ФОРМА СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ И СРЕДНЕСРОЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Шибалова А.С.^{1,2,3}, Обридко В.Н.¹, Пипин В.В.⁴, Соколов Д.Д.^{1,2,3}

¹ИЗМИРАН, Москва, Троицк, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

³Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

⁴ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия

SHAPE OF SOLAR CYCLES AND MID-TERM SOLAR ACTIVITY OSCILLATIONS

Shibalova A.S.^{1,2,3}, Obridko V.N.¹, Pipin V.V.⁴, Sokoloff D.D.^{1,2,3}

¹IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

²Department of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³Moscow Center of Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia

⁴ISTP SB RAS, Irkutsk, Russia

The evolution of the solar activity comprises, apart from the well-known 11-year cycle, various temporal scales ranging from months up to the main cycle known as mid-term oscillations. Its nature deserves a physical explanation. In this work, we have considered 5-to-6 year oscillations as derived both from sunspot data and from the data on the solar magnetic dipole. Data rows have been examined by Fourier and wavelet analyses. We have compared results of the computations with some dynamo models to find out an origin of the oscillations. The model to have been taken into consideration is developed enough to include the non-axisymmetric solar magnetic field. At the same time it is relatively simple for computation.

Five years is about half the duration of the solar cycle and magnetic force affecting the dynamo efficiency is quadratic. Hence a possible explanation is connected with turbulent cascade or any resembling process. Observational data shows the existence of quasi-sexennial oscillations both in the sunspot-number time series and in the global magnetic field of the Sun (solar axial dipole evolution). Using the solar dynamo model, we have found out that these variations may be a manifestation of the dynamo nonlinearities and non-harmonic shape of the solar activity cycle. We have concluded that the mid-term oscillations observed are related to the nonlinear saturation of the dynamo processes in the solar interior.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-365-368

Помимо хорошо известного 11-летнего цикла во временной эволюции солнечной активности наблюдаются изменения с меньшими характерными временами. В данной работе мы рассматривали вариации длительностью 5–6 лет (далее будем называть их квазишестилетними колебаниями). Поиск шестилетних вариаций производился для данных по числу солнечных пятен и по напряженности основной гармонике магнитного поля на поверхности Солнца (поле магнитного диполя). Такой выбор данных позволяет отслеживать эволюцию тороидального и полоидального магнитного поля, поскольку солнечные пятна являются трасерами — тороидального поля, а магнитный диполь — полоидального. Возможное теоретическое объ-

яснение возникновения квазишестилетних колебаний — проявление турбулентного каскада или некоторого сходного с ним процесса. Развитие этой идеи и легло в основу проведенного исследования.

Среднемесячные значения числа пятен взяты из данных Бельгийской Королевской обсерватории (WDC-SILSO) на интервале 1749–2019 гг. (версия 2). Напряженность магнитного поля вычислялась на основе данных измерения радиального магнитного поля Стэнфордской обсерватории Дж. Уилкокса (WSO) за промежуток от 1642 кэррингтоновского оборота (май 1976) до 2210 оборота (ноябрь 2019). Для расчета использовалось потенциальное приближение (соответствующий метод описан в [1], [2]).

Для исследования использовался анализ Фурье и вейвлет-анализ. При объяснении и интерпретации результаты сравнивались с расчетами для модели динамо.

Рис. 1. Интегральный вейвлет-спектр для числа солнечных пятен.

Интегральный вейвлет-спектр для ряда числа солнечных пятен демонстрирует главный максимум на 11-летнем периоде и небольшое поднятие в районе значения 5-6 лет. Похожий результат дает классический Фурье-анализ: доминирует максимум, соответствующий 11-летнему циклу, однако присутствует и дополнительный пик около 6-летнего периода. Построение вейвлет-плоскости показывает, что квазишестилетние колебания заметны только во время максимумов солнечной активности.

Рис. 2. Интегральные вейвлет-спектры для солнечного диполя, левая панель — данные наблюдений, правая панель — модель динамо

При исследовании главного магнитного поля Солнца спектры строились отдельно для аксиального и экваториального диполя. В спектре аксиального диполя максимум в районе 5 лет является более выраженным, чем для солнечных пятен, а в спектре экваториального диполя отсутствует. Это явление объяснимо, если вспомнить, что в механизме динамо участвует тороидальное поле и осесимметричная часть полоидального поля, а экваториальный диполь может не участвовать в циклическом изменении поля.

Квазишестилетние колебания ярче выражены в вариациях магнитного диполя, чем в изменении числа солнечных пятен. Это явление может быть связано с особенностями генерации магнитного поля и его эволюцией при формировании биполярных областей. Другое возможное объяснение — различие в длине рядов данных. Данные для солнечных пятен доступны для значительно большего интервала времени, поэтому для них возможно «размывание» коротких циклов из-за наличия долгопериодических вариаций их периодов.

Выбор модели динамо определялся необходимостью воспроизведения одновременно симметричных и асимметричных деталей магнитного поля. В работе использован упрощенный вариант модели, предложенной в [3]. Динамо возбуждается в тонком слое в глубине конвективной зоны, возникновение биполярных активных областей воспроизводится с помощью магнитной плавучести.

В качестве исследуемых величин выступают среднее значение модуля симметричного тороидального магнитного поля и полный поток радиального магнитного поля (берется абсолютное значение поля).

Интегральный вейвлет-спектр для аксиального диполя, полученный в рамках модели, содержит главный максимум 11-летний максимум и локальный максимум около 5 лет; спектр для экваториального диполя не имеет 5-летнего максимума.

При моделировании рассматривался случай очень малых начальных значений магнитного поля. Квазишестилетние колебания становятся заметными позже возникновения 11-летнего цикла, после окончания нелинейного роста магнитной энергии и выхода динамо на стационарный режим. Таким образом, квазишестилетние осцилляции могут рассматриваться как проявление нелинейности.

5-6-летние изменения по форме далеки от строго периодического гармонического сигнала и имеют малую амплитуду по сравнению с 11-летними колебаниями уровня активности. Если рассматривать полный поток радиального магнитного поля вместо тороидальной компоненты, в интегральном вейвлет-спектре максимум, соответствующий 6-летнему периоду, незаметен. Вейвлет-плоскость для полного потока показывает наличие вариаций с периодами от 2 до 6 лет, причем 5-летние колебания возникают преимущественно вблизи моментов, где полный поток минимален.

В рамках рассмотренной модели эволюция аксиального диполя и плотности потока тороидального магнитного поля содержит квазишестилетние колебания только при нелинейных динамо-процессах. Изменения в колебаниях поля аксиального диполя могут рассматриваться как результат нелинейного динамо процесса.

По результатам исследования можно заключить, что квазишестилетние колебания присутствуют и в значениях числа солнечных пятен, и в данных о дипольной составляющей магнитного поля Солнца. Возможная причина этих колебаний — нелинейность и асимметрия цикла динамо в глубинных слоях конвективной зоны Солнца. Длительность цикла может меняться, что связано с долгопериодическими вариациями в работе динамо и с характерными временами формирования солнечных пятен.

Работа поддержана проектами РФФИ № 20-02-00150, 19-52-53045. Численное моделирование выполнено в рамках проекта ФИ П.16 ИСЗФ СО РАН.

Литература

1. *Hoeksema J.T.* // 1991, in BAAS, pp.679–683
2. *Hoeksema J.T., Scherrer P.H.* // 1986, WDCA Report UAG-94, NGDC, Boulder, CO
3. *Pipin V.V., Kosovichev A.G.* // 2018, ApJ, 867, 145
4. *Sokoloff D.D., Shibalova A.S., Obridko V.N., Pipin V.V.* // 2020, MNRAS, 497, 4376