ОЦЕНКА ПЕРИОДА НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ФАКЕЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА СОЛНЦЕ

Стрекалова П.В.¹, Соловьев А.А.¹, Смирнова В.В.¹, Наговицын Ю.А.^{1,2}

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский Государственный Университет
Аэрокосмического Приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

ESTIMATION OF PERIOD OF LONG-TERM OSCILLATIONS OF FACULAR FORMATIONS ON THE SUN

Strekalova P.V.¹, Solov'ev A.A.¹, Smirnova V.V.¹, Nagovitsyn Y.A.^{1,2}

¹Central (Pulkovo) Astronomical Observatory RAS, Saint Petersburg, Russia

²Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

The long-term variations of magnetic field with periods in the range of 30–260 minutes are revealed for the facular formations – solitary small-scale structures in the solar photosphere. Facular formations are regarded as the systems with time-dependent effective rigidity. The periods of slow oscillations of such systems are calculated by the assumption that the facular formation could be modeled by a vertical magnetic flux tube, which bounded below by a level where the magnetic pressure is compared with the dynamic pressure of photospheric convection. The periods estimated by such a way ranged from one and a half to three hours. These values fit well to the observed range of periods.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-373-376

Нами были исследованы факельные образования (ФО) – уединённые, долгоживущие, устойчивые магнитные структуры, наблюдаемые в фотосфере и хромосфере. Их время жизни в среднем составляет от 10 до 30 часов, максимальное магнитное поле находится в пределах 400–1100 Гс, а размеры составляют от 1,5 до 4 Мм [1]. Анализировались магнитограммы, полученные инструментом SDO/HMI. Его временное разрешение составляет 45 секунд, пространственное – 1 угловая секунда. Длина временных рядов, использованных для исследования вариаций магнитного поля, варьировалась в зависимости от времени жизни каждого ФО.

Для выявления колебаний использовалось разложение сигнала на эмпирические моды (EMD) [2]. Данный метод хорошо подходит для анализа нестационарных и нелинейных колебаний, так как не имеет априорного базиса разложения. Базис EMD строится адаптивно, исходя из свойств исследуемого сигнала. С помощью метода, описанного в работе [3], выявленные колебательные моды проверялись на принадлежность к цветным шумам. Моды, лежащие выше доверительных интервалов цветных шумов, считались значимыми [1]. Во всех исследованных случаях, где максимальное магнитное поле превышало 500 Гс, было обнаружено по одной значимой моде одного из трёх типов: период и амплитуда растут со временем;

период и амплитуда уменьшаются со временем; перемежающиеся режимы, когда интервалы раскачки и затухания колебаний по амплитуде и периоду сменяют друг друга. В работе [4] впервые были обнаружены низкочастотные колебания факельной структуры, в которой за время наблюдений сильно уменьшилось магнитное поле (с 900 до 200 Гс), но при этом период и амплитуда колебаний значительно выросли (период возрос с получаса до 3.5 часов). Авторы [4] предложили экзотический механизм отрыва плазменных вихрей от тела ФО. Однако такое предположение нуждается в дополнительных наблюдениях и численных оценках. В работах [5, 6] было показано, что все три режима нелинейных колебаний факельных структур могут быть описаны в рамках представлений о том, что мы в данном случае имеем дело с колебаниями системы, у которой в течение наблюдаемого интервала времени заметно меняется ее эффективная жёсткость, т.е. реакция системы на внешние возмущения. Для их описания в [5, 6] рассматривалось уравнение малых линейных колебаний некоторого параметра системы x (в нашем случае речь идет о средней напряжённости магнитного поля в силовой трубке ФО) при наличии трения β в системе с переменной по времени эффективной жёсткостью $W^2(t)$:

$$\ddot{x}(t) + 2\beta\dot{x}(t) + W^2(t)x(t) = 0 \quad (1)$$

При различных предположениях об изменении функции $W^2(t)$ во времени, можно получить решения этого уравнения, которые хорошо описывают все три типа обнаруженных медленных колебаний. Нас в данном случае интересует вопрос, как можно, исходя из общих соображений, получить порядковую оценку колебаний ФО как целого?

В [7] была предложена модель ФО, магнитное поле которого можно грубо изобразить как более-менее однородную вертикальную силовую трубку, которая уже в подфотосферных слоях начинает расширяться, её радиус $a(z)$ растет с высотой (рис. 1). А снизу, начиная с некоторого уровня глубины H , где сравниваются магнитное давление и давление конвективных турбулентных потоков, магнитное поле силовой трубки ФО запутывается, теряет регулярный характер и перестает влиять на поведение верхней части ФО. Эффективную вертикальную протяжённость такой системы L можно оценить, согласно [7], 1–2 Мм (рис. 1).

Рис. 1. Схематическое изображение магнитной структуры факельного образования.

$W^2(t)$ имеет смысл квадрата частоты. Оценка дает линейный коэффициент возвращающей силы, рассчитанной на единицу массы. Жесткость системы определяется, в основном, магнитным полем. Градиент магнитного давления представляет собою магнитную силу, поэтому для жесткости можно дать порядковую оценку:

$$W^2(t) = \omega_0^2 \cong \frac{B^2}{8\pi L} \frac{1}{L} \frac{V}{M} = \frac{B^2}{8\pi L^2} \frac{1}{\bar{\rho}} \quad (2)$$

где ω_0 – эффективная частота системы, $\frac{B^2}{8\pi}$ – магнитное давление, V – объем внутри трубки, $\bar{\rho}$ – средняя плотность массы. В полученном выражении в качестве масштаба можно взять как высоту трубки, так и её радиус, поскольку в нашей модели эти величины одного порядка.

Таким образом, характерная частота получается равной:

$$\omega_0 \cong \frac{B}{L\sqrt{2}\sqrt{4\pi\bar{\rho}}} \quad (3)$$

В этом выражении под корнем можно без заметной погрешности заменить среднюю плотность массы плотностью газа на глубине H , так как основной вклад в плотность массы вносят только самые нижние слои. А на уровне H согласно нашей модели $V_A(H)$ будет равна скорости конвективных движений в фотосферных и подфотосферных слоях – V_{CON} , которая оценивается величиной 0,5–1,0 км/с. В таком случае:

$$\omega_0 \cong \frac{B}{L\sqrt{2}\sqrt{4\pi\bar{\rho}}} = \frac{\bar{V}_A}{L\sqrt{2}} = \frac{V_A(H)}{L\sqrt{2}} = \frac{V_{CON}}{L\sqrt{2}} \quad (4)$$

В этой простой формуле обе величины поддаются разумной оценке, и тогда для характерного периода долгопериодических колебаний ФО как целостного магнитного объекта получаем:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \frac{L\sqrt{2}}{V_{CON}} \approx \frac{9L}{V_{CON}} = \frac{9 \times 10^8}{10^5} = 2.5 \text{ часов} \quad (5)$$

Эта оценка в среднем согласуется с наблюдаемыми значениями периодов медленных колебаний ФО.

Не применяя физическую модель малых колебаний, описанную выше, можно предложить подход, заключающийся в фитировании наблюдаемых колебательных мод. В этом случае, исходя из нелинейности колебаний, для фитирования мод, можно применить формулу вида:

$$x(t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right) \quad (6)$$

Здесь амплитуда изменяется по Гауссу: $A = A_0 \exp\left(\frac{-(t-t_0)^2}{2c^2}\right)$, а период связан с амплитудой как: $T = dA^p + b$, где d , p , и b константы. Результат такого фитирования хорошо соответствует наблюдаемым режимам колебаний ФО, однако, следующим шагом данного подхода является поиск фи-

зической модели, описывающей соответствующую связь периода и амплитуды.

Работа поддержана грантами РФФИ 18-32-00555, 19-02-00088, 18-02-00168, программой КП 19-270.

Литература

1. *Strekalova P.V., Nagovitsyn Y.A., Smirnova V.V.* Analysis of Oscillatory Modes of the Magnetic Field of Solar Faculae Formations // *Ge&A.*, 2018, V. 58, No. 7, P. 893–898.
2. *Kolotkov, D.Y., Anfinogentov, S.A., & Nakariakov, V.M.* Empirical mode decomposition analysis of random processes in the solar atmosphere // *A&A*, 2016, V. 592, id.A.153, 9 PP.
3. *Huang N.E., Zheng S., Long S.R., and 7 co-authors.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // *Proc. R. Soc. L. Ser. A.* 1998. V. 454. P. 903–995.
4. *Kolotkov, D.Y.; Smirnova, V.V.; Strekalova, P.V.; et al.* Long-period quasi-periodic oscillations of a small-scale magnetic structure on the Sun // *Astronomy & Astrophysics.* 2017. V. 598. Id. L2. P. 4.
5. *Solov'ev A.A., Kirichek E.A., Efremov V.I.* Eigen oscillations of faculae knot on the stage of slow dissipation // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2017, V. 57, Is. 8, P. 1101-1105.
6. *Solov'ev, A.A., Smirnova V.V., Strekalova P.V., Riechokainen A.* Eigen oscillations of facular knots // *Astroph. and Space Sci.*, 2019, V. 364, Is. 2, Id. 29, 8 PP.
7. *Solov'ev A.A., Kirichek E.A.* Structure of solar faculae // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 2019, V. 482, Is. 4, P. 5290-5301.