

КОЛЕБАНИЯ ЭЛЛИПСОИДАЛЬНЫХ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ РЕГИОНОВ

Г.ДУМБАДЗЕ¹, Б.ШЕРГЕЛАШВИЛИ^{1,2,3}

Поступила 18 августа 2019

Принята к печати 18 декабря 2019

Проведены исследования четырех солнечных активных регионов (АР). Наблюдательные данные были получены из SDO/HMI магнитограмм прямой видимости sharp_cea_720s. Данные каждого АР были обработаны с помощью метода наименьших квадратов в эллипсе. Используя последовательность снимков после обработки данных во всех АР, обнаружены колебания больших и малых осей эллипса, а также углов наклона больших осей к экватору в зависимости от времени. Для анализа этих колебаний применен метод быстрого преобразования Фурье, в результате чего было выявлено несколько периодов с уровнем достоверности, превышающим 95%. Обнаружено, что большие оси осциллируют с периодом в 6-8 час., а малые оси - с периодами в 6-8 час. и 4-5 час. Углы наклона больших осей к экватору трех АР осциллируют с периодом приблизительно в 4 час.

Ключевые слова: *Солнце: активные регионы: колебания*

1. Введение. Активные регионы (АР) на поверхности Солнца включают в себя множество солнечных пятен. Магнитные структуры АР имеют сложную морфологию и динамику, состоящую из различных типов волн [1-4].

В последнее время были разработаны автоматизированные методы обнаружения и идентификации солнечных магнитных структур, в том числе для АР и солнечных пятен. Методология их идентификаций включает морфологический анализ и пороги интенсивности [5]. В [6] был разработан алгоритм автоматического обнаружения траектории активных регионов (Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Active Region Patches (HARPs)). Этот алгоритм служит для предоставления пространственной информации о долгоживущих, когерентных магнитных структурах в масштабе солнечного АР. В [7] были описаны два алгоритма: Solar Monitor Active Region Tracker (SMART) и Activity Prediction (ASAP). SMART автоматически извлекает, характеризует и отслеживает АР [8]. ASAP представляет собой набор алгоритмов, обнаруживающих солнечные пятна, факелы и АР [9]. Кроме того, в [7] был описан алгоритм Spatial Possibility Clustering Algorithm (SPoCAsuite), который обнаруживает АР, зоны спокойного Солнца и корональные дыры на полных изображениях солнечного диска.

2. *Наблюдение и анализ данных.* Авторы использовали магнитограммы прямой видимости (line-of-sight (LOS)) sharp_sea_720s (Spaceweather HMI Active Region Patches (SHARP)) [10], которые были предоставлены обсерваторией Solar Dynamics Observatory (SDO)/HMI [11,12]. Эти данные были спроецированы и отображены в цилиндрическую равновеликую декартовую систему координат с центром, совмещенным с отслеживаемым AP.

Были рассмотрены четыре AP: AP 11512 - от 26.06.2012 13:00 до 30.06.2012 20:00; AP 11535 - от 02.08.2012 12:00 до 06.08.2012 19:00; AP 11560 - от 30.08.2012 23:00 до 04.09.2012 17:00; AP 12253 - от 02.01.2015 00:00 до 06.01.2015 07:00.

Мы исследовали каждый AP, состоящий из случайно распределенных небольших пятен и отдельных пикселей с изменяющейся напряженностью магнитного поля, а также определили граничные точки AP, начиная с верхнего и нижнего краев домена, выбирая первую граничную точку с пикселем, соответствующим градиенту поля, превышающим порог в 40 Гс на пиксель. Таким образом, мы обнаружили пары граничных точек в каждом вертикальном срезе. С целью уменьшения влияния случайных шумов на распределение этих точек, мы рассмотрели средние величины координат для 30 последовательных точек. Новые найденные граничные точки мы использовали для моделирования AP. Такой метод моделирования AP называется "методом наименьших квадратов в эллипсе".

Используя последовательность снимков, полученных за время наблюдений, получена зависимость от времени величин больших и малых осей, а также

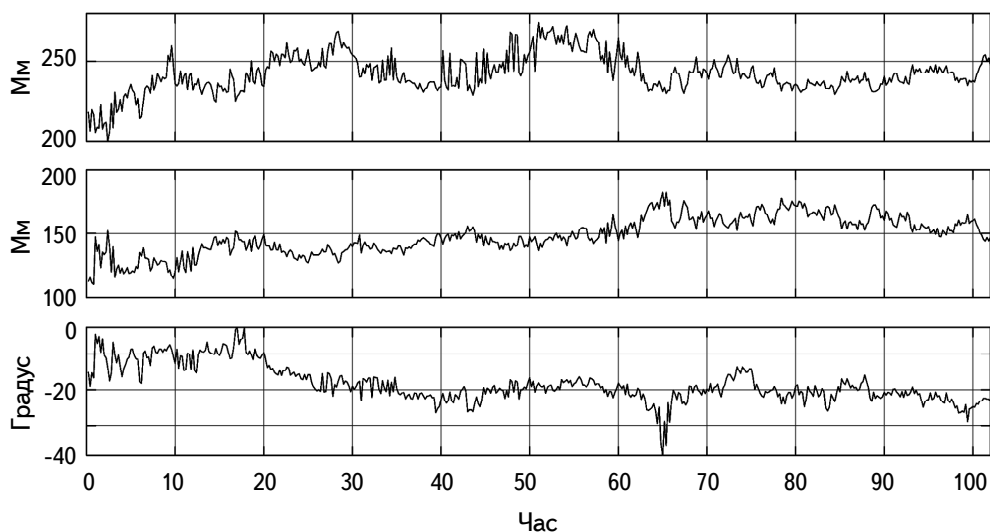


Рис.1. Верхняя панель: зависимость больших осей от времени. Средняя панель: зависимость малых осей от времени. Нижняя панель: зависимость углов наклона больших осей к экватору от времени. Данные соответствуют AP 11512.

величины угла наклона больших осей к экватору. На рис.1 показана зависимость от времени больших (верхняя панель) и малых (средняя панель) осей, углов наклона (нижняя панель) для AP 11512. В результате обнаружены колебания обеих осей и угла наклона в зависимости от времени во всех AP. Кроме того, установлена тенденция пространственного увеличения некоторых AP с течением времени. В связи с этим мы вычитали линейные тренды для AP 11535 и квадратные тренды для AP 11512, AP 11560, AP12253.

3. Результаты. Для анализа наблюдаемых колебаний применен метод быстрого преобразования Фурье (БПФ) к данным, полученным после вычитания тренда. Этот анализ выявил несколько значительных спектральных пиков с уровнем достоверности, превышающим 95%. Пики, соответствующие наибольшим периодам, мы не рассматривали, так как они связаны с известными инструментальными эффектами: с существованием 12 и 24 час. вариаций сигнала на магнитограммах НМИ [13].

Рассчитан доверительный интервал значимости в 95% (гладкая линия на рис.2-4) по формуле: $p + t_{crit} se$, где p - усредненная величина мощности; t_{crit} - критическая величина, в нашем случае $t_{crit} = 3\sigma$; se - стандартная ошибка прогноза.

На рис.2 представлены результаты БПФ-анализа больших осей для всех AP. Пики периодов с максимальной амплитудой соответствуют 8.52 ± 0.6 час. (AP 11535), 6.39 ± 0.61 час. (AP 11560), 7.86 ± 0.65 час. (AP 12253) и 4.87 ± 0.15 час. (AP 11512). Для AP 11512 также наблюдается 6.01 ± 0.44 часовой период.

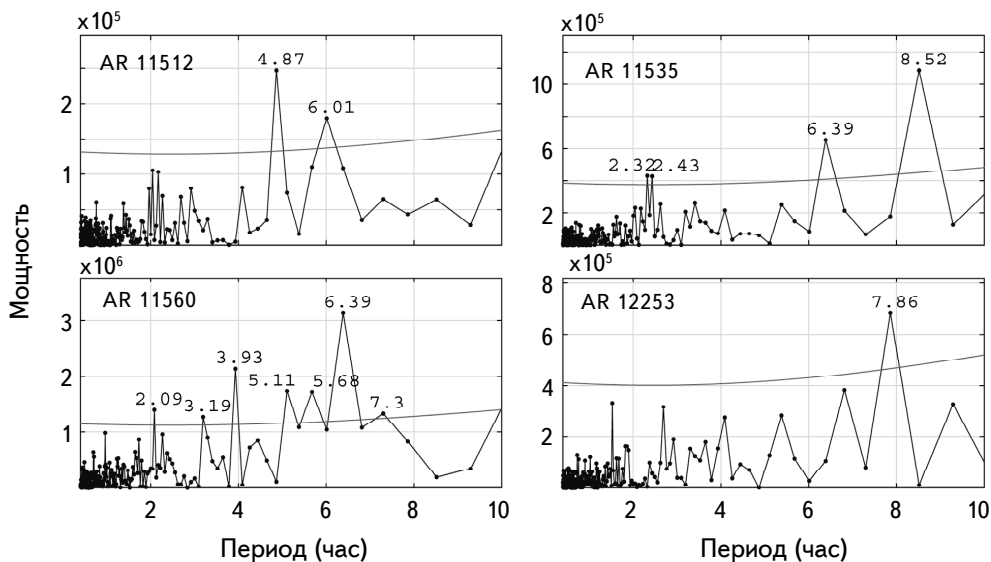


Рис.2. БПФ-анализ данных для больших осей всех AP. Гладкая линия соответствует 95% уровню достоверности.

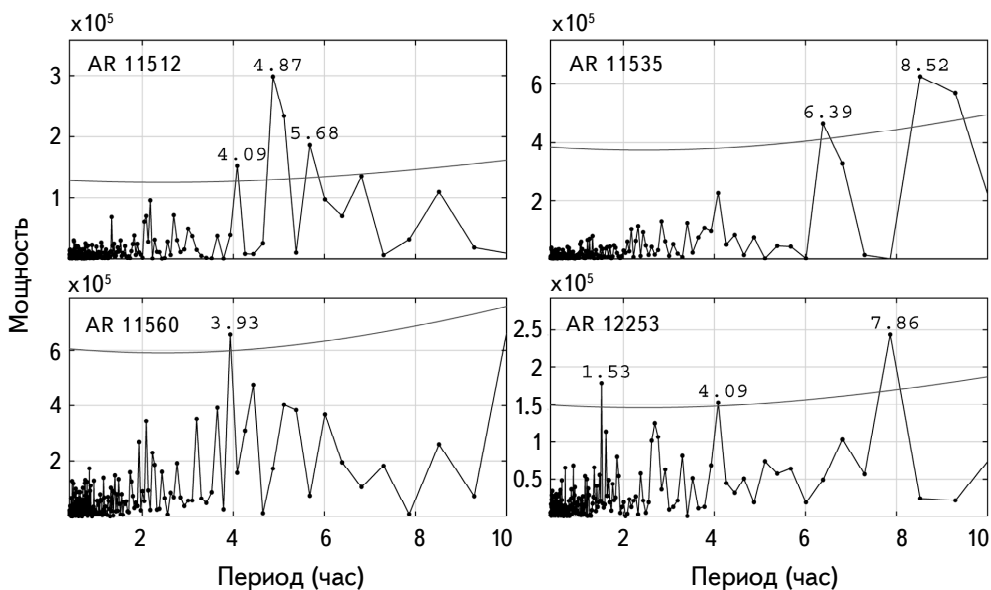


Рис.3. То же самое, что на рис.2, но для малых осей.

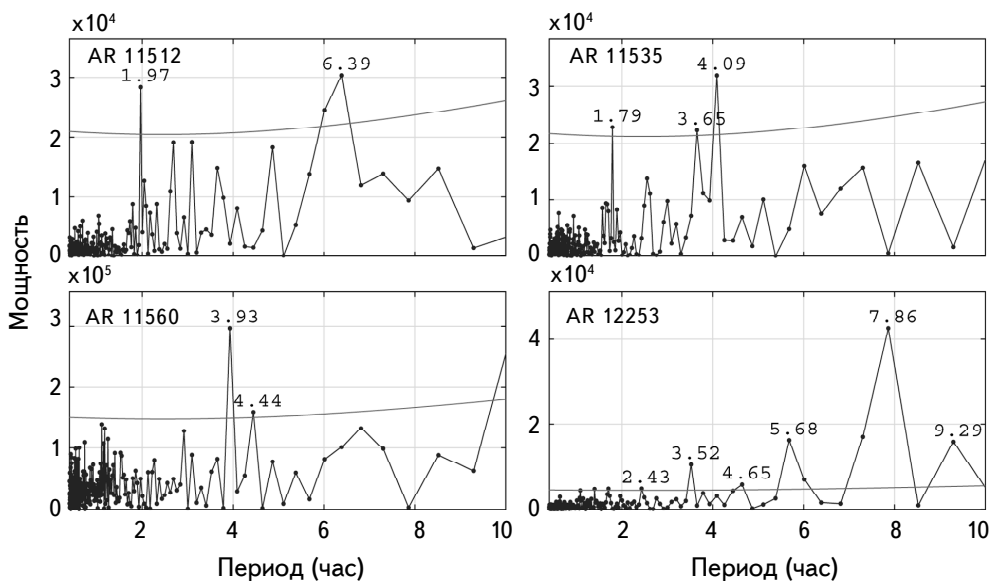


Рис.4. То же самое, что на рис.2, но для углов наклона.

Таким образом, большие оси всех АР осциллируют с периодом в 6–8 час. На рис.3 показан БПФ-анализ малых осей для всех АР. Мы зафиксировали АР с двумя различными периодами с максимальной амплитудой в 7–8 час. (АР 11535 и АР 12253) и в 4–5 час. (АР 11512 и АР 11560). Периоды приблизительно

в 4 часа наблюдаются в трех АР: 4.87 ± 0.43 час. в АР 11512, 3.93 ± 0.3 час. в АР 11560 и 4.09 ± 0.26 часа в АР 12253. Эти периоды соответствуют периоду, найденному в [4].

БПФ-анализ углов наклона выявил два типа периодов, соответствующих 6-7 час. (АР 11512 и АР 12253) и 4 час. (АР 11535 и АР 11560) (см. рис.4). Приблизительно 4 час. период наблюдается в следующих АР: АР 11535 - 4.09 ± 0.23 час., АР 11560 - 3.93 ± 0.16 час., АР 12253 - 3.52 ± 0.1 и 4.65 ± 0.51 час., которые соответствуют периоду, найденному в [4]. Ошибки несоответствия периодов оценены как величины половины ширины соответствующих пиков мощности.

4. *Выводы.* Авторы исследовали динамику всех АР на основе метода наименьших квадратов в эллипсе, который хорошо подходит для изучения АР с эллипсоидальной формой, идентифицировали несколько значительных спектральных пиков с уровнем достоверности, превышающим 95%, а также обнаружили, что большие оси всех АР осциллируют с периодом в 6-8 час., тогда как малые оси осциллируют с периодом в 6-8 час. (АР 11535, АР 12253) и с периодом в 4-5 час. (АР 11512, АР 11560). Углы наклона больших осей к экватору также осциллируют с периодами в 6-8 час. (АР 11512, АР 12253) и приблизительно в 4 час. (АР 11535, АР 11560, АР 12253) последний совпадает с периодом, найденным в [4].

Колебания углов наклона могут быть интерпретированы в терминах стоячей второй гармоники мод волн кинка [4], которые поддерживаются в двух противоположно поляризованных параллельных трубках (солнечных пятнах). Эти трубки обладают аналогичными свойствами и соединены небольшими петлями, расположенными в солнечной атмосфере. В [4] предположено, что АР колеблются как единая система, и соответствующая мода волн кинка имеет узел в вершине петли над поверхностью Солнца. Это упрощенное предположение позволило приблизительно определить возможное распределение значений фазовой скорости вдоль трубок. Величина характерной глубины АР составляет приблизительно 40 Мм [4], ниже этой глубины пятна предположительно фрагментированы в более мелкие петлевые структуры, как было рассмотрено в [14].

Работа была поддержана Национальным научным фондом имени Шота Руставели (SRNSF) [PhDF2016_177] и грантом DI-2016-52. Авторы выражают свою благодарность О.Авсаджанишвили за полезные обсуждения и замечания.

¹ Абастуманская астрофизическая обсерватория, Тбилиси, Грузия, e-mail: gulsun.dumbadze.1@iliauni.edu.ge

² Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Austria

³ Combinatorial Optimization and Decision Support, KU Leuven campus Kortrijk, E. Sabbelaan53, 8500 Kortrijk, Belgium

OSCILLATIONS IN THE ELLIPTICAL SOLAR ACTIVE REGIONS

G.DUMBADZE¹, B.SHERGELASHVILI^{1,2,3}

We studied the oscillatory dynamics of the four active regions (AR). The data were obtained from the SDO/HMI magnetogram sharp_cea_720s. The data of each AR were processed using the least squares method on the ellipse. After processing the data, we found that the major and minor axes of the ellipses and the tilt angle of the major axis toward the solar equatorial plane oscillate in time. To analyze these oscillations, we applied the fast Fourier transform method, which revealed several periods with a confidence level of 95%. We found that the major axis oscillates with the period of 6-8 hours, the minor axes oscillate with a period of 6-8 hours, as well as with a period of 4-5 hours. The tilt angles of the three ARs oscillate with a period of approximately 4 hours.

Keywords: *Sun: active regions: oscillations*

ЛИТЕРАТУРА

1. *R.Centeno, M.Collados, J.T.Bueno*, *Astrophys. J.*, **640**, 1153, 2006.
2. *J.H.Thomas, L.E.Cram, A.H.Nye*, *Astrophys. J.*, **285**, 368, 1984.
3. *N.Chorley, B.Hnat, V.M.Nakariakov et al.*, *Astron. Astrophys.*, **513**, A27, 2010.
4. *G.Dumbadze, B.M.Shergelashvili, V.Kukhianidze et al.*, *Astron. Astrophys.*, **597**, A93, 2017.
5. *R.T.J.McAteer, P.T.Gallagher, J.Ireland et al.*, *Sol. Phys.*, **228**, 55, 2005.
6. *J.T.Hoeksema, Y.Liu, K.Hayashi et al.*, *Sol. Phys.*, **289**, 3483, 2014.
7. *C.Verbeeck, V.Delouille, B.Mampaey et al.*, *Astron. Astrophys.*, **561**, A29, 2014.
8. *P.A.Higgins, P.T.Gallagher, R.T.J.McAteer et al.*, *Advances in Space Research*, **47**, 2105, 2011.
9. *T.Colak, R.Qahwaji*, *Sol. Phys.*, **248**, 277, 2008.
10. *M.G.Bobra, X.Sun, J.T.Hoeksema et al.*, *Sol. Phys.*, **289**, 3549, 2014.
11. *J.Schou, P.H.Scherrer, R.I.Bush et al.*, *Sol. Phys.*, **275**, 229, 2012.
12. *P.H.Scherrer, J.Schou, R.I.Bush et al.*, *Sol. Phys.*, **275**, 207, 2012.
13. *Y.Liu, J.T.Hoeksema, P.H.Scherrer et al.*, *Sol. Phys.*, **279**, 295, 2012.
14. *E.N.Parker*, *Astrophys. J.*, **234**, 333, 1979.