

ФЛУКТУАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМО КАК ВОЗМОЖНАЯ ПРИЧИНА ДОЛГОВРЕМЕННОЙ СЕВЕРО-ЮЖНОЙ АСИММЕТРИИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

А.А. Непомнящих

Институт солнечно земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
nep_a@iszf.irk.ru

FLUCTUATIONS OF DYNAMO PARAMETERS AS A POSSIBLE CAUSE OF LONG-TERM NORTH-SOUTH ASYMMETRY OF SOLAR ACTIVITY

A.A. Nepomnyashchikh

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
nep_a@iszf.irk.ru

Аннотация. Наблюдаемая северо-южная асимметрия активности солнечных пятен имеет регулярную компоненту, изменяющуюся в масштабе времени нескольких солнечных циклов, происхождение и свойства которой в настоящее время широко обсуждаются. В работе рассматривается вопрос о том, может ли долговременная северо-южная асимметрия быть результатом случайных изменений параметров солнечного динамо во времени и широте. Модель динамо с флуктуациями α -эффекта типа Бэбкока–Лейтона используется для вычисления большого числа магнитных циклов для статистического анализа их северо-южной асимметрии. Северо-южная асимметрия в моделируемом динамо обусловлена наличием экваториально-симметричной части в изменяющемся магнитном поле. Субдоминантные квадрупольные флуктуации стохастически вызываются доминирующими дипольными флуктуациями через экваториально-симметричную часть флуктуирующего α -эффекта. Амплитуда и знак асимметрии отдельных циклов изменяются в масштабе времени порядка четырех периодов циклов. Изменения нерегулярны, то есть не периодические. Модель предполагает, что асимметрия в полярных магнитных полях в солнечных минимумах может быть использована в качестве предвестника асимметрии активности солнечных пятен в следующем солнечном цикле.

Ключевые слова: динамо, активность, магнитные поля.

Abstract. The hemispheric asymmetry of sunspot activity observed possesses a regular component varying on a time scale of several solar cycles whose origin and properties are currently debated. This paper addresses the question of whether the long-term hemispheric asymmetry can result from random variations of solar dynamo parameters in time and latitude. A dynamo model with fluctuations in the Babcock–Leighton type α -effect is used to compute a large number of magnetic cycles for statistical analyses of their hemispheric asymmetry. Hemispheric asymmetry in the simulated dynamo results from the presence of an equator-symmetric part in the oscillating magnetic field. The subdominant quadrupolar oscillations are stochastically forced by dominant dipolar oscillations via the equator-symmetric part of the fluctuating α -effect. The amplitude and sense of the asymmetry of individual cycles varies on a time scale of the order of four dynamo-cycle periods. The variations are irregular, i.e. not periodic. The model suggests that asymmetry in the polar magnetic fields in the solar minima can be used as a precursor for asymmetry of sunspot activity in the following solar cycle.

Keywords: dynamo – Sun, activity – Sun, magnetic fields.

ВВЕДЕНИЕ

Неравномерное распределение солнечных пятен и других проявлений магнитной активности относительно солнечного экватора известно давно [Spörer, Maunder, 1890]. Происхождение северо-южной асимметрии до сих пор остается предметом дискуссий [см. Norton et al., 2014; Hathaway, 2015; Schussler, Cameron, 2018; и ссылки в них]. Усредненная по солнечному циклу асимметрия демонстрирует согласованность в течение нескольких циклов активности. Солнечные динамо-модели допускают решения смешанной четности, если они содержат достаточно сильные нелинейности или случайные широтные изменения параметров модели. Однако, наблюдательная гирохронология звезд солнечного типа показывает, что солнечное динамо является лишь слабо закоррелированным и поэтому слабо нелинейным [van Saders et al., 2016].

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Для исследования долговременной северо-южной асимметрии, вызванной кратковременными изменениями параметров солнечного динамо, используется согласованная модель среднего поля

α -динамо, подробно описанная в работе [Кичатинов, Непомнящих, 2017], дополненная стохастическими флуктуациями α -эффекта. Слабо нелинейная модель динамо создает поля чистой дипольной четности, когда альфа-эффект регулярен или включает случайные флуктуации только во времени. Учет случайных вариаций в пространстве нарушает экваториальную симметрию. Для оценки амплитуды и степени когерентности северо-южной асимметрии в соседних магнитных циклах была вычислена и проанализирована статистика, состоящая из 4000 магнитных циклов.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Магнитные поля модели динамо можно рассматривать как суперпозицию дипольного поля, объединяющую экваториально-несимметричную часть тороидального поля с экваториально-симметричным потенциалом. Модель в конечном итоге сходится к дипольному полю независимо от четности начального поля. Определим конец магнитного цикла и начало следующего цикла как момент обращения знака дипольной части придонного тороидального

поля, расположенного на широте 15° , где тороидальное поле достигает своего наибольшего значения. Соответственно, максимум цикла определяется в момент самого сильного поля в данном цикле. Северо-южная асимметрия была оценена в расчетах по своему относительному значению,

$$A_t = \frac{B^2(15^\circ) - B^2(-15^\circ)}{B^2(15^\circ) + B^2(-15^\circ)}, \quad (1)$$

для придонного тороидального поля в максимумах циклов.

Еще одна мера асимметрии,

$$A_p = \frac{B_r^2(90^\circ) - B_r^2(-90^\circ)}{B_r^2(90^\circ) + B_r^2(-90^\circ)}, \quad (2)$$

оценивается с помощью поверхностного полярного поля B_r в минимумах циклов. Другая мера экваториальной четности, традиционно используемая в моделировании динамо, связана с полной магнитной энергией ($E=E_q+E_d$), которая включает энергию компонентов дипольного (E_q) и квадрупольного (E_d) полей:

$$P=(E_q-E_d)E^{-1} \quad (3)$$

На рис. 1 показан характерный фрагмент параметров асимметрии для вычисляемых циклов 200–300. Среднеквадратичная четность и ее мгновенные значения в максимумах циклов близки друг к другу. Таким образом, четность мало меняется в ходе вычислений отдельных циклов. Отрицательное соотношение показывает преобладание дипольной части поля. Асимметрия полярного поля в начале цикла тесно связана с асимметрией тороидального поля в максимумах цикла. Известно, что амплитуды солнечных циклов предопределяются напряженностью полярного поля в предыдущих минимумах активности [Schatten et al., 1978; Choudhuri et al., 2007].

Модельные расчеты показывают, что экваториально-симметричная часть флуктуаций α -эффекта могут приводить к северо-южной асимметрии дина-

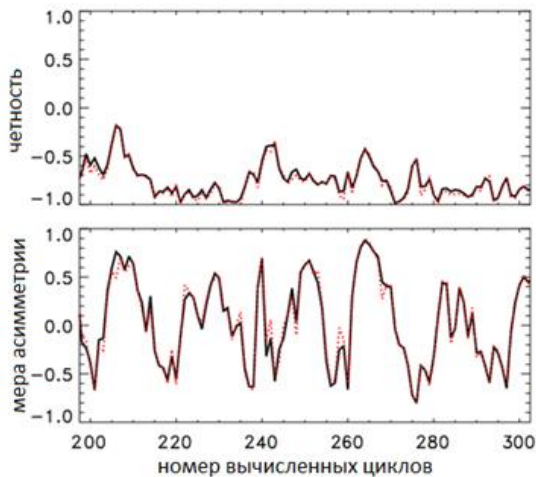


Рис. 1. Вверху: Усредненная по времени четность отдельных циклов (сплошная линия) и мгновенные значения четности (3) в максимумах циклов (пунктирная) как функции вычисленного числа циклов. Внизу: меры асимметрии по выражению (1) тороидального поля для максимумов циклов (сплошная линия) и асимметрии по выражению (2) полярных полей в начале цикла (пунктирная)

мических полей. Положительные флуктуации приводят к тому, что квадрупольная часть поля синхронизируется по фазе с дипольной, тем самым приводя к асимметрии. Под влиянием отрицательных флуктуаций дипольные и квадрупольные части поля сдвигаются по фазе, что приводит к изменению знака асимметрии.

Рисунок 1 показывает также, что несколько соседних циклов имеют тенденцию сохранять асимметрию одного вида. Вычисленные циклы 261–281, например, показывают асимметрию северного типа в первых десяти циклах и асимметрию южного типа в последних десяти циклах. Долгосрочная когерентность асимметрии и ее возможная периодичность могут быть проверены путем вычисления ее корреляционных функций:

$$C_t(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=1}^{N-m} A_t(n) A_t(n+m), \quad (4)$$

$$C_p(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=1}^{N-m} A_p(n) A_p(n+m). \quad (5)$$

Вычисленные функции достаточно точно аппроксимируются экспоненциальным законом $\exp(-m/m_c)$. Число когерентности $m_c = 4.28$ означает, что знак асимметрии сохраняется в среднем около 4 последовательных циклов. Периодичность вариаций асимметрии может привести к изменению корреляций на отрицательные значения с ростом m . Отсутствие такого обращения знака на рисунке 2 означает, что асимметрия в модели не является периодической.

Сходство асимметрий полоидального и тороидального полей на рис. 1 и 2 указывает на их корреляцию. Рисунок 3 подтверждает, что асимметрия полоидального поля в минимумах циклов и асимметрия тороидального поля в максимумах следующих циклов тесно взаимосвязаны. Коэффициент корреляции для графика на рисунке 3 составляет $r = 0.98$. Корреляция, предсказанная моделью, если она будет подтверждена наблюдениями, может иметь определенное прогностическое значение. Амплитуды солнечного цикла можно предсказать по измененным значениям крупномасштабных полярных полей предыдущих минимумов [Choudhuri et al., 2007; Hathaway, Upton, 2016]. Корреляция на рис. 3 позволяет предположить, что северо-южная асимметрия также может быть предсказана из тех же измерений.

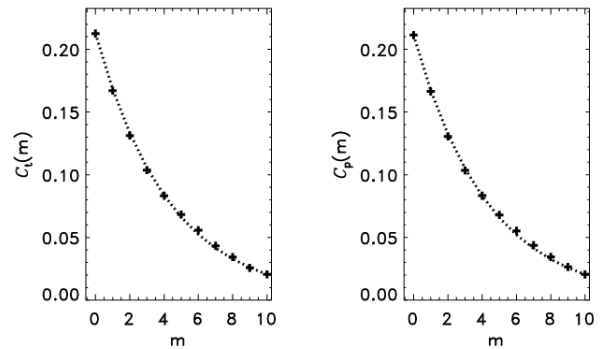


Рис. 2. Корреляционные функции асимметрии (4) и (5). Пунктирные линии показывают приближение по экспоненциальному закону $\exp(-m/m_c)$ ($m_c = 4.28$)

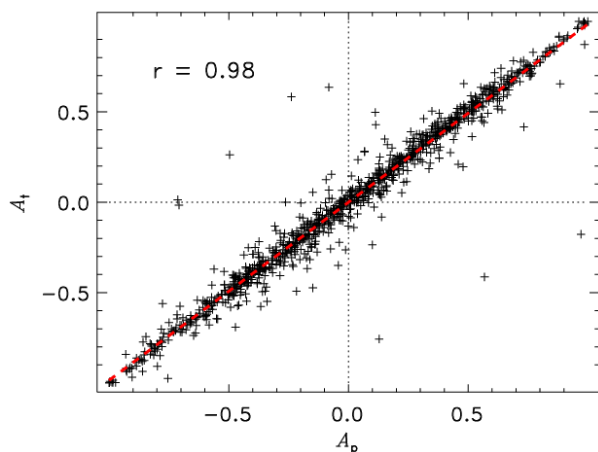


Рис. 3. Положения магнитных циклов модели динамо на координатной плоскости асимметрии тороидального поля по уравнению (1) максимумов циклов и асимметрии полярного поля (2) предыдущих минимумов. Пунктирная линия показывает наилучшее линейное приближение

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная модель динамо показывает, что широтно-временные флуктуации α -эффекта приводят к длительной по сравнению со временем флуктуаций северо-южной асимметрии моделируемых магнитных циклов. Физическим механизмом этой асимметрии является возбуждение субдоминантной квадрупольной динамо-моды доминирующей дипольной модой через экваториально-симметричную часть флуктуирующего α -эффекта. Статистический анализ вычисленных магнитных циклов показывает, что знак и амплитуда асимметрии изменяются нерегулярно на характерном временном интервале в несколько (около четырех) циклов, но вариации непериодические. Анализ показывает, что северо-южная асимметрия циклов солнечной активности может быть предсказана по асимметрии полярного магнитного поля предыдущих минимумов активности.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16 и при поддержке гранта РФФИ № 17-02-00016.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кичатинов Л.Л., Непомнящих А.А. Согласованная модель солнечного динамо и дифференциального вращения // Письма в *Астрономический журнал*. 2017. Т. 43, № 5. С. 332–343.
- Choudhuri A.R., Chatterjee P., Jiang J. Predicting Solar Cycle 24 With a Solar Dynamo Model // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 98, iss. 13. id. 131103.
- Hathaway D.H. The Solar Cycle // *Living Rev. Solar Phys.* 2015. V. 12, iss. 1. id. 4.
- Hathaway D.H., Upton L.A. Predicting the amplitude and hemispheric asymmetry of solar cycle 25 with surface flux transport // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. V. 121, iss. 11. P. 10.
- Norton A.A., Charbonneau P., Passos D. Hemispheric Coupling: Comparing Dynamo Simulations and Observations // *Space Sci. Rev.* 2014. V. 186, iss. 1-4. P. 251–283.
- van Saders J.L., Ceillier T., Metcalfe T.S., et al. Weakened magnetic braking as the origin of anomalously rapid rotation in old field stars // *Nature*. 2016. V. 529, iss. 7585. P. 181–184.
- Schatten K.H., Scherrer P.H., Svalgaard L., Wilcox J.M. Using dynamo theory to predict the sunspot number during solar cycle 21 // *Geophys. Res. Lett.* 1978. V. 5. P. 411–414.
- Schussler M., Cameron R.H. Origin of the hemispheric asymmetry of solar activity // *Astron. Astrophys.* 2018. V. 618, id. A89.
- Spoerer F.W.G., Maunder E.W. Prof. Spoerer's researches on Sun-spots // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1890. V. 50. P. 251.