

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ФАКЕЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА СОЛНЦЕ

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

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

²Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

INTERPRETATION OF QUASI-PERIODIC OSCILLATIONS OF FACULAR FORMATIONS ON THE SUN

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

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

²St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russia

Аннотация. Исследованы одиночные мелкомасштабные магнитные структуры в солнечной фотосфере, так называемые факельные образования. На основании наблюдений магнитных полей долгоживущих факельных образований, полученных с космического аппарата SDO, исследованы длительные квазипериодические вариации с периодами в диапазоне 25–230 мин. Выявлены статистически значимые моды колебаний для каждого интересующего объекта. Все найденные значимые моды классифицированы на 3 типа. Предложены два подхода к аналитическому описанию полученных значимых мод этих типов. В соответствии с каждым подходом были подобраны численные параметры, качественно описывающие зарегистрированные колебания.

Ключевые слова: магнитное поле Солнца, колебания, мелкомасштабные магнитные структуры.

Abstract. Single small-scale magnetic structures in the solar photosphere, the so-called facular formations, have been studied. Based on observations of the magnetic fields of long-lived facular formations obtained from the SDO spacecraft, long quasi-periodic variations with periods in the range of 25–230 minutes were investigated. Statistically significant oscillatory modes for each object of interest are revealed. All found significant modes are classified into 3 types. Two approaches to the analytical description of the obtained significant modes of each type are proposed. In accordance with each approach, numerical parameters that qualitatively describe the recorded oscillations were selected.

Keywords: Solar magnetic field, oscillations, small-scale magnetic structures.

ВВЕДЕНИЕ

Объектами исследования являются факельные образования (ФО) — уединенные, долгоживущие, устойчивые магнитные структуры, наблюдаемые в фотосфере и имеющие свои проявления в хромосфере. Такие ФО не принадлежат к активным областям. Их время жизни часто составляет от нескольких часов до нескольких десятков часов, характерный размер варьируется от 1500 до 4000 км, а абсолютные значения максимальной напряженности магнитного поля составляют 400–1100 Гс [Strekalova et al., 2016].

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Мы анализируем изменения сигнала магнитограмм, полученных аппаратом SDO/HMI. Данные выбирались за время, в течение которого ФО сохраняли свою относительную целостность на магнитограмме и были наиболее стабильны. Инструмент HMI наблюдает полный солнечный диск на длине волны λ 6173 Å с пространственным разрешением в 1" и максимальным временным разрешением 45 с. Длина временных рядов, использованных для исследования вариаций магнитного поля, зависела от времени жизни каждого ФО. Для выявления колебательных мод в сигнале использовался метод EMD [Nagovitsyn, 1997; Huang et al., 1998], в основе которого лежит разложение сигнала на эмпирические моды. Преимущество данного метода для анализа

нелинейных и нестационарных колебаний состоит в том, что данный метод не имеет базиса разложения, следовательно, не вносит никаких искажений в исследуемый сигнал. Далее с помощью метода, описанного в работе [Kolotkov et al., 2016], полученные колебательные моды проверялись на принадлежность к цветным шумам: белому, красному и розовому. Моды, лежащие выше доверительных интервалов цветных шумов, считались значимыми [Strekalova et al., 2018].

Во всех исследованных случаях, где максимальное магнитное поле превышало 500 Гс, было обнаружено по одной значимой моде одного из трех типов:

- 1) период и амплитуда растут со временем;
- 2) период и амплитуда уменьшаются со временем;
- 3) режимы возрастания и убывания амплитуды и периода сменяют друг друга.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Нашей целью было предложение аналитической модели колебания, адекватно описывающей все типы наблюдаемых значимых колебательных мод. Для этого было использовано два подхода:

Первый подход описан в статье [Solov'ev et al., 2019] и заключался он в рассмотрении ФО как системы с переменной жесткостью и решения уравнения малых линейных колебаний при наличии трения (демпфирования):

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

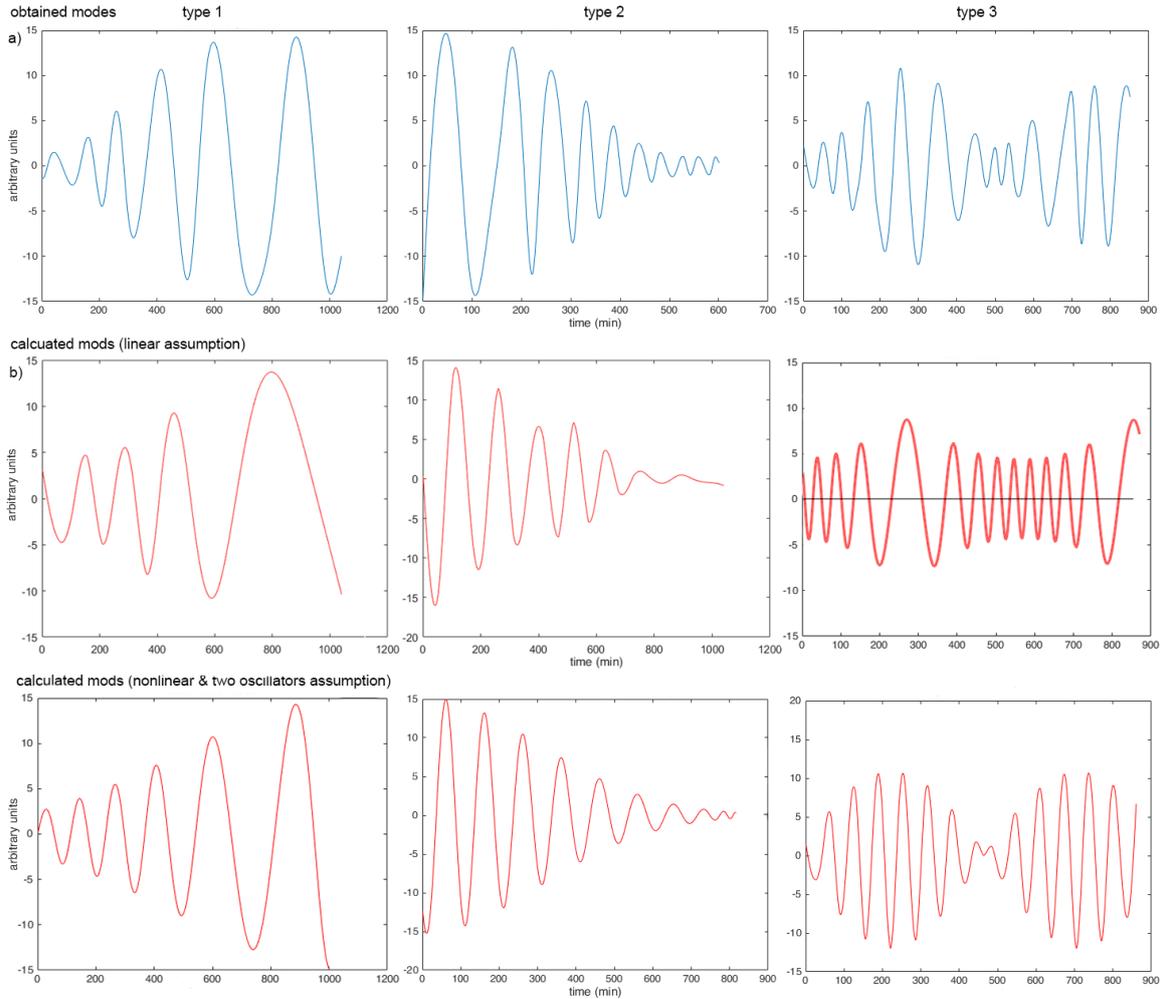


Рис. 1. *a* — примеры полученных из сигнала магнитограмм значимых колебательных мод первого, второго и третьего типа соответственно; *b* — линейные колебания, описывающие характер наблюдаемых мод каждого типа; *c* — нелинейные колебания, описывающие наблюдаемые моды 1 и 2 типа и биения в системе двух осцилляторов со слабой связью для описания мод 3 типа соответственно

где $W(t)$ — зависящая от времени эффективная упругость системы (возвращающая сила, рассчитанная на единицу массы). Было получено решение:

$$x(t) = A_0 \exp[(\gamma - \beta)t] \cos[(\omega_0/2\gamma) \exp(-2\gamma t) + \varphi], \quad (2)$$

где A_0 — амплитуда колебаний, γ — инкремент ее возрастания, ω_0 — начальная частота, β — коэффициент трения, φ — фаза.

С помощью изменения параметров β , γ , ω_0 и φ были подобраны функции, достаточно хорошо описывающие колебания 1 и 2 типа (пример на рисунке, панель *b*). Однако для описания колебаний 3 типа мы были вынуждены либо собирать кусочную функцию из частей с разными начальными параметрами, либо в рамках механической аналогии переходить к альтернативному выражению возвращающей силы, вводя параметр, определяющий модуляцию амплитуды. Однако эти подходы не обеспечивали достаточного соответствия наблюдаемому колебанию.

Поэтому имеет смысл рассмотреть второй подход, основанный на фитинге значимых мод с последующей физической интерпретацией.

Исходя из предположения о нелинейности колебаний, мы взяли выражение колебаний:

$$x(t) = A \sin((2\pi/T)t + \varphi), \quad (3)$$

после чего предположили, что амплитуда изменяется по Гауссу:

$$A = A_0 \exp(-(t-t_0)^2/2c^2) \quad (4)$$

и использовали для связи амплитуды и периода соотношение, полученное в статье [Kolotkov et al., 2017] для одного из наших объектов, который имел значимую моду 1 типа:

$$T = dA^p + b, \quad (5)$$

где d , p , b — константы.

Далее мы подобрали численные значения параметров для колебаний 1 и 2 типа. Примеры приведены на рисунке, панель *c*, 1 и 2 графики. Однако случай биений все же требует отдельного рассмотрения. Для него мы использовали приближение системы двух линейных осцилляторов со слабой связью, рассматривая колебания системы как суперпозицию

двух колебаний с близкими частотами. Одним из известных решений уравнений движения для такой системы является уравнение:

$$x(t) = 2A \sin \omega_a t \sin \omega_b t, \quad (6)$$

где ω_a — средняя частота колебаний системы, а ω_b — частота изменения амплитуды. Пример представлен на рисунке, панель *c*, третий график.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

И линейный, и нелинейный подходы могут описать колебательные моды, полученные из сигнала магнитограмм ФО для мод 1 и 2 типа, однако нелинейный подход с введением степенной зависимости точнее фитирует форму наблюдаемых колебаний. Вопрос о физике процесса пока остаётся открытым. Можно предположить, что «легкие» ФО испытывают толчки со стороны более массивных динамических структур, например, супергранул, а возвращающимися являются горизонтальные магнитные силы магнитных трубок ФО. Случай с биениями достаточно хорошо описывается системой двух слабосвязанных осцилляторов. Это может говорить о воздействии на ФО внешних объектов, колеблющихся на близких частотах, или о взаимодействии относительно слабо связанных структур внутри ФО (магнитные трубки из которых состоят ФО). Нашей первостепенной целью было предложить наиболее простую аналитическую модель, достаточно адекватно описывающую наблюдаемые явления. Однако реальная физика колебательных процессов, происходящих в магнитном поле факельных образований, очевидно, гораздо более сложна. Анализируя полученные результаты можно предположить, что колебательная система слабонелинейная и гораздо более точно может быть описана с помощью уравнения Дуффинга:

$$x + k\ddot{x} + \omega^2 x + \alpha x^3 = F \cos \omega t, \quad (7)$$

Это уравнение представляет собой пример системы с нелинейной восстанавливающей силой и затуханием, совершающей вынужденные колебания при гармоническом внешнем воздействии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-02-00088, 18-32-00555, 18-02-00168) и программы РАН № 12.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Strekalova P.V., Nagovitsyn Y.A., Riehoakainen A., Smirnova V.V. Long-Period Variations in the Magnetic Field of Small-Scale Solar Structures // *Ge&A*. 2016. V. 56. P. 1–8.
- 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.
- Nagovitsyn Y.A. A nonlinear mathematical model for the solar cyclicity and prospects for reconstructing the solar activity in the past // *Astronomy Lett. Nov.* 1997. V. 23, iss. 6. P. 742–748.
- 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. A153. 9 p.
- 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, N 7. P. 893–898.
- Solov'ev A.A., Strekalova P.V., Smirnova V.V., Riehoakainen A. Eigen oscillations of facular knots // *Astroph. Space Sci*. 2019. V. 364, iss. 2, id. 29. 8 p.
- 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 // *A&A*. 2017. V. 598, id L2. 4 p.