ЦИКЛИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ ЗОНАЛЬНЫХ ГАРМОНИК СОЛНЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

**Обридко В.Н.^{1,5}, Соколов Д.Д.^{1,2,4}, Пипин В.В.³,
Шибалова А.С.^{1,2,4}, Лившиц И.М.¹**

¹ИЗМИРАН, Троицк, Москва, Россия

²МГУ имени Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

³ИСЗФ РАН, Иркутск, Россия

⁴Московский Центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

⁵ГАО РАН, Пулковское, Санкт-Петербург, Россия

CYCLIC VARIATIONS IN ZONAL HARMONICS OF THE SOLAR MAGNETIC FIELD AND PROBLEMS OF PREDICTION OF SOLAR ACTIVITY

**Obridko V.N.^{1,5}, Sokoloff D.D.^{1,2,4}, Pipin V.V.³,
Shibalova A.S.^{1,2,4}, Livshits I.M.¹**

¹IZMIRAN, Troitsk, Moscow, Russia

²Physical Faculty of the Moscow State University, Moscow, Russia

³Institute of Solar-Terrestrial Physics RAS, Irkutsk, Russia

⁴Moscow Center of Fundamental and Applied Mathematics, Russia

⁵Main Astronomical Observatory RAS, Pulkovo, St.-Petersburg, Russia

According to the scheme of action of the solar dynamo, the poloidal magnetic field can be considered a source of production of the toroidal magnetic field by the solar differential rotation. From the polar magnetic field proxies, it is natural to expect that solar Cycle 25 will be weak as recorded in sunspot data. We suggest that there are parameters of the zonal harmonics of the solar surface magnetic field, such as the magnitude of the harmonic $l = 3$ or the effective multipole index, that can be used as a reasonable addition to the polar magnetic field proxies. The global minimum of solar activity was reached in Cycles 23-24, and Cycle 25 is likely to be close in height to Cycle 24.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-207-212

1. Введение

Строго говоря, все методы прогнозирования более или менее обоснованно можно отнести к одной из двух групп. Первую группу можно условно назвать математической или, точнее, статистической. В этом случае прогнозист выбирает индекс солнечной активности (обычно число солнечных пятен – SSN) и расширяет выбранный ряд на один или несколько 13 циклов вперед различными статистическими методами. Принципиально иная группа прогнозов основана на понимании процессов генерации магнитного поля на Солнце. Согласно теории солнечного динамо, развитой Паркером в 1955 г., цикл солнечных пятен представляет собой колебание между тороидальной и полоидальной составляющими. В солнечном дина-

мо участвуют два процесса: генерация тороидального поля из полоидального и регенерация полоидального поля нового цикла с противоположной полярностью от этого тороидального поля.

Подробная классификация методов прогнозирования дана в [1], где разделяются климатологические, предвестники, теоретические (динамо-модель), спектральные, нейросетевые и методы прогнозирования фондового рынка. Все методы прогнозирования в целом можно разделить на методы-предвестники и статистические (включая большинство приведенных выше классификаций) или их комбинации [2, 3]. Тот факт, что предсказание солнечного цикла не улучшилось с добавлением 22 дополнительных данных (новый солнечный цикл), предполагает, что все современные методы не могут дать надежные прогнозы (см., например, современный обширный обзор Нанди [4]).

Нам представляется, что точное указание высоты цикла не имеет особого смысла. Смешно говорить о высоте цикла (как измеренного, так и прогнозируемого) с указанием единиц чисел пятен, когда точность прогноза (и это хорошо видно на диаграмме в работе Нанди), как правило, не превышает 10–15%. Нам представляется, что простое указание на тенденцию и сравнение с предыдущим циклом содержит всю достоверную информацию.

В настоящей работе, которая использует некоторые результаты из недавно вышедшей работы [5], мы не стремимся дать определенный прогноз 25 цикла, а хотим указать на некоторые характерные особенности в циклической вариации зонального крупномасштабного поля, которые могут быть полезны при оценке ситуации в современный переходный период эволюции солнечной активности.

2. Циклические вариации зональных гармоник

На рис. 1 показан вклад каждой из гармоник с 1 по 9 ($l = 1-9$) на поверхности фотосферы. Гармоники с номерами $l = 0$ и $l > 9$ носят шумовой характер и в данной работе не рассматривались. Слева на рис. 1a показан вклад с азимутальной составляющей, на рис. 1b сохранен вклад только осесимметричного поля, на рис. 1c. показана циклическая вариация нечетных зональных гармоник.

Видно, что в периоды максимумов присутствуют гармоники всех видов, четные и нечетные вплоть до высоких значений l . Постепенно с общим понижением высот циклов происходит постепенное вымирание высоких гармоник. В минимумах циклов полностью исчезают четные гармоники, нечетные гармоники с $l = 1, 3, 5$ хорошо видны в минимуме 21 цикла (1986 г.). Они все еще довольно сильны в минимуме 22 цикла (1996 г.) и совершенно не заметны в минимуме 23 цикла (2008 г.). Это указывает на постепенный спад общего потока крупномасштабного поля, что отражается в хорошо известном спаде полярного поля (см. верхнюю панель рисунка 1с).

Рис. 1.

Любопытно, что это постепенное ослабление нечетных гармоник в минимумах циклов прекращается в минимуме 24 цикла (2018–2019 гг.), что отражается и в приостановке спада полярного поля.

Рис. 2.

Все эти эффекты еще более четко выражены, когда мы рассматриваем только осесимметричные (зональные гармоники). Здесь четные гармоники практически не видны вообще, постепенный спад значений в минимумах и новое усиление в конце 24 цикла более заметны.

Сходство первых нечетных зональных гармоник особенно подчеркивается на рис. 2, где просуммированы гармоники 1 и 3 ($m = 0$, тонкая линия) и показано непосредственно измеренное полярное поле (толстая сглаженная линия). Поскольку к непосредственному измерению полярного поля есть целый ряд претензий (измеряется не радиальная компонента, а поле вдоль луча зрения, есть определенный вклад вращения Земли вокруг Солнца, поле измеряется на пределе чувствительности прибора), наши расчеты, опирающиеся на совокупность измерений на всем диске Солнца, имеют некоторое преимущество и могут быть использованы для прогнозирования следующего цикла.

Возвращаясь теперь к рис. 1с, обратим внимание на то, что гармоника $l = 5$ ведет себя совершенно иначе. Максимумы этой гармоники наблюдаются за 1–2 года до переполюсовки и, соответственно, до фазы максимума числа пятен. Физический смысл гармоники $l = 5$ иллюстрирует рис. 3, на котором показано магнитное поле одного из оборотов в 1998 г. В нем

устранены все другие гармоники, кроме $l = 5$ (учтены все гармоники с этим l , не только зональные).

Рис. 3.

Рис. 4.

Толстыми линиями показаны изолинии северной полярности, тонкими – южной. Видно, что крупномасштабное магнитное поле распадается на полосы. В северной полусфере идут полосы северной, южной и снова северной полярности. В южной также три полосы, соответственно, противоположной полярности.

Экстремумы гармоники $l = 5$ иллюстрируют специфическое свойство наложения 11-летних циклов по времени.

На рис. 4 представлены данные о магнитном поле (светлые элементы соответствуют северной полярности; темные – южной), на который нанесены вертикальными толстыми линиями максимумы пятой гармоники из рис. 3. Видно, что эти максимумы соответствуют кратковременной ситуации, когда на Солнце в каждом полушарии возникают две волны нового цикла, но в полярной зоне все еще продолжает существовать волна предыдущего цикла. От нашей отметки до полной полярной переполюсовки как раз 1–2 года.

3. Индексы глобального поля

Мы можем вычислить среднеквадратичную радиальную составляющую магнитного поля на сфере радиуса R [6, 7]. Ниже даны формулы для фотосферы и поверхности источника R_S .

$$i(B_r)|_{R_0} = \sum_{lm} \frac{(l+1+l\zeta^{2l+1})^2}{2l+1} (g_{lm}^2 + h_{lm}^2), \quad (1)$$

$$i(B_r)|_{R_S} = \sum_{lm} (2l+1)\zeta^{2l+4} (g_l m^2 + h_l m^2), \quad (2)$$

где $\zeta = R_0/R_S$. В наших расчетах $\zeta = 0.4$. Мы можем рассчитать эти показатели отдельно для осесимметричных или неосесимметричных компонент; т.е. положить $m = 0$ или $m \neq 0$ в уравнениях (1) и (2). Эти кривые показаны на рис. 5 для фотосферы (слева) и для поверхности источника (справа). Все значения даны в микротеслах в квадрате.

Рис. 5.

Все индексы показывают постепенный спад в соответствии с общим спадом солнечной активности в течение последних 40 лет. Но в осесимметричном магнитном поле ($m = 0$) обнаруживается удивительная странность – 23 цикл на уровне фотосферы чрезвычайно слаб, его как бы и вовсе нет. А ведь именно из этого полоидального поля, по основной концепции динамо, и должно было строиться тороидальное поле следующего цикла. Неудивительно, что 24 цикл оказался таким слабым.

4. Индекс эффективного мультиполя

Индекс эффективного мультиполя был введен нами в [8] и изменяется от 3, когда на Солнце присутствует только дипольное поле, вплоть до 5–6 при наличии более высоких гармоник.

$$I_M = -\frac{1}{2\log 2.5} \log \frac{i(B_r)|_{R_S}}{i(B_r)|_{R_0}} \quad (3)$$

Его тоже можно вычислять как для суммы всех присутствующих гармоник, так и отдельно для осесимметричной и неосесимметричной составляющих. Заметим, что индексы составляющих в соответствии с определением неаддитивны. Их зависимость от времени показана на рис. 6. Снова мы видим, что осесимметричное поле в 23 цикле ведет себя нестандартно.

На рис. 7. циклическая вариация этого индекса рассчитана на основе динамо модели [9, 10]. Верхняя панель – поверхностное (фон) и подповерхностное тороидальное поле. Средняя панель показывает квадрат магнитного поля на фотосфере, его осесимметричную часть и поле на поверхности источника. На нижней панели показаны характеристики индекса эффективного мультиполя.

Рис. 6.

Рис. 7.

5. Дискуссия и выводы

Таким образом, наши результаты показывают, что глобальный минимум солнечной активности был достигнут в циклах 23–24, и цикл 25, вероятно, будет близок по высоте к циклу 24. Зональные гармоники можно использовать для описания и прогноза солнечной активности, а с использованием пятой гармоники можно уточнять за 1–2 года даты переполюсовки и максимума цикла.

Авторы благодарят Министерство науки и высшего образования РФ за финансовую поддержку по программе 075-15-2020-780: договор No. 075-15-2019-1621.

Литература

1. Pesnell W.D. // Sol. Phys., 2008, 252, 209.
2. Hathaway D.H., Wilson R.M., Reichmann E.J. // J. Geophys. Res., 1999, 104, 22375.
3. Hathaway D.H. // Space Sci. Rev. 2009, 144, 401.
4. Nandy D. // Sol. Phys., 2021, 296, 54.
5. Obridko V.N., Sokoloff D.D., Pipin V.V., et al. // JASTP, 2021, 105743.
6. Obridko V.N., Yermakov F.A. // Astronomicheskij Tsirkulyar, 1989, N 1539, 24.
7. Obridko V.N., Shelting B.D. // Sol. Phys., 1992, 137, 167.
8. Ivanov E.V., Obridko V.N., Shelting B.D. // Astron. Rep., 1997, 41, 236.
9. Pipin, V.V. // J. Plasma Phys., 2021, 87, 775870101.
10. Obridko V.N., Pipin V., Sokoloff D., Shibalova A.S. // MNRAS, 2021, 504, 4990.