

УДК 524.316-56

ПЯТНА И ЦИКЛЫ АКТИВНОСТИ ЗВЕЗДЫ FK Com — АНАЛИЗ ДАННЫХ 2013–2015 ГГ.

© 2016 В. Б. Пузин^{1*}, И. С. Саванов¹, Е. С. Дмитриенко²,
И. И. Романюк³, Е. А. Семенко³, И. А. Якунин³, А. Ю. Бурданов^{4,5}

¹Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

³Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

⁴Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620002 Россия

⁵Льежский университет, Льеж, 4000 Бельгия

Поступила в редакцию 07 декабря 2015 года; принята в печать 14 марта 2016 года

Проведен анализ новых фотометрических и спектрополяриметрических наблюдений хромосферно-активной звезды FK Com. На основе этого наблюдательного материала и сведений из литературных источников по единой методике выполнен анализ полного набора имеющихся фотометрических данных, которые были разбиты на 218 индивидуальных кривых блеска. Для каждой из них решена обратная задача восстановления крупномасштабных температурных неоднородностей на поверхности звезды по ее кривой блеска. Проанализированы временные ряды 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. Анализ результатов определений положений активных долгот приводит к заключению о существовании двух систем активных областей на поверхности FK Com. Установлено, что положения каждой из этих систем претерпевают циклические изменения. Подтверждается вывод о вероятном отсутствии ярко выраженной регулярности флип-флопов у FK Com, сделанный ранее другими исследователями. Представлены результаты новых поляриметрических наблюдений FK Com в 2014–15 гг. Эти измерения свидетельствуют о правомерности предлагаемой интерпретации поведения величины продольного магнитного поля $\langle B_z \rangle$, указывающего на установление более симметричного распределения магнитных областей на поверхности FK Com. Зарегистрированное по фотометрическим наблюдениям увеличение активности звезды в последние годы также согласуется с вероятным началом возрастания параметра $\langle B_z \rangle$ после 2014 г.

Ключевые слова: *звездные пятна — звезды: магнитное поле — звезды: индивидуальные: FK Com*

1. ВВЕДЕНИЕ

Небольшая группа звезд типа FK Com включает в себя одиночные G–K-гиганты, обладающие высокой активностью и быстрым вращением (см., например, в [1]). Кроме самой FK Com, к этой группе относятся еще лишь две звезды — ET Dra (BD +70959) и HD 199178, а причисленная ранее звезда UZ Lib была исключена из числа объектов после обнаружения ее двойственности. В одном из наших последних исследований [2] по результатам анализа фотометрических наблюдений космического телескопа Кеплер были выбраны и

изучены четыре звезды, параметры которых соответствуют звездам типа FK Com, и которые могут рассматриваться как потенциальные кандидаты для включения в эту группу. Дальнейшие исследования позволят более определенно установить их принадлежность к объектам типа FK Com и при положительном результате существенно увеличат число звезд данного редкого типа. Эволюционный статус звезд этой группы все еще не ясен [3].

Прототип группы, FK Com, является активной звездой позднего спектрального класса, которая интенсивно изучается в ходе наземной фотометрии и спектроскопии, а также многочисленных космических наблюдений в ультрафиолетовом и гамма-диапазонах (см. о них подробнее в [4] и [5]). описа-

*E-mail: vpuzin@inasan.ru

ние основных свойств FK Com можно также найти в [6] и в серии статей [5], ниже они приводятся согласно данным этих литературных источников. Спектральный класс FK Com оценивается как G5III, проекция скорости вращения звезды на луч зрения составляет 159 км с^{-1} . Фотометрический период вращения FK Com оценивается в 2.4 суток. Ее активность 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 смены активных долгот (flip-flop phenomenon, флип-флоп) [6]. По результатам фотометрических и спектральных наблюдений, послуживших основой для проведения доплеровского картирования поверхности FK Com, было сделано заключение о том, что явление flip-flop происходит вследствие быстрого переключения активности с одной долготы (области) на другую, как правило, отстоящую от первой примерно на 180° . По-видимому, это объяснение можно считать общепринятым [4]. Альтернативным ему является мнение авторов [5], считающих что флип-флоп происходит вследствие миграции пятен по поверхности звезды. Анализ доплеровских карт и фотометрических данных позволил установить, что вращение поверхности FK Com является дифференциальным (коэффициент 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 года.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Новый наблюдательный материал для исследования фотометрической переменности FK Com был получен нами в 2013–2015 г. Эти наблюдения были выполнены в трех обсерваториях: в Терскольском филиале ИНАСАН, в Звенигородской обсерватории (ЗО ИНАСАН) и Коуровской астрономической обсерватории УрФУ. Наблюдения проведены с использованием фотометрических фильтров системы Джонсона–Моргана на двух телескопах Цейсс-600 в фильтрах V и R (ТФ ИНАСАН, ЗО ИНАСАН), на роботизированном телескопе Velocе RH 200 в фильтрах B , V , R (ЗО ИНАСАН) и на телескопе МАСТЕР-II-Урал в фильтрах V и R (КАО УрФУ). Полученные фотометрические наблюдения подверглись процессу стандартной обработки, который включал в себя следующие процедуры: вычитание кадров подложки (bias), вычитание темного 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, $V = 7.616$), находящаяся вблизи от исследуемого объекта.

Собранные нами данные образуют каталог фотометрических наблюдений FK Com в период с 7 мая 1966 г. по 15 июля 2015 г. (юлианские даты 2439253.438–2457189.462) в фильтрах U , B , V , R (соответственно 2650, 3773, 7044 и 2064 измерений). Каталог дополнен фотометрическими данными, любезно предоставленными автором работы [7]. Поскольку наибольшее число измерений для FK Com было получено в фильтре V , наши исследования будут преимущественно основаны именно на них.

На основе нового наблюдательного материала и данных из литературных источников по единой методике мы провели анализ полного набора имеющихся фотометрических данных. Это существенно отличает наше исследование от [4], в котором рассматривался максимально доступный до 2013 г. (без наших последних наблюдений) наблюдательный материал, но в котором был применен лишь строго математический периодограммный анализ. С другой стороны, исследования [5] (близкие к нашему по методике исследований на основе построения температурных карт поверхности по фотометрическим и спектральным наблюдениям) неоднократно проводились лишь по избранным, доступным на момент проведения их анализа данным, но не по всей их совокупности.

3. АНАЛИЗ ПЕРЕМЕННОСТИ БЛЕСКА

Весь набор фотометрических данных в фильтре V (рис. 1а) для FK Com был разбит на 218 сетов таким образом, что в течение каждого интервала форма кривой блеска не менялась, а на соответствующей фазовой кривой по возможности отсутствовали пробелы. Фазы вращения были рассчитаны нами по эфемеридам из [5] с периодом $P = 2.4002466$ дня. Для каждой из 218 индивидуальных кривых блеска мы решили обратную задачу восстановления крупномасштабных температурных неоднородностей на поверхности звезды по ее кривой блеска с помощью программы iPH [8]. Основу программы составляет метод статистического подхода к решению обратных задач, примененный нами ранее в [9] для решения задачи доплеровского картирования и использующий усеченную оценку главных компонентов решения проблемы. Как и в наших предыдущих исследованиях и в [5], решение обратной задачи находилось в двухтемпературном приближении, при котором интенсивность излучения от каждой элементарной площадки на поверхности звезды складывается из двух компонентов: излучение от фотосферы и от холодного пятна. Согласно [5], мы приняли значения для температур фотосферы и пятна 5000 К и

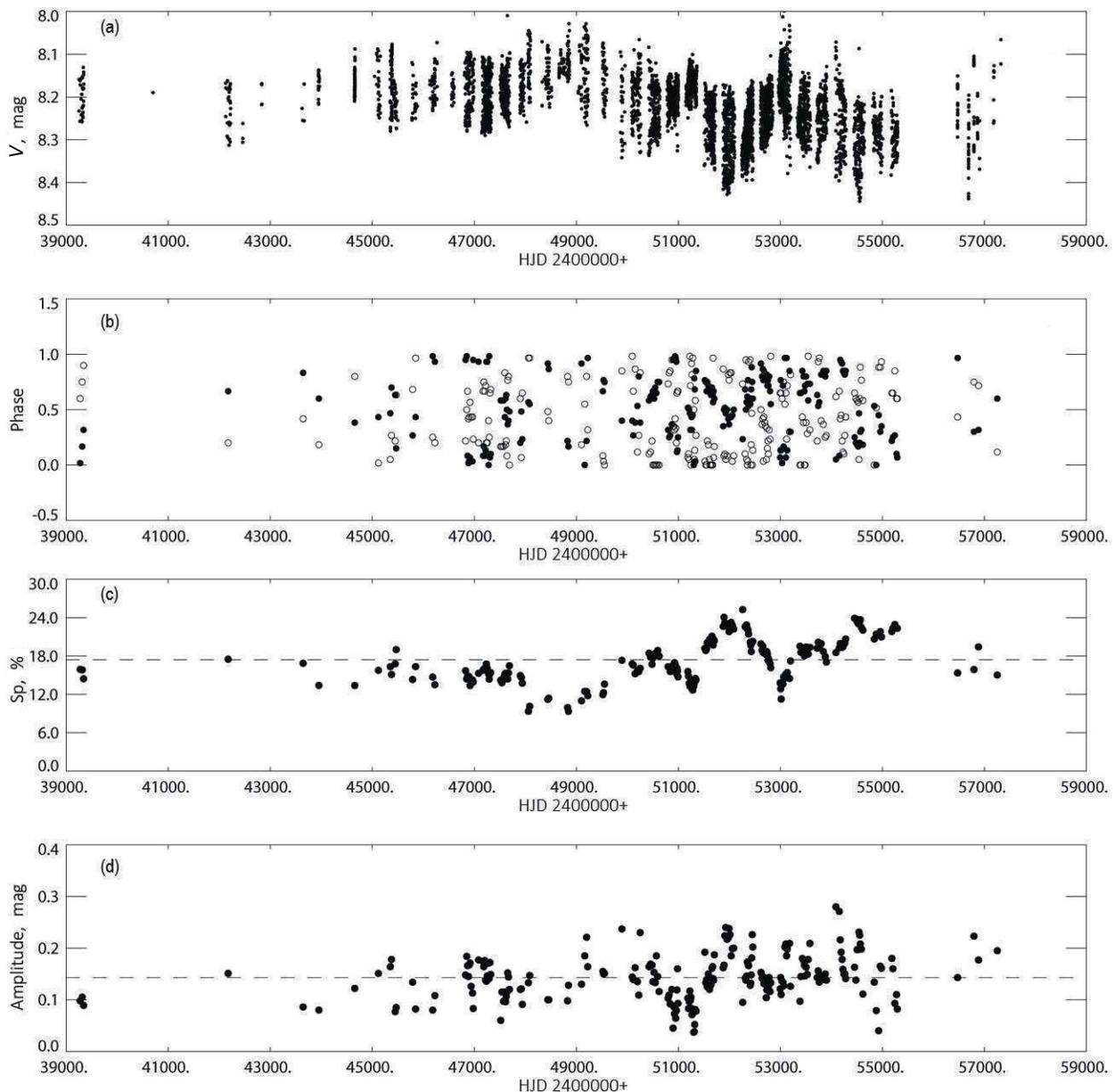


Рис. 1. Кривая блеска FK Com в фильтре V (a). Фазы активных долгот: заполненные кружки — более активная область, незаполненные — менее активная (b). Изменения запятненности поверхности FK Com (c). Изменения амплитуды колебаний блеска (d).

4000 К соответственно. В наших вычислениях мы использовали оценку максимального блеска звезды $V = 8^{\text{m}}04$, а также величину угла наклона оси вращения звезды $i = 60^\circ$ [5]. При моделировании поверхность звезды была разделена на элементарные площадки размером $6^\circ \times 6^\circ$. Факторы заполнения f были найдены для каждой площадки. Поскольку примеры восстановления температурных неоднородностей на поверхности активных звезд можно найти в наших предыдущих публикациях, в данном случае для FK Com в статье они не приводятся, но могут быть представлены авторами по запросу.

По построенным картам мы определили долготы, соответствующие максимальным значениям f . Распределение параметра f на картах содержит более достоверную информацию о положении поверхностных неоднородностей (в первую очередь долгот), чем просто определение фаз, соответствующих минимумам кривых блеска (см. также [5, 8]). 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 рис. 1b. Можно заключить, что их перемещение по поверхности звезды имеет достаточно сложный характер. Результаты измерений, выполненных по наблюдениям в 1966–1992 гг., согласуются с измерениями положений фаз минимумов из [6]. Для более поздних имеется хорошее, но не полное согласие с результатами исследований Корхонен и соавторов (например, [5]) и с еще более поздними работами [4] для интервала 1995–2010 гг., что является закономерным следствием в различиях методик определений. Мы находили положения пятен на температурных картах, а авторы [4] — фазы минимумов на фотометрических кривых.

Следует признать, что данные для четырех последних сетов (214–217) 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 большой осторожностью, они носят большей частью иллюстративный характер, однако не противоречат общему ходу миграции активной области по поверхности звезды. Новые наблюдения становятся существенными при исследовании долговременной переменности блеска и циклов активности FK Com (см. ниже).

Доля поверхности звезды FK Com, покрытая пятнами, в среднем составляет $S_p \approx 17\%$, она меняется в пределах от 9% до 25% (рис. 1c). Периодичность изменения S_p будет обсуждаться в следующем разделе. Во время наблюдений около HJD 2448400 величина S_p уменьшалась до минимального значения в 9/5, а максимальное значение в 25/5 было достигнуто около HJD 2452200 и HJD 2454600 при минимальном блеске звезды. Подобное поведение параметра S_p было отмечено нами ранее при анализе звезды V 410 Tau [10]. Как и в случае V 410 Tau, минимальное значение величины S_p достигается тогда, когда амплитуда переменности блеска звезды имеет свое максимальное значение (рис. 1d). В целом кривая изменения S_p в первом приближении является как бы зеркальным отражением кривой изменения амплитуды колебаний блеска звезды.

Подчеркнем, что проблема оценки температуры пятен и изучение эволюции этой величины со временем выходит за рамки нашего настоящего исследования. Наиболее достоверно температура пятен была оценена в [5, 11] при доплеровском картировании поверхности звезды. Как и в этих

исследованиях, мы принимали значение температуры фотосферы звезды при отсутствии пятен равной 5000 К. Если пренебречь изменениями со временем, то средняя температура пятен, согласно рис. 14 (нижняя панель) из [11], должна примерно соответствовать 4000 К (диапазон изменений контраста пятен составляет 600–1200 К). Отметим, что вариации температуры пятен не влияют на основные выводы нашего исследования (см. ниже), в частности, ни на наши результаты определений положений активных областей на поверхности FK Com, ни на заключение о существовании двух систем активных областей и их эволюции, а влияют лишь на оценки величин доли поверхности звезды, покрытой пятнами.

Таблица, содержащая данные о положениях активных областей и запятненности звезды для каждого из 218 сетов, как и иллюстративный материал о картах поверхностных температурных неоднородностей, может быть представлена авторами по запросу. Переменность кривой блеска звезды, представленная на рис. 1a, обладает ярко выраженной модуляцией на различных промежутках времени — от 2 дней (период вращения) до сотен суток — нескольких лет (см. ниже).

4. ЦИКЛЫ АКТИВНОСТИ

Изучение долговременной переменности звезды FK Com и установление циклов ее активности являлись предметом многочисленных исследований (см. [4, 5, 12]). Отметим, что различающиеся по временным интервалам данные для разных параметров не позволяют получить однозначные оценки продолжительности того или иного цикла. Например, по данным [12] для изменений положений активных областей были установлены квазипериодические циклы в 5.8 ± 0.4 года и 5.2 ± 0.4 года. Периодограммный анализ изменений площади пятен на поверхности FK Com указал на величину 6.35 ± 0.41 года. Авторы [13] установили, что для интервала наблюдений 1990–2005 гг. в фотометрическом поведении звезды доминировал цикл с продолжительностью около 5.8 года. Согласно [14], продолжительность цикла фотометрической активности составляет 4.5–6.1 года.

Мы провели независимое установление свойств переменности звезды и вычислили амплитудные спектры для ряда параметров, характеризующих переменность звезды. Результаты вычислений представлены на рис. 2. Нами были рассмотрены временные ряды для блеска звезды в фильтрах U , B и V , амплитуды переменности блеска, суммарной площади пятен на поверхности звезды (запятненности) S_p и среднего значения блеска для каждого рассматриваемого нами сета. Графики всех спектров мощности имеют широкие пики для

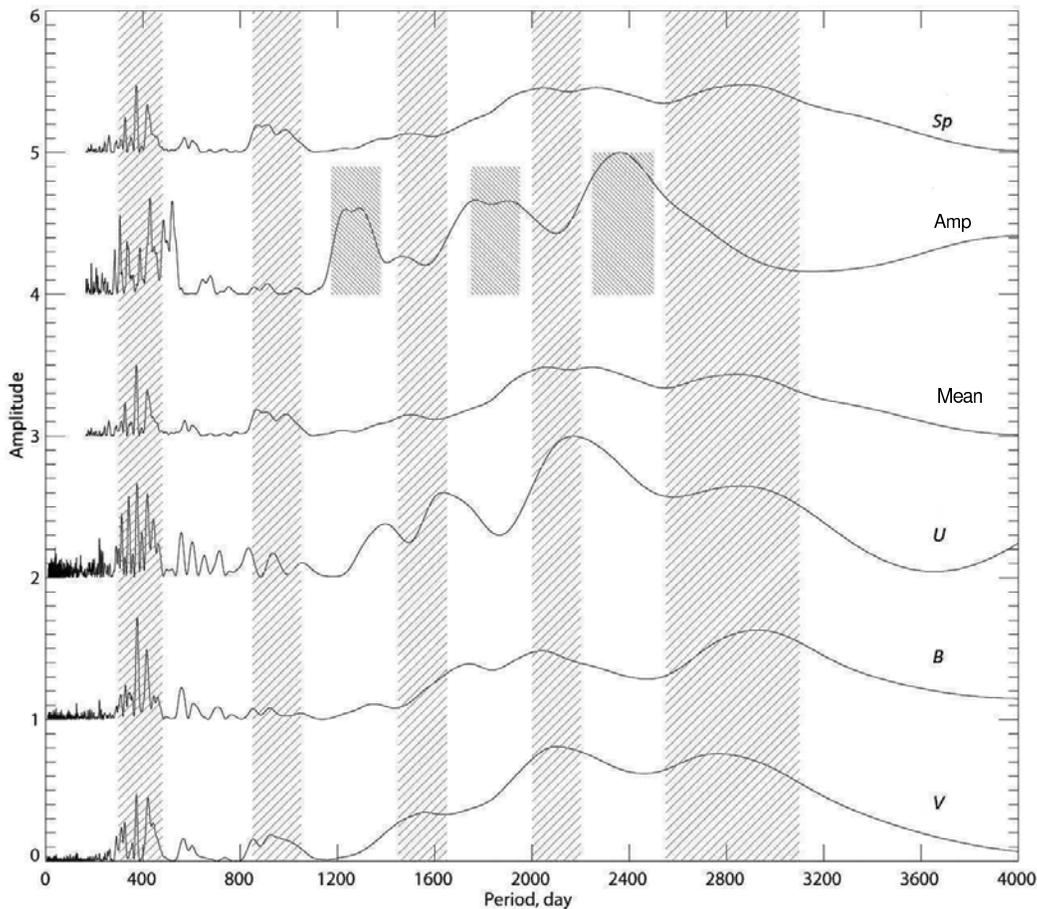


Рис. 2. Амплитудные спектры мощности для данных о переменности запятненности (Sp), амплитуды переменности блеска в фильтре V (Amp), средних значений блеска (Mean), фотометрической переменности FK Com в фильтрах U , B и V . Заштрихованными областями выделены диапазоны возможных периодов переменности.

нескольких наборов характерных времен переменности. Переменность с характерными временами около 400, 900, 1600, 2100 и 2800 суток прослеживается для данных о запятненности звезды, но отсутствует в изменениях амплитуды переменности блеска. На наш взгляд, наиболее достоверными являются результаты, полученные из рассмотрения спектров мощности для фильтра V (он построен по 7044 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 соответственно). Отметим, что период в 5.4 года ранее был установлен в [6] 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 блеска и Sp в случае периода в 470 суток (1.29 года).

5. ПОЛОЖЕНИЯ АКТИВНЫХ ДОЛГОТ И ФЛИП-ФЛОПЫ

Как и в наших предыдущих исследованиях, мы выполнили анализ распределения факторов заполнения f в зависимости от времени и от долготы на поверхности звезды (см. рис. 1b, на котором представлены положения двух активных областей на поверхности звезды). На рисунке хорошо прослеживается только положение основной активной долготы, при этом на первый взгляд отсутствуют указания на ярко выраженную переменность положений более активной и менее активной долгот (флип-флопов). В целом наши измерения согласуются с результатами, полученными в [4] и [5] (рис. 8 и рис. 5 в этих источниках соответственно). Однако, вследствие того, что нами выбиралось отличное от [5] разбиение наблюдений по сетам (мы старались делать их меньшей продолжительности), стало возможным более подробно проследить эволюцию положений активных долгот. На рис. 3 представлены данные, характеризующие только положения наиболее активной обла-

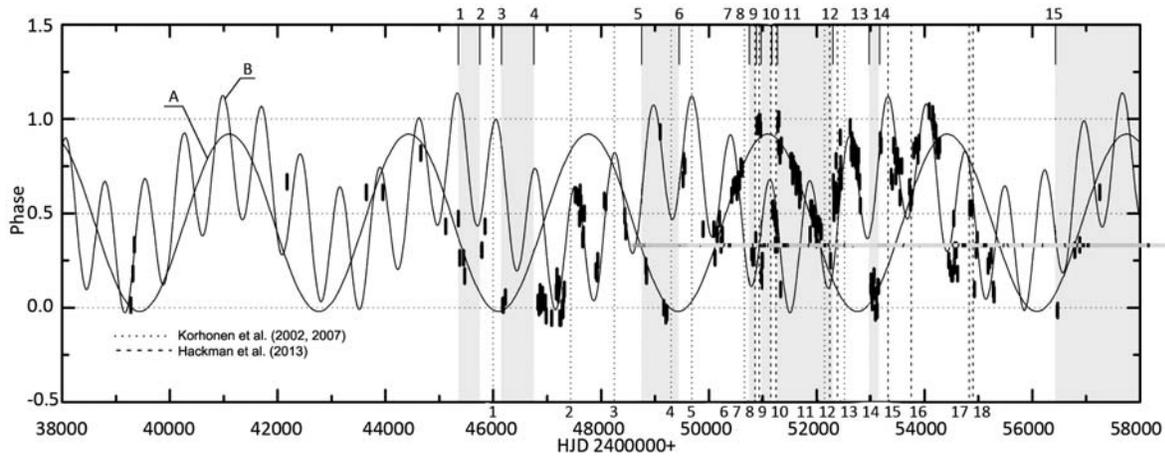


Рис. 3. Положения двух систем активных областей на поверхности FK Com (кривые A и B). Вертикальными линиями представлены имеющиеся в литературе данные о моментах флип-флопов (по результатам [5] (пунктирные линии) и [4] (штриховые линии)) с присвоенными номерами от 1 до 18 (нижняя ось графика) и от 1 до 15 по нашим данным (верхняя ось графика и затемненные области) (см. подробности в тексте).

сти (длина вертикальной линии примерно соответствует точности определения положения пятна). Анализ наших результатов приводит, во-первых, к принципиально новому заключению о существовании двух систем активных областей на поверхности FK Com (мы обозначили их A и B). Во-вторых, мы установили, что положения каждой из этих систем претерпевают циклические изменения. Характерное время изменения положения первой из систем (A) составляет порядка 3330 суток (9.12 года). Изменения положений второй активной области (B) 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 [15] по 156 дневным наблюдениям со спутником CoRoT мы установили, что на поверхности карлика HD 181906 спектрального класса F существуют две системы активных областей, разделяющихся по долготе на 180° внутри систем и на 100° между системами. 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. Наше исследование не является единственным, в ходе которого были установлены долговременные циклические изменения положений активных областей: например, при исследовании активной звезды типа RS CVn HR 1099 авторы [16] пришли к выводу о существовании на поверхности этой звезды долгоживущих активных областей, мигрирующих по поверхности с характерным временем в 16 ± 3 года. Другие циклы активности для HR 1099, согласно [16], составляют

15 лет (фотометрическая переменность в фильтре V) и 5.3 ± 0.1 года (амплитуда переменности).

Отметим, что представленные выше выводы касаются циклическости изменений положений систем активных областей на поверхности FK Com, а не характерного времени между переключениями активности долгот. Явление переключения активности долгот принято называть флип-флопом (см. [6]). Исследования [4] не привели к заключению о регулярности явления флип-флопа у FK Com. Согласно [12], две активные области с долготами около 90° и 270° 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-флопа. На рис. 3 вертикальными линиями представлены имеющиеся в литературе данные о моментах флип-флопов. В совокупности по результатам [5] (пунктирные линии) и [4] (штриховые линии) мы отметили 18 таких явлений и присвоили им номера от 1 до 18. Согласно нашему подходу, переключением положений активных долгот нужно считать только те случаи, когда происходит переключение между системами активных областей, а не просто изменение положения активной области на 0.5 по фазе. Следует принять во внимание то, что иногда нет возможности однозначно определить, к какой из систем относится измеряемое положение. Несмотря на данное затруднение, в ряде случаев возможна однозначная интерпретация. Например, мы предполагаем, что, событие под номером 2, несмотря на видимый сдвиг в положении на 0.5 по фазе, не следует относить к флип-флопу. Группы точек до линии 2 и после

Таблица 1. Моменты переключения между системами активных областей (флип-флопы)

| No. | 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 |

нее принадлежат холодным пятнам одной и той же активной области (кривая B). В итоге нами выделено 15 событий, рассматриваемых как переключение между системами активных областей (таблица 1). Частично, в случае семи событий, они совпадают с данными, представленными в [4] и [5], а в восьми случаях — нет. Подобно тому, как было сделано нами в [15], мы применили периодограммный анализ к суммарным данным о положениях активных областей A , B и моментах флип-флопов (рис. 4). Для исследования характерных времен переключения активных долгот (флип-флопов) (см. [17]) мы построили искусственный временной ряд, состоящий только из 0 и 1, в котором 0 соответствует моментам, когда более активная долгота лежит на кривой A , а 1 — на кривой B . 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 флип-флопов по нашим определениям равны 1.1, 1.3, 4.2 и 27 лет.

Можно согласиться с выводом из [4] о вероятности отсутствия ярко выраженной регулярности флип-флопов у FK Com (по имеющемуся в нашем распоряжении набору данных). Препятствиями к обнаружению их цикличности, несомненно, являются большая скажность наблюдений и высокая вероятность того, что эволюция пятен может происходить на короткой шкале времен. Согласно [4], иногда кривые блеска претерпевают значительные изменения примерно за 10 дней.

Наконец, отметим, что заключение о существовании двух систем активных областей на поверхности FK Com и их эволюции естественным образом снимает вопрос (см. в [4]) о том, что различия в положениях активных областей на поверхности звезды в момент переключения могут составлять по фазе не только 0.5, но и 0.25 и др.

Таблица 2. Среднее продольное магнитное поле

| HJD 2400000+ | Фаза | $\langle B_z \rangle$, Гс |
|--------------|--------|----------------------------|
| 56793.2556 | 0.7327 | 5 ± 52 |
| 56793.3133 | 0.7567 | 50 ± 51 |
| 56793.3910 | 0.7891 | -47 ± 52 |
| 56793.4709 | 0.8224 | 18 ± 68 |
| 56794.2612 | 0.1517 | 5 ± 52 |
| 56794.3231 | 0.1774 | 98 ± 53 |
| 56794.3814 | 0.2017 | -12 ± 55 |
| 56794.4904 | 0.2471 | 77 ± 57 |
| 56795.3336 | 0.5984 | 65 ± 45 |
| 56795.3961 | 0.6245 | 24 ± 45 |
| 56795.4440 | 0.6444 | -32 ± 45 |
| 56795.5044 | 0.6696 | -10 ± 49 |
| 57168.4222 | 0.0361 | 23 ± 52 |
| 57171.3477 | 0.2549 | 74 ± 40 |

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Мы дополнили наше исследование фотометрической переменности FK Com результатами нашего анализа новых поляриметрических наблюдений в 2014–2015 г. Как и ранее (см. [18]), наблюдательный материал для определения величины продольного магнитного поля звезды был получен на Основном звездном спектрографе 6-м телескопа САО. Моменты наблюдений приводятся в таблице 2. Фаза наблюдений была установлена по эфемеридам из [19]. Был использован анализатор круговой поляризации в сочетании с поворотной пластинкой $\lambda/4$ [20]. Для контроля измерений регистрировались спектры стандарта магнитного поля, а также звезды с нулевым общим магнитным полем.

Описание методики обработки и анализа приводились нами ранее в [18, 21, 22]. Здесь мы лишь кратко остановимся на них. Спектральное разрешение составляло $R = 15\,000$. При наблюдениях применялась ПЗС-матрица размером 2048×4096 элементов. Полученный материал охватывал спектральный диапазон 4386–4945 Å. Обработка данных проводилась стандартным методом в системе MIDAS с пакетом программ ZEEMAN [23]. Первичная обработка включала в себя построение и последующее вычитание из всех рабочих снимков усредненного кадра подложки (bias), калибровку по длинам волн с использованием спектра

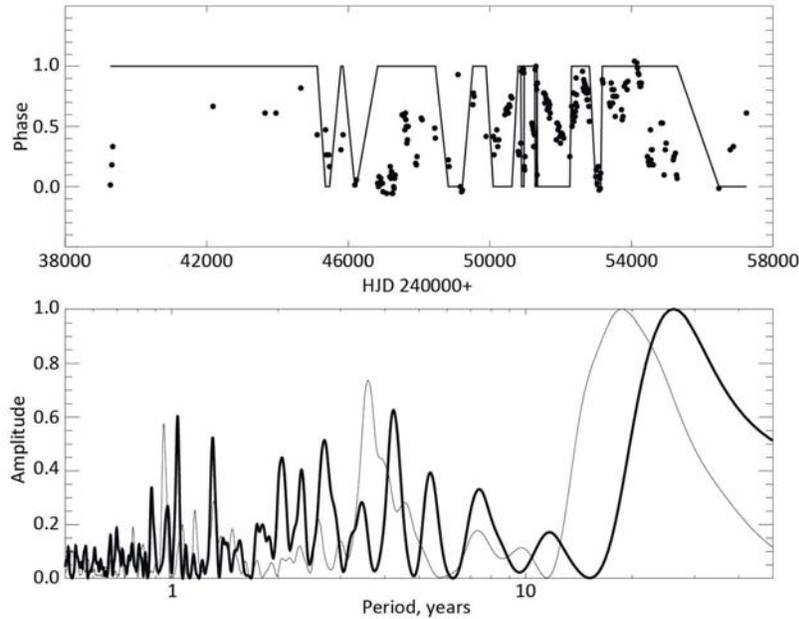


Рис. 4. Верхняя диаграмма: данные о положениях активной области А (точки) и моментах флип-флопов (сплошная линия). Нижняя: амплитудные спектры изменений положений активной области А (тонкая линия) и переменности флип-флопов (толстая линия) (см. подробности в тексте).

Th-Ag-лампы, экстракцию одномерного спектра и его нормировку на континуум.

Для определения величины продольной компоненты магнитного поля $\langle B_z \rangle$ для FK Com была выбрана методика, предложенная в [24] и подробно обсужденная в [25]. Ранее аналогичная методика уже применялась нами [18, 21, 22], в том числе для FK Com и для анализа поляризационных наблюдений субкарлика Val 09. Таким же образом были выполнены оценки $\langle B_z \rangle$ для стандартов магнитного поля (α^2 CVn и γ Equ) и звезд с нулевым общим магнитным полем.

Величина продольной компоненты магнитного поля $\langle B_z \rangle$ определяется по отношению параметров Стокса V/I [25] из уравнения

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

где g_{eff} — эффективный фактор Ланде, λ — длина волны в А, $\langle B_z \rangle$ — величина продольной компоненты магнитного поля.

Мы используем $g_{\text{eff}}=1.2$, так как, согласно аргументам из [21, 22], такое значение служит хорошим приближением для спектров Ар-звезд (стандарты магнитного поля α^2 CVn и γ Equ). Как и в [18], определение $\langle B_z \rangle$ для FK Com в рамках нашего исследования было выполнено методом регрессионного анализа. Он позволяет получить одновременно оценки ошибок параметров регрессии и, следовательно, погрешность $\langle B_z \rangle$ (таблица 2).

Среднее значение $\langle B_z \rangle$ для FK Com по нашим измерениям [18] составляет -23 Гс, а по данным [19] — 189 Гс. По измерениям 2014 г. среднее значение $\langle B_z \rangle$ для FK Com составило 20 Гс, а два измерения, выполненные в 2015 г., привели к оценке $\langle B_z \rangle$ в 48 Гс. Очевидно, что при точности единичного определения $\langle B_z \rangle$ порядка 50 Гс (эта величина примерно в три раза больше, чем в [19]) и невысоком числе новых оценок $\langle B_z \rangle$ (двенадцать в 2014 г. и лишь две в 2015 г.) нет возможности рассматривать изменения $\langle B_z \rangle$ в зависимости от фазы вращения звезды, как это было выполнено для наблюдений 2012 г. (см. рис. 5). На рис. 5 представлены результаты наших определений средних величин $\langle B_z \rangle$, а также для сравнения данные из [19]. Помимо средних величин $\langle B_z \rangle$ мы приводим на рис. 5 максимальные и минимальные значения измерений продольной компоненты магнитного поля. 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 [19]. Данные, представленные для FK Com на рис. 5, указывают на уменьшение $\langle B_z \rangle$, которое может быть аналогичным зарегистрированному для II Peg вековому изменению $\langle B_z \rangle$ (см. рис. 3 в [26]). Для II Peg авторы [26] пришли к заключению о систематическом уменьшении амплитуды переменности $\langle B_z \rangle$ в течение промежутка времени с 2004 до 2010 гг. Более того, авторы [26] (из анализа спектрополяриметрических наблюдений и построения температурных и магнитных карт поверхности II Peg) делают вывод

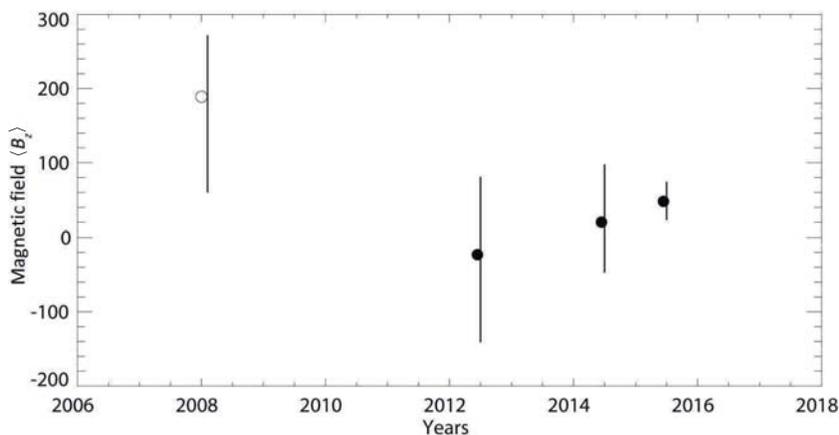


Рис. 5. Изменения средних величин $\langle B_z \rangle$ в 2008–2015 гг. (для сравнения данные из [17] представлены незаполненным кружком). Помимо средних величин $\langle B_z \rangle$ приведены максимальные и минимальные значения измерений продольной компоненты магнитного поля.

о том, что распределение магнитного поля на поверхности звезды II Peg претерпело изменения за промежуток времени меньше восьми месяцев, что также сопоставимо с найденными нами характерными временами изменений $\langle B_z \rangle$ у FK Com.

Таким образом, наши новые измерения свидетельствуют о правомерности нашей интерпретации [18] поведения параметра $\langle B_z \rangle$, указывающего на установление более симметричного распределения магнитных областей на поверхности FK Com. Независимое подтверждение нашего вывода можно найти у авторов исследования [11], которые делают заключение о том, что в 2009–2010 гг. FK Com находилась в необычно спокойном состоянии с очень низким уровнем хромосферной активности и низким пятненным контрастом. Зарегистрированное нами увеличение активности звезды по фотометрическим наблюдениям в последние годы также согласуется с вероятным началом возрастания величины параметра $\langle B_z \rangle$ после 2014 г.

Предполагается обсудить в отдельной статье проблему связи изменений блеска звезды, обусловленных пятенной активностью и проявляющихся в фотометрических наблюдениях, изменения профилей спектральных линий, а также проявления вклада в излучение звезды факельных полей и флоккулов. Также предполагается продолжить изучение связи фотосферной и хромосферной активности FK Com.

7. ВЫВОДЫ

Получен новый наблюдательный материал для исследования фотометрической переменности FK Com в 2013–2015 г. На его основе и данных из литературных источников по единой методике мы провели анализ полного набора имеющихся фотометрических данных. Данные наблюдений были

разбиты на 218 индивидуальных кривых блеска, для каждой из которых мы решили обратную задачу восстановления крупномасштабных температурных неоднородностей на поверхности звезды по ее кривой блеска. По построенным поверхностным картам мы определили 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) S_p и среднего значения блеска каждого рассматриваемого нами сета. 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 ее поверхности. 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 пятнадцать событий, рассматриваемых нами как переключение между системами активных областей: частично (семь событий) они совпадают с данными, представленными в [4] и [5], а в восьми случаях совпадения нет.

Установлена величина 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%.

Подтверждается вывод из [4] о вероятном отсутствии ярко выраженной регулярности флип-флопов у FK Com. Препятствиями к обнаружению циклической являющейся большей скважностью наблюдений

и высокая вероятность того, что эволюция пятен может происходить на короткой шкале времен.

Представлены результаты новых спектрополяриметрических наблюдений FK Com в 2014–2015 гг. Наблюдательный материал для определения величины продольного магнитного поля $\langle B_z \rangle$ звезды был получен на Основном звездном спектрографе 6-м телескопа САО. Наши новые измерения свидетельствуют о правомерности нашей интерпретации поведения параметра $\langle B_z \rangle$, указывающего на установление более симметричного распределения магнитных областей на поверхности FK Com. Зарегистрированное нами увеличение активности звезды по фотометрическим наблюдениям последних лет также согласуется с вероятным началом возрастания величины параметра $\langle B_z \rangle$ после 2014 г.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны команде космического телескопа Кеплер и команде архива МАСТ за возможность использования наблюдательных данных. Настоящая работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Происхождение и эволюция звезд и галактик,» Программы государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-4354.2008.2). Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения проекта по федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (идентификатор RFMEFI6114X0288). ИС, ИР и ИЯ благодарят Российский фонд фундаментальных исследований за финансовую поддержку работы (проект №15-02-00406). Наблюдения на 6-метровом телескопе САО РАН проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.619.21.0004, идентификатор проекта RFMEFI61914X0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. W. Vopp and R. E. Stencel, *Astrophys. J.* **247**, L131 (1981).

2. V. B. Puzin, I. S. Savanov, and E. S. Dmitrienko, *Astronomy Reports* **58**, 471 (2014).

3. A. V. Tutukov and A. V. Fedorova, *Astronomy Reports* **54**, 156 (2010).

4. T. Hackman, J. Pelt, M. J. Mantere, et al., *Astron. and Astrophys.* **553**, A40 (2013).

5. H. Korhonen, S. V. Berdyugina, T. Hackman, et al., *Astron. and Astrophys.* **476**, 881 (2007).

6. L. Jetsu, J. Pelt, and I. Tuominen, *Astron. and Astrophys.* **278**, 449 (1993).

7. P. A. Heckert, *J. Astron. Data* **18**, No. 5 (2012).

8. I. S. Savanov and K. G. Strassmeier, *Astronomische Nachrichten* **329**, 364 (2008).

9. I. S. Savanov and K. G. Strassmeier, *Astron. and Astrophys.* **444**, 931 (2005).

10. I. S. Savanov, *Astronomy Reports* **56**, 722 (2012).

11. K. Vida, H. Korhonen, I. Ilyin, et al., *Astron. and Astrophys.* **580**, 64 (2015).

12. K. Olah, H. Korhonen, Zs. Kovari, et al., *Astron. and Astrophys.* **452**, 303 (2006).

13. K. Panov and D. Dimitrov, *Astron. and Astrophys.* **467**, 229 (2007).

14. K. Olah, Z. Kollath, T. Granzer, et al., *Astron. and Astrophys.* **501**, 703 (2009).

15. I. S. Savanov, *Astronomy Reports* **54**, 1125 (2010).

16. S. V. Berdyugina and G. W. Henry, *Astrophys. J.* **659**, 157 (2007).

17. I. S. Savanov, *Astronomy Reports* **53**, 941 (2009).

18. V. B. Puzin, I. S. Savanov, I. I. Romanyuk, et al., *Astrophysical Bulletin* **69**, 321 (2014).

19. H. Korhonen, S. Hubrig, S. V. Berdyugina, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **395**, 282 (2009).

20. G. A. Chountonov, in *Proc. Intern. Meeting on Magnetic Stars, Nizhnij Arkhyz, Russia, 2004*, Ed. by Yu. Glagolevskij and I. Romanyuk (Nizhnij Arkhyz, 2004), p. 286.

21. I. S. Savanov, I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, and E. S. Dmitrienko, *Astronomy Reports* **55**, 1115 (2011).

22. I. S. Savanov, I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, and E. S. Dmitrienko, *Astronomy Reports* **57**, 757 (2013).

23. D. O. Kudryavtsev, *Baltic Astronomy* **9**, 649 (2000).

24. J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **258**, 639 (1982).

25. S. Bagnulo, T. Szeifert, G. A. Wade, et al., *Astron. and Astrophys.* **389**, 191 (2002).

26. O. Kochukhov, M. J. Mantere, T. Hackman, and I. Ilyin, *Astron. and Astrophys.* **550**, 84 (2013).

Spots and Activity Cycles of the Star FK Com—2013–2015 Data Analysis

V. B. Puzin, I. S. Savanov, E. S. Dmitrienko, I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, I. A. Yakunin, and
A. Yu. Burdanov

We present an analysis of new photometric and spectropolarimetric observations of a chromospherically active star FK Com. Based on this observational data and the data from the literature sources, applying a common technique, we performed an analysis of a complete set of the available photometric data, which were divided into 218 individual light curves. For each of them a reverse problem of restoring large-scale temperature irregularities on the surface of the star from its light curve was solved. We analyzed the time series for the brightness of the star in the U -, B -, and V -bands, the brightness variability amplitudes, the total area of the spots on the surface of the star, and the average brightness of each set considered. The analysis of determination results of the positions of active longitudes leads to the conclusion about the existence of two systems of active regions on the FK Com surface. It was determined that the positions of each of these systems undergo cyclic changes. This confirms the conclusion on the likely absence of a strongly pronounced regularity of the flip-flops in FK Com, earlier suggested by other researchers. The results of the new polarimetric observations FK Com in 2014–2015 are presented. These measurements evidence the legitimacy of the proposed interpretation the behavior of the longitudinal magnetic field strength $\langle B_z \rangle$, indicating the settling-in of a more symmetric distribution of magnetic region on the FK Com surface. An increasing activity of the star over the recent years, registered from the photometric observations is also consistent with the probable onset of growth in the $\langle B_z \rangle$ parameter starting from 2014.

Keywords: *starspots—stars: magnetic field—stars: individual: FK Com*