

ОСОБЕННОСТИ ТОПОЛОГИИ СОЛНЕЧНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В 21–25 ЦИКЛАХ

Биленко И.А.

*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга,
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

TOPOLOGY FEATURES OF THE SOLAR MAGNETIC FIELDS IN CYCLES 21–25

Bilenko I.A.

Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, Russia

The structural organization and variations in the topology of solar magnetic fields in the cycles 21–24 and the first half of the 25th solar activity cycle are studied based on synoptic data from the Wilcox Solar Observatory from May 1976 to September 2024. It is shown that the topology of the structural organization of magnetic fields differs both in different cycles and at different phases of each cycle. Structures with the dominance of magnetic fields of different polarities occupy opposite longitudinal intervals, which alternate in even and odd cycles. Sharp changes in the topology of the distribution of magnetic fields of positive and negative polarity are observed over 1–3 Carrington rotations in each cycle. The life time of magnetic structures does not reveal a clear correspondence with the height of a cycle. In each cycle, the magnetic field in a structure changes in the form of separate pulses, forming a total of two maximum increases with the second peak higher than the first one. Peak values of magnetic fields correspond to certain structures with positive- or negative-polarity dominated magnetic fields. The maximum values of magnetic field intensity in structures decrease from cycle 21 to cycle 25. The dependences of the mean magnetic field strength in a Carrington rotation on the chaotic state of the magnetic field topology in each cycle are shown. The chaotic state of the magnetic field topology is higher in the weak cycles 23–25 with lower magnetic fields than in the high cycles 21 and 22. In each cycle, the magnetic field intensity decrease with increase in the chaotic state of the magnetic field topology.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-37-40>

Введение

Систематические измерения солнечных магнитных полей начались в шестидесятых годах. И уже первые исследования синоптических карт показали, что солнечные магнитные поля распределены по долготе не равномерно, а формируют сложную структуру [1, 6]. При этом топология распределения магнитных полей изменяется как в течение каждого цикла, так и от цикла к циклу [5–8]. Последующие исследования показали, что структурная организация магнитных полей сохраняется на значительных расстояниях от Солнца и наблюдается в межпланетном магнитном поле на орбите Земли. В солнечной короне ее топология и все структурные изменения однозначно трассируются динамикой корональных дыр [3]. Топологические изменения структуры солнечных магнитных полей отражаются в

различных явлениях солнечной активности [2]. Целью данного исследования является рассмотрение структурной организации и вариаций топологии солнечных магнитных полей в 21–24 и первой половине 25 цикла солнечной активности. В работе использованы синоптические данные магнитных полей обсерватории Wilcox с мая 1976 по сентябрь 2024 гг. Каждая синоптическая карта содержит информацию о полном Кэррингтоновском обороте (КО) Солнца (1 КО = 27.2753 дня) и представляет собой широтно-долготное распределение значений напряженности магнитного поля, состоящее из 360×180 пикселей, соответствующих солнечным координатам от -75° до $+75^\circ$ выраженных в синусах широты и от 0° до -360° долготы. Наиболее четко структурная организация магнитных полей проявляются в полях, рассчитанных на поверхности источника [8]. Поэтому были использованы синоптические карты магнитных полей рассчитанных в потенциальном приближении на поверхности источника на расстоянии 2.5 радиуса Солнца.

Результаты исследования

На рис. 1а представлена диаграмма долготно-временного распределения магнитных полей усредненных по широте за каждый КО, рассчитанных на поверхности источника, положительной (желто-красные цвета) и отрицательной (сине-лиловые цвета) полярности. На рис. 1b показаны вариации средней напряженности магнитного поля рассчитанной для каждого КО по диаграмме (рис. 1а) для полей положительной (красная кривая) и отрицательной (синяя кривая) полярности и суммы их модулей (черная кривая).

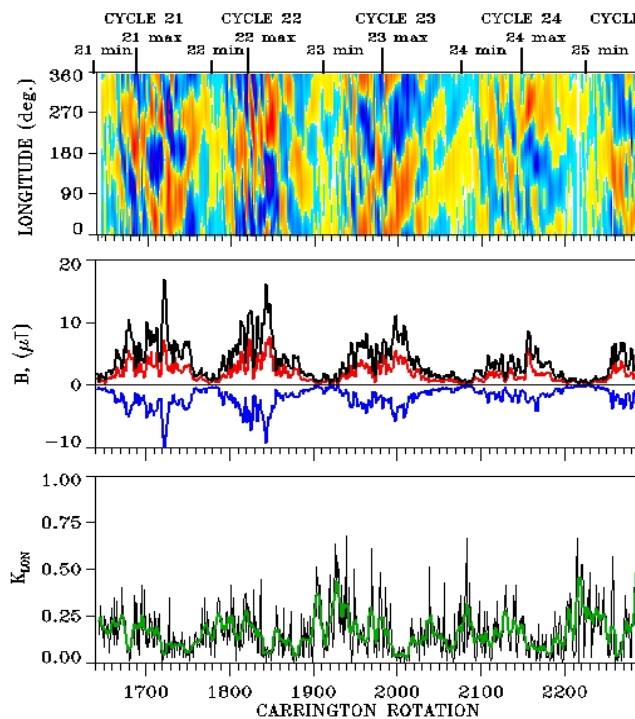


Рис. 1.

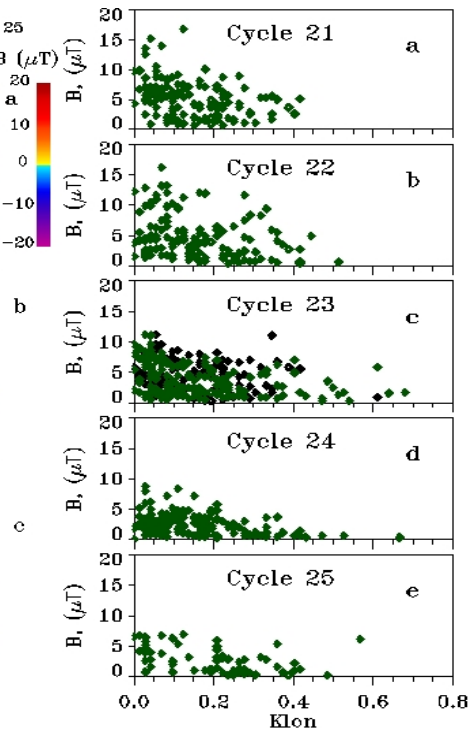


Рис. 2.

Вариации коэффициента изменчивости структур (K_{LON}) рассчитанного как отношение числа долготных интервалов, в которых произошла смена полярности при переходе от одного КО к следующему к общему числу интервалов [2] приведены на рис. 1с. Из рис. 1а следует, что размеры, продолжительность квазистабильного существования, характер вращения, изменение напряженности в каждой отдельной униполярной структуре различны в разных циклах. Топология структур различается и на разных фазах каждого цикла. Структуры с повышенными значениями напряженности магнитного поля начинают формироваться на фазах роста солнечной активности и продолжают существовать в периоды максимума и начала спада каждого цикла. Каждая пара структур с доминированием магнитных полей положительной и отрицательной полярности занимает, приблизительно в одни и те же КО, противоположные долготные интервалы, которые чередуются в четных и нечетных циклах. В таблице приведены параметры структур с максимальными значениями напряженности магнитных полей в каждом цикле.

Таблица.

КО	L+ (deg.)	L – (deg.)	Bmax +	Bmax –
21 цикл				
1677-1695 1725-1745	142-250	215-342	18.23	-17.97
22 цикл				
1824-1856 1838-1853	182-360	0-190	14.53	-16.14
23 цикл				
1981-2004 1989-2032	294-360	158-360	10.29	-9.99
24 цикл				
2139-2210 2150-2212	154-360	0-250	10.58	-7.61
25 цикл				
2242-2288 2255-2288	0-216	202-360	7.32	-6.56

В каждом цикле наблюдаются резкие, в течение 1–3 КО, изменения топологии распределения магнитных полей. На долготных интервалах с доминированием магнитных полей, например, положительной полярности происходит смена доминирования магнитных полей на поля отрицательной полярности, а в соответствующих долготных интервалах с доминированием магнитных полей отрицательной полярности происходит такая же быстрая смена доминирования магнитных полей на поля положительной полярности. Пиковые значения напряженности магнитного поля выше в высоких, 21 и 22 циклах. Продолжительность существования структур не

выявляет однозначного соответствия с высотой цикла. Магнитное поле в каждой структуре изменяется не плавно, а в виде отдельных импульсов, формируя суммарно два максимальных возрастания в каждом цикле (рис. 1b). При этом второй пик, приходящийся на фазу спада, выше первого в каждом цикле. Согласно такой закономерности 25 цикл должен быть выше 24 цикла. Наблюдается снижение максимальных значений напряженности магнитного поля в структурах от 21 к 25 циклу. Пики напряженности магнитного поля положительной и отрицательной полярности на рис. 1b совпадают с конкретными структурами на рис. 1a.

На рис. 2 показаны зависимости средней напряженности магнитных полей от K_{LON} . В каждом цикле наблюдается снижение средней напряженности магнитного поля в КО с ростом K_{LON} . В работе [4] для 21–23 циклов было показано, что чем стабильнее структура глобального магнитного поля, т. е. чем ниже K_{LON} , тем выше напряженность магнитного поля в цикле. Из рис. 1 и рис. 2 также следует, что значения K_{LON} , характеризующего степень хаотичности топологии магнитного поля, выше в 23, 24 и 25, т. е. в слабых циклах с более низкими средними за КО значениями магнитного поля, чем в высоких, 21 и 22 циклах.

В заключение следует отметить, что источник формирования и циклической эволюции описанных выше структур в настоящее время не известен. Интересной представляется гипотеза о том, что возможной причиной появления наблюдаемых структур могут быть волны Россби генерируемые в основании конвективной зоны Солнца [9]. В статье [5] было показано, что время существования структур разных масштабов, моменты их формирования и реорганизаций совпадают с аналогичной динамикой волн Россби различной частоты.

Wilcox Solar Observatory data used in this study was obtained via the web site <http://wso.stanford.edu> at 2023:04:28 12:04:38 PDT courtesy of J.T. Hoeksema. The Wilcox Solar Observatory is currently supported by NASA.

Литература

1. Ambrož P., Bumba V., Howard R., Šýkora J. // IAUS, 1971, 43, 696-709.
2. Bilenko I.A. // Solar Phys., 2014, 289, 4209-4237.
3. Bilenko I.A. and Tavastsherna K.S. // Solar Phys., 2016, 291, 2329-2352.
4. Bilenko I.A. and Tavastsherna K.S. // Geomag. Aeronom., 2017, 57, 803-813.
5. Bilenko I.A. // Astrophys. J. Lett., 2020, 897, L24.
6. Bumba V. and Howard R. // Solar Phys., 1969, 7, 28-38.
7. Bumba V. // IAUS, 1976, 71, 47-67.
8. Hoeksema J.T. // Adv. Space Res., 1991, 11, 15-24.
9. Tikhomolov E. // Solar Phys., 1995, 156, 205-219.