

ВАРИАЦИИ ПЛОЩАДЕЙ И ШИРИН СОЛНЕЧНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР В 2017–2020 гг.

¹П.В. Стрекалова, ²А. Риехокайнен, ³В.В. Смирнова, ¹А.А. Соловьев, ⁴А.Г. Тлатов, ¹И. Живанович

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия
auriga-lynx@yandex.ru

²Университет Турку, Турку, Финляндия

³Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

⁴Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, Кисловодск, Россия

VARIATIONS IN AREAS AND WIDTHS OF SOLAR CORONAL HOLES IN 2017–2020

¹P.V. Strekalova, ²A. Riehoainen, ³V.V. Smirnova, ¹A.A. Solov'ev, ⁴A.G. Tlatov, ¹I. Zhivanovich

¹Central (Pulkovo) Astronomical Observatory RAS, Saint-Petersburg, Russia
auriga-lynx@yandex.ru

²University of Turku, Turku, Finland

³Crimean Astrophysical Observatory RAS, Nauchny, Russia

⁴Kislovodsk Mountain Astronomical Station of the Pulkovo Observatory, Russia

Аннотация. Основной целью работы было изучение вариаций площадей и долготных ширин самых больших солнечных корональных дыр, наблюдаемых ежедневно в полярных и экваториальной зонах, на шкале времени ~1000 дней. Для выявления периодичности в вариациях этих параметров использовались методы быстрого преобразования Фурье и вейвлет-преобразования. Обнаружены вариации площадей и долготных ширин солнечных корональных дыр с периодами 8–9, 13–15 и 26–29 дней как в полярных (северной и южной), так и экваториальной зонах. Интерпретация обнаруженной периодичности дана в рамках предположения о секторной структуре крупномасштабного магнитного поля Солнца.

Ключевые слова: Солнце, корональные дыры, магнитное поле, вращение.

Abstract. The main goal of this paper was to study variations in the largest areas and longitudinal widths of solar coronal holes observed daily in the polar and equatorial zones on a time scale of about 1000 days. To determine periodicity of variations in these parameters, we used statistical methods of fast Fourier transform and wavelet transform. Long-term variations in the measured areas and longitudinal widths of solar coronal holes with periods of 8–9, 13–15 and 26–29 days were detected in polar and equatorial zones. We interpreted the obtained periods, using the suggestion on the rotation of sectoral structure of the large-scale solar magnetic field.

Keywords: Sun; coronal holes; magnetic field; rotation.

ВВЕДЕНИЕ

Корональные дыры (КД) представляют собой структуры с открытой конфигурацией магнитного поля. Благодаря такой конфигурации магнитного поля заряженные частицы могут вылетать из короны, образуя солнечный ветер, оказывающий важное влияние на космическую погоду. Изучение структуры КД, их происхождения и различных физических параметров важно для понимания сложных процессов солнечной активности. Корональные дыры видны по всему солнечному диску. Их можно разделить на полярные и среднеширотные (или экваториальные). Полярные КД — одна из самых долгоживущих структур Солнца; согласно [Heinemann et al., 2020], экваториальные корональные дыры могут жить более 18 месяцев, а полярные корональные дыры могут жить 2–3 года. Они вносят вклад в глобальное состояние солнечной короны и связаны с крупномасштабной структурой магнитного поля. В настоящей работе мы исследовали вариации наибольших суточных площадей и долготных ширин полярных и экваториальных КД. За полярные корональные дыры мы принимали объекты, лежащие выше $\pm 50^\circ$, а за экваториальные, соответственно, лежащие между $\pm 50^\circ$. Мы предположили, что наибольшая за сутки площадь и продольная ширина корональных дыр являются маркерами, характеризующими крупномасштабную структуру солнечного магнитного поля.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для обработки мы использовали данные инструмента AIA, установленного на борту космического аппарата SDO [Schou et al., 2012; Scherrer et al., 2012]. Для определения наибольших площадей и размеров КД были использованы два метода сегментации. Первый метод заключался в применении алгоритма распознавания мультитепловой эмиссии (CHIMERA) [Garton et al., 2018] к изображениям SDO/AIA, полученным в трех ультрафиолетовых полосах пропускания: 171, 193 и 211 Å, для распознавания корональных дыр. Второй метод — это алгоритм RGA, описанный [Wang et al., 2013]. Метод применялся к той же группе данных SDO/AIA в полосе пропускания 193 Å. Площадь, полученная методом CHIMERA, выражалась в процентах, а методом RGA — в миллионных долях полусферы. Для удобства эти значения были пересчитаны с учетом кривизны Солнца в Mm^2 . Оба метода сегментации КД показали практически одинаковые значения площадей. Коэффициент корреляции между временными рядами площадей, полученных этими двумя методами, равен 0.87. На рис. 1 приведены изображения полярных корональных дыр, полученных двумя упомянутыми выше методами.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Время жизни рассматриваемых нами корональных дыр за период 2017–2020 гг. составило 740–1000 дней.

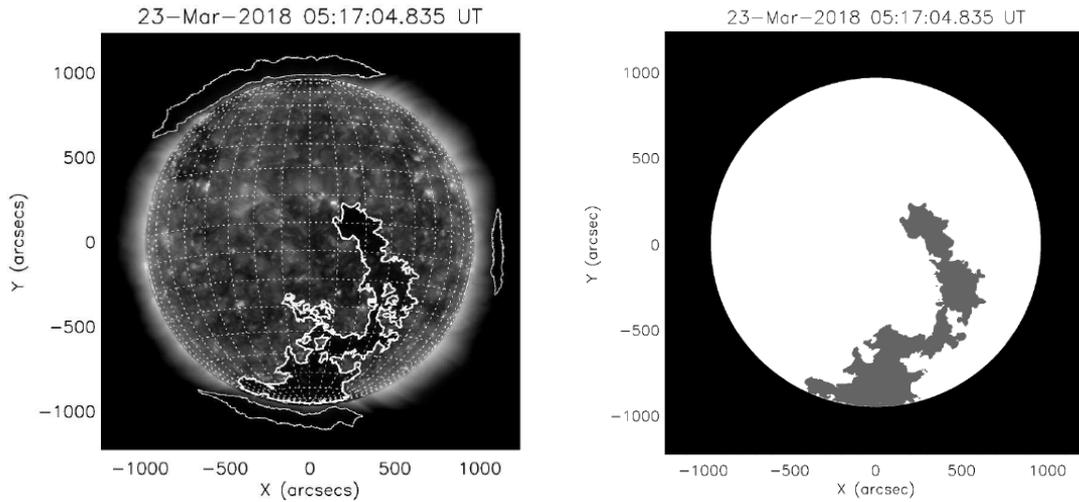


Рис. 1. Одна и та же корональная дыра, полученная методом CHIMERA (слева) и методом RGA (справа). Рисунок взят из работы [Richokainen et al., 2022]

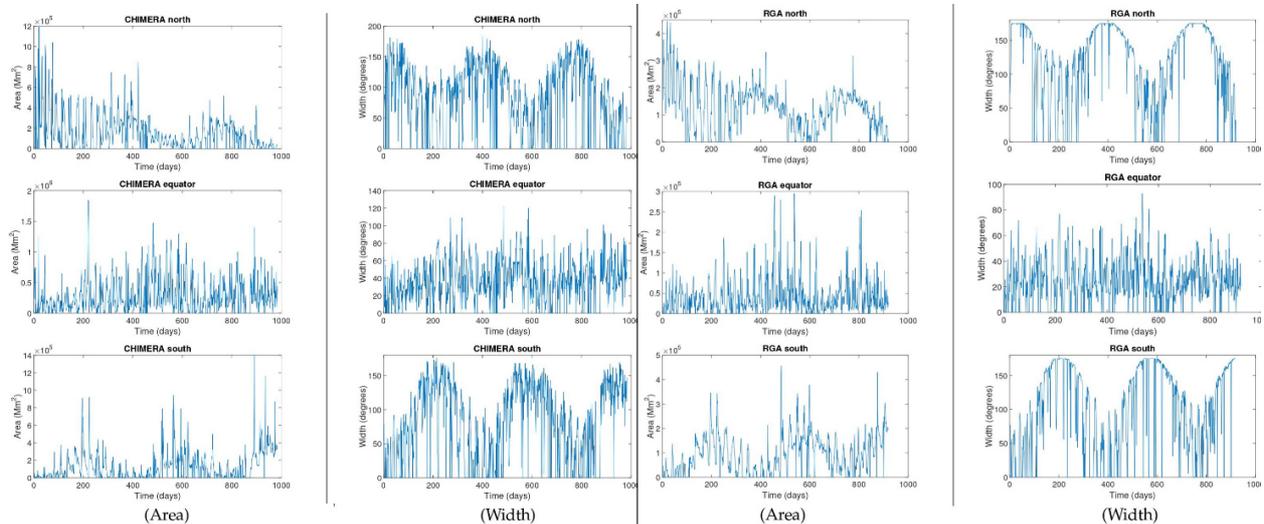


Рис. 2. Временные ряды максимальной суточной площади и максимальной суточной ширины, полученные двумя методами сегментации КД в разных зонах Солнца

Временные ряды изменения максимальной суточной площади и максимальной суточной ширины для трех зон представлены на рис. 2. Каждый временной ряд состоит из максимальных за сутки значений параметров корональных дыр. Заметим, что эти значения не обязательно принадлежат одной и той же корональной дыре. Мы предполагаем, что вариации наибольших суточных значений этих параметров отражают поворот секторной структуры магнитного поля Солнца. На рис. 2 виден долговременный тренд 350–360 дней, возникающий за счет изменения угла B_0 . Этот тренд удалялся с помощью метода разложения сигнала на эмпирические моды [Huang et al., 1998]. После этого каждый временной ряд анализировался с использованием фурье- и вейвлет-преобразования. Оба преобразования показали соответствующие друг другу результаты. В спектрах площадей и ширин КД мы обнаружили 8-, 14- и 28-дневные периоды вариаций во всех рассмотренных зонах. На рис. 3 для примера приведены результаты фурье- (слева) и вейвлет- (справа) анализа для пра-

вого верхнего временного ряда с рис. 2. Этот временной ряд соответствует северной полярной зоне. Метод получения корональных дыр — RGA. Уровень доверительного интервала соответствует 95%. На фурье-спектре видны периоды 29, 14 и 9 дней, на вейвлет-спектре — 28 и 14 дней.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Период 26–28 дней — это период вращения Солнца на экваторе. В нашей работе этот период был выявлен и для КД. Интерпретацию этого, а также других обнаруженных периодов (8 и 14 дней) можно дать в рамках исследований циклических вариаций крупномасштабного магнитного поля Солнца, проведенных в работах [Obridko, Shelting, 1999, Vasil'eva et al., 2002], которые показали периоды вращения 13.64, 26.86 и 9 дней. Эти периоды объясняются четырех-, двух- и шестисекторной структурой крупномасштабного магнитного поля Солнца соответственно. Ранее эти периоды были получены

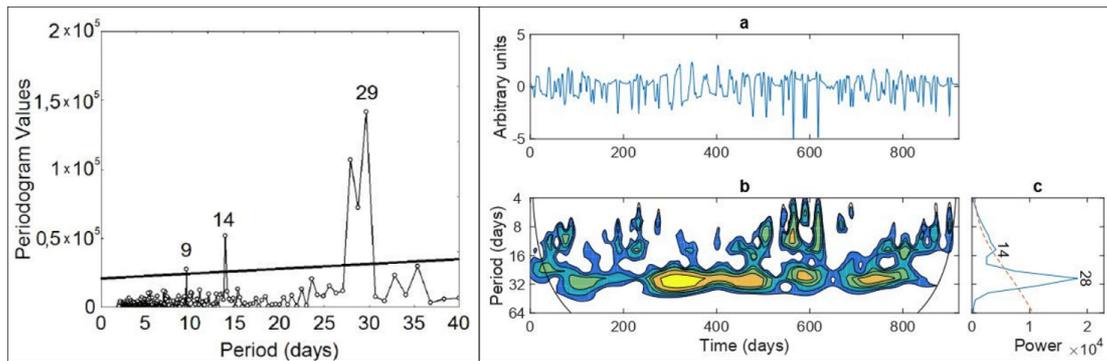


Рис. 3. Фурье-спектр (слева) и вейвлет-спектр (справа) для временного ряда, построенного для карт северной полярной области, обработанных методом RGA

для экваториальной зоны Солнца. Период 8–9 дней также может быть связан с проявлением гравитационных мод [Fossat et al., 2017].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Fossat E., Boumier P., Corbard T., et al. Asymptotic g modes: Evidence for a rapid rotation of the solar core. *Astron. Astrophys.* 2017. Vol. 604, A40.
- Garton T.M., Gallagher P.T., Murray S.A. Automated coronal hole identification via multi-thermal intensity segmentation. *J. Space Weather Space Clim.* 2018. Vol. 8. A02.
- Heinemann S.G., Jeřić V., Temmer M., et al. A statistical study of the long-term evolution of coronal hole properties as observed by SDO. *Astron. Astrophys.* 2020. Vol. 638. A68.
- Huang N.E., Shen Z., Long S.R., et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A* 1998. Vol. 454. P. 903–998.
- Obridko V.N., Shelting B.D. Structure of the Heliospheric Current Sheet derived for the interval 1915–1916. *Solar Phys.* 1999. Vol. 184. P. 187–200
- Riechokainen A., Smirnova V., Solov'ev A., et al. Variations in daily maximum areas and longitudinal widths of solar coronal holes in 2017–2020. *Universe.* 2022. Vol. 8, iss. 3, 158.
- Schou J., Scherrer P.H., Bush R.I., et al. Design and ground calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012. Vol. 275. P. 229–259.
- Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., et al. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012. Vol. 275. P. 207–227.
- Vasil'eva V.V., Makarov V.I., Tlatov A.G. Rotation cycles of the sector structure of the solar magnetic field and its activity. *Astron. Lett.* 2002. Vol. 28. P. 199–205.
- Wang Q., Song X., Jiang Z. An improved image segmentation method using three-dimensional region growing algorithm. *Proc. of the 2013 International Conference on Information Science and Computer Applications, Changsha, China, 8–9 November 2013. Amsterdam: Atlantis Press, 2013. P. 148–152.*