

УДК-523.9-337

У. М. Лейко

Астрономическая обсерватория Киевского национального университета им. Тараса Шевченко
04053, Киев, ул. Обсерваторная, 3

Вариации вращения секторных структур магнитной системы Солнце — гелиосфера

Исследовано вращение секторных структур крупномасштабных магнитных полей нескольких типов на основе анализа эволюции основного периода их вращения. Использовались ряды наблюдений фонового магнитного поля Солнца (ФМПС, 1904—2000 гг.) приэкваториальной зоны ($\pm 20^\circ$), среднего магнитного поля Солнца (СМПС, 1975—2003 гг.), межпланетного магнитного поля (ММП, 1947—2001 гг.). Значение основного периода вращения двухсекторной структуры ФМПС в первой половине XX ст. (около 27—30 сут) изменялось примерно с 11-летней циклическостью, во второй (26.5—27.7 сут) — с 8-летней. В то же время значение основного периода вращения четырехсекторной структуры ФМПС изменялось с 20—22-летней циклическостью на протяжении всего исследуемого интервала. В 1937—1957 гг. наблюдалось синхронное вращение главных секторных структур ФМПС. Подтверждено изменение режима вращения Солнца в середине XX ст., а также обнаружено изменение характера секторной структуры ФМПС — увеличение доли мелкомасштабных структур. Наблюдается изменение характера секторной структуры ММП: появление мелкомасштабных структур (шестисекторной структуры) в последние 20—30 лет XX ст. Эволюция основных периодов вращения ФМПС, СМПС, ММП в течение общих интервалов наблюдений имеет не идентичный характер. Минимальный период вращения двухсекторной структуры ФМПС наблюдается при низком уровне активности, а для СМПС — при высоком уровне активности. Преобладание четырехсекторной структуры СМПС и ММП наблюдается в течение одних и тех же интервалов времени. Результаты исследования подтверждают концепцию самостоятельной сущности ФМПС.

ВАРІАЦІЇ ОБЕРТАННЯ СЕКТОРНИХ СТРУКТУР МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ СОНЦЕ—ГЕЛІОСФЕРА, Лейко У. М. — Досліджено обертання секторних структур великомасштабних магнітних полів кількох типів на основі аналізу еволюції основного періоду їхнього обертання. Використовувались ряди спостережень фонового магнітного поля Сонця (ФМПС, 1904—2000 рр.) у приекваторіальній зоні ($\pm 20^\circ$), середнього магнітного поля Сонця (СМПС, 1975—2003 рр.), міжпланетного маг-

нітного поля (ММП, 1947—2001 рр.). Значення основного періоду обертання двосекторної структури ФМПС у першій половині ХХ ст. (приблизно 27—30 діб) змінювалося з 11-річною циклічністю, у другій половині ХХ ст. (26.5—27.7 діб) — з 8-річною. У той же час значення основного періоду обертання чотирисекторної структури ФМПС змінювалося з 20—22-річною циклічністю протягом усього досліджуваного інтервалу. У 1937—1957 рр. спостерігалось синхронне обертання основних секторних структур ФМПС. Підтверджено зміну режиму обертання Сонця в середині ХХ ст., а також виявлено зміну характеру секторної структури ФМПС — збільшення частки дрібномасштабних структур. Зміна характеру секторної структури спостерігається також і для ММП — поява дрібномасштабних структур (шестисекторної структури) в останні 20—30 років ХХ ст. Еволюція основних періодів обертання ФМПС, СМПС, ММП протягом загальних інтервалів спостережень має неідентичний характер. Мінімальний період обертання двосекторної структури ФМПС спостерігається при низькому рівні активності, а для СМПС — при високому. Переважання чотирисекторної структури СМПС і ММП спостерігається протягом тих самих інтервалів часу. Результати дослідження підтверджують концепцію про самостійну сутність ФМПС.

ROTATION VARIATIONS OF SECTOR STRUCTURES OF THE SUN-HELIOSPHERE MAGNETIC SYSTEM, by Leiko U. M. — The rotation of sector structures of large-scale magnetic fields of several types is studied from the analysis of the evolution of their main rotation period. For this purpose, we used the series of observations of solar background magnetic field (SBMF, 1904—2000) in the equatorial zone from +20° to -20° in latitude, of solar mean magnetic field (SMMF, 1975—2003), and of interplanetary magnetic field (IMF, 1947—2001). The rotation rate of the SBFM two-sector structure varied with about a 11-year cycle during the first half of the interval under investigation (around from 27 to 30 days) and with about a 8-year cycle during the second half (from 26.5 to 27.7 days). The four-sector structure had a 22-year cycle of rotation rate variability during the overall interval. The rotation synchronization of the main sector structures of SBFM took place during 1937—1957. We confirmed the existence of a rotation change of the Sun in the middle of the 20th century and revealed the change of the character of the SBFM sector structure, namely, the share of small-scale structures increased during the second half of the 20th century. The change of the IMF sector structure is observed which lies in the appearance of small-scale magnetic structures (the six-sector structure) during the last 20—30 years of the 20th century. The evolution of the main rotation periods of SBFM, SMMF, IMF is not identical during common intervals of observations. The rotation minimum period of the two-sector structure takes place during a low level of the solar activity in the case of SBFM and during a high level of the solar activity in the case of SMMF. The predominance of the four-sector structure of SMMF and IMF is observed during the same time intervals. Our results confirmed the idea that large-scale magnetic field is independent phenomenon of solar magnetism.

ВВЕДЕНИЕ

Впервые секторная структура (СС) межпланетного магнитного поля (ММП) была обнаружена Нессом и Вилкоксом после обработки первых спутниковых измерений ММП [40]. Почти сразу же пришло понимание, что она должна быть связана с крупномасштабными солнечными магнитными полями осо-

бого рода — жестко вращающимися и долго живущими [43, 46—47]. Но, как оказалось, характер этой связи не такой простой и однозначный, как это представлялось вначале. Сейчас очевидно, что управляющее действие магнитной переменности Солнца на гелиосферное магнитное поле имеет сложный характер и требует всестороннего исследования.

Долгое время самым существенным проявлением магнитной переменности Солнца, формирующим во времени последовательность циклов солнечной активности, считались солнечные пятна — носители сильного локального магнитного поля. После изобретения магнитографа [30] удалось измерить слабые магнитные (фоновые) поля и обнаружить переполусовку полярного магнитного поля [31, 33], происходящую в эпоху максимума пятнообразования. Сложилось мнение, что фоновые магнитные поля Солнца (ФМПС) образуются посредством дисперсии сильных магнитных полей активных областей (АО), что нашло отображение в эволюционной модели Бэбкока — Лейтона [32, 35, 36]. Позже начала развиваться концепция самостоятельной сущности крупномасштабных фоновых магнитных полей Солнца [17, 19, 22, 23, 38], чему способствовали улучшение инструментов и регулярность наблюдений.

В 1965 г. для обеспечения прогноза обстановки в межпланетном пространстве по инициативе А. Б. Северного [42] были начаты наблюдения среднего магнитного поля Солнца (СМПС). Выяснилось, что СМПС также имеет секторную структуру, коррелирующую с секторной структурой ММП [44, 47].

Для понимания природы магнитной переменности Солнца и ее цикличности важно знание скорости вращения Солнца и его магнитных полей. История вращения Солнца, распределения его крупномасштабных полей также важны для установления эволюционного пути Солнца. Обработка почти столетнего массива данных синоптических H_α -карт распределения полярности фонового поля Солнца дала возможность исследовать динамику основных секторных мод глобального магнитного поля Солнца [24, 25], получить количественные соотношения между мощностью вращения секторных структур фонового поля и уровнем солнечной активности [1], а также обнаружить изменение режима вращения Солнца в середине XX столетия.

С целью дальнейшего изучения динамики секторных мод магнитной системы Солнце — гелиосфера в данной работе мы анализируем временные ряды ФМПС (1904—2000 гг.), СМПС (1975—2003 гг.) и ММП на орбите Земли. В итоге получен ряд новых интересных особенностей динамики крупномасштабных магнитных полей.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Фоновое магнитное поле Солнца (ФМПС). Структура крупномасштабного поверхностного ФМПС определяется распределением униполярных магнитных областей, разделенных нейтральными линиями (с нулевой радиальной составляющей магнитного поля). Положение нейтральной линии трассируется волокнами и другими хромосферными образованиями. Пространственно-временное распределение нейтральных линий определяет топологию глобального магнитного поля, которая имеет определяющее значение при изучении глобальных процессов на Солнце. Распределение нейтральных магнитных линий есть результат взаимодействия всего комплекса явлений во всех слоях атмосферы Солнца [16].

При построении H_α -карт (полярности ФМПС) величина поля не учитывается, областям положительной и отрицательной полярности приписывается значение +1 или -1 и таким образом создаются ряды значений магнит-

ного поля (для определенных широтных зон). Хотя H_α -карты не приводят данных о величине магнитного поля, они дают возможность определять границы структур крупномасштабного поля Солнца и тем самым проследить его эволюцию в цикле солнечной активности.

Методика построения синоптических H_α -карт была впервые разработана Мак-Интошем [18]. Впоследствии Макаровым и Сивараманом [37] на основе наблюдений Солнца в обсерватории Кодайканал (Индия) были воссозданы синоптические карты полярности ФМПС для интервала 1915—1975 гг. В дальнейшем этот ряд был дополнен H_α -картами Кисловодской горной астрономической станции [16]. На основе H_α -карт были проведены исследования различных характеристик фонового поля [8, 21], исследовано вращение секторных структур на длинном интервале для широтной зоны $\pm 50^\circ$ [24, 25]. В работе [1] для поиска количественных соотношений между мощностью вращения секторных структур и уровнем солнечной активности использован временной ряд фонового поля широтной зоны $\pm 20^\circ$, который будем использовать и мы.

Среднее магнитное поле Солнца или магнитное поле Солнца как звезды измеряется магнитографом в интегральном пучке света видимого диска Солнца. СМПС определяется как свертка распределения по диску Солнца продольной составляющей магнитного поля с весовой функцией магнитографа [6, 41]. По сути сигнал магнитографа пропорционален разности магнитных потоков положительной и отрицательной полярностей (разбалансу) с видимого диска Солнца. При наблюдениях ставится задача получить одно точное значение СМПС за сутки. Измерения СМПС проводились в четырех обсерваториях. Подробности наблюдений изложены в работах [10, 41].

Межпланетное магнитное поле (ММП). Знак полярности ММП на орбите Земли определяется как посредством прямых спутниковых измерений при помощи магнитометров так и косвенных наблюдений по изменению геомагнитных индексов в приполярных областях Земли. Методика воссоздания секторной структуры ММП по наблюдениям геомагнитных индексов была разработана Мансуровым (инструкция для определения знака полярности сектора ММП на орбите Земли помещена на сайте ИЗМИР РАН).

Данные. В данной работе использованы:

а) данные о распределении ФМПС в широтной зоне $\pm 20^\circ$, полученные из синоптических H_α -карт, 1904—2000 гг., а именно, ряды значений величины $\alpha = (S_+ - S_-)/(S_+ + S_-)$ (S_+ и S_- — площади областей магнитного поля положительной и отрицательной полярности) через 10° по долготе [1];

б) измерения СМПС, выполненные в Станфордской обсерватории в 1975—2003 гг. (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SUN_AS_STAR/).

в) ряд определений полярности ММП (CC) за период 1947—2001 гг. (<http://www.izmiran.troitsk.ru/magnetism/SSIMF/>, ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/)

Методика обработки данных. Наблюдаемая структура крупномасштабного магнитного поля Солнца используется для определения скорости вращения Солнца. При применении двух различных методов обработки магнитографических наблюдений (метода кросс-корреляции последовательных дневных магнитограмм со сдвигами 1-4 сут и автокорреляции рекуррентных структур на центральном меридиане со сдвигом в целое число оборотов Солнца) получают различные профили дифференциального вращения. Дифференциальный профиль вращения магнитного поля, полученный Снодграссом [44] при использовании первого метода, подобен дифференциальному профилю вращения фотосферной плазмы, определен-

ному спектроскопическим методом. В автокорреляцию магнитного поля, вычисленную вплоть до нескольких оборотов Солнца, основной вклад вносят глубоко залегающие и долгоживущие крупномасштабные магнитные структуры. Их вращение более быстрое, чем вращение мелкомасштабных структур. Квазижесткое вращение долгоживущих магнитных структур, локализованных в дискретных широтных зонах, было обнаружено также методами, коррелопериодограммного анализа [4], широтно-временных диаграмм [21], спектральных диаграмм [29] и др. [34, 39].

Спектры временных рядов дают возможность определить устойчивые периоды. По-видимому, эти устойчивые периоды дают информацию о вращении магнитных структур (или источниках их генерации), живущих намного дольше нескольких оборотов Солнца. Как известно, спектры рядов СМПС, ММП, ФМПС в высокочастотной области имеют несколько групп пиков (26—30, 13—15 сут и т. д.), обусловленных вращением секторных мод различного порядка.

Исследование вращение секторных мод различного порядка проводилось по следующей методике. Спектр для определенного частотного диапазона, соответствующего секторной моде определенного порядка, вычислялся по формуле

$$P = U^2(\nu) + V^2(\nu),$$

$$U(\nu) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \cos(2\pi\nu k)\alpha_k,$$

$$V(\nu) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sin(2\pi\nu k)\alpha_k,$$

где N — длина ряда, α_k — исследуемый временной ряд, ν — частота исследуемого сигнала. Например, двухсекторной моде соответствует частотный диапазон $1/26—1/30 \approx 0.037—0.033$ сут⁻¹, где 26—30 сут — диапазон периодов вращения двухсекторной структуры. В этом спектре отыскивался пик с наибольшей амплитудой. Значение найденного периода принято считать основным периодом вращения секторной структуры на данном временном интервале — выбранном окне обработки. Кроме периода вращения и его мощности, вычислялись значимость каждого полученного периода вращения секторной структуры, уровни значимости 3σ нормального распределения и уровень значимости 5 %. Процедура повторялась при смещении окна на следующий шаг. Реализация такого алгоритма дает возможность получить для моментов времени $t = t_w/2 + t_h$ (определяемых шириной окна t_w и шагом обработки t_h) массивы значений основного периода вращения (секторной структуры), его мощность, значимость. Полученные массивы значений и амплитуды основного периода вращения секторной структуры в дальнейшем сглаживались скользящим средним.

Приведенные здесь результаты получены с окном длительностью около четырех лет и шагом, соответствующим приблизительно трем периодам вращения Солнца.

ФМПС ПРИЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Диапазон периодов вращения ФМПС приэкваториальной области. Согласно современным представлениям периоды вращения поверхностных магнитных полей широтной зоны $\pm 20^\circ$ заключены в диапазоне 26.9—27.8 сут [44]. Напомним, что этот результат был получен по магнитографическим наблюдениям второй половины XX ст.

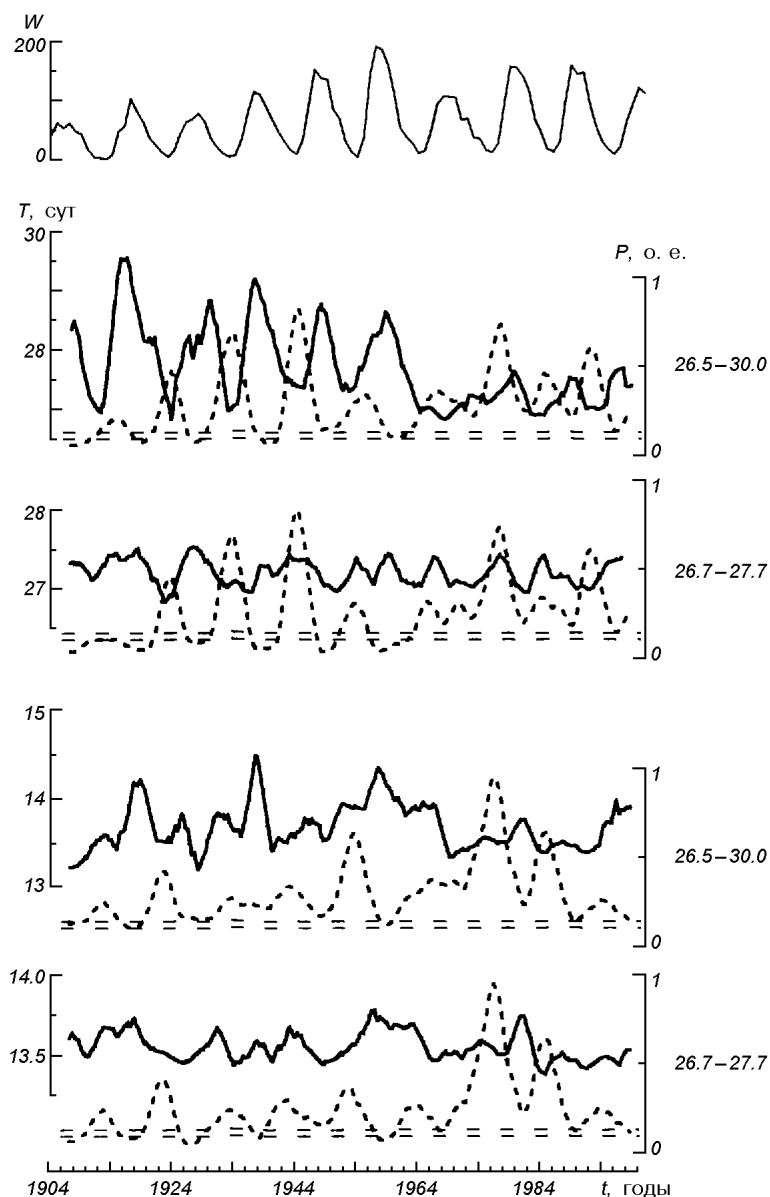


Рис. 1. Вариации среднегодовых чисел Вольфа W , а также сглаженные (по тринадцати точкам) кривые вариаций периода вращения (сплошная кривая, шкала слева) и его мощности (штриховая кривая, шкала справа) двухсекторной и четырехсекторной структур. Спектры вычислялись для двух диапазонов вращения: 26.7—27.7 и 26.5—30.0 сут. Штриховые горизонтальные линии — уровни значимости 5 % и 3σ для нормального распределения

При процедуре поиска наиболее мощного пика нами были испробованы несколько диапазонов периодов вращения, включая диапазон 26.9—27.8 сут. Оказалось, что чем шире диапазон, тем большее количество значимых пиков обнаруживается в получаемом массиве. Другими словами, если вычислять спектр с узким диапазоном периодов вращения, вне анализа остается большое количество мощных пиков, значения периода которых отображают основной период вращения поверхностного магнитного поля.

На рис. 1 приведены вариации амплитуды и значения основного периода вращения двухсекторной и четырехсекторной структур для двух

диапазонов периодов вращения: 26.7—27.7 сут и 26.5—30.0 сут. Вычисление спектров производилось с окном длиной 2000 точек (около 4 лет) и шагом 100 точек (приблизительно три оборота Солнца). Длина окна при вычислении спектров с целью определения основного периода вращения (вплоть до 8 лет) не влияет на окончательный результат. Жирные кривые (сплошная — значение периода, штриховая — амплитуды) получены в результате сглаживания скользящим средним по тринадцати точкам массивов, полученных при реализации алгоритма поиска основного периода вращения секторной структуры. Видно, что количество значимых пиков значительно больше при использовании более широкого диапазона периодов вращения, чем при использовании узкого, особенно в первой половине исследуемого интервала. Как видно из рис. 1, при более широком диапазоне периодов вращения более четко вырисовывается циклический характер вращения секторных структур ФМПС в первой половине интервала. Структура сглаженных кривых претерпевает значительные изменения в первой половине интервала. Во второй же части эти изменения незначительны, и диапазон периодов вращения заключен в пределах 26.9—27.8 сут.

Полученная нами картина вращения двухсекторной структуры в общих чертах подобна картине, полученной Обридо и Шелтинг (см. рис. 3, 4 работы [24]), четырехсекторной — согласуется с результатами работы [1].

Циклическость вращения двухсекторной структуры близка к 11-летней, четырехсекторной — 20—22 года. Этот факт, по-видимому, подтверждает концепцию независимости двухсекторной и четырехсекторной структур ФМПС. Если исходить из предположения, что движение долгоживущих магнитных структур отражает движение их источников генерации, то приходим к выводу, что источник генерации двухсекторной структуры ФМПС в течение XX ст. имел значительные изменения.

Сравним сглаженные кривые зависимости значения основного периода вращения двухсекторной структуры ФМПС, полученные в результате вычислений спектров с более узким и более широким диапазонами периодов вращения. Видно, что различие хода кривых для первой половины исследуемого интервала произошло вследствие расширения диапазона периодов вращения в сторону более длинных периодов, а незначительные различия для второй части исследуемого интервала — в результате расширения диапазона периодов вращения в сторону коротких периодов. Другими словами, характер вращения двухсекторной структуры ФМПС приэкваториальной области в первой и во второй половине XX ст. имеет сильные различия: в первой половине вращение было намного медленней, чем во второй. Циклическое изменение периода вращения двухсекторной структуры ФМПС в первой половине XX ст. происходил в диапазоне 27.0—30.0 сут, четырехсекторной структуры — 26.8—29.0 сут. В последние приблизительно сорок лет XX ст. диапазон циклического изменения вращения обеих структур был одинаков и находился в пределах 26.9—27.6 сут.

Основные характеристики двух режимов вращения ФМПС. Считается хорошо установленным факт, что приблизительно в середине XX столетия произошло изменение режима вращения Солнца [1, 24, 25]. Отмечено, что в первой половине XX столетия двухсекторная структура ФМПС была преобладающей. На рис. 2 приведены значения периода наиболее мощного пика (сплошная кривая) и его амплитуды (штриховая кривая) как функции времени в частотных диапазонах, отвечающим различным секторным модам ($m = 1...7$), начиная с 2-секторной ($m = 1$, диапазон периодов 26.2—30.0 сут) и заканчивая 14-секторной ($m = 7$, диапазон периодов 3.4—4.3 сут). Штриховые горизонтальные прямые — уровни значимости 3σ и 5% . Как видно, весь исследуемый интервал можно

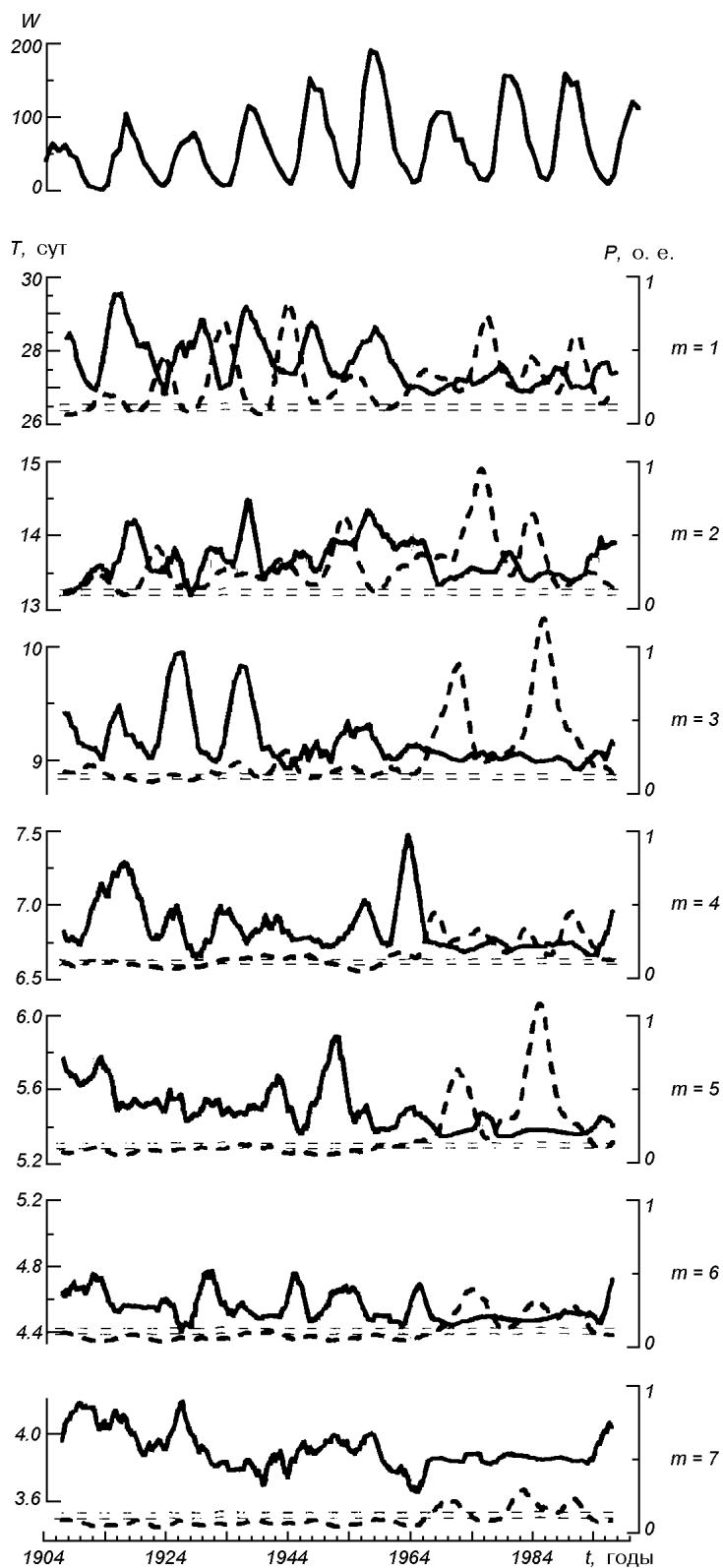


Рис. 2. Вариации основного периода вращения и мощности различных секторных мод m . Обозначения см. на рис. 1

разделить на две части: 1904—1960 гг. и 1960—2000 гг. В течение первой части исследуемого интервала значимые пики имеются только в спектрах частотных диапазонов, отвечающим модам низкого порядка ($m = 1...3$), во второй половине XX столетия мощность двухсекторной моды ослабевает и появляются моды более высокого порядка, вплоть до $m = 7$ (14-секторная структура). То есть, изменение режима вращения Солнца сопровождается (или обусловлено) изменением характера секторной структуры магнитного поля, а именно — увеличением доли мелкомасштабных структур.

Вращение основных секторных структур ФМПС, как уже было отмечено раньше [1, 24, 25], не идентично. Мы обнаружили новые отличия временных изменений этих структур.

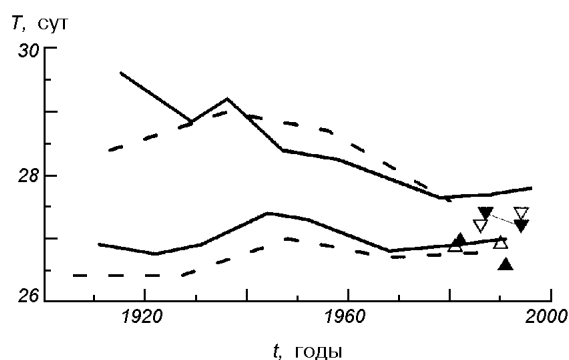
Двухсекторная структура в первой половине исследуемого интервала имеет примерно 11-летний цикл изменения значения основного периода вращения и его амплитуды, которые происходят в противофазе. Хорошо выполняется известное правило: более низкой активности соответствует большая скорость вращения. В эпоху минимумов пятнообразования период вращения двухсекторной структуры наименьший, а амплитуда наибольшая. Причем в 1920—1952 гг. кривая изменения амплитуды основного периода вращения имеет такой же ход, как кривая изменения среднегодовых чисел Вольфа и опережает ее приблизительно на полцикла. Этот факт подтверждает концепцию независимости и первичности слабого крупномасштабного поля по отношению к сильному локальному полю [17, 19, 22, 23, 38]. Возможно, это подтверждает вывод Михайлуцы об определяющем влиянии двухсекторной структуры на высоту последующих циклов пятнообразования [19].

В 1915 г. и 1956 г., а также в 1967 г. по нашим результатам наблюдается очень низкая амплитуда основного периода вращения двухсекторной структуры, причем ее максимум достигается не при минимальном значении периода, а на фазе роста значения периода (следующего цикла). Во второй половине исследуемого интервала цикличность в изменении значения основного периода вращения двухсекторной структуры становится более короткой, а значение периода варьирует около значения 27.0 сут. Следующие максимумы основного периода вращения двухсекторной структуры наступают приблизительно в 1976, 1984, 1991 гг., минимумы — в 1972, 1981, 1988 гг., т. е. имеет место 8-летняя цикличность в изменении основного периода вращения двухсекторной структуры ФМПС.

Вращение четырехсекторной структуры имеет совершенно иной характер. Изменение амплитуды происходит с 11-летним периодом, а максимальное значения периода достигается через 20—22 г. Форма этой (~ 21-летней) циклической кривой довольно сложная и сохраняется в течение всего исследуемого интервала. Кроме основного максимума периода, который по времени совпадает с нечетными максимумами чисел Вольфа (15, 17, 19, 21), имеются еще два вторичных максимума по разные стороны главного максимума. Минимумы выражены не так четко, как максимумы, и по времени совпадают с максимумами четных чисел Вольфа (16, 18, 20, 22). Как известно, нечетные максимумы чисел Вольфа выше четных. Скорость вращения четырехсекторной структуры максимальна во время четного цикла, менее интенсивного, и минимальна во время более интенсивных нечетных циклов. Правило «более низкой активности соответствует более высокая скорость вращения» для четырехсекторной структуры проявляется в совершенно ином виде, чем для двухсекторной структуры. Этот результат очень хорошо согласуется с выводами работы [1].

Во вращении шестисекторной структуры, а также секторных структур более высокого порядка, которые появляются и сравнимы по амплитуде с

Рис. 3. Скорость вращения двухсекторной (сплошные линии) и четырехсекторной (штриховые) структур фонового поля в эпохи максимумов (верхние кривые) и минимумов (нижние кривые) солнечной активности. Треугольники — основной период вращения двухсекторной (светлые треугольники) и четырехсекторной (темные треугольники) структур ФМПС для эпох минимумов (вершины треугольников вниз) и максимумов (вершины треугольников вверх)



двумя основными секторными модами только во второй половине исследуемого интервала, цикличности не наблюдается.

Таким образом, кроме установленного ранее и подтвержденного приведенными здесь исследованиями факта изменения режима вращения ФМПС, обнаружен факт изменения характера секторной структуры ФМПС. Также выявлено, что кроме изменения скорости вращения двухсекторной структуры имеет место изменение цикличности основного периода ее вращения (приблизительно 11-летней на 8-летнюю). Обнаружены новые факты, подтверждающие независимость основных (двухсекторной и четырехсекторной) секторных мод ФМПС.

Соотношение основных характеристик вращения главных секторных мод ФМПС. Средняя по всему исследуемому интервалу скорость вращения двухсекторной структуры составляет 27.7 сут (что почти совпадает со значением средней скорости вращения двухсекторной структуры 27.6 сут по интервалу 1915—1996 гг., полученным в работе [24] для широтной зоны $\pm 50^\circ$), четырехсекторной — 27.4 сут (в [24] — 27.9 сут), шестисекторной — 27.5 сут. Средняя скорость вращения мод более высокого порядка определялась только для второй части исследуемого интервала, поскольку в первой части значимость наиболее мощных пиков соответствующих диапазонов низкая. Средний период вращения двухсекторной структуры ФМПС в эпохи минимумов составляет 27.0 сут, в эпохи максимумов — 28.4 сут. Период вращения четырехсекторной структуры ФМПС в эпохи максимумов четных циклов (наиболее быстрое вращение) равен 26.6 сут, в эпохи максимумов нечетных циклов (наиболее медленное вращение) — 28.4 сут. То есть, четырехсекторная структура в эпохи минимумов вращается быстрее, чем двухсекторная. Изменение скорости вращения в эпохи максимумов и минимумов двухсекторной (сплошные линии) и четырехсекторной (штриховые линии) структур приведены на рис. 3.

Следует отметить, что средняя скорость вращения четырехсекторной структуры по всему интервалу изменяется незначительно. Период вращения двухсекторной структуры (как средний, так и в эпохи максимумов и минимумов активности) существенно изменялся: в первой части интервала значение среднего периода равно 28.1 сут, во второй — 27.2 сут. Все эти факты указывают на независимость двухсекторной и четырехсекторной структур (или их источников генерации).

Приблизительно в 1938 г. (максимум 17-го цикла) и 1957 г. (максимум 19-го цикла) моменты достижения максимального периода вращения (минимальной скорости) всех трех наиболее значимых секторных мод ФМПС совпали. Возможно, синхронизация вращения главных секторных структур ФМПС повлияла каким-то образом на характер секторной структуры ФМПС и стала причиной появления мелкомасштабных магнитных структур и изменения режима вращения ФМПС. Характерно, что значения среднего

периода вращения всех секторных мод в течение этого интервала времени близки и находятся в интервале 26.9—27.2 сут.

Нельзя сказать, что двухсекторная мода ФМПС в широтной зоне $\pm 20^\circ$ является преобладающей, как это следует из результатов исследований глобального поля Солнца широтной зоны $\pm 50^\circ$ [24]. Для определения

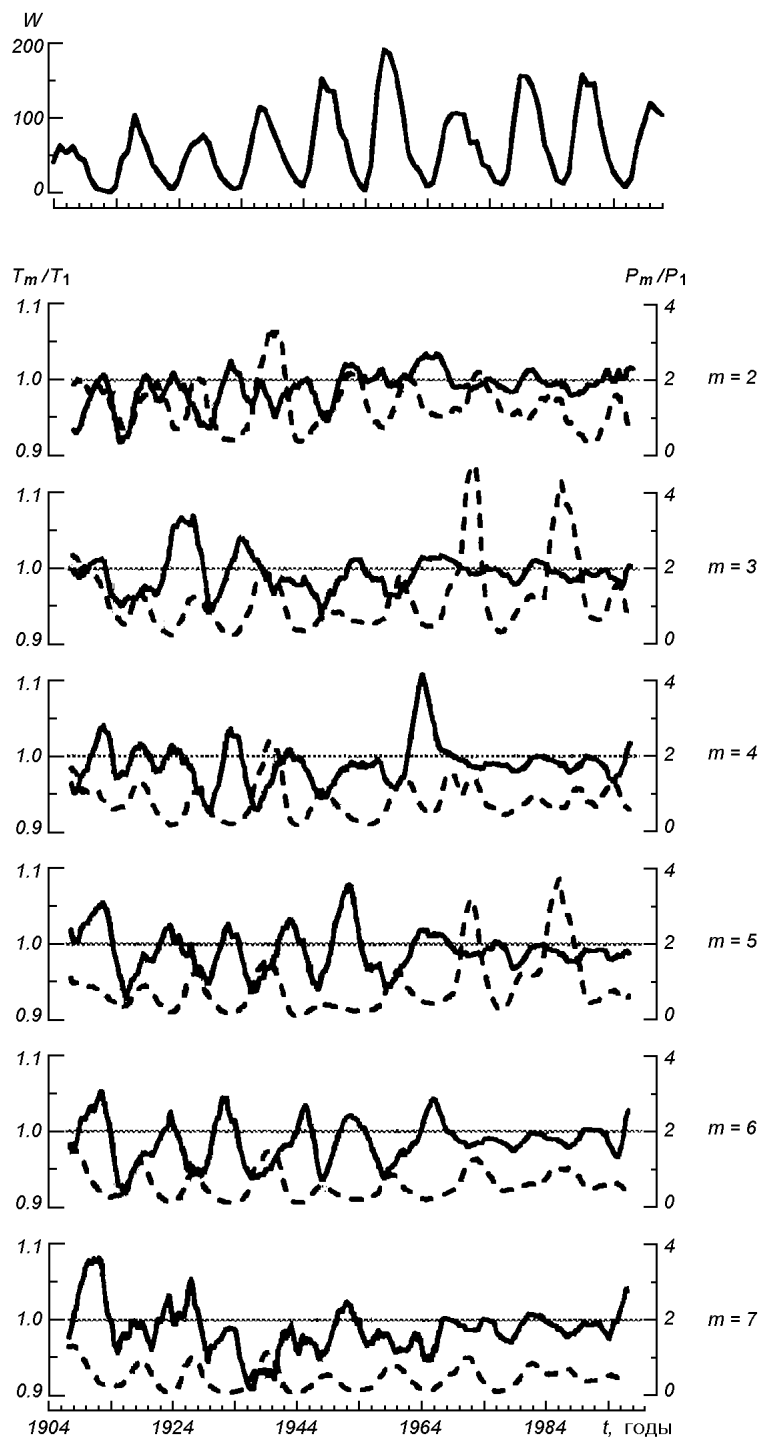


Рис. 4. Изменение отношения основного периода вращения $R_{T,m} = T_m/T_1$ (сплошная линия, шкала слева) и их амплитуд $R_{P,m} = P_m/P_1$ (штриховая линия, шкала справа) секторных мод порядка m и двухсекторной моды. Кривые получены сглаживанием по тринадцати точкам

соотношения характеристик секторных мод ФМПС на рис. 4 мы исследуем величины

$$R_{P,m} = P_m/P_1, \quad R_{T,m} = T_m/T_1,$$

где T_m , P_m — значение основного периода и мощность моды вращения секторной моды порядка m , T_1 , P_1 — значение основного периода и мощность для вращения двухсекторной моды.

Величина $R_{P,m}$ в случае $m = 2$ (четырёхсекторная структура) на всем исследуемом интервале редко имеет значения, меньше единицы. Для остальных секторных мод во второй части исследуемого периода оно также редко бывает меньше единицы, а временами — гораздо больше единицы. Приблизительно в 1947 г. (максимум 18 цикла) наблюдается минимум величины $R_{T,m}$ для $m = 2$, т. е. четырёхсекторной структуры. До этого момента времени величина $R_{T,m}$ была почти всюду меньше единицы, после этого момента ее значение колеблется около единицы. Другими словами, сначала скорость вращения четырёхсекторной структуры была больше скорости вращения двухсекторной структуры, а потом скорости стали приблизительно одинаковыми. Можно выделить еще одну особую точку на рис. 3 — приблизительно в 1964 г. почти одновременно для всех секторных мод наблюдается всплеск величины $R_{T,m}$, в дальнейшем ее значение варьирует около единицы.

Все вышеизложенное, на наш взгляд, подчиняется следующей схеме. В начале XX века в приэкваториальной зоне преобладали две основные секторные моды ФМПС — двухсекторная и четырёхсекторная. Средняя скорость вращения четырёхсекторной структуры, постоянная на всем интервале, в начале века была больше скорости вращения двухсекторной структуры. Приблизительно в 1937 г. (эпоха максимума 17-го цикла) обе моды одновременно достигли минимальной скорости вращения. Поскольку вариации вращения первой из этих мод имеют примерно 11-летний период, а второй — 22-летний, то в 1947 г. совпали по времени моменты достижения минимальной скорости вращения двухсекторной структуры и максимальной скорости вращения четырёхсекторной структуры. В 1957 г. снова совпали моменты достижения минимальной скорости вращения обеих мод. После этого режим вращения ФМПС изменился.

Таким образом, двухсекторная мода не является преобладающей модой ФМПС в зоне $\pm 20^\circ$. Более того, в отдельные интервалы времени во второй половине исследуемого интервала доля мелкомасштабных структур настолько велика, что мощность двухсекторной структуры становится в несколько раз меньше мощности секторных мод более высокого, чем четырёхсекторная мода, порядка.

Зависимость скорости вращения секторной структуры ФМПС от ее порядка. Как было показано, во второй половине прошлого столетия структура ФМПС в широтной зоне $\pm 20^\circ$ характеризовалась (кроме основных двухсекторной и четырёхсекторной структур) наличием секторных структур более высокого порядка, вплоть до $m = 7$. Выше уже упоминалось, что основные секторные моды — двухсекторная и четырёхсекторная имели различные средние скорости вращения как по всему интервалу, так и во второй части интервала. Неидентичный характер вращения наблюдался также и во вращении секторных мод более высокого порядка. На рис. 5 приведена зависимость среднего периода вращения секторной моды от ее порядка. Как видно, с увеличением моды до $m = 5$ период вращения секторной структуры убывает, а потом вновь начинает увеличиваться.

Таким образом, увеличение скорости вращения ФМПС в приэкваториальной зоне связано с увеличением доли мелкомасштабных структур

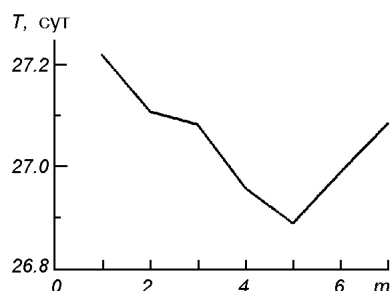


Рис. 5. Зависимость среднего периода P вращения секторных мод фонового поля от их порядка m

(изменением характера секторной структуры ФМПС). Чем выше порядок секторной моды (меньше размер магнитной структуры), тем выше ее скорость (меньше период) вращения. Однако для очень высоких секторных мод (начиная с $m = 6$) зависимость имеет противоположный характер.

СРЕДНЕЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СОЛНЦА

Исследование вариаций магнитного поля Солнца как звезды или среднего магнитного поля Солнца (СМПС) было начато А. Б. Северным в 1968 г. [42, 43]. Анализу вариаций вращения СМПС впоследствии было уделено много внимания [6—10, 12, 14, 15, 20, 27, 28]. Были получены указания на то, что основной вклад в сигнал магнитографа при измерении СМПС вносится большими участками слабого фотосферного (фонового) поля [9, 20]. Как было показано в работе [9], вклад активных областей с сильными магнитными полями в целом незначителен, поскольку активные области сосредоточены на сравнительно небольшой площади, а сильные магнитные поля солнечных пятен противоположной полярности в значительной степени компенсируют друг друга при наблюдениях в интегральном свете. Согласно результатам работы [9] значения коэффициента корреляции ρ сигнала СМПС составляют 0.87 с фоновыми магнитными полями, 0.75 с магнитными полями активных областей, 0.45 с магнитными полями пятен. Согласно результатам [28] с течением цикла в направлении экватора перемещаются так же, как и пятна на поверхности Солнца, те образования, магнитные поля которых дают основной вклад в сигнал СМПС; такими образованиями могут быть фоновые магнитные поля, магнитные поля активных областей. Вследствие дифференциального вращения магнитные образования, появляющиеся на поверхности в начале цикла на высоких широтах, должны иметь меньшую скорость вращения, которая с течением времени должна увеличиваться к концу цикла. Действительно, вследствие примененной им методики было получено, что в начале 21-го цикла (1978 г.) максимум на главной полосе вращения находился на частоте, которая соответствовала периоду вращения СМПС 27.36 сут, в конце цикла (1986 г.) — 26.61 сут. Такая же ситуация наблюдается и для 22 цикла: в 1986 г. центр полосы находился на частоте, соответствующей периоду вращения 27.56 сут, в 1994 г. — 26.73 сут. Анализ спектров последовательных трехгодичных интервалов [12, 14] указывает на то, что наиболее мощные пики в течение приблизительно шести лет, соответствующих эпохам максимума 21 и 22 циклов, имели значения периодов около 26.9 сут. В спектре суммарных данных (1968—2001 гг.), составленных сотрудниками КРАО по наблюдениям четырех обсерваторий, доминирует пик, который соответствует синодическому вращению СМПС 26.95 ± 0.06 сут [10]. Этот пик обнаруживает фазовую когерентность в течение всего интервала наблюдений. Авторы работы [10], ссылаясь на данные гелиосейсмологии, полагают

ют, что такая устойчивость периода около 26.9 сут отображает вращение тороидального поля под конвективной зоной.

Известно, что спектры СМПС в области периодов вращения 26—32 сут имеют две группы доминирующих пиков (около 27.0 и 28.2 сут). Считается, что период около 27.0 сут обусловлен распределением магнитных полей в приэкваториальной зоне, 28.2 сут — зоны с широтой около 30°. Наличие выделенных периодов квазижесткого вращения фоновых полей на дифференциально вращающемся Солнце свидетельствует об устойчивых структурах, существующих от нескольких оборотов Солнца до десятков лет. Ряд исследований [29, 39] указывают на два источника или две системы фоновых полей с периодами вращения около 27.0 и 28.2 сут в 20 и 21 циклах.

Описанная выше методика была применена нами к исследованию временного ряда измерений СМПС. При поиске основного периода вращения секторных структур спектры вычислялись для двух диапазонов периодов вращения: 26.2—27.7 и 27.71—32.0 сут (с окном 4 года и шагом около 3 оборотов Солнца). В дальнейшем мы их будем называть первым и вторым диапазонами периодов вращения. Основное внимание при анализе мы уделяем первому вращательному диапазону, поскольку нашей задачей является сравнение характеристик секторных структур в приэкваториальной области. На рис. 6 приведены вариации значения периода и амплитуды двух доминирующих пиков, соответствующих вращению секторных структур (двухсекторной, четырехсекторной и шестисекторной).

Амплитуды наиболее мощного пика первого вращательного диапазона всех трех секторных мод имеют максимальные значения в эпоху максимумов пятнообразования (1980—1981 гг. и 1989—1990 гг.) Наименьшее значение периода (т. е. около 26.9—27.0 сут) вращения двухсекторной и четырехсекторной мод достигается также в эпохи максимумов циклов активности. Можно говорить о 9-летнем периоде изменения вращения двухсекторной и четырехсекторной структур СМПС. Правило, что наименьшему периоду вращения отвечает максимальное значение амплитуды, сохраняется. Но не в минимуме активности, как это наблюдается во вращении двухсекторной структуры фонового поля. Этот факт дает повод усомниться в концепции определяющего влияния фонового поля на формирование сигнала магнитографа при наблюдении СМПС. Скорее это подтверждает гипотезу о наличии тороидального магнитного поля в основании конвективной зоны. Значения примерно 27-сут периода вращения секторных структур СМПС в эпохи максимумов и минимумов активности нанесены на рис. 3. Как видно, изменение периода двухсекторной структуры СМПС в эпоху максимума исключительно хорошо ложится на кривую изменения скорости вращения двухсекторной структуры ФМПС в эпоху минимумов пятнообразования. То есть в приэкваториальной области полоидальное и тороидальное поле имеют почти одинаковую цикличность изменения скорости вращения (~ 8-9 лет), смещенную друг относительно друга приблизительно на полцикла.

Итак, вариации вращения секторной структуры СМПС совершенно отличны от вариаций вращения секторной структуры ФМПС на общем интервале наблюдений. Однако длина цикла изменения основного периода вращения двухсекторной и четырехсекторной мод СМПС приэкваториальной зоны равна примерно 9 лет, что близко к 8-летней цикличности вращения двухсекторной моды ФМПС.

Согласно современным представлениям глобальное магнитное поле Солнца имеет две составляющие — полоидальную и тороидальную, активность которых протекает в противофазе и смещена на полцикла активности.

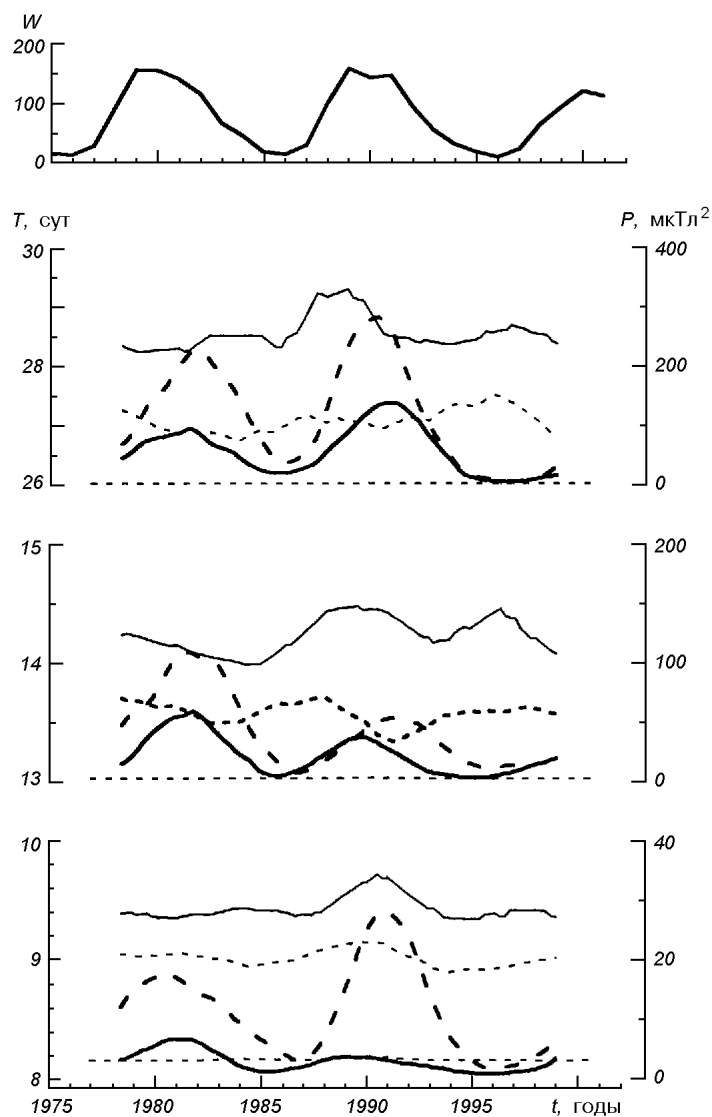


Рис. 6. Вариации значения периода T и амплитуды P двух доминирующих пиков, соответствующих вращению секторных структур СМПС. Штриховые линии — первый диапазон периодов вращения (короткие штрихи — период наиболее мощного пика; длинные — его амплитуды). Сплошные линии — второй диапазон периодов вращения (тонкая линия — период наиболее мощного пика, жирная — его амплитуда). Штриховые горизонтальные линии — уровень значимости 3σ

Цикличность вращения (изменение значения периода вращения) фонового магнитного поля и магнитного поля Солнца как звезды в приэкваториальной области также смещена друг относительно друга на полцикла. По-видимому, это является веским аргументом в пользу гипотезы, что период около 27 сут отражает вращение глубинного тороидального поля.

Почти синхронно изменяются амплитуда и значение (28 сут) наиболее мощного пика второго вращательного диапазона в спектрах двухсекторной и четырехсекторной структур. Амплитуда периодов вращения обеих структур максимальна в эпохи максимумов пятнообразования. Однако значения периода вращения изменяются не закономерным образом. Наибольший период вращения двухсекторной структуры наблюдается на ветви роста

22-го цикла, четырехсекторной структуры — в эпоху максимума и минимума 22-го цикла. Существенные различия эволюции двух выделенных периодов (примерно 27 и 28 сут) квазижесткого вращения СМПС, вероятно, указывают на наличие двух независимых систем магнитных полей.

МЕЖПЛАНЕТНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ НА ОРБИТЕ ЗЕМЛИ

Согласно современным представлениям гелиосферное магнитное поле имеет довольно сложную пространственно-временную организацию в широком диапазоне масштабов от самых мелких до глобальных структур и процессов. Взаимная соподчиненность различных элементов гелиосферного поля контролируется разнообразными нелинейными и нелокальными плазменными и электродинамическими механизмами, которые тесно связаны между собой и увязывают в единое целое систему Солнце — гелиосфера как на макроскопическом гидродинамическом уровне, так и на уровне микроскопических кинетических явлений. На сегодняшний день ясно, что между крупномасштабным солнечным и гелиосферным магнитными полями в целом, несомненно, есть тесная связь, подмеченная довольно давно [5, 40, 46, 47]. В последние годы эта связь была исследована более глубоко путем сравнения больших массивов солнечных и гелиосферных данных, полученных в течение последних двух-трех солнечных циклов [2, 3, 13]. Обнаруживается довольно тесная, но далеко не абсолютная корреляция между дипольной составляющей магнитного поля на Солнце и радиальным полем в гелиосфере, а также между полем Солнца как звезды и векторными компонентами гелиосферного магнитного поля и его интенсивностью [3].

Исследование вращения секторной структуры ММП проводилось неоднократно [11, 13, 26, 45]. Результаты указывают на близость ее периодов вращения с периодами крупномасштабных магнитных полей.

В рамках общего подхода нами исследовано вращение секторной структуры гелиосферного магнитного поля на интервале 1947—2001 гг. с целью сравнения характеристик вращения секторных структур межпланетного магнитного поля с характеристиками вращения секторных структур фонового магнитного поля и среднего магнитного поля Солнца (СМПС). Исследование временного ряда знака полярности ММП проводилось по той же методике, что и исследование временного ряда СМПС, а графики на рис. 7 строились аналогично графикам на рис. 6. Как видно из рис. 7, преобладающей модой ММП, несомненно, является двухсекторная мода. В четырехсекторной структуре значимы лишь пики первого вращательного диапазона. Шестисекторная структура ММП значима лишь в последние 20—30 лет XX ст. Как уже упоминалось выше, после изменения режима вращения фоновых полей в середине XX ст. увеличилась доля мелкомасштабных поверхностных магнитных структур, что, по-видимому, отразилось и в характере секторной структуры ММП.

Проанализируем сначала первый диапазон периодов вращения. Средняя скорость вращения двухсекторной и четырехсекторной структур на интервале 1947—2000 гг. составляет 27.1 сут. Небольшое повышение скорости вращения двухсекторной структуры и понижение скорости вращения четырехсекторной структуры наблюдается после 1978 г. Максимумы амплитуды основного периода вращения имеют место в 1956, 1970, 1975, 1983, 1990 гг., т. е., после 1975 г. тоже имеет место приблизительно 7-летняя цикличность в изменении амплитуды периода вращения двухсекторной структуры ММП. Максимумы значения квази-27-дневного периода вращения двухсекторной структуры имеют место в 1954, 1975 и 1996 гг., т. е. возможно существует 21-летняя цикличность в изменении этого периода.

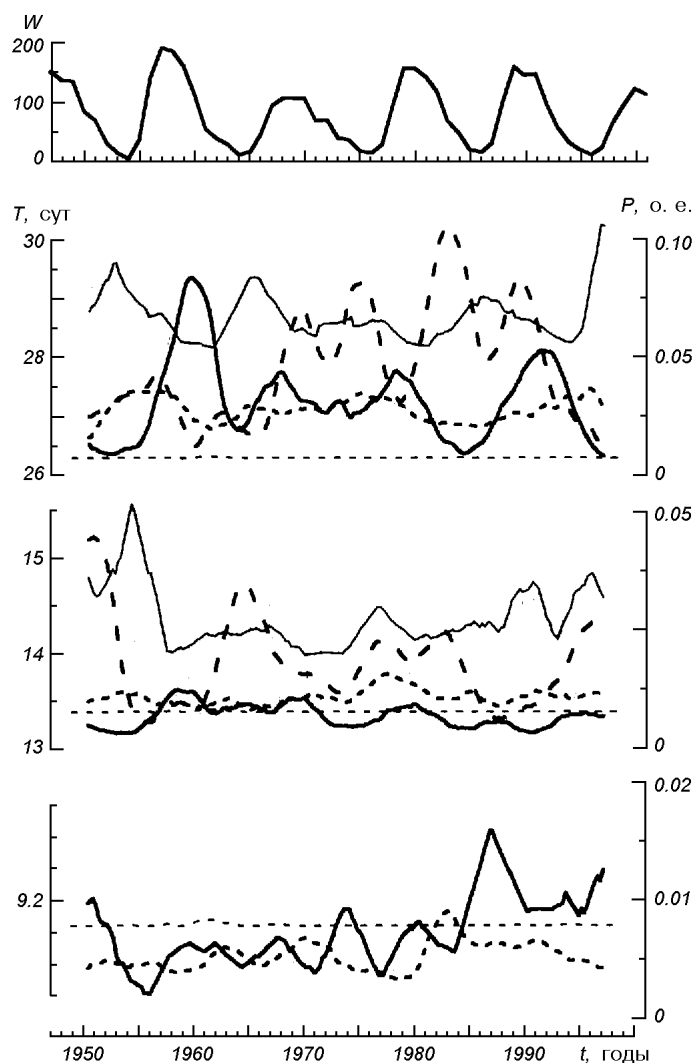


Рис. 7. Вариации значения периода и амплитуды двух доминирующих пиков, соответствующих вращению секторных структур ММП. Штриховые линии — первый диапазон периодов вращения (короткие штрихи — значение периода наиболее мощного пика, длинные — его амплитуды), сплошные линии — второй диапазон периодов вращения (тонкая линия — значение периода наиболее мощного пика, жирная — его амплитуды). Верхний график — изменение среднегодовых чисел Вольфа. Штриховые горизонтальные линии — уровень значимости 3σ нормального распределения

Пики второго вращательного диапазона значимы только в частотном диапазоне, соответствующем двухсекторной структуре. Их вариации существенно отличаются от вариаций главного пика первого диапазона периодов вращения и наиболее мощного пика второго вращательного диапазона СМПС (рис. 6). Изменения со временем основного периода второго вращательного диапазона (назовем его квази-28-дневным периодом вращения) имеет приблизительно 11-летнюю цикличность.

На рис. 8 приведены изменения со временем отношения основных периодов вращения и их амплитуд четырехсекторной и двухсекторной мод ММП и СМПС. Отношение периодов близко к единице, как и в случае

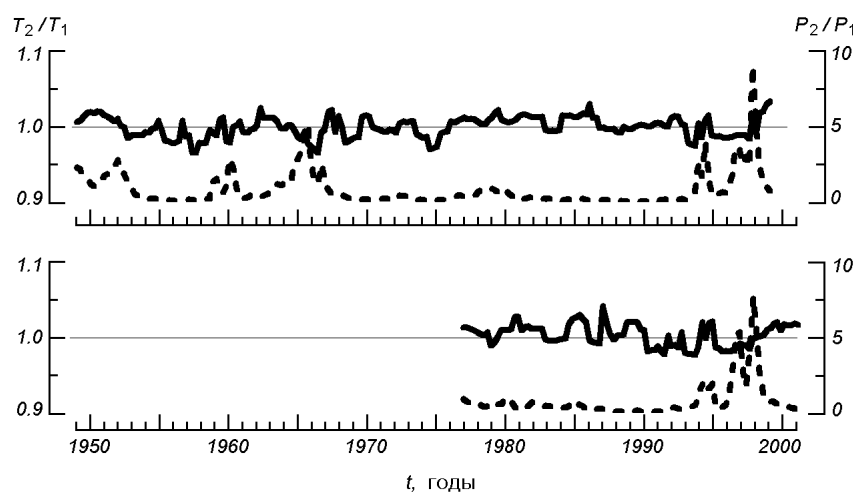


Рис. 8. Изменение отношения основного периода вращения $R_{T,m} = T_2/T_1$ (сплошная линия, левая шкала) и их амплитуд $R_{P,m} = P_2/P_1$ (штриховая линия, правая шкала) четырехсекторной и двухсекторной мод ММП (верхний график) и СМПС (нижний график). Кривые получены сглаживанием по тринадцати точкам

ФМПС. Отношение амплитуд почти идентично в случае СМПС и ММП и существенно отличается от отношения амплитуд этих мод ФМПС. И в СМПС, и в ММП двухсекторная мода является преобладающей почти всегда, что согласуется с выводами работы [24]. Четырехсекторная мода преобладала в один и тот же период времени (1993—2000 гг.) и в ММП, и в СМПС. Этот результат нами был уже получен ранее при применении другой методики исследования [13].

Итак, управляющее действие магнитной переменности Солнца имеет весьма сложный характер. Полученные результаты указывают на связь между основными секторными модами ММП, СМПС и ФМПС приэкваториальной зоны.

ВЫВОДЫ

Полученные в данной работе результаты приводят к установлению следующих фактов.

Подтвержден факт изменения режима вращения ФМПС. Обнаружено изменение характера секторной структуры ФМПС (увеличение доли мелко-масштабных структур), а также изменение характера секторной структуры ММП. Получены указания на то, что возможной причиной этих изменений могла быть синхронизация вращения главных секторных структур ФМПС, имеющая место в 1937—1957 гг.

Обнаружены новые факты, подтверждающие независимость основных секторных мод ФМПС.

Характер вращения двухсекторной структуры ФМПС имеет сильные отличия в первой и во второй половине XX столетия, а именно — в первой половине вращение было намного медленней, чем во второй. Циклическое изменение периода вращения двухсекторной структуры ФМПС в первой половине XX столетия происходило в диапазоне примерно 27.0—30.0 сут, во второй — 26.5—27.7 сут. Также обнаружено, что кроме изменения скорости вращения двухсекторной структуры ФМПС имеет место изменение цикличности в изменении основного периода вращения (приблизительно

11-летней на 8-летнюю). Вращение четырехсекторной структуры ФМПС имеет совершенно иной характер. Изменение амплитуды основного периода вращения происходит приблизительно с 11-летним периодом, а максимальное значение периода достигается приблизительно через 20—22 г. Форма этой циклической кривой довольно сложная и сохраняется в течение всего исследуемого интервала. Кроме основного максимума периода, который по времени совпадает с нечетными максимумами чисел Вольфа (15, 17, 19, 21), имеются еще два вторичных максимума по разные стороны главного максимума. Минимумы выражены не так четко, как максимумы, и по времени совпадают с максимумами четных чисел Вольфа (16, 18, 20, 22). Как известно, нечетные максимумы чисел Вольфа выше четных. Скорость вращения четырехсекторной структуры ФМПС максимальна во время четного, т. е. менее интенсивного цикла.

Установлено, что чем выше порядок секторной моды ФМПС, тем выше ее скорость вращения. Для очень высоких секторных мод (начиная с $m = 6$) зависимость имеет противоположный характер.

Вариации периода вращения секторных структур СМПС совершенно отличны от вариаций секторных структур фонового поля для этого же периода времени. Однако длина цикла изменения основного периода вращения двухсекторной и четырехсекторной мод СМПС в приэкваториальной зоне равна примерно 9 лет, что близко к 8-летней цикличности вращения двухсекторной моды фонового поля. Цикличность вращения (изменение значения периода вращения) ФМПС и СМПС в приэкваториальной области смещены друг относительно друга на полцикла. По-видимому, это является веским аргументом в пользу гипотезы, что период около 27 сут отражает вращение глубинного тороидального поля и согласуется с современными представлениями о том, что глобальное магнитное поле Солнца имеет две составляющие — полоидальную и тороидальную, активность которых протекает в противофазе и которые смещены друг относительно друга на полцикла активности.

Изменения значения квази-27-летнего периода вращения двухсекторной структуры ММП возможно имеет 20—22-летнюю цикличность, квази-28-дневного — 11-летнюю цикличность. Средние периоды вращения двухсекторной и четырехсекторной структур ММП на интервале 1947—2000 гг. почти одинаковы и составляют 27.1 сут. Небольшое повышение скорости вращения двухсекторной структуры и понижение скорости вращения четырехсекторной структуры наблюдается после 1978 г. Максимумы амплитуды периода вращения имеют место в 1956, 1970, 1975, 1983, 1990 гг., т. е., после 1975 г. тоже имеет место приблизительно 7-летняя цикличность в изменении амплитуды периода вращения двухсекторной структуры ММП. Полученные результаты указывают на связь между основными секторными модами ММП и СМПС.

Автор благодарна В. И. Макарову, А. Г. Тлатову, В. В. Васильевой за предоставление временного ряда фонового поля, сотрудникам Станфордской обсерватории за возможность работать с данными по СМПС, а также Н. Н. Степанян за полезные замечания.

1. Васильева В. В., Макаров В. И., Тлатов А. Г. Циклы вращения секторной структуры магнитного поля Солнца и его активности // Письма в Астрон. журн.—2002.—28, № 3.—С. 228—234.
2. Веселовский И. С., Дмитриев А. В., Суворова А. В. Средние параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на орбите Земли за последние три цикла // Астрон. вестник.—1998.—32, № 4.—Р. 352—358.

3. Веселовский И. С., Дмитриев А. В., Суворова А. В., Минаева Ю. С. Структура долговременных изменений параметров плазмы и магнитных полей в околоземной гелиосфере // Астрон. вестник.—2000.—34, № 1.—С. 82—93.
4. Григорьев В. М., Пещеров В. С. О двух модах твердотельного вращения крупномасштабных солнечных магнитных полей // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физ. Солнца.—1983.—Вып. 65.—С. 3—13.
5. Иванов Е. В. О связи межпланетного магнитного поля с крупномасштабным распределением солнечных магнитных полей // Солнеч. данные.—1987.—№ 1.—С. 56—66.
6. Котов В. А. Вращение Солнца и вращение его общего магнитного поля // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1987.—77.—С. 39—50.
7. Котов В. А., Левицкий Л. С. Дискретность периодов вращения солнечного и межпланетного магнитных полей // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1983.—68.—С. 56—68.
8. Котов В. А., Степанян Н. Н. Некоторые характеристики крупномасштабных магнитных полей на Солнце // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1980.—62.—С. 118—124.
9. Котов В. А., Степанян Н. Н., Щербакова З. А. Роль фонового магнитного поля и полей активных областей в общем магнитном поле Солнца // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1977.—56.—С. 75—83.
10. Котов В. А., Ханейчук В. И., Цап Т. Т. Новые измерения общего магнитного поля Солнца и его вращение // Астрон. журн.—1999.—87, вып. 3.—С. 218—224.
11. Куклин Г. В., Обридко В. Н. Вращение секторной структуры межпланетного магнитного поля (1926—1980) // Солнеч. данные.—1988.—№ 2.—С. 78—84.
12. Лейко У. М. О периодичностях общего магнитного поля Солнца // Новый цикл активности Солнца: наблюдательные и теоретические аспекты. / Под ред. В. И. Макарова, В. Н. Обридко и др. — Санкт-Петербург: ГАО РАН, 1998.—С. 288—292.
13. Лейко У. М. Вариации межпланетного магнитного поля на протяжении 18—22 циклов // Sun at the top of the maximum and the solar-stellar connection. — Saint-Petersburg, Pulkovo, 2000.—Р. 242.
14. Лейко У. М. Аналіз спектрів потужності загального магнітного поля Сонця на різних фазах циклу активності // Вісник Київ. ун-ту. Астрономія.—2001.—№ 37.—С. 29—37.
15. Лейко У. М. Вариации секторных структур крупномасштабных солнечного и межпланетного полей // Кинематика и физика небес. тел.—2002.—18, № 5.—С. 399—409.
16. Макаров В. И. О методике построения «Синоптических карт активных образований на Солнце» на Горной астрономической станции ГАО АН СССР // Солнеч. данные.—1984.—№ 6.—С. 59—61.
17. Макаров В. И., Тлатов А. Г. Крупномасштабное магнитное поле Солнца и 11-летние циклы активности // Астрон. журн.—2000.—77, № 11.—С. 858—864.
18. Мак-Интош П. С. Определение полярностей солнечных магнитных полей по наблюдениям в линии H_{α} // Наблюдения и прогноз солнечной активности / Под ред. П. Мак-Интош, М. Драйер. — М.: Мир, 1976.—С. 43—67.
19. Михайлуца В. П. Крупномасштабная организация магнитной цикличности Солнца // Астрон. журн.—1993.—70, № 3.—С. 543—555.
20. Мордвинов А. В., Плюснина Л. А. Когерентные структуры в динамике крупномасштабного магнитного поля Солнца // Астрон. журн.—2001.—78, № 8.—С. 753—760.
21. Степанян Н. Н. Фоновые магнитные поля на Солнце в 1964—1978 гг. // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1982.—65.—С. 43—58.
22. Степанян Н. Н. Изменение дифференциального вращения фоновых магнитных полей на Солнце // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1983.—67.—С. 59—65.
23. Степанян Н. Н. Фоновые магнитные поля и солнечная активность // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1985.—71.—С. 62—68.
24. Обридко В. Н., Шелтинг Б. Д. Крупномасштабное магнитное поле на Солнце: экваториальная область // Астрон. журн.—2000.—77, № 2.—С. 124—133.
25. Обридко В. Н., Шелтинг Б. Д. Крупномасштабное магнитное поле на Солнце: зависимость от широты // Астрон. журн.—2000.—77, № 4.—С. 303—312.
26. Тавастшерна К. С., Макаров В. И., Петрова Н. С. О вращении секторной структуры межпланетного магнитного поля в период 1926—1986 гг. // Солнеч. данные.—1988.—№ 2.—С. 84—91.
27. Ханейчук В. И. Вращение общего магнитного поля Солнца, 1968—1996 гг. // Астрон. журн.—1999.—76, № 5.—С. 385—395.
28. Ханейчук В. И. Вариации общего магнитного поля Солнца: вращение и 22-летний цикл // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2000.—96.—С. 176—187.
29. Antonucci E., Hoeksema J. T., Scherrer P. H. Rotation of the photospheric magnetic fields: a north-south asymmetry // Astrophys. J.—1990.—360.—P. 296—304.
30. Babcock H. W. The solar magnetograph // Astrophys. J.—1953.—118.—P. 387—396.
31. Babcock H. W. The Sun's polar magnetic field // Astrophys. J.—1959.—130, N 1.—P. 360—365.

32. *Babcock H. W.* The topology of the Sun's magnetic field and the 22-year cycle // *Astrophys. J.*—1961.—**133**, N 1.—P. 572—597.
33. *Babcock H. W., Babcock H. D.* The Sun's magnetic fields, 1952—1954 // *Astrophys. J.*—1955.—**121**, N 1.—P. 349—366.
34. *Erofeev D. V.* Rigidly rotating modes of the solar magnetic field // *Solar Phys.*—1996.—**167**, N 1.—P. 220—228.
35. *Leighton R. R.* Transport of magnetic fields on the Sun // *Astrophys. J.*—1964.—**140**.—P. 1547—1563.
36. *Leighton R. R.* A magneto-kinematic model of the solar cycle // *Astrophys. J.*—1969.—**156**.—P. 1—26.
37. *Makarov V. I., Sivaraman K. R.* Atlas of H_{α} synoptic charts // *Kodaikanal Observatory Bulletins.*—1986.—7.—P. 2.
38. *McIntosh P. S., Wilson P. R.* A new model for flux emergence and evolution of sunspots and large-scale fields // *Solar Phys.*—1985.—**97**, N 1.—P. 59—79.
39. *Mordvinov V. I., Tikhomolov E. M.* On the rotation of large-scale background fields in the 21-st cycle of solar activity // *Solar Phys.*—1992.—**138**, N 1.—P. 23—33.
40. *Ness N. F., Wilcox J. M.* Extension of the photospheric magnetic field into interplanetary space // *Astrophys. J.*—1966.—**143**, N 1.—P. 23—31.
41. *Scherrer P. H., Wilcox J. M., Svalgaard L., et al.* The mean magnetic field of the Sun: observations at Stanford // *Solar Phys.*—1977.—**54**, N 1.—P. 353—361.
42. *Severny A. B.* The polar fields and time fluctuations of the general magnetic field of the Sun // *Solar magnetic fields: Proc. IAU Symp. N 43.* — Dordrecht, 1971.—P. 675—695.
43. *Severny A., Wilcox J. M., Scherrer P. H., Colburn D. S.* Comparison of the mean photospheric magnetic field and the interplanetary magnetic field // *Solar Phys.*—1970.—**15**, N 1.—P. 3—14.
44. *Snodgrass H. B.* Magnetic Rotation of the Solar Photosphere // *Astrophys. J.*—1983.—**270**, N 1.—P. 288—289.
45. *Svalgaard L., Wilcox J. M.* Long term evolution of solar sector structure // *Solar Phys.*—1975.—**41**, N 2.—P. 461—475.
46. *Wilcox J. M., Ness N. F.* Solar source of the interplanetary sector structure // *Solar Phys.*—1967.—**1**.—P. 437—445.
47. *Wilcox J. M., Severny A. B., Colburn D. S.* Solar source of interplanetary magnetic fields // *Nature.*—1969.—**224**.—P. 353—354.

Поступила в редакцию 19.02.04