

РЕГУЛЯРНЫЕ И КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЯРКИХ ТОЧЕК КОРОНЫ

Т.ЦИНАМДЗГВРИШВИЛИ¹, Б.ШЕРГЕЛАШВИЛИ^{1,2,3},
Б.ЧАРГЕИШВИЛИ¹, И.МГЕБРИШВИЛИ¹, Т.МДЗИНАРИШВИЛИ¹,
Д.ДЖАПАРИДЗЕ¹

Поступила 26 октября 2019

Принята к печати 24 июня 2020

Долгосрочное автоматическое отслеживание ярких точек короны дало возможность изучить их собственные движения, используя данные SDO/AIA канала AIA 193 Å. Для обработки выбраны серии Fits файлов для 95 визуально долгоживущих ярких точек, которые равномерно распределены по широте. Специально разработанное программное обеспечение автоматически фиксирует гелиографические координаты центроида выбранной корональной яркой точки в серии Fits файлов. Получено, что в собственных движениях все изучаемые корональные яркие точки четко показывают колебательный характер. Периоды колебаний имеют диапазон от 5 до 60 ч со средним значением 20 ч. Выявлены некоторые тенденции широтной зависимости колебательных характеристик. Высказано возможное объяснение этих колебаний с помощью распространения спиральных волн вдоль магнитных петель, составляющих конструкцию ярких точек. С помощью линейных трендов широтных и долготных компонентов движения корональных точек получены скорости вращения и меридианной миграции корональных ярких точек. Анализ скоростей вращения подтверждает дифференциальный характер широтной зависимости. Обсуждается проблема определения направления и величины меридианной миграции.

Ключевые слова: *яркие корональные точки; собственные движения; колебания*

1. Введение. Корональные яркие точки (КЯТ) - это небольшие активные области, связанные с небольшими магнитными образованиями в солнечной короне. Они являются яркими динамическими образованиями, видимыми на спокойном Солнце и корональных отверстиях и состоят из петель, локально связанных с фотосферными биполярными магнитными полями [1,2]. КЯТ обычно живут от нескольких часов до нескольких дней и имеют размер менее 50". Около половины всех КЯТ имеют продолжительность жизни менее 20 мин, а средняя продолжительность жизни другой половины - 6 ч. Менее 5% КЯТ имеют продолжительность жизни более 20 ч [3,4].

Благодаря многочисленности и почти равномерному распределению, КЯТ являются удобным инструментом для изучения дифференциального вращения Солнца и меридиональных потоков на Солнце. Наиболее часто используемыми и самыми старыми трассерами для исследования дифференциального вращения Солнца являются солнечные пятна [5-8]. Обладая многими преимуществами,

использование солнечных пятен в качестве трассеров ограничено, поскольку их широтное распределение сильно неравномерно и не распространяется на более высокие солнечные широты. Количество солнечных пятен также сильно варьируется в течение солнечного цикла, что делает практически невозможным измерение профиля дифференциального вращения Солнца во время солнечного минимума [9].

КЯТ сравнительно одинаково распределены по широте и многочисленны в течение всех фаз солнечного цикла. Они также распространяются на все солнечные широты. КЯТ использовались в качестве трассеров солнечного вращения с начала космической эры [10]. В последние годы было проведено множество исследований, изучающих дифференциальное вращение Солнца с использованием КЯТ в качестве трассеров [11]. Изучение собственных горизонтальных движений КЯТ показывает, что около 90 % местоположений КЯТ соответствуют полосе границ супергрануляционных клеток [12]. Исследование азимутальных скоростей КЯТ показывает, что их скорости вращения имеют дифференциальный характер [9,11,13-16].

Что касается меридиональной миграции КЯТ, то результаты противоречивы. Отслеживание КЯТ на изображениях SOHO EIT показывает, что на низких ($B < 10^\circ$) и высоких ($B > 40^\circ$) широтах доминируют экваториальные потоки, тогда как на средних широтах ($B \sim 10^\circ \div 40^\circ$) - потоки к полюсам [17]. С другой стороны, исследование КЯТ с использованием изображений короны SDO/AIA показало, что меридиональная скорость почти всегда направлена к полюсам для всех широт [6,9,18,19].

В настоящей работе, используя большой набор данных SDO, изучены собственные движения КЯТ в течение всей видимой продолжительности их жизни. В разделе 2 описаны данные, используемые для исследования, и методы их анализа, а в разделе 3 представлены результаты изучения остаточных скоростей КЯТ после детрендизации. Раздел 4 посвящен резюме и выводам.

2. Наблюдения и методы обработки данных. Мы использовали данные SDO/AIA канала AIA $193 \text{ \AA}$, так как яркие точки и их морфология наиболее четко проявляются в этом канале. Были использованы данные 1.5 уровня, которые содержат удаление пиков, выравнивание по плоскости, коррекцию масштаба и удаление плохих пикселей. Данные калиброваны и анализированы с использованием стандартных процедур в пакете SolarSoft (SSW).

Выбранные данные принадлежат различным периодам 2012, 2015 и 2016 гг. Из наблюдаемых ярких точек выбраны 95 КЯТ с самыми длинными временами продолжительности жизни. Выбранные КЯТ, насколько это возможно, равномерно распределены по широте. Это дает возможность выявить, есть ли закономерность для всего диска и есть ли широтная зависимость характеристик

движения. Мы использовали 10 мин промежуток времени для создания временных серий изображений для каждого КЯТ. Меньший промежуток времени приведет к более ступенчатым изменениям остатков скоростей.

Специально разработанный код в редакторе MATLAB с интерактивным графическим интерфейсом автоматически идентифицирует выбранный КЯТ в последовательных изображениях и определяет его границы, находит центр масс и приспособливает эллипс к ее форме. Код определяет гелиографические координаты центроида КЯТ в соответствии с датой наблюдения. Впоследствии получаем серию данных с гелиографическими координатами центроида КЯТ и пиксельные размеры большого и малого полуосей подогнанного к КЯТ эллипса. Сравнение вариаций этих размеров с временными вариациями движения КЯТ убеждает, что колебания, выявленные в движениях, являются действительно следствием перемещения КЯТ, а не отражением колебаний центроида из-за осцилляции интенсивности КЯТ, вызывающей неравномерные изменения размеров КЯТ.

3. *Результаты.* Основными факторами, определяющими характер движения КЯТ, являются солнечное вращение и широтная миграция. Именно эти движения определяют линейные тренды составляющих компонент траекторий

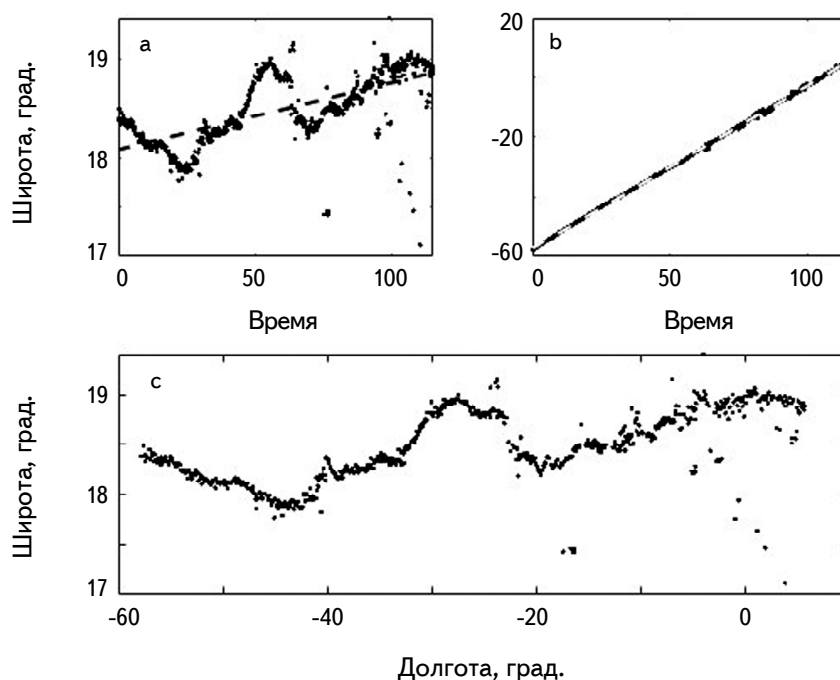


Рис.1. а) Временная вариация широты центроида КЯТ. Черная пунктирная прямая показывает линейный тренд. б) Временная вариация долготы центроида КЯТ. Белая пунктирная прямая показывает линейный тренд. в) Траектория КЯТ в гелиографических координатах.

движения КЯТ. Траектории всех изученных 95 КЯТ показывают колебательный характер движения даже без снятия линейного тренда в меридианном направлении, а некоторые из них имеют явно выраженные длинные периоды. Для наглядного примера на рис.1 приведен случай наиболее долгоживущей КЯТ (2012-02-23 UT18: 00: 07 L57.8: B18.4).

На рис.1а, b пунктирные линии показывают линейные тренды изменения соответствующих координат центроида КЯТ. Этими трендами как раз и определяются вращательная и меридианная скорости КЯТ. Как видно из рис.1b тренд с большой точностью совпадает с самой кривой и тем самым является хорошим и точным индикатором направления и величины скорости вращения КЯТ независимо от длины серий данных (подразумевается некоторая статистически разумная длина) и нахождения стартовой и конечной точек. То же самое нельзя сказать в случае определения меридианной скорости. Из рис.1а видно, что тренд кривой сильно зависит и от длины серий данных и от местоположения стартовой и конечной точек. Таким образом, из-за того, что движение КЯТ имеет выраженный колебательный характер в меридианном направлении, для определения направления и величины средней меридианной скорости применение нескольких измерений недостаточно. Нужно, чтобы серия была бы длиннее, чем возможный период изменения меридианной скорости КЯТ. В приведенном случае самой долгоживущей КЯТ (рис.1) это условие удовлетворяется, но далеко не во всех остальных случаях это так.

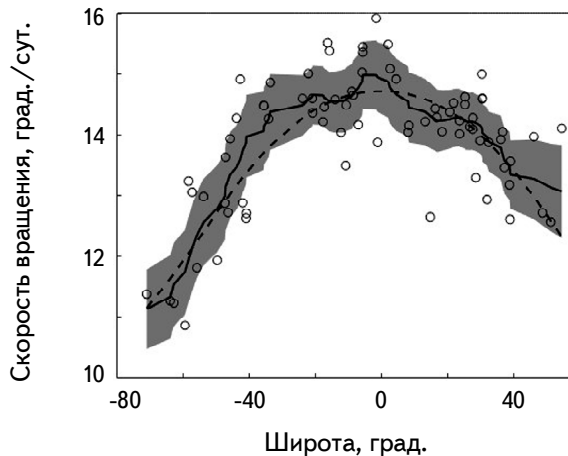


Рис.2. Широтное распределение вращательных скоростей КЯТ. Круги обозначают скорости отдельных КЯТ, жирная сплошная кривая является результатом локальной регрессии с использованием взвешенных линейных наименьших квадратов и полиномиальной модели 1-й степени (MATLAB "rlowess" method), сглаживание произведено с промежутком 0.8, серая теневая область обозначает среднеквадратичное отклонение, пунктирная линия показывает вращательные скорости фотосферных солнечных пятен [20].

В ходе исследований в дальнейшем пришлось исключить те КЯТ, которые показывали сильные признаки активности и резко меняли размеры и положения. Впоследствии для исследования остались 78 более или менее стабильных объектов.

Наши измерения дают явно выраженный дифференциальный характер вращательных скоростей КЯТ (рис.2), что хорошо согласуется с ранними результатами [9,11,13-16].

Близкое совпадение приведенной кривой для дифференциального вращения КЯТ с фотосферной кривой [20] подтверждает, что КЯТ возникают в слое, где супергрануляционные потоки управляют поведением магнитного поля, и это происходит вблизи уровня фотосферы.

Что касается определения меридианных скоростей, применение того же метода, что и для долготных скоростей, было бы некорректно. Сначала нужно изучить колебательные свойства движения в меридианном направлении всех КЯТ, определить возможные периоды и выбрать такие КЯТ, у которых тренды движения не сильно зависят от продолжительности наблюдения, т.е. с продолжительностью больше возможного периода двигательных колебаний. Для этого

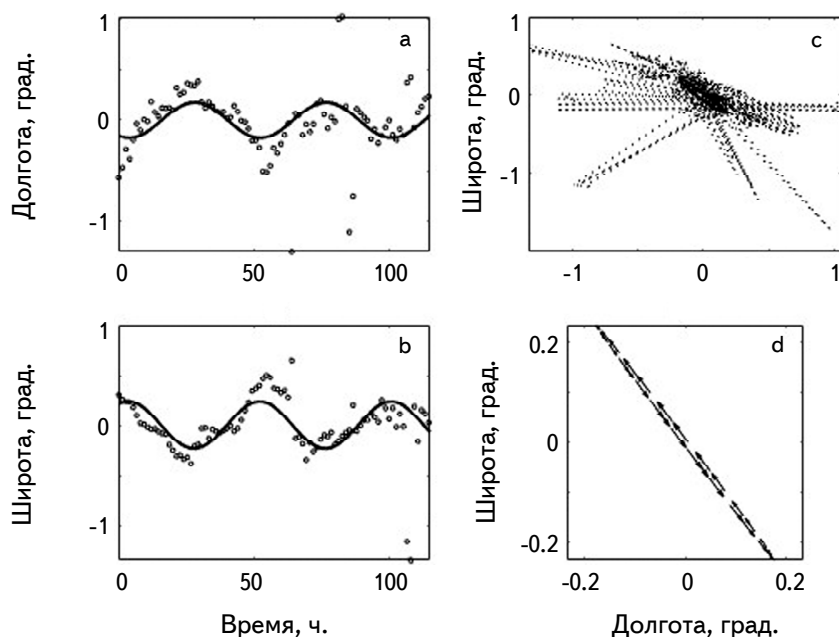


Рис.3. Гармонизация широтного и долготного скоростей на примере КЯТ (2012-02-23 UT18: 00: 07 L57.8: B18.4). а) Долготное колебание движения КЯТ. Данные восьмикратно сокращены для удобства визуализации. Круги обозначают долготные положения центраида КЯТ, а сплошная кривая является подгонкой синусной функции. б) То же самое, что в а), только для широтной компоненты. в) Реальная траектория КЯТ. д) Гармонизированная траектория КЯТ. Стрела показывает направление движения.

синусная функция была подогнана на детрендизированные данные изменения траекторий КЯТ. Результаты получаются несколько различными для широтного и долготного компонентов. Конечно же, КЯТ является сложной конструкцией переплетения двух или нескольких магнитных микропетель. А колебания, которые наблюдаются, являются наложением различных микроколебаний. Для определения некоторой картины мы производим идеализацию процесса и допускаем, что периоды колебаний обоих компонентов равны. Общим периодом выбран тот, который дает высокую адекватность модели для обоих компонентов. Результат гармонизации колебаний приведен на рис.3.

Для выявления возможной зависимости колебательных характеристик движения КЯТ от широты, кроме гармонизованного периода, мы вычислили угол наклона и так называемую циркуляцию колебательного эллипса. Знак циркуляции положительный при направлении колебаний по часовой стрелке и отрицательный - в противоположном направлении, а величина определяется соотношением малой и большой осей колебательного эллипса. Таким образом, при колебаниях на прямой циркуляция равна нулю, а при колебаниях по окружности она максимальна и равна единице. Что касается угла наклона, он равен углу между большой осью эллипса траектории и направлением юг-север, и считается положительным (от 0° до 90°) по часовой стрелке, отрицательным (от 0° до -90°) против часовой стрелки.

После получения всех возможных периодов оставшихся 78 КЯТ, можно определить возможную широтную зависимость распределения меридианных скоростей движения КЯТ. Как и ожидалось, в случае всех оставшихся 78 КЯТ, не удалось получить более-менее достоверную регулярность поведения

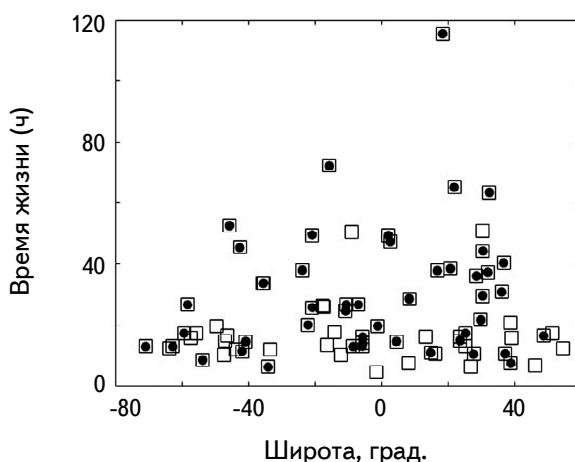


Рис.4. Временно-широтное распределение корональных ярких точек. Белыми квадратиками обозначены все 78 КЯТ. Черные кружки соответствуют тем КЯТ, которые имеют продолжительность жизни больше, чем соответствующие гармонизированные периоды.

широтного распределения меридианных скоростей (рис.5а). Только исключив из рассмотрения все КЯТ с продолжительностью жизни ниже соответствующих гармонизированных периодов (рис.4), удалось получить некоторую регулярность, что и показано на рис.5а.

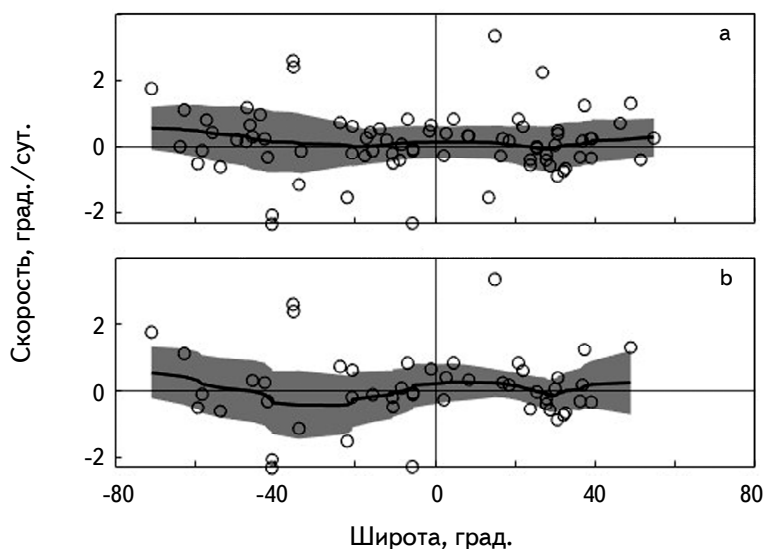


Рис.5. Широтная зависимость меридианных миграций КЯТ. а) Для всех КЯТ. Кругжки обозначают результаты наблюдений, сплошная жирная кривая результат сглаживания данных методом lowess и с интервалом 0.4, серая теневая область обозначает среднеквадратичное отклонение. б) То же самое как а), но для КЯТ, которые имеют продолжительность жизни больше, чем соответствующие гармонизированные периоды.

Изображение на рис.5б не позволяет с уверенностью судить о некоторых регулярностях меридианного движения КЯТ. В центре наблюдается некоторая симметричная картина, но центр симметрии примерно на 10° сдвинут к южной полусфере. В пределах $\pm 40^\circ$ широты миграция происходит от экватора к высоким широтам, а ближе к 40° в южном полушарии направление миграции меняется и КЯТ движутся от полюсов. В северном полушарии данных явно не хватает, чтобы судить о дальнейшей миграции КЯТ.

На рис.6 представлены результаты изучения широтной зависимости углов наклона и циркуляций гармонизированных колебаний КЯТ.

В общем, можно отметить, что результаты для колебательных характеристик не проявляют особую регулярность по отношению широтного распределения. Тем не менее, для углов наклона колебательных движений просматривается тенденция превалирования различных знаков наклона в различных полушариях. Доводы нужно подтвердить дальнейшими исследованиями более многочисленных объектов с длинными продолжительностями жизни.

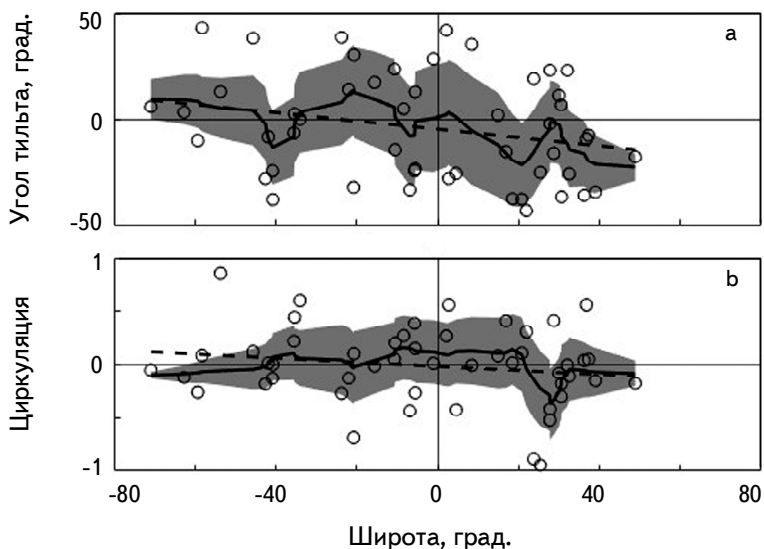


Рис.6. а) Широтное распределение угла наклона гармонизированных колебаний собственного движения КЯТ. Кружки обозначают наблюдательные данные, сплошная жирная кривая является результатом сглаживания данных методом *lowess* с промежутком 0.2, серая теневая область обозначает среднеквадратичное отклонение, пунктирная линия является линейным трендом данных. б) То же самое, что в а), только для циркуляции колебаний.

4. **Выводы.** Мы проанализировали данные наблюдений 95 корональных ярких точек, полученные SDO/AIA, которые почти равномерно распределены по широте. Код автоматического отслеживания измеряет координаты и геометрические характеристики всех выбранных КЯТ в течение всей продолжительности их жизни с интервалом в 10 мин. Тщательный анализ долготных профилей движения центроидов КЯТ заставил нас исключить из дальнейшего исследования те КЯТ, которые показывали повышение активности и резко меняли размеры и положения. Тем самым число изучаемых КЯТ уменьшилось до 78.

Изучение остатков после удаления регулярных компонентов движения показало, что собственные движения КЯТ имеют четко выраженный колебательный характер. Яркие корональные точки - это небольшие особенности, сравнимые с другими большими образованиями на Солнце, но они не являются реальными точками. Наблюдения с высоким разрешением ясно показывают, что КЯТ построены из одной или нескольких магнитных петель. Магнитные петли являются основными каналами, направляющими различные моды МГД-волн от нижних слоев к короне. Из-за сложной геометрии групп петель суперпозиция волн, направляемых петлями, дает очень сложные траектории, спроецированные на поверхность короны, как видно на рис.3с. Чтобы упростить извлечение полезной информации из

такого сложного движения, мы согласовали колебания продольной и широтной составляющих. Гармонизированные компоненты приводят к эллиптическим траекториям с различными направлениями вращения и геометрическими характеристиками. Их периоды колеблются в интервале от 5 до 60 ч со средним значением 20 ч. Сопоставление профилей собственного движения и изменения геометрических размеров КЯТ исключили происхождение этих периодов из осцилляционных процессов в яркости КЯТ. Характер траекторий указывает на то, что это должна быть проекция змеевидных или спиральных волн на корональный слой. В этом контексте, безусловно, уместно вспомнить недавнее исследование, в котором колебания мелкомасштабных магнитных элементов относятся к хромосферным спиральным волнам [21]. Возбудителем этих волн должна быть супергрануляционная сетка, которая и является держателем корней петель ярких точек и выявленные периоды как раз сравнимы с продолжительностями жизни супергрануляционных ячеек.

Изучение широтной зависимости колебательных характеристик собственных движений корональных ярких точек, вопреки ожиданиям, не дали убедительных указаний на какие-то регулярности. Это, наверное, вызвано недостатком количества изученных долгоживущих объектов. Тем не менее, в случае угла наклона колебаний (рис.6а) просматривается тенденция разных превалирующих знаков наклона в разных полушариях. Это может быть следствием влияния силы Кориолиса. Последующие исследования большего количества КЯТ дадут более убедительные результаты в этом направлении.

Изучение линейных трендов широтной составляющей движения КЯТ подтвердило дифференциальный характер их вращения, выявленный в ранних работах [9,11,13-16]. Близкое совпадение кривых данного исследования и фотосферной кривой [20] указывает на то, что корни петель, составляющих КЯТ, закреплены в хромосферную сетку вблизи от фотосферного уровня.

Явный колебательный характер меридианного движения КЯТ, который легко просматривается даже без снятия линейного тренда (рис.1а), является основным препятствием для определения как направления, так и величины меридианной миграционной скорости КЯТ. Любое применение извлечения линейного тренда для определения скорости меридианной миграции некорректно, потому что линейный тренд сильно зависит от длины данных и от состояния начальной и конечной точек. Нужно определить какой-то минимальный промежуток времени, который будет достаточен для более или менее достоверного результата. Мы посчитали этим промежуток периоды гармонизированных колебаний, что и уменьшило количество данных для определения широтных скоростей. В результате, из рис.5b можно предположить, что в центре наблюдается некоторая симметричная картина, но центр симметрии примерно на 10° сдвинут к южной полусфере. В пределах $\pm 40^\circ$ широты миграция происходит от

экватора к высоким широтам, а ближе к 40° в южном полушарии направление миграции меняется и КЯТ движутся от полюсов. В северном полушарии данных явно не хватает, чтобы судить о миграции КЯТ. Можно заключить, что оценка меридиональной скорости с помощью кратковременных наблюдений может привести к неправильной оценке ее значения и знака. Можно считать, что это является причиной того, что результаты меридиональных миграций КЯТ так противоречивы. Аналогичные результаты с различным широтным распределением меридиональной миграции были получены в более раннем исследовании [17]. Как мы уже упоминали выше, правильность результатов меридиональных миграций зависит от длительности отслеживания, и дальнейшее увеличение времени отслеживания и количества КЯТ на всех широтах должно повысить достоверность результатов исследования.

Работа была поддержана Национальным научным фондом им. Шота Руставели, грантом № PHDF-18-4028.

¹ Абастуманская астрофизическая обсерватория, государственный университет им. Илии, Тбилиси, Грузия, e-mail: tamar.tsinamdzhvrishvili.i@iliauni.edu.ge

² Институт космических исследований, Австрийская академия наук, Австрия

³ Комбинаторная оптимизация и поддержка принятия решений, кампус KU Leuven, Кортрейк, Бельгия

REGULAR AND OSCILLATORY MOTION OF CORONAL BRIGHT POINTS

T.TSINAMDZGVRISHVILI¹, B.SHERGELASHVILI^{1,2,3}, B.CHARGEISHVILI¹,
I.MGHEBRISHVILI¹, T.MDZINARISHVILI¹, D.JAPARIDZE¹

Long-term automatic tracing of coronal bright points made it possible to study their proper motion using the SDO/AIA channel AIA 193 Å data. For processing the series of chosen fits files, we took 95 visually long-lived bright points which were homogeneously distributed along the latitude. Specially developed code automatically detects heliographic coordinates of the centroid of the chosen coronal bright points in a series of fits files. The final results of all studied coronal bright points show apparent oscillatory character in their proper motion. Oscillation periods range from 5 to 60 hours with an average of 20 hours. Some trends of latitudinal dependence of oscillation characteristics are revealed. There is supposed that these oscillations are the result of propagation of helical waves along the magnetic loops,

constructing coronal bright points. Using the linear trends of latitudinal and longitudinal components of the movement of the coronal bright points, we obtained their rotational rates and the meridional migration speeds. The results of the rotational rates are confirming the differential character of latitudinal dependence. The problem of determining the direction and magnitude of meridian migration is discussed.

Keywords: *coronal bright points: proper motion: oscillations*

ЛИТЕРАТУРА

1. *L.Golub, A.S.Krieger, G.S.Vaiana*, Solar Phys., **49**, 79, 1976.
2. *N.R.Jr.Sheeley, L.Golub*, Solar Phys., **63**, 119, 1979.
3. *J.Zhang, M.R.Kundu, S.M.White*, Solar Phys., **198**, 347, 2001.
4. *N.Alipour, H.Safari*, Astrophys. J., **807**, 175, 2015.
5. *H.W.Newton, M.L.Nunn*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **111**, 413, 1951.
6. *R.F.Howard, P.A.Gilman*, Kodaikanal Obs. Bull., **4**, 1, 1984.
7. *H.Balthasar, M.Vazquez, H.Woehl*, Astron. Astrophys., **155**, 87, 1986.
8. *R.Brajša, H.Wöhl, B.Vršnak et al.*, Astron. Astrophys., **392**, 329, 2002.
9. *D.Sudar, I.Skokić, R.Brajša et al.*, Astron. Astrophys., **575**, A63, 2015.
10. *A.K.Dupree, W.Jr.Henze*, Solar Phys., **27**, 271, 1972.
11. *R.Kariyappa*, Astron. Astrophys., **488**, 297, 2008.
12. *M.Yousefzadeh, H.Safari, R.Attie et al.*, Solar Phys., **291**, 29, 2016.
13. *R.Brajša, H.Wöhl, B.Vršnak et al.*, Astron. Astrophys., **374**, 309, 2001.
14. *N.Karachik, A.A.Pevtsov, I.Sattarov*, Astrophys. J., **642**, 562, 2006.
15. *E.Shahamatnia, I.Dorotović, J.M.Fonseca et al.*, JSWSC, **6**, A16, 2016.
16. *J.McAteer, L.E.Boucheron, M.Osorno*, AAS SPD meeting, **47**, 2, 2016.
17. *B.Vršnak, R.Brajša, H.Wöhl et al.*, Astron. Astrophys., **404**, 1117, 2003.
18. *E.W.Maunder*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **64**, 747, 1904.
19. *G.Lustig, H.Woehl*, Solar Phys., **152**, 221, 1994.
20. *H.B.Snodgrass, R.K.Ulrich*, Astrophys. J., **351**, 309, 1990.
21. *M.Stangalini, F.Giannattasio, R.Erdélyi et al.*, Astrophys. J., **840**, 19, 2017.