

ЦИКЛИЧЕСКАЯ ВАРИАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ЭНЕРГЕТИКИ СОЛНЕЧНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

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

¹*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*

²*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*

³*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

⁴*Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия*

CYCLIC VARIATION IN THE STRUCTURE AND ENERGY OF SOLAR MAGNETIC FIELDS

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

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Moscow, Troitsk, Russia*

²*Central Astronomic Observatory RAS, Pulkovo, St. Petersburg, Russia*

³*Dept. of Physics, Moscow Lomonosov State University, Moscow, Russia*

⁴*Moscow Center of Fundamental and Applied Math., Moscow, Russia*

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-239-244>

A comparison of theory with observations, carried out on the basis of a time-latitude diagram for the past 4 cycles has shown the presence of two waves of activity moving towards the pole and one directed towards the equator. A more general description involves the analysis of zonal, sectorial, and tesseral modes. In this work, we have carried out an energy analysis of these modes both at the photosphere and the source surface levels. Their evolution over four cycles is described in detail. All modes were found to display a strong gradual decrease with time. Normalization to the total energy of the magnetic field was performed, after which it turned out that the long-term decline disappears and the internal distribution of harmonics is repeated in every cycle. Therefore, the internal structure of each cycle can be quite adequately described by the classical dynamo theory. It is suggested that the sunspot activity is the result of a combined action of three mechanisms: the classical dynamo, an external modulating factor (or a long-term cycle), and the proper sunspot formation mechanism.

Введение

В недавней работе [1] картина расширенного солнечного цикла дополнена следующими чертами. Исходная парадигма солнечного динамо разумно соответствует описанию 11-летнего цикла солнечной активности с помощью первых двух нечетных зональных гармоник крупномасштабного магнитного поля Солнца. С другой стороны, в рамках концепции расширенного солнечного цикла это описание нуждается в определенной модификации и уточнении. Во время фазы перекрытия на поверхности Солнца сосуществуют три волны активности, что приводит к появлению и усилению нечетной зональной гармоник с $l = 5$.

Подводя итог, можно сказать, что незадолго до инверсии полярного магнитного поля на поверхности фотосферы практически одновременно возникают как крупномасштабные, так и относительно мелкомасштабные магнитные поля. Появившись почти одновременно, поля затем начинают вести себя совсем по-другому. В результате можно увидеть, как над солнечной поверхностью одновременно распространяются две противоположные по полярности волны. Напротив, локальные магнитные поля представляют собой биполярные образования, которые распространяются к экватору. Формально разделение волн обоих типов количественно выражается гармониками с $l = 5$.

1. Энергетические индексы магнитного поля

Для уточнения вклада различных структурных параметров в циклическую эволюцию крупномасштабных полей мы прибегли к методу сферического анализа. Использовались Стэнфордские измерения магнитного поля с разрешением $3'$, полученные с июня 1976 г. по июль 2022 г., то есть за период Кэррингтоновских оборотов №№ 1642—2055 <http://wso.stanford.edu/forms/prsyn.html>.

Для удобства расчетов данные были представлены в виде полиномов Лежандра. Предполагалось, что в сферическом слое от поверхности фотосферы до некоторой фиксированной поверхности, условно называемой поверхностью источника, источники тока отсутствуют, а структура полностью описывается потенциальным приближением (формулы см. в [1]).

Обозначим как $i(B_r)$ квадрат радиальной компоненты магнитного поля, усредненный по поверхности Солнца (Br^2):

$$i(B_r)|_R = \langle B_r^2 \rangle, \quad (1)$$

где R – радиус сферы, по которой производится усреднение.

Для определения $i(B_r)$ надо знать магнитное поле B_r . Используя основные формулы из [1], получаем выражения для индексов $i(B_r)$ в любой точке сферической поверхности от поверхности фотосферы до поверхности источника [2, 3]. В частности, получаем следующие выражения для поверхности фотосферы и поверхности источника:

$$i(B_r)|_{R_\odot} = \sum_{lm} \frac{(l+1+l\zeta^{2l+1})^2}{2l+1} (g_{lm}^2 + h_{lm}^2), \quad (2)$$
$$i(B_r)|_{R_s} = \sum_{lm} (2l+1) \zeta^{2l+4} (g_{lm}^2 + h_{lm}^2).$$

В дальнейшем мы будем обсуждать интегральный энергетический индекс и все парциальные индексы как на уровне фотосферы, так и на уровне поверхности источника. Здесь важно отметить, что на поверхности фотосферы вклад дают локальные поля. На поверхности источника сохраняются только поля большого масштаба, то есть в основном гармоники с ма-

лыми номерами по l . Математически это определяется сильными зависимостями от ζ в формулах (2); физически это связано с тем, что поля больших пространственных масштабов, естественно, имеют значительно более малый градиент падения с высотой. Поэтому мы часто будем подразумевать под глобальными структурами соответствующие структуры на поверхности источника.

С помощью гармонических коэффициентов можно выделить следующие структуры крупномасштабных полей [2, 3]:

Зональные ($m = 0$). Их можно разделить на два типа по четности индекса l : **ZO** (l нечетное, наиболее яркий представитель – осевой диполь, $l = 1$) и **ZE** (l четное, наиболее яркий представитель – осевой квадруполь, $l = 2$).

Секториальные ($m = l$). Их тоже можно разделить на два типа по четности индекса l : **SO** (l нечетное, наиболее яркий представитель – экваториальный диполь и двухсекторная структура, $l = m = 1$) и **SE** (l четное, наиболее яркий представитель – экваториальный квадруполь и четырехсекторная структура, $l = m = 2$).

Тессеральные (все остальные комбинации m и l).

2. Провал Гневывшева и глобальное магнитное поле

Использование энергетических индексов в ряде случаев оказывается более эффективным, чем непосредственный анализ напряженностей магнитного поля. Так, анализ циклической вариации полной энергии магнитного поля позволяет уточнить некоторые характеристики явления, известного как провал Гневывшева.

В 1967 году М.Н. Гневывшев [4] обратил внимание на то, что в 19 цикле (1954–1965) излучение короны в линии 5303 (green line) имело два максимума: один в 1957 г., другой в 1959–1960 гг. Понижение среднеполугодовых значений яркости короны получило название «Провал Гневывшева» (Gnevyshev Gap, GG) и с тех пор наблюдалось в разных индексах, в основном, относящихся к частоте солнечных хромосферных вспышек, верхним слоям атмосферы Солнца, в межпланетной среде и космических лучах. В ряде работ это явление связывается с наблюдениями квазидвухлетних вариаций (см. обзор [5] и многочисленные ссылки в нем и [6]).

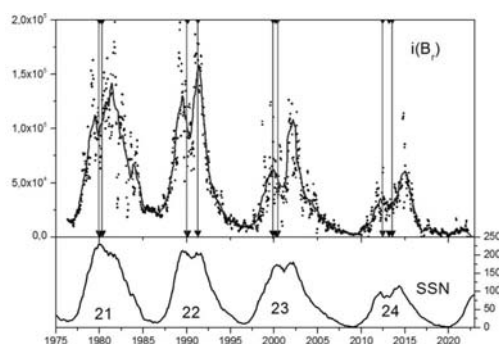


Рис. 1. Индекс $i(B_r)$ на поверхности фотосферы. На нижней панели среднегодовые значения SSN. Тонкими вертикальными линиями показаны моменты переполюсовки на северном и южном полюсе.

В целом вариация $i(B_r)$ соответствует вариации числа пятен. Виден постепенный спад высот циклов, хотя форма циклов несколько различная. Во всех циклах отчетливо видна двухвершинность фазы максимума. Если для чисел пятен вторичный максимум был наиболее отчетливо виден только в 24 цикле, то для интегрального индекса $i(B_r)$ это является правилом. Более того, вторичный максимум во всех циклах выше, чем первый. Провал Гневышева на диаграммах $i(B_r)$ отчетливо совпадает с переполлюсовками полярного поля.

Следует заметить, что в цикле солнечных пятен при анализе сглаженных по стандарту среднемесячных значений двухвершинность на самом деле является довольно редким явлением. Из 24 циклов, о которых мы имеем надежные сведения, уверенная двухвершинность наблюдалась только в шести (5, 9, 18, 22, 23, 24) циклах. При этом только в 24 цикле второй максимум выше первого на 17%, во всех остальных случаях оба максимума практически одной высоты.

Ситуация совершенно иная, когда мы анализируем полную энергию магнитного поля (см. рис. 1). Во всех четырех циклах наблюдается хорошо выраженная двухвершинность, при этом всегда более поздний максимум выше первого.

Таким образом, эффект провала Гневышева связан именно с магнитным полем и сценарием последовательного появления различных компонент поля. Сам провал определенно связан с резким уменьшением зональной составляющей, особенно ее нечетной части, то есть осесимметричной части ZO. Ближе к концу максимума начинает восстанавливаться четная зональная составляющая и, в особенности, секториальные гармоники. Именно поэтому в начале фазы спада наиболее развиты секторные структуры межпланетного поля.

3. Относительный вклад различных составляющих в полную энергию магнитного поля

При взгляде на рис.1 бросается в глаза различие циклов по высоте и их постепенный спад. Именно высота циклов и является главным свойством разных циклов и главным предметом прогноза солнечной цикличности. Однако можно поставить вопрос о внутреннем соотношении различных составляющих энергии солнечной активности внутри каждого цикла. С этой целью мы ввели нормировку, поделив энергию каждой составляющей на полную энергию магнитного поля.

Оказалось, что доля разных составляющих определяется 11-летним циклом, а не вековой вариацией. Хотя высоты циклов в числах пятен и в $i(B_r)$ меняются, доля структур сохраняется с удивительной точностью. Удивляет устойчивость и практическая независимость зональных и секториальных мод. Тессеральные, которые никогда не падают до нуля, всегда оставаясь в диапазоне 0.3–0.6, и достигают максимума на фазе роста, то

есть мощные поля малых пространственных масштабов существуют всегда. И более того, нарушается правило Гневыхеква-Оля в интегральной энергии крупномасштабного поля.

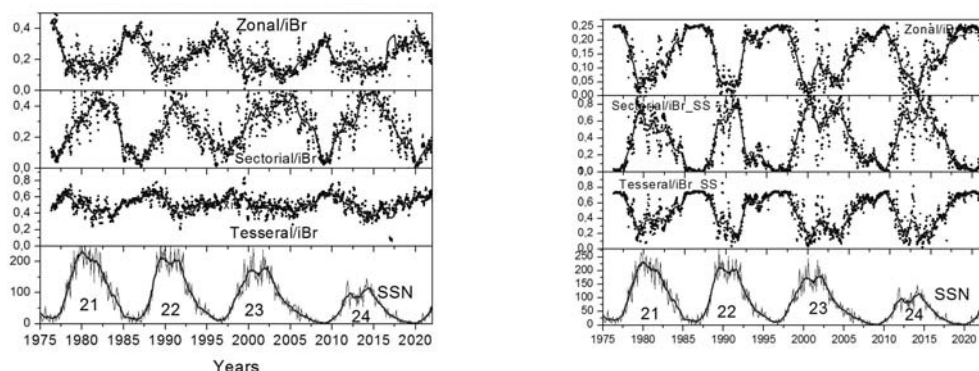


Рис. 2. Результаты нормировки на уровне фотосферы (слева) и на уровне поверхности источника (справа).

Таким образом, полная энергия зависит от векового цикла, но доля внутри каждого цикла сохраняется. Внутри каждого цикла существует внутренняя иерархия, которая определяет соотношение структур с разным типом симметрии, она не зависит от полной энергии данного цикла и в целом согласуется с основной концепцией солнечного динамо. Вариация высот циклов связана с некоторым другим модулирующим механизмом. Этот сценарий более четко проявляется для крупномасштабного поля на поверхности источника, хотя количественные значения, естественно, несколько иные. Так несколько неожиданным оказались высокие и очень устойчивые значения суммарной энергии тессеральных компонент в минимумах циклов SSN (70%).

4. Роль и анализ вклада тессеральных гармоник

Тессеральным гармоникам практически не уделяется внимания. Можно полагать, что в силу преобладающего влияния локальных полей тессеральные гармонки должны быть значительны именно в приэкваториальной зоне.

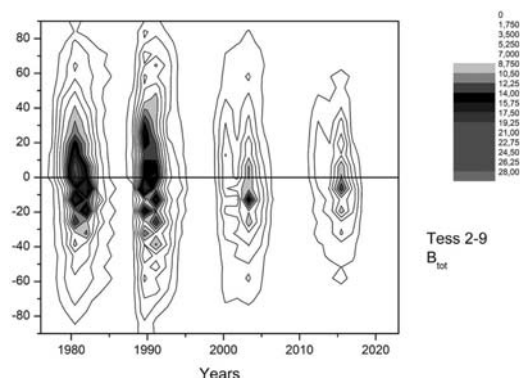


Рис. 3. Широтно-временная диаграмма среднего квадрата магнитного поля по сумме всех тессеральных компонент (значения даны в G^2).

Из рис. 3 видно, что тессеральные компоненты в основном сосредоточены в так называемых «королевской» зоне на широтах $\pm 30^\circ$. Более того, эта зона постепенно сужается после 1990 г., то есть в 22, 23 и 24 циклах. Это полностью соответствует тому, как меняется высота циклов солнечных пятен.

Однако непосредственно широтно-временную диаграмму для пятен (бабочки Маундера) получить не удастся. По-видимому, пятна определяются как тессеральными, так и зональными гармониками и располагаются на границах направленных к экватору волн.

5. Дискуссия

То, что мы называем солнечной цикличностью, – это совместное действие трех независимых, но взаимосвязанных процессов.

1). Некий внешний механизм, определяющий собой многолетние вариации высоты циклов. В классической схеме преобразования поля из полоидального в тороидальное его нет.

2). Хорошо описываемый механизмами динамо 11-летний цикл. В нем полоидальное поле преобразуется в тороидальное и обратно, причем внутреннее соотношение интегральных потоков и энергии от цикла к циклу сохраняется.

3). Генерация пятен из полоидального приэкваториального поля. Проявляется в виде тессеральных гармоник.

Этот третий процесс преобразования генерированного в динамо среднего поля в отдельные объекты с сильным полем разыгрывается непосредственно под поверхностью фотосферы.

АШ и ДС благодарны фонду Базис, грант 21-1-1-4-1 за поддержку работы.

Литература

1. *Obridko V.N., Shibalova A.S., and Sokoloff, D.D.* // MNRAS, 2023, 523, 1, 982.
2. *Obridko V.N. and Yermakov, F.A.* // Astron. Tsirk., 1989, No. 1539, 24.
3. *Obridko V.N. and Shelting B.D.* // Solar Physics, 1992, 137: 167-177.
4. *Gnevyshev M.N.* // Solar Phys., 1967, 1, 107.
5. *Bazilevskaya G., Broomhall A.-M., Elsworth Y., Nakariakov V.M.* // Space Science Reviews, 2014, 186, Issue 1-4, 359-386.
6. *Kraiev M., Bazilevskaya G., Kalinin M., et al.* Proc. of the 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC2015). 30 July - 6 August, 2015. The Hague, The Netherlands. Online at <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=236>, id.181.