospheric Magnetic Activity in a Proxy for the Young Sun: HD 134319 // Astrophysics and Space Science. -1998. - 4 : T. 260. - ctp. 493-505.

- Middelkoop F. Magnetic structure in cool stars. III CA II H and K emission and rotation of main-sequence stars // Astronomy and Astrophysics. - 1981. -T. 101. - ctp. 295-298.
- Neff James E., O'Neal Douglas, Saar Steven H. Absolute Measurements of Starspot Area and Temperature: II Pegasi in 1989 October // Astrophysical Journal. - 1995. - T. 452. - ctp. 879.
- Oláh K., Kolláth Z., Granzer T., Strassmeier K.G., Lanza A.F., Järvinen S., Korhonen H., Baliunas S.L., Soon W., Messina S., Cutispoto G., Multiple and changing cycles of active stars. II. Results // Astronomy and Astrophysics. -2009. - 2 : T. 501. - ctp. 703-713.
- Oláh K., Korhonen H., Kővári Zs., Forgács-Dajka E., Strassmeier K.G., Study of FK Comae Berenices. VI. Spot motions, phase jumps and a flip-flop from time-series modelling // Astronomy and Astrophysics. - 2006. - 1 : T. 452. ctp. 303-309.
- Oláh K., Kővári Zs., Petrovay K., Soon W., Baliunas S., Kolláth Z., Vida K., Magnetic cycles at different ages of stars // Astronomy & Astrophysics. -2016. - A133 : T. 590. - crp. 13.
- O'Neal Douglas, Saar Steven H., Neff James E. Measurements of Starspot Area and Temperature on Five Active, Evolved Stars // Astrophysical Journal. - 1996. - T. 463. - ctp. 766.
- 88. Pallavicini R. Golub L., Rosner R., Vaiana G.S., Ayres T., Linsky J.L. Relations among stellar X-ray emission observed from Einstein, stellar rotation and bolometric luminosity [Статья]. - 1981 г.. - Astrophysical Journal, Part 1. - T. 248. - стр. 279-290.
- Panov K., Dimitrov D., Long-term photometric study of FK Comae Berenices and HD 199178 // Astronomy and Astrophysics. - 2007. - 1 : T. 467. - crp. 229-235.
- 90. Pinsonneault Marc H., Elsworth Yvonne Epstein Courtney, Hekker Saskia, Mészáros Sz., Chaplin William J., Johnson Jennifer A., García Rafael A., Holtzman Jon, Mathur Savita, and 35 coauthors. The APOKASC Catalog: An

Asteroseismic and Spectroscopic Joint Survey of Targets in the Kepler Fields // The Astrophysical Journal Supplement. - 2014. - 2 : T. 215. - ctp. 1-23.

- Piskunov N.E., Tuominen I., Vilhu O., Surface imaging of late-type stars // Astronomy and Astrophysics. - 1990. - 2 : T. 230. - ctp. 363-370.
- 92. Reinhold Timo, Gizon Laurent, Rotation, differential rotation, and gyrochronology of active Kepler stars // Astronomy & Astrophysics. - 2015. -A65 : T. 583. - ctp. 1-15.
- Reinhold Timo, Reiners Ansgar, Basri Gibor, Rotation and differential rotation of active Kepler stars // Astronomy & Astrophysics. - 2013. - A4 : T. 560. - ctp. 1-19.
- 94. Rice J.B. Doppler imaging of stellar surfaces techniques and issues // Astronomische Nachrichten. - 2002. - 3/4 : T. 323. - ctp. 220-235.
- 95. Rodono M., Cutispoto G., Pazzani V., Catalano S., Byrne P.B., Doyle J.G., Butler C.J., Andrews A.D., Blanco C., Marilli E., Linsky J.L., Scaltriti F., Busso M., Cellino A., Hopkins J.L., Okazaki A., Hayashi S.S., and 5 coautours. Rotational modulation and flares on RS CVn and BY Dra-type stars. I - Photometry and SPOT models for BY Dra, AU Mic, AR Lac, II Peg and V 711 Tau (= HR 1099) // Astronomy and Astrophysics. - 1986. - 1-2 : T. 165. - ctp. 135-156.
- 96. Rodono M. Lanza, A.F., Catalano S., Starspot evolution, activity cycle and orbital period variation of the prototype active binary RS Canum Venaticorum // Astronomy and Astrophysics. 1995. T. 301. ctp. 75.
- 97. Roettenbacher R.M., Monnier J.D., Korhonen H., Aarnio A.N., Baron F., Che X., Harmon R.O., Kővári Zs., Kraus S., Schaefer G.H., Torres G., Zhao M., Ten Brummelaar T.A., Sturmann J., Sturmann L. No Sun-like dynamo on the active star ζ Andromedae from starspot asymmetry // Nature. 2016. 7602 : T. 533. ctp. 217-220.
- Rousselet-Perraut K., Stehlé C., Lanz T., Le Bouquin J.B., Boudoyen T., Kilbinger M., Kochukhov O., Jankov S. Stellar activity and magnetism

studied by optical interferometry // Astronomy and Astrophysics. - 2004. - Т. 422. - стр. 193-203.

- Rucinski S.M. The radio light curve of FK Comae at 3.6 CM // Astronomical Journal. - 1991. - T. 101. - ctp. 2199-2206.
- 100. Saar S.H., Brandenburg A. A new look at dynamo cycle amplitudes // Astronomische Nachrichten. 2002. 3/4 : T. 323. ctp. 357-360.
- 101. Sanad M.R., Bobrowsky M. Ultraviolet spectral variations of FK Comae and V 1794 Cygni // New Astronomy. 2014. Т. 31. стр. 37-42.
- 102. Savanov I.S. Evolution of cool spots on the surface of V410 Tau // Astronomy Reports. - 2012. - 9 : Т. 56. - стр. 722-729.
- 103. Savanov I.S. HD 181906: A star with two systems of active longitudes on its surface // Astronomy Reports. - 2010. - 12 : T. 54. - ctp. 1125-1133.
- 104. Savanov I.S., Romaniuk I.I., Semenko E.A., Dmitrienko E.S. The presence of a magnetic field on the pulsating subdwarf Balloon 090100001. Observations of 2012 // Astronomy Reports. - 2013. - 10 : T. 57. - ctp. 751-756.
- 105. Savanov I.S., Romanyuk I.I., Semenko E.A., Dmitrienko E.S. The magnetic field of the pulsating subdwarf Balloon 090100001 // Astronomy Reports. -2011. - 12 : Т. 55. - стр. 1115-1122.
- 106. Savanov I.S. Spots and activity cycles of HD 199178 // Astronomy Reports. -2009. - 11 : Т. 53. - стр. 1032-1038.
- 107. Savanov I.S. Spots on the surfaces of late-type stars [Статья] // Astronomy Reports. 2014 г.. 7 : Т. 58. стр. 478-487.
- 108. Savanov I.S., Strassmeier K.G., Light-curve inversions with truncated leastsquares principal components: Tests and application to HD 291095 = V1355 Orionis // Astronomische Nachrichten. - 2008. - 4 : T. 329. - ctp. 364.
- 109. Semel M., López Ariste A. Current Ground-Based Stellar Spectropolarimeters and their Use for Zeeman-Doppler Imaging // Magnetic Fields Across the Hertzsprung-Russell Diagram, ASP Conference Proceedings. - 2001. - T. 248. - ctp. 575.

- 110. Silva Adriana V.R. Method for Spot Detection on Solar-like Stars // The Astrophysical Journal. 2003. 2 : T. 585. ctp. L147-L150.
- 111. Silva D.R., Liebert J., Stocke J.T., Aaronson M. Spectroscopic observations of three X-ray selected late-type stars // Astronomical Society of the Pacific. -1985. - T. 97. - ctp. 1096-1100.
- 112. Simon Theodore, Fekel Francis C.Jr. The dependence of ultraviolet chromospheric emission upon rotation among late-type stars // Astrophysical Journal. - 1987. - 1 : T. 316. - ctp. 434-448.
- 113. Skumanich A. Time Scales for CA II Emission Decay, Rotational Braking, and Lithium Depletion // Astrophysical Journal. - 1972. - T. 171. - ctp. 565.
- 114. Strassmeier K.G., Bartus J., Cutispoto G., Rodono M. Starspot photometry with robotic telescopes: Continuous UBV and V(RI)\_C photometry of 23 stars in 1991-1996 // A & A Supplement series. - 1997. - T. 125. - ctp. 11-63.
- 115. Strassmeier K.G. Doppler imaging of stellar surface structure. XI. The super starspots on the K0 giant HD 12545: larger than the entire Sun // Astronomy and Astrophysics. - 1999. - Т. 347. - стр. 225-234.
- 116. Strassmeier K.G., Lupinek S., Dempsey R.C., Rice J.B., Doppler imaging of stellar surface structure. X. The FK Comae-type star HD 199178 = V 1794 Cygni // Astronomy and Astrophysics. 1999. T. 347. ctp. 212-224.
- 117. Strassmeier K.G., Rice J.B., Wehlau W.H., Vogt S.S., Hatzes A.P., Tuominen I., Hackman T., Poutanen M., Piskunov N.E., Doppler imaging of high-latitude SPOT activity on HD 26337 // Astronomy and Astrophysics. 1991. 1 : T. 247. ctp. 130-147.
- 118. Strassmeier Klaus G. A multiple SPOT model for simultaneous solution of light curves and distorted line profiles of spotted stars // Astrophysics and Space Science. - 1988. - 2 : T. 140. - ctp. 223-235.
- 119. Strassmeier Klaus G. Starspots // The Astronomy and Astrophysics Review. -2009. 3 : T. 17. ctp. 251-308.

- 120. Strassmeier Klaus G., Washuettl Albert, Granzer Thomas a Survey for Rapidly-Rotating ca II H& K Emission-Line Stars // NOAO Proposal ID #1999A-0022. - 1999.
- 121. Tas G., Evren S. II Pegasi Reached The Largest Amplitude Up To Now // Information Bulletin on Variable Stars. - 2000. - 1 : T. 4991.
- 122. Tayar Jamie, Ceillie Tugdual, García-Hernández D.A., Trou Nicholas W., Mathur Savita, García, Rafael A., Zamora O., Johnson Jennifer A., Pinsonneault Marc H., Mészáros Szabolcs, and 10 coauthors. Rapid Rotation of Low-mass Red Giants Using APOKASC: A Measure of Interaction Rates on the Post-main-sequence // The Astrophysical Journal. - 2015. - 1 : T. 807. ctp. 1-15.
- 123. Terebizh V. Yu. Quasi-optimal filtering in inverse problems // Astronomical and Astrophysical Transactions. 2004. 2 : Т. 23. стр. 85-93.
- 124. Tutukov A.V., Fedorova A.V. Possible scenarios for the formation of Ap/Bp stars // Astronomy Reports. - 2010. - 2 : T. 54. - ctp. 156-162.
- 125. Valio Adriana, Estrela Raissa, Netto Yuri, Bravo J.P., de Medeiros J.R. Activity and Rotation of Kepler-17 // The Astrophysical Journal. 2017. 2 : Т. 835. - стр. 6.
- 126. Vaughan A.H., Preston G.W., Baliunas S.L., Hartmann L.W., Noyes R.W., Middelkoop F., Mihalas D. Stellar rotation in lower main-sequence stars measured from time variations in H and K emission-line fluxes. I - Initial results // Astrophysical Journal, Part 1. - 1981. - T. 250. - ctp. 276-283.
- 127. Vida K., Korhonen H., Ilyin I.V., Oláh K., Andersen M.I., Hackman T., Study of FK Comae Berenices. VII. Correlating photospheric and chromospheric activity // Astronomy & Astrophysics. - 2015. - A64 : T. 580. - стр. 1-14.
- 128. Vilhu O. The nature of magnetic activity in lower main sequence stars // Astronomy and Astrophysics. 1984. 1 : T. 133. ctp. 117-126.
- 129. Vogt Steven S., Penrod G. Donald, Hatzes Artie P., Doppler images of rotating stars using maximum entropy image reconstruction // Astrophysical Journal. - 1987. - 1 : T. 321. - ctp. 496-515.

- 130. Walter F.M., Bowyer S. On the coronae of rapidly rotating stars. I The relation between rotation and coronal activity in RS CVn systems // Astrophysical Journal, Part 1. 1981. T. 245. ctp. 671-676.
- 131. Walter F.M. On the coronae of rapidly rotating stars. II A period-activity relation in G stars // Astrophysical Journal. 1981. T. 245. ctp. 677-681.
- 132. Wilson O.C. Flux Measurements at the Centers of Stellar h- and K-Lines // Astrophysical Journal. 1968. T. 153. ctp. 221.
- 133. Wittkowski M., Schöller M., Hubrig S., Posselt B., von der Lühe O. Measuring starspots on magnetically active stars with the VLTI // Astronomische Nachrichten. - 2002. - 3/4 : T. 323. - ctp. 241-250.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Таблица 1.

Фотометрические данные полученные по наблюдениям

## выполненным в 2013-2015 гг.

HJD	B, m	HJD	V, m	HJD	R, m
2457178.34833	9.043	2456472.25510	8.264	2456472.25969	7.513
2457178.35145	9.035	2456472.25611	8.269	2456472.35038	7.522
2457178.35459	9.054	2456472.25700	8.266	2456473.30309	7.428
2457178.35771	9.070	2456472.25810	8.266	2456473.30923	7.424
2457178.36084	9.037	2456472.25879	8.273	2456473.38813	7.405
2457179.38038	8.962	2456472.26010	8.269	2456474.29372	7.468
2457179.38327	8.964	2456472.26232	8.268	2456474.37945	7.488
2457182.41328	8.884	2456472.26377	8.268	2456792.32043	7.660
2457182.41336	8.896	2456472.26497	8.265	2456792.33106	7.663
2457182.41345	8.884	2456472.25876	8.256	2456792.34301	7.664
2457182.42149	8.901	2456472.35092	8.294	2456792.35497	7.663
2457182.42979	8.888	2456473.30110	8.172	2456792.36707	7.665
2457182.42987	8.886	2456473.30204	8.177	2456792.37903	7.663
2457186.34161	9.012	2456473.30500	8.172	2456792.39099	7.662
2457186.34420	9.005	2456473.30600	8.178	2456792.40294	7.660
2457186.34677	9.021	2456473.30700	8.172	2456792.41077	7.663
2457189.34076	8.901	2456473.30900	8.175	2456793.34129	7.482
2457189.34367	8.892	2456473.3100	8.181	2456793.35113	7.489
		2456473.31100	8.176	2456793.36319	7.488
		2456473.38700	8.176	2456793.37510	7.485
		2456473.38800	8.17	2456793.38701	7.485
		2456473.38900	8.176	2456793.39906	7.481
		2456473.39000	8.171	2456793.41112	7.483
		2456473.39100	8.151	2456793.41773	7.476
		2456474.29300	8.22	2456794.25178	7.601
		2456474.29400	8.216	2456794.26308	7.600
		2456474.29500	8.215	2456794.27506	7.605
		2456474.29600	8.22	2456794.28705	7.602
		2456474.37800	8.23	2456794.29673	7.614

Продолжение (1) таблицы 1, ПРИЛОЖЕНИЯ А

HJD	B, m	HJD	V, m	HJD	R, m
		2456474.37900	8.237	2456805.39215	7.497
		2456474.38000	8.242	2456805.40036	7.494
		2456687.30500	8.312	2456805.41235	7.493
		2456687.30600	8.326	2456805.42433	7.492
		2456687.31083	8.345	2456805.43631	7.491
		2456687.31200	8.346	2456805.44830	7.493
		2456687.31600	8.346	2456805.45831	7.493
		2456687.31700	8.347	2457178.34871	7.639
		2456687.32200	8.357	2457178.35183	7.632
		2456687.32300	8.351	2457178.35496	7.620
		2456687.32533	8.346	2457178.35810	7.616
		2456687.32700	8.335	2457178.36122	7.628
		2456687.33150	8.335	2457179.38351	7.553
		2456687.33740	8.39	2457179.38639	7.520
		2456687.34160	8.363	2457182.41388	7.514
		2456687.34610	8.367	2457182.41398	7.484
		2456687.35256	8.438	2457182.41413	7.523
		2456687.35722	8.426	2457182.42242	7.514
		2456687.36171	8.433	2457182.43031	7.489
		2456688.29850	8.335	2457182.43040	7.512
		2456688.30420	8.331	2457182.43054	7.485
		2456688.30920	8.207	2457186.34183	7.614
		2456688.31522	8.224	2457186.34443	7.602
		2456688.37833	8.266	2457186.34701	7.597
		2456688.43100	8.296	2457189.33811	7.500
		2456688.44145	8.311	2457189.34102	7.506
		2456689.34480	8.317	2457189.34392	7.515
		2456689.37450	8.325		
		2456691.29267	8.262		
		2456691.44292	8.275		
		2456693.32446	8.196		
		2456693.42573	8.219		
		2456694.25218	8.272		

Продолжение (2) таблицы 1, ПРИЛОЖЕНИЯ А

HJD	B, m	HJD	V, m	HJD	R, m
		2456694.39673	8.234		
		2456792.32021	8.328		
		2456792.32929	8.325		
		2456792.33944	8.325		
		2456792.34938	8.322		
		2456792.35951	8.324		
		2456792.36962	8.327		
		2456792.37956	8.324		
		2456792.38953	8.325		
		2456792.3995	8.317		
		2456792.40944	8.319		
		2456792.41533	8.313		
		2456793.26243	8.127		
		2456793.26944	8.124		
		2456793.27938	8.12		
		2456793.28949	8.119		
		2456793.29962	8.118		
		2456793.30956	8.115		
		2456793.31950	8.114		
		2456793.32947	8.111		
		2456793.33700	8.105		
		2456794.25219	8.247		
		2456794.25950	8.248		
		2456794.28905	8.257		
		2456794.29919	8.263		
		2456861.32961	8.251		
		2456861.33517	8.249		
		2456862.31171	8.261		
		2456862.31600	8.26		
		2456862.32643	8.253		
		2456862.33284	8.259		
		2456862.34042	8.257		
		2456863.34063	8.17		

Продолжение (3) таблицы 1, ПРИЛОЖЕНИЯ А

HJD	B, m	HJD	V, m	HJD	R, m
		2456863.34677	8.197		
		2456864.33438	8.29		
		2456864.34319	8.284		
		2456865.32979	8.192		
		2456865.33818	8.198		
		2456866.31641	8.298		
		2456866.32254	8.294		
		2456866.33589	8.298		
		2456903.14493	8.253		
		2456903.14493	8.256		
		2456903.14618	8.344		
		2456903.14623	8.344		
		2456903.14653	8.159		
		2456903.14690	8.217		
		2456903.14706	8.369		
		2456903.14725	8.354		
		2456903.14757	8.348		
		2456903.14792	8.072		
		2456903.14799	8.215		
		2457178.35477	8.261		
		2457179.38339	8.207		
		2457182.41370	8.139		
		2457182.42180	8.141		
		2457182.43011	8.154		
		2457186.34431	8.256		
		2457189.34089	8.142		
		2457189.46249	8.127		

Значения долей площади видимой поверхности звезды FK Com занятой пятнами (Sp) и долгот с наиболее активными областями на поверхности звезды определенные по картам температурных поверхностных

HJD	Sp, %	Долгота в	Присвоенное
2400000+		фазах	положение
		вращения	на системе
			долгот А (0)
			и Б (1)
39274.87	15.9	0.014	1
39315.79	15.8	0.181	1
39341.27	14.4	0.333	1
42175.32	17.5	0.667	1
43644.74	16.8	0.611	1
43954.24	13.4	0.611	1
44656.48	13.3	0.819	1
45120.45	15.7	0.431	1
45354.05	16.3	0.472	0
45377.28	15.1	0.264	0
45449.74	16.7	0.264	0
45468.90	19.0	0.167	0
45790.71	14.3	0.306	1
45849.52	16.3	0.431	1
46184.65	14.6	0.014	0
46227.58	13.5	0.056	0
46828.42	15.6	0.028	1
46851.38	14.4	0.000	1
46867.90	14.7	0.083	1
46885.32	14.8	0.014	1
46898.77	14.7	0.028	1
46916.27	13.3	0.069	1
46937.72	14.2	0.028	1

неоднородностей (построенные по 218 сетам).

HJD	Sp, %	Долгота в	Присвоенное
2400000+		фазах	положение
		вращения	на системе
			долгот А (0)
			и Б (1)
46965.70	14.2	0.028	1
46979.16	13.9	-0.042	1
47083.65	15.2	-0.056	1
47172.50	15.7	0.083	1
47184.98	15.9	0.167	1
47205.40	16.0	0.069	1
47220.38	15.9	0.125	1
47236.34	16.7	-0.056	1
47252.80	16.1	-0.056	1
47280.77	15.1	0.000	1
47292.21	14.3	-0.014	1
47307.18	15.2	0.069	1
47321.67	15.4	0.097	1
47518.53	14.2	0.597	1
47541.02	13.8	0.597	1
47573.41	14.5	0.583	1
47599.35	15.1	0.472	1
47612.80	15.3	0.611	1
47626.28	14.6	0.556	1
47639.34	15.2	0.500	1
47655.05	14.4	0.361	1
47669.70	15.3	0.389	1
47689.68	16.4	0.500	1
47902.99	14.9	0.194	1
47922.92	14.6	0.181	1
47941.37	13.7	0.250	1
48061.19	9.3	0.569	1
48086.18	10.1	0.556	1
48441.27	11.2	0.486	1

Продолжение (1) таблицы 2, ПРИЛОЖЕНИЯ А

нір	Sn %	Лолгота в	Присвоенное
2400000	₀∕ , <b>א</b> ר	долгота в	
2400000+		фазах	положение
		вращения	на системе
			долгот А (0)
			иБ(1)
48459.69	11.3	0.403	1
48827.68	9.9	0.222	0
48846.16	9.3	0.167	0
49100.38	11.0	0.931	0
49164.26	12.4	0.000	0
49201.20	12.4	-0.042	0
49223.66	11.7	-0.028	0
49519.75	11.9	0.681	1
49532.72	12.2	0.778	1
49552.19	13.6	0.750	1
49892.71	17.3	0.417	1
50095.97	16.7	0.417	1
50115.42	16.5	0.264	1
50152.38	15.2	0.389	1
50196.70	15.6	0.472	1
50223.19	15.5	0.333	1
50251.18	16.0	0.389	1
50425.01	18.4	0.597	1
50454.00	17.8	0.639	1
50483.42	16.6	0.653	1
50501.39	17.7	0.653	1
50523.25	17.9	0.611	1
50546.20	18.3	0.681	1
50568.22	18.4	0.667	1
50594.71	18.8	0.750	1
50623.21	17.9	0.736	1
50798.53	16.3	0.292	0
50817.98	16.2	0.264	0
50839.38	15.5	0.278	0

Продолжение (2) таблицы 2, ПРИЛОЖЕНИЯ А

HJD	Sp, %	Долгота в	Присвоенное
2400000+		фазах	положение
		вращения	на системе
			долгот А (0)
			иБ(1)
50872.37	16.3	0.361	1
50895.31	16.3	0.958	1
50910.80	16.7	0.972	1
50924.23	16.9	0.972	1
50935.67	16.7	0.986	1
50948.22	15.7	0.972	1
50960.68	15.3	0.944	1
50972.18	16.0	0.167	0
50983.17	15.6	0.139	0
50993.19	14.7	0.250	0
51186.47	15.5	0.528	1
51197.90	14.8	0.514	1
51211.94	13.7	0.500	1
51224.97	13.2	0.472	1
51235.90	13.5	0.333	1
51246.82	14.1	0.444	1
51259.83	13.7	0.431	1
51266.31	12.8	0.333	1
51281.22	12.6	0.972	0
51302.24	13.2	1.000	0
51311.69	13.7	0.847	0
51321.22	14.0	0.806	0
51333.23	14.4	0.097	0
51346.19	14.2	0.861	0
51519.01	19.2	0.778	0
51536.97	18.8	0.778	0
51552.96	19.1	0.694	0
51566.45	20.1	0.764	0
51586.89	20.1	0.736	0

Продолжение (3) таблицы 2, ПРИЛОЖЕНИЯ А

HJD	Sp, %	Долгота в	Присвоенное
2400000+		фазах	положение
		вращения	на системе
			долгот А (0)
			и Б (1)
51610.35	20.5	0.722	0
51621.20	20.0	0.639	0
51638.40	20.6	0.653	0
51658.71	21.1	0.708	0
51671.76	20.4	0.653	0
51681.71	19.7	0.569	0
51690.71	20.5	0.681	0
51705.27	20.3	0.611	0
51879.03	22.6	0.389	0
51894.50	24.0	0.528	0
51910.52	23.2	0.528	0
51928.45	23.0	0.472	0
51954.40	22.7	0.500	0
51980.27	22.5	0.417	0
51994.25	21.8	0.361	0
52012.11	22.3	0.444	0
52034.21	23.2	0.444	0
52058.19	22.7	0.431	0
52085.37	22.2	0.403	0
52259.50	25.2	0.250	0
52308.87	22.5	0.667	1
52323.31	22.4	0.500	1
52336.78	22.8	0.583	1
52351.25	22.2	0.625	1
52363.75	22.0	0.778	1
52375.75	21.4	0.542	1
52408.71	20.1	0.583	1
52419.66	19.6	0.625	1
52427.68	18.6	0.694	1

Продолжение (4) таблицы 2, ПРИЛОЖЕНИЯ А

HID	Sp, %	Долгота в	Присвоенное
2400000+		фазах	положение
		вращения	на системе
			долгот А (0)
			иБ(1)
52436.69	19.9	0.903	1
52448.19	20.2	0.764	1
52458.52	20.2	0.667	1
52618.52	19.8	0.958	1
52640.49	18.8	0.819	1
52654.42	19.5	0.889	1
52665.93	18.5	0.792	1
52676.47	18.8	0.861	1
52692.61	18.4	0.847	1
52706.62	18.5	0.833	1
52723.28	18.1	0.778	1
52732.79	18.6	0.819	1
52744.26	18.3	0.722	1
52755.68	17.3	0.778	1
52764.17	17.6	0.722	1
52778.73	17.1	0.806	1
52797.22	16.8	0.667	1
52810.58	16.1	0.542	1
52994.51	13.7	0.083	0
53005.49	12.8	0.139	0
53014.46	11.2	0.139	0
53032.41	13.5	0.028	0
53048.60	13.6	0.083	0
53063.34	14.7	0.167	0
53087.86	14.5	-0.028	0
53106.77	15.1	0.069	0
53120.20	15.0	-0.014	0
53133.66	15.4	0.111	0
53179.20	14.4	0.889	1

Продолжение (5) таблицы 2, ПРИЛОЖЕНИЯ А

<u></u>	Sn 0/		Присродника
ענח	эр, %	долгота в	присвоенное
2400000+		фазах	положение
		вращения	на системе
			долгот А (0)
			и Б (1)
53197.49	17.2	0.861	1
53383.31	19.5	0.694	1
53401.78	18.5	0.667	1
53429.32	18.8	0.861	1
53453.77	18.9	0.806	1
53469.73	18.0	0.694	1
53483.17	18.6	0.750	1
53502.67	19.4	0.806	1
53527.17	19.0	0.750	1
53544.18	18.3	0.583	1
53577.99	19.3	0.750	1
53720.52	19.2	0.639	1
53740.48	20.1	0.556	1
53760.94	19.4	0.583	1
53798.87	19.9	0.833	1
53840.20	18.7	0.861	1
53879.18	17.9	0.806	1
53901.16	17.0	0.875	1
54088.02	18.5	1.042	1
54153.84	19.2	1.028	1
54172.82	19.9	0.986	1
54189.78	19.6	0.944	1
54209.69	19.3	0.931	1
54225.79	19.4	0.861	1
54244.21	20.0	0.833	1
54263.19	19.9	0.833	1
54279.69	20.6	0.861	1
54453.52	23.8	0.250	1
54479.44	23.8	0.208	1

Продолжение (6) таблицы 2, ПРИЛОЖЕНИЯ А

	Sm 9/		Присроднико
ענח	sh, %	долгота в	присвоенное
2400000+		фазах	положение
		вращения	на системе
			долгот А (0)
			и Б (1)
54502.38	23.3	0.181	1
54524.37	23.0	0.181	1
54539.83	23.0	0.472	1
54554.24	23.3	0.222	1
54565.29	23.6	0.306	1
54586.76	22.4	0.306	1
54616.77	22.0	0.181	1
54839.47	20.6	0.528	1
54878.85	21.4	0.528	1
54925.31	21.4	0.097	1
54957.72	21.8	0.306	1
54980.26	20.9	0.361	1
55184.01	21.8	0.222	1
55204.45	22.3	0.250	1
55242.42	22.9	0.278	1
55275.82	22.3	0.097	1
55291.31	22.3	0.069	1
56473.32	15.3	-0.014	0
56793.31	15.8	0.306	0
56882.24	19.4	0.333	0
57250.56	15.0	0.611	0

Продолжение (7) таблицы 2, ПРИЛОЖЕНИЯ А

#### ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Рисунок 1. Карты поверхностных температурных неоднородностей звезды FK Сот построенные по данным массива фотометрических данных с 07.05.1966 по 27.10.2015 гг. (HJD=2439253.438-2457322.767)



#### Продолжение (1) рисунка 1, ПРИЛОЖЕНИЯ Б















47

360

360

















360

360









50 0 -50 180 360 0





41



















7.95

8.20 8.45

7.95

8.20 8.45

7.95

8.20 8.45

7.95

8.20

8.45

7.95 [

8.20

8.45

7.95 8.20

8.45

7.95 8.20 8.45

7.95

8.20 8.45

7.95

8.20 8.45

7.95

8.20 8.45

7.95

8.20 8.45

0.0

0.0

0.0

0.0

0.0

0.0

0.0

0.0

0.0

0.0

0.0

## Продолжение (2) рисунка 1, ПРИЛОЖЕНИЯ Б





1.0

0 180 360





### Продолжение (3) рисунка 1, ПРИЛОЖЕНИЯ Б

117

120

123

126

129

132

135

138

-

141

144

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

;et

0.5 phase



50 0 -50

0

180 360



0.0



50 0 -50





































119

122

125

360

360

180

180

50 0 -50

50 0 -50

0

0









50 0 -50

0



360









360







119

7.95



















7.95

7.95 8.20 8.45

0.0

118

\*\*+

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

118

360

360

360

### Продолжение (4) рисунка 1, ПРИЛОЖЕНИЯ Б

156

159

162

165

168

171

\*\*\*\* 0.5 phase

174

+++++ 0.5 phase

177

180

183

186

189

192

0.5 phase

0.5 phase

0.5 phase

鞋

0.5 phase

0,5 phase

0.5 phase

\*\*\*

0.5 phase

0.5 phase

ŧ

0.5 phase

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

0.5 phase

++

0.5 phase































0.5 phase 1.0 193 8.20 8.45 0.0









173 50 0 -50 0 180 360

176 50 0 -50 0 180 360



182

360

360







191 50 0 -50







158

1.0

\*\*\*\*+\*

0.5 phase

7.95

8.20 8.45

0.0





















# Продолжение (5) рисунка 1, ПРИЛОЖЕНИЯ Б

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0

1.0



50 0 -50

50 0 -50

50 0 -50

50 0 -50

50 0 -50

50 -50

50 0 -50

50 0 -50

0

0

0



196































1.0

1.0

1.0

1.0

1.0







197

200

203

206

360

180 360

180 360

0 180 360

0









7.95

8.20 8.45

7.95

0.0



197

200

1.0

1.0

0.5 phase











7.95 8.20 8.45

7.95

8.20

7.95

8.20 8.45 0.0

7.95 8.20 8.45 0.0

7.95

8.20 8.45

7.95

8.20 8.45 0.0

7.95 8.20 8.45 0.0

0.0

0.5 phase

0.5 phase

0.5 phase

0.5 phase

0.5 phase

208

211

214

217

0.0

0.0