

УДК 523.9–337

## ИЗМЕНЕНИЯ ДИПОЛЬНОГО МАГНИТНОГО МОМЕНТА СОЛНЦА В ТЕЧЕНИЕ ЦИКЛА АКТИВНОСТИ

© 2006 г. И. М. Лившиц, В. Н. Обридко

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

Поступила в редакцию 28.02.2006 г.; принята в печать 13.03.2006 г.

На основе наблюдений крупномасштабных магнитных полей (синоптических карт) и данных измерений поля Солнца как звезды (общего магнитного поля — ОМП) определены характеристики магнитного момента и направления дипольного поля для трех последних солнечных циклов. Получено, что как величина момента, так и его вертикальная и горизонтальная компоненты регулярно изменяются в ходе цикла, никогда не исчезая совсем. Вейвлет-анализ измерений ОМП показал, что амплитуда 27-дневных вариаций ОМП самым тесным образом связана с величиной магнитного момента горизонтального диполя. Процесс переполюсовки глобального диполя представляет собой изменение угла наклона его оси и происходит не плавно, а отдельными цугами, длящимися 1–2 года. При этом перед началом переполюсовки ось диполя прецессирует относительно оси вращения Солнца, а затем смещается в меридианальной плоскости, достигая очень низких широт, где начинает существенно смещаться по долготе. Эти результаты обсуждаются совместно с гелиосейсмологическими выводами о существовании колебаний с периодом около 1.3 года, а также особенностями протекания динамо-процессов в случае наклонного ротатора.

PACS numbers : 96.60.Hv

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, большинство основных явлений солнечной активности связывают с эволюцией локальных магнитных полей. Она приводит к формированию солнечных пятен и активных областей в целом — образований размером несколько угловых минут. При наблюдениях с высоким пространственным разрешением более крупномасштабные поля на Солнце не видны. Они достаточно хорошо выделяются на Стэнфордских синоптических картах, разрешение которых составляет  $3' \times 3'$ . На магнитных картах можно условно выделить локальные (размером несколько угловых минут) и крупномасштабные (размером от нескольких до  $10'–20'$ , т.е.  $\sim 0.2–1 R_{\odot}$ ) магнитные поля. Крупномасштабное поле включает в себя две высокоширотные области, занятые противоположно направленными полями, и набор квазиуниполярных структур на средних и низких широтах размером от нескольких до  $10'–20'$ . Квазиуниполярные магнитные области, иногда формирующиеся как остатки больших активных областей, существуют от полугода до 1–2 лет. Самый крупный масштаб связан с дипольной составляющей магнитного поля — глобальным диполем.

Уже давно известно, прежде всего из затменных наблюдений, что при очень низкой активности маг-

нитное поле в короне с определенной степенью точности представляет собой глобальный диполь, ось которого практически совпадает с осью вращения Солнца. Здесь имеются в виду корональные слои, в которых скорости солнечного ветра еще малы, т.е. ниже “поверхности источника” солнечного ветра. На этой фазе цикла возмущения диполя со стороны локальных полей слабы. Такая магнитная конфигурация остается устойчивой в течение нескольких лет.

В области низких широт дипольная конфигурация глобального поля способствует развитию некоторого количества высоких корональных петель, каждая из которых соединяет области противоположно направленных магнитных полей по обе стороны от экватора. Это приводит к формированию известной крупномасштабной структуры короны в минимуме, включающей в себя пояс стримеров на всех долготах вблизи экватора и две системы полярных щеточек близ полюсов. В результате выноса глобальных магнитных полей солнечным ветром наружу в межпланетном пространстве возникает гелиосферный токовый слой, разделяющий противоположно направленные магнитные потоки. При низкой активности этот нейтральный токовый слой является плоским.

С ростом активности влияние активных областей возрастает, и линия раздела полярностей

крупномасштабных магнитных полей вблизи экватора становится волнистой. Кроме того, в этот период возрастает роль квадрупольной составляющей крупномасштабных магнитных полей и более высоких гармоник.

В настоящее время имеются непосредственные наблюдения крупномасштабных магнитных полей за несколько последних циклов. Кроме того, с 1968 г. в Крымской астрофизической обсерватории, а затем и в других обсерваториях, проводятся наблюдения магнитного поля Солнца как звезды (общего магнитного поля — ОМП). Сигнал ОМП пропорционален величине напряженности магнитного поля Солнца, проинтегрированной по центральной части диска. Основной вклад вносят поля крупного масштаба. Эти два ряда данных позволяют изучить характеристики крупномасштабных полей в течение нескольких циклов.

В последние годы достигнут существенный прогресс в теории динамо и гелиосейсмологических исследованиях. К сожалению, эти работы не в полной мере учитывают результаты наблюдений магнитных полей на Солнце. В частности, при анализе вопроса о генерации магнитного поля внутри Солнца до сих пор обычно предполагалось, что в начале переполусовки близ максимума солнечного цикла дипольный момент Солнца полностью исчезает, а затем вновь возникает с противоположным знаком [1]. Это явилось дополнительным стимулом для того, чтобы вернуться к рассмотрению вопроса о вкладе дипольной компоненты в наблюдаемое магнитное поле Солнца.

Ниже сначала дано краткое описание наблюдений крупномасштабных полей и методов выделения дипольной составляющей. Затем изучается поведение в ходе последних трех циклов поля Солнца как звезды и компонент диполя, вычисленных на основании анализа синоптических карт. При этом сопоставляются результаты вейвлет-анализа временного ряда значений ОМП с вычисленными характеристиками диполя с целью детализации выявленных закономерностей. В заключении статьи приводятся полученные результаты и кратко обсуждается их значение для динамо-теории, гелиосейсмологии и физики межпланетного магнитного поля.

## 2. ИСХОДНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ЕГО АНАЛИЗА

В работе использованы измерения магнитных полей, проведенные на обсерватории Стэнфордского университета (сейчас — Солнечная обсерватория имени Дж. Вилкокса; <http://quake.stanford.edu/wso/wso.html>). Соответствующие величины —

напряженность продольной компоненты магнитного поля на фотосфере — были сведены в синоптические карты для каждого из кэрригтоновских оборотов [2, 3].

Для последующего анализа учитывалось разложение наблюдаемого магнитного поля по сферическим функциям (полиномам Лагранжа). Далее по данным с 1642-го оборота по 2027-й (1976.44—2005.2 гг.) были проведены вычисления магнитного момента диполя  $\mu$  и широты  $\theta$  северного (N) полюса магнитного диполя, а также отдельно условных магнитных моментов “вертикального”  $\mu_{vert}$  и “горизонтального”  $\mu_{horiz}$  диполей по следующим формулам:

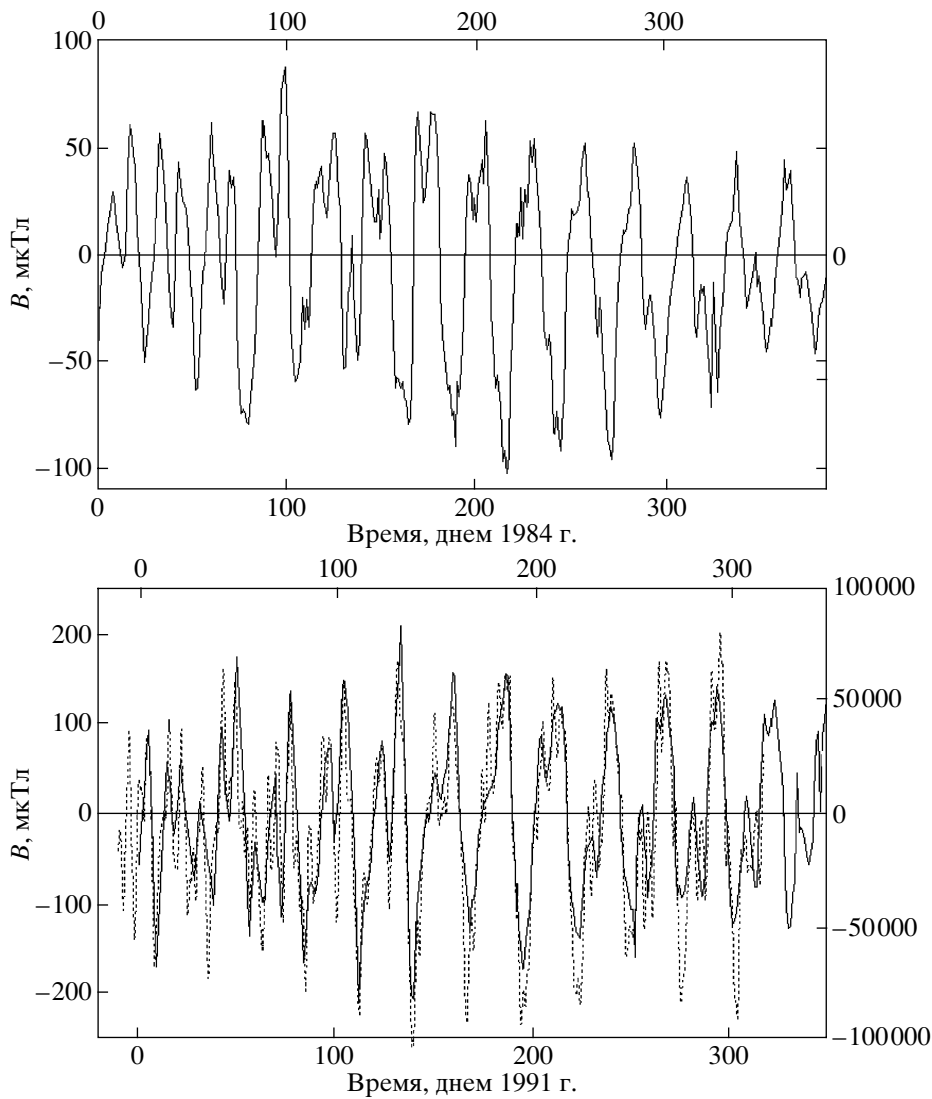
$$\begin{aligned}\mu_{full} &= \sqrt{g_{10}^2 + g_{11}^2 + h_{11}^2}, \\ \mu_{vert} &= |g_{10}|, \\ \mu_{horiz} &= \sqrt{g_{11}^2 + h_{11}^2}, \\ \sin \theta &= g_{10}/\mu,\end{aligned}$$

где  $g_{10}$ ,  $g_{11}$  и  $h_{11}$  — коэффициенты разложения наблюдаемого магнитного поля по полиномам Лагранжа.

Расчеты велись в классическом варианте, т.е. предполагалась потенциальность от фотосферы до поверхности источника на высоте  $2.5 R_{\odot}$  от центра и вводилась полярная коррекция, учитывающая ненадежность измерений магнитного поля вблизи полюсов [4]. Впрочем, результаты этой работы практически не зависят от принятых предположений.

Кроме того, наш анализ основывается на ряде ежедневных значений ОМП Солнца. В принципе, эти данные могут также использоваться для изучения вариаций дипольной составляющей глобального магнитного диполя. Так для иллюстрации на рис. 1 приведены значения ОМП Солнца для 1984 и 1991 гг. по ряду значений, полученных на различных обсерваториях и сведенных в единый ряд [5]. Во-первых, на рис. 1 отчетливо видно наличие изменений с периодом около 27 сут. Амплитуда этих изменений велика в некоторые периоды близ максимума активности и уменьшается до очень малых значений при переходе к минимуму. Различие максимальных значений ОМП в 1984 и 1991 г. проявляется на рис. 1 в согласии с подробным исследованием, проведенным в КрАО [6]. Отметим, что точное значение доминирующего периода также выявлено в ходе предыдущих исследований в КрАО [6, 7].

Во-вторых, на рис. 1 сравниваются значения ОМП для 1991 г., непосредственно измеренные и вычисленные путем осреднения синоптических карт. По этим данным, приведенным для 1991 г., видно, что сигнал ОМП действительно является



**Рис. 1.** Магнитное поле Солнца как звезды в микротеслах ( $100 \text{ мкТл} \equiv 0.01 \text{ Гс}$ ) в 1984 и 1991 гг. по наблюдениям в Стэнфорде (сплошные кривые). Пунктир — вычисленные по фотосферным данным значения ОМП Солнца в условных единицах (шкала справа).

средним полем центральной части диска Солнца. Заметим, что в активность в 1991 г. была достаточно высокой, с присутствием и развитием на диске больших групп пятен (сильных локальных полей). В более спокойные периоды согласие значений ОМП и вычисленного по синоптическим картам среднего значения гораздо лучше показанного на нижней диаграмме рис. 1.

рис. 1 дает некоторое основание считать, что вариация ОМП связана с поведением глобального диполя. Однако для изучения того, какие характеристики (компоненты магнитного момента, величина или направление) определяют изменение ОМП на различных фазах цикла, это исследование было продолжено. Ниже анализ данных ОМП Солнца за период с 1975 по 1996 гг. также осно-

ван на наблюдениях, проведенных в обсерватории Стэнфордского университета. Для изучения этого временного ряда мы использовали программу вейвлет-анализа, разработанную на основе алгоритма “gapped wavelet algorithm” [8], особое внимание в котором уделяется исключению влияния лагун в данных. Были проведены тестовые расчеты, которые продемонстрировали высокую эффективность работы программы в приложении к рядам данных с большими лагунами. При пропусках в используемом здесь ряде значений ОМП около 15% всего периода наблюдений это оказалось лучшим, чем заполнение лагун по наблюдениям других обсерваторий. Основной трудностью при сведении данных в единый ряд является, как обычно, преодо-

ление различий калибровок отдельных инструментов.

### 3. ЦИКЛИЧЕСКАЯ ВАРИАЦИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ДИПОЛЯ И ЕГО КОМПОНЕНТ

Результаты расчетов магнитного момента дипольной составляющей и его компонентов представлены на рис. 2 и 3. Видно, что абсолютная величина  $\mu_{full}$  почти все время заключена в пределах 20–40 мкТл/ $R_{\odot}^3$ , т.е. в течение двух с половиной циклов не менялась более, чем в 2–2.5 раза.

Подчеркнем, что магнитный момент диполя никогда не обращается в ноль. Строго говоря, это утверждение делается здесь по данным с временным разрешением 13–14 дней, но очень быстрые изменения магнитных полей на масштабе, сравнимом с солнечным радиусом, представляются невозможными. Более того, исчезновение глобального магнитного поля привело бы к значительным изменениям структуры короны на высотах более 1.2–1.5  $R_{\odot}$ . Просмотр ежедневных наблюдений SOHO LASCO-2 показал, что таких аномальных случаев не наблюдалось.

Сравнение временных изменений полного момента диполя с фазой солнечного цикла (рис. 2а) и чисел Вольфа (рис. 2в) в данном случае показывает, что минимум величины магнитного момента не всегда совпадает с характерными точками цикла. Обычно он достигается на фазе роста или спада солнечного цикла. Циклическая вариация видна как в величине полного вектора, так и в обоих его компонентах (рис. 2 и 3). Наиболее отчетливо она проявляется в угле наклона  $\theta$ .

Тот известный факт, что в в минимуме цикла магнитный диполь является строго вертикальным, отражается на рис. 2 в том, что в этот момент горизонтальный диполь обращается в нуль, а широта полюса диполя близка к  $90^\circ$ . С приближением к максимуму полный магнитный момент в некоторые моменты сильно уменьшается, никогда не обращаясь в нуль.

На фазе спада цикла на 1–2 года устанавливается состояние, при котором магнитные моменты вертикального и горизонтального диполя сравнимы. Эту ситуацию в астрофизике принято называть наклонным ротатором. Видно, что такое положение реализуется в годы высокой активности, но наиболее отчетливо оно проявилось во втором максимуме корональной активности и уже начале фазы спада в 1982, 1984 гг. и через 10 лет в 1992 и 1994 гг. В только что прошедшем цикле активности такая картина не была столь четкой.

Обсуждаемые выше закономерности проявляются также на рис. 3, где полный магнитный момент

диполя сопоставлен с вертикальной и горизонтальной его компонентами. Сглаженное по нескольким оборотам значение величины вертикальной компоненты плавно изменяется, отчетливо демонстрируя циклическую десятилетнюю вариацию. Горизонтальная компонента проявляется в каждом цикле в периоды высокой активности, близким к эпохам переполюсовки. Ее величина иногда достигает больших значений по сравнению с вертикальной компонентой и характеризуется гораздо большим разбросом значений. Возможно, здесь сказываются изменения с периодом 1–2 года (обсуждение см. ниже). Сравнение компонент с величиной полного диполя еще раз иллюстрирует то, что в минимум цикла реализуется ситуация вертикального, а близ максимума — горизонтального диполя.

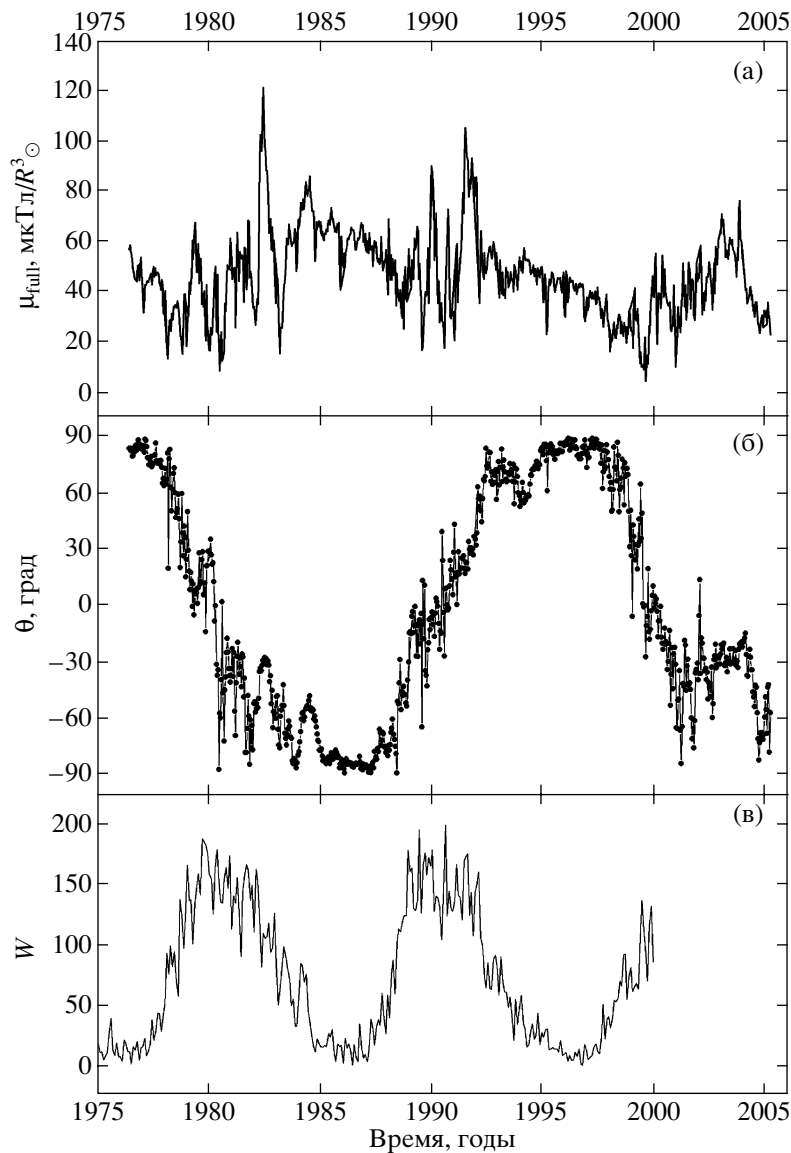
На рис. 3 также видны сильные отличия в поведении обеих компонент в 21-м, 22-м циклах от их изменений в 23-м цикле. Как известно, основное отличие прошедшего цикла состояло в том, что активность в его максимуме была невысокой, но продолжалась гораздо дольше обычного — около 5 лет. Заметим, что отношение горизонтальной к вертикальной составляющей равно  $\tan \theta = \mu_{horiz} / \mu_{vert}$ , поэтому некоторые закономерности могут быть прослежены и на рис. 2.

В заключение этого раздела повторим, что циклическая вариация надежно проявляется в величине дипольного магнитного момента и его компонент.

### 4. ИЗМЕНЕНИЯ СИГНАЛА ОМП, СВЯЗАННЫЕ С ВРАЩЕНИЕМ

Обратимся теперь к информации о дипольной составляющей, которая может быть получена из вариаций ОМП. Уже из самих этих данных видно, что амплитуда 27-дневных изменений велика в период максимума активности и уменьшается до очень малых значений при переходе к минимуму. Ранее это было изучено Ханейчуком [6] для каждого года в период 1968–1996 гг. Случаи больших амплитуд представлены на рис. 1 для 1984 и 1991 гг.

Представляет интерес, однако, сравнить поведение этих колебаний для характерных периодов существования солнечного диполя. Такой анализ был начат нами ранее в [9] для ситуаций, условно называемых горизонтальным и наклонным диполем. Первая ситуация наиболее наглядно проявилась в 1991 г., когда в некоторые моменты времени пояс стримеров наблюдался близ полюсов Солнца, а через четверть солнечного оборота вновь появлялась типичная круглая корона эпохи максимума. В [9] мы разделили каждый из промежутков, в которых отчетливо проявляется модуляция сигнала ОМП (сводный ряд данных в [5]), на 27-дневные интервалы, причем начало колебания в



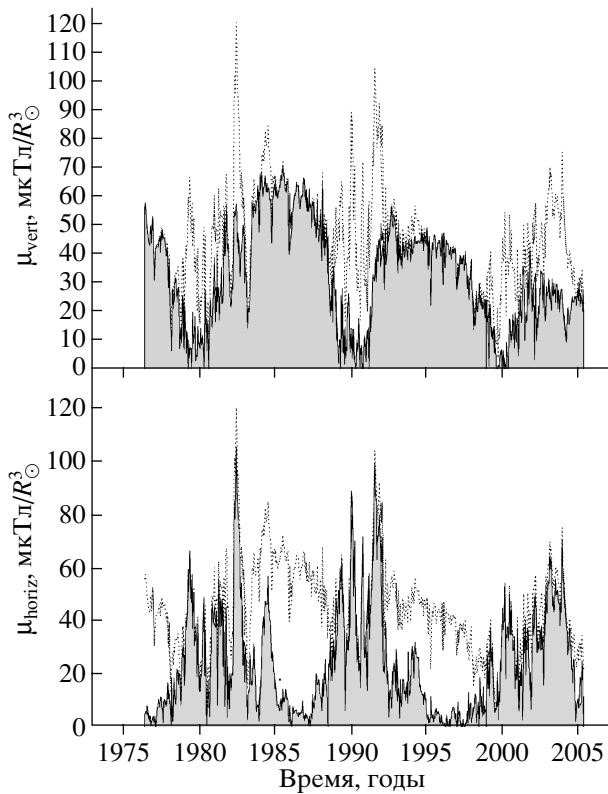
**Рис. 2.** (а) — Полный магнитный момент диполя  $\mu_{full}$ . (б) — Угол  $\theta$  наклона оси магнитного диполя, отсчитываемый от плоскости солнечного экватора (широта); временное разрешение — 0.5 кэррингтоновского оборота. (в) — Среднемесячные значения чисел Вольфа.

середине интервала совмещалось с сутками начала кэррингтоновского оборота (CR). Получено, что наилучшим образом 27-дневные изменения ОМП проявлялись в 1984 г. в CR 1748–1753. Такая ситуация является не слишком редкой, и на фазе спада каждого из циклов можно выбрать один или несколько промежутков длительностью около полугода с подобным набором таких близких фазовых зависимостей. Во второй половине 1991 г. амплитуда этих изменений была в несколько раз больше, чем в 1984 г., а их форма — более сложная, в чем проявляется влияние квадрупольной составляющей магнитного поля.

Заметим, что нарушения регулярности 27-дневных колебаний в июне 1991 г., также как и в

августе 1972 г., конечно, связаны с возникновением больших комплексов активности и интенсификацией процессов на активной долготе.

Вейвлет-анализ предоставляет очень большие возможности для изучения периодических изменений сигналов, амплитуда которых изменяется на временных интервалах, существенно превышающих период основной моды. Распределение амплитуд вейвлет-преобразования временного ряда значений ОМП по наблюдениям в Стэнфорде представлено на рис. 4. Здесь приведен вариант расчетов, соответствующий наилучшему разрешению по оси  $x$  (значение коэффициента  $k$  в выражении для вейвлет-преобразования [8] равно 4). Каждые



**Рис. 3.** Поведение вертикальной  $\mu_{vert}$  (а) и горизонтальной  $\mu_{horiz}$  (б) компонент глобального магнитного диполя со временем. Площадь под кривыми показана серым цветом. Тонкой линией на обоих графиках показано поведение величины полного магнитного момента (в тех же единицах).

10 лет появляются выраженные пики этого распределения  $A \approx 100$  при значении периода, близкого к 27 сут. Конечно, эти годы (1983, 1990–1991) с большой амплитудой вращательной модуляции ОМП согласуются с полученными ранее выводами [6, рис. 5]. Вторая гармоника этих вариаций выражена довольно отчетливо. В данных об основной моде, также как и на второй гармонике, можно выделить некоторые временные интервалы в 1–2 года, когда появляются изменения ОМП с периодом около 30 дней.

Наличие изменений с периодами, немного превышающими 27 дней, проявляется и в аналоге спектра Фурье — сумме амплитуд вейвлет-анализа в данном интервале частот. Соответствующая зависимость для всего исследуемого периода времени приведена на рис. 5 в зависимости от периода. В приводимом варианте расчетов с  $k = 4$  разрешение по частоте не очень высокое. Определенная структура частотного распределения проявляется в различии левого и правого крыла основного максимума. Компонента с периодом 30 дней выделяется в расчетах с  $k = 2$  более отчетливо.

Эта частотная структура в интервале периодов 26–30 дней (13–15 дней на второй гармонике) отражает особенности дифференциального вращения магнитных полей на Солнце и соответственно далее в межпланетном пространстве.

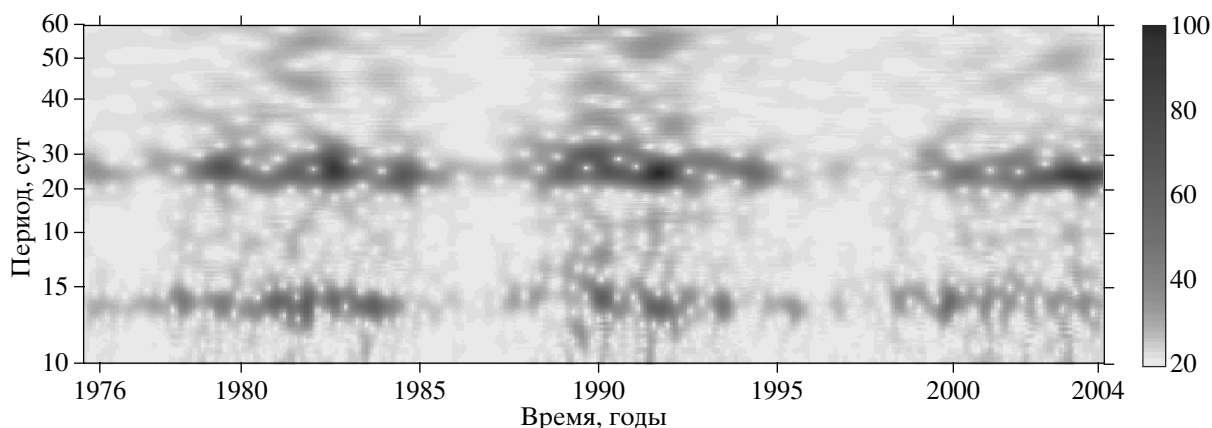
Использование вейвлет-преобразования позволяет выяснить причину возникновения вариаций ОМП Солнца с периодом 27 дней. Действительно, на рис. 6 сопоставлены изменения амплитуды вейвлет преобразования при периоде 27 дней с изменениями величины магнитного момента горизонтального диполя. Разрез распределения величин  $A$ , приведенных на рис. 4 при значении периода, очень близкого к 27 дням, характеризуется максимумами, практически идентичными максимумам величины магнитного момента горизонтальной компоненты диполя. Кроме тенденции к “твердотельности” вращения источников магнитного поля самых больших масштабов, здесь, по-видимому, проявляются и особенности процесса переполюсовки (см. ниже).

Подчеркнем, что большие значения магнитного момента горизонтального диполя наблюдаются в период высокой активности, когда пятна и соответствующие локальные поля присутствуют на диске в большом количестве. Тем не менее, сигнал поля Солнца как звезды главным образом связан именно с положением полюса диполя. Иначе говоря, наклонный ротатор на Солнце возникает тогда, когда величина дипольного момента не обращается в ноль, а скорее достигает больших или даже самых больших значений. Процесс переполюсовки связан именно с поворотом вектора дипольного момента.

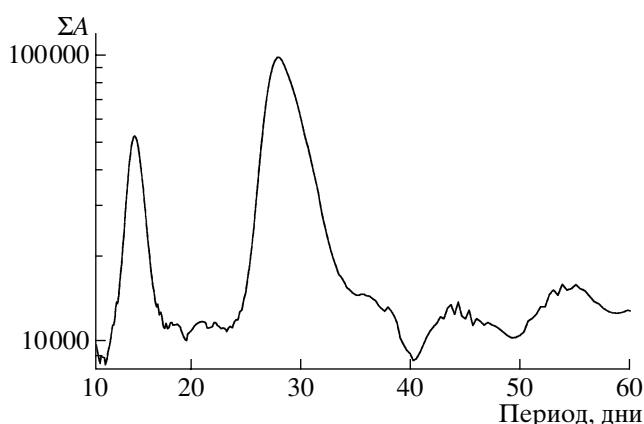
## 5. О КООРДИНАТАХ СЕВЕРНОГО ПОЛЮСА ДИПОЛЯ И ЕГО ИЗМЕНЕНИЯХ В ХОДЕ ЦИКЛА

Проследим теперь за циклической вариацией положения северного полюса суммарного диполя на Солнце с учетом как широты, так и долготы. По определению широта полюса вертикального диполя равна  $\pm 90^\circ$ , а долгота не определена, в то время как для вектора горизонтального диполя, параллельного экваториальной плоскости, широта полюса всегда равна нулю, а долгота является существенной характеристикой. Положение северного полюса суммарного диполя на сфере зависит от долготы горизонтального диполя и отношения модулей вертикальной и горизонтальной компонент.

Для каждого кэррингтоновского оборота в 21–23-м циклах на рис. 7 даны положения северного магнитного полюса на поверхности Солнца в полярной системе координат  $(\theta, \lambda)$ , где  $\theta, \lambda$  — соответственно широта и долгота точки на поверхности Солнца. Заметим, что в используемом представлении полярные широты оказываются более



**Рис. 4.** Распределение амплитуд вейвлет-преобразования временного ряда значений ОМП Солнца в координатах период–время. Справа дана шкала амплитуд  $A$  на единичный интервал частот.



**Рис. 5.** Сумма амплитуд вейвлет-преобразования, показанного на рис. 4, в зависимости от периода (аналог спектра мощности Фурье всего массива данных ОМПС). В приведенном варианте вейвлет-анализа разрешение по времени было максимальным, что привело к некоторому сглаживанию приводимого частотного спектра.

растянутыми по сравнению с экваториальными областями. Центр системы координат — географический полюс соответствующего полушария Солнца. Верхние диаграммы относятся к северному полюсу, нижние — к южному.

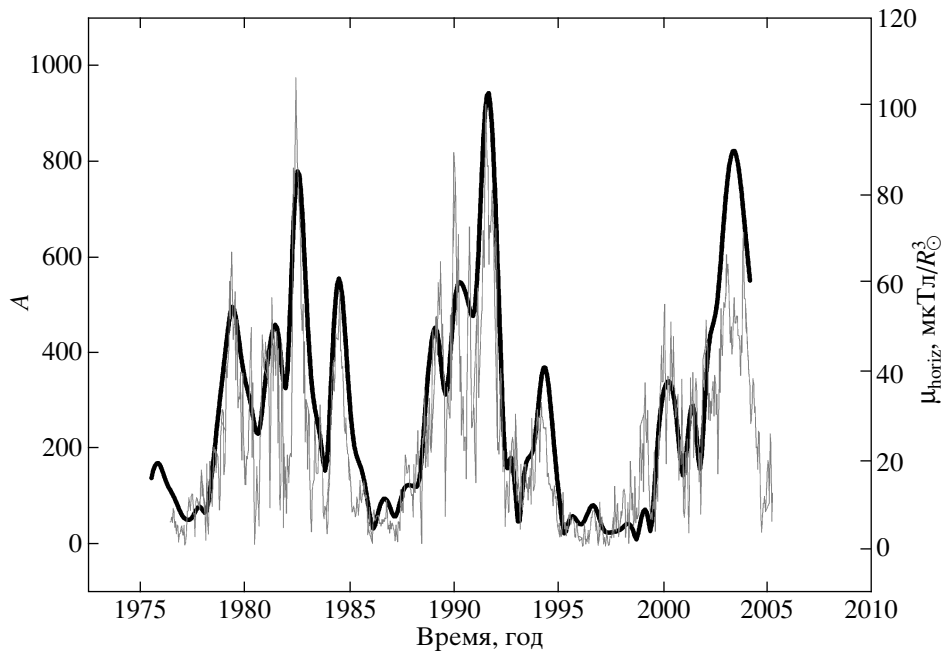
В конце 20-го и в начале 21-го циклов северное N-поле располагалось в северной полярной шапке. Соответственно на верхней диаграмме рисунка для 21-го цикла приведены данные для CR 1643–1665 (полярное поле в период 1976.5–1978.2) и затем для переполусовки в ходе CR 1666–1692 в период 1978.2–1980.2. На нижней диаграмме рисунка для 21-го цикла данные для переполусовки относятся к CR 1692–1697 (1980.25–1980.66) и для “полярного поля” к CR 1697–1737.

В начале 22-го цикла северное поле оккупирует южную полярную шапку. Соответственно точки, относящиеся к CR 1737–1801 (1983.6–1988.3) и описывающие положение N-полюса диполя, располагаются на нижней диаграмме (квадратики).

Далее для периода переполусовки приведены данные CR 1801–1828 (1988.3–1990.3) на нижней диаграмме и CR 1829–1857 (1990.4–1992.5) уже на верхней диаграмме. Полярное поле в конце (звездочки) четного 22-го цикла приведено для CR 1857–1900 (1992–1995.7).

В начале 23-го цикла повторяется картина нечетного 21-го цикла. Данные в его начале представлены для CR 1901–1941 (1995.8–1998.8). Далее при переполусовке N-полюс диполя располагался на CR 1941–1963 сначала в северном полушарии, а затем на CR 1959–2018 — уже в южном. Наконец, полярное поле в конце 23-го цикла представлено данными CR 2018–2036 (2004.6–2005.9).

Из рис. 7 видно, что во время минимума полюс диполя описывает довольно регулярные перемещения относительно полюса вращения, напоминающие прецессию. За время минимума диполь обходит вокруг полюса вращения, делая один или



**Рис. 6.** Временной ход амплитуд вейвлет-преобразования, показанного на рис. 3, для периода 27.0 дня (жирная кривая). Абсолютные значения  $A$  здесь соответствуют нескольким единицам интервала частот. Тонкая кривая — величина горизонтальной компоненты диполя (шкала приведена справа).

два оборота. Эта квазипрессия продолжается от 1 до 3 лет, и именно в течение этого времени реализуется ситуация наклонного ротатора. Затем происходит довольно резкий перескок в экваториальную область. Время этого перескока составляет 0.7–1.2 года. Далее диполь продолжает уже в приэкваториальной области плавное движение вдоль долготы в течение 1.5–3 лет. Затем происходит новый перескок, и прецессия продолжается уже у противоположного полюса.

Можно обратить внимание на то, что различные скорости изменения широты проявляются и на рис. 2 как изменение угла наклона  $d\theta/dt$ . Широта полюса диполя быстрее изменяется в начале и в конце процесса переполюсовки, а в области низких широт эти изменения происходят медленнее. Так, например, в 22-м цикле активности широта быстро изменялась до начала 1990 г., затем — уже в 1992 г. (рис. 2) и более медленно — в 1990–1991 гг.; соответствующие особенности можно проследить и на фазе спада этого цикла около 2000 г.

Квазипрециссия делает более понятным то, что изменения в области периодов от 1.5 до 2.5 лет проявляются не только в эпохи высокой активности, но также остаются заметными и при практически спокойном Солнце.

Особенности изменений положения диполя в 23-м цикле по сравнению с 21-м и 22-м прослеживаются и на рис. 7. Для северного полушария они состоят в несколько меньшей амплитуде

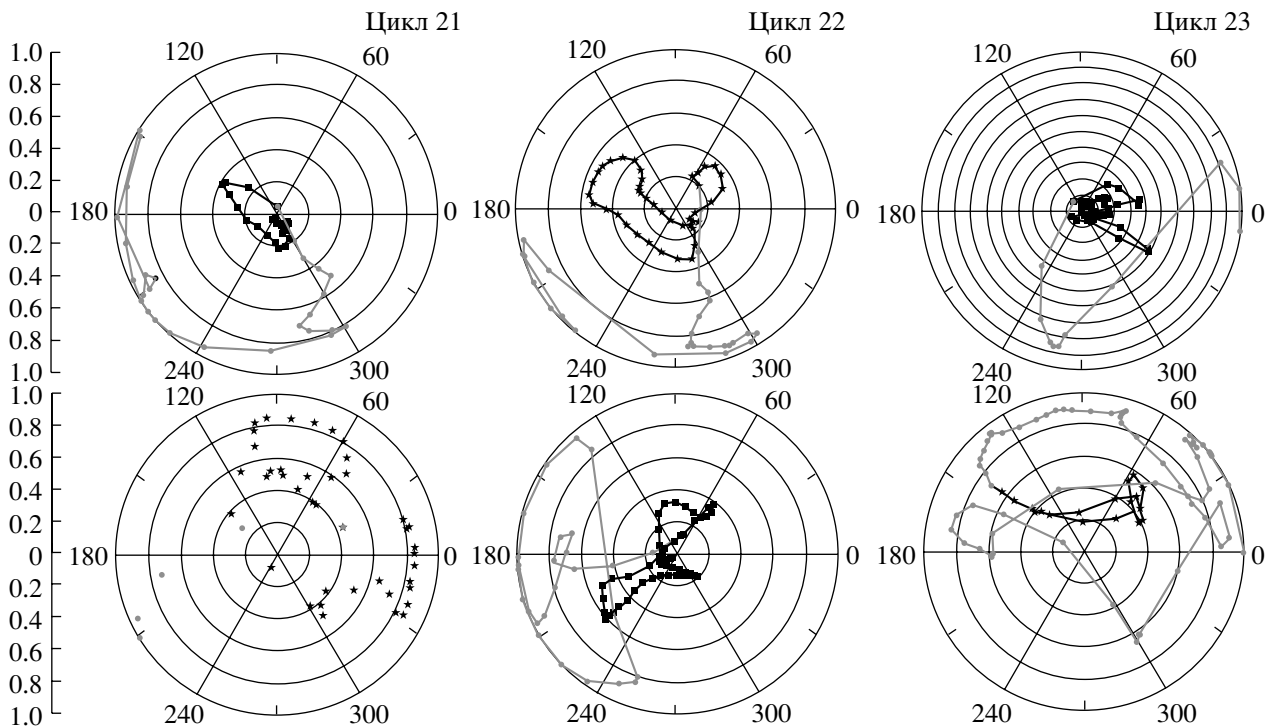
квазипрециссии и необычном дрейфе по долготе и широте в 1998 г. Как известно, прошедший цикл был во многом необычным, и, в частности, его максимум был выражен очень плохо, а спад активности происходил чрезвычайно медленно. Заметим также, что для обсуждаемых трех циклов активности движения полюса диполя в северном полушарии (рис. 7) оказались более регулярными, чем в южном. Эта асимметрия скорее всего обусловлена уже вековыми изменениями солнечной активности.

## 6. О НАЛИЧИИ ИЗМЕНЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕКТОРА ДИПОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ПЕРИОДОМ 1–2 ГОДА

Выше уже говорилось о том, что характеристики как всего вектора дипольного момента, так и его компонент изменяются с периодом цикла. Однако кроме этой основной моды колебаний — квазиодиннадцатилетнего цикла, — по-видимому, присутствуют и более короткопериодические колебания. На рис. 8 показан спектр Фурье отдельно для вертикального и горизонтального диполей. Из рисунка видно следующее:

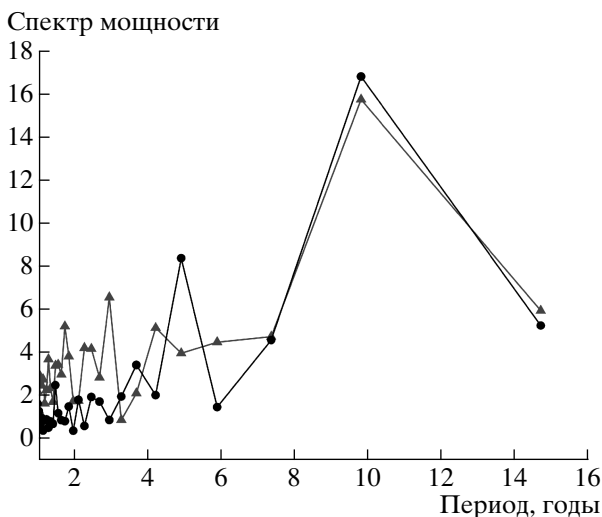
1. Квазиодиннадцатилетний цикл абсолютно одинаков в колебаниях магнитного момента как горизонтального, так и вертикального диполей. Полное совпадение как по периоду, так и по амплитуде указывает на то, что это по существу одно и то же физическое явление и разделение на





**Рис. 7.** Положение северного полюса магнитного диполя для трех солнечных циклов. Верхние диаграммы соответствуют северному полушарию Солнца, нижние — южному. Окружности представляют собой изолинии значений  $\cos \theta$ , которые приведены на вертикальных шкалах. Значения  $\lambda$  даны в градусах. Периоды начала каждого цикла указаны квадратами, конца — звездочками (подробнее см. текст).

два типа с точки зрения основного цикла солнечной активности не имеет особого физического смысла, так что мы встречаемся здесь с циклической вариацией широты полюса наклонного ротатора.



**Рис. 8.** Спектр мощности Фурье всего массива данных  $B_{\odot}$ . Кружки относятся к вертикальной компоненте, треугольники — к горизонтальной.

2. Совершенно по другому обстоит дело в отношении колебаний с периодами 1.3–2.5 лет. Эти колебания присутствуют только в колебаниях магнитного момента горизонтального диполя и полностью отсутствуют в вертикальном диполе. Их существование приводит и к возникновению колебаний наклона суммарного диполя, отмеченным Гуляевым [10]. Совпадение с наблюдаемым в гелиосейсмологии периодом 1.3 года [11] приводит к выводу о том, что эти колебания являются следствием генерации магнитного поля в конвективной зоне в области тахоклина. Любопытно что и в гелиосейсмологии колебания с периодом 1.3 года постепенно исчезают с переходом к более высоким широтам, т.е. в область преобладания вертикального диполя.

### 7. ВЫВОДЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, в результате проведения этой работы складывается определенная картина изменения характеристик вектора глобального диполя Солнца в ходе цикла. Вертикальная и горизонтальная компоненты диполя вполне определенно демонстрируют циклическую вариацию, которая слабее выражена в величине модуля вектора. Последнее связано со сдвигом фазы изменений в обеих компонентах примерно на 5 лет (половину длительности цикла). Характер изменений амплитуды

двух компонент сильно различен. Вертикальная компонента меняется более плавно, достигая максимальных по модулю значений в минимуме цикла (вертикальный диполь). Горизонтальная компонента определяет максимальную величину полного дипольного поля в периоды высокой активности. Она более изменчива, и фактически определяет направление полного вектора дипольного поля в процессе переполюсовки. Величина  $\mu_{horiz}$  изменяется на временах 1–2 года. Вектор глобального диполя, по-видимому, не слишком регулярно прецессирует вокруг направления оси вращения, и затем происходит его поворот в процессе переполюсовки фактически в меридианальной плоскости, т.е. на одной и той же гелиодолготе в каждом полушарии.

Результаты данной работы необходимо учитывать при анализе некоторых проблем, развиваемых в теории динамо, гелиосейсмологии и физике межпланетного магнитного поля. Здесь можно отметить, что при конечном, отличном от нуля значении магнитного момента диполя Солнца или другой звезды при переполюсовке генерация и усиление магнитного поля будет, по-видимому, происходить иначе, чем это считалось ранее. Сильнее всего это должно сказаться на проблеме динамо при несовпадении направлений вектора дипольного момента и оси вращения. Иначе говоря, теория генерации магнитного поля в случае наклонного ротатора должна строиться для случая поворота диполя, а не его обращения в ноль при переполюсовке.

Кроме того, есть основания полагать, что обнаруженная в статье квазипрецессия действительно означает реальную прецессию глобального диполя, т.е. не возникает из-за влияния развивающихся на диске больших комплексов активности — мощных локальных магнитных полей. В таком случае генерация и усиление полей, которые рассматривались в период минимума активности в условиях чисто полоидального поля, теперь должны учитывать наличие слабой тороидальной  $\phi$ -компоненты. Это может облегчить трансформацию полоидального поля в тороидальное, происходящую в ходе цикла.

Интересный результат работы состоит в выявлении вариаций характеристик дипольного поля с периодом 1–2 года. Эти изменения, наилучшим образом выраженные в периоды высокой активности, с большой вероятностью отражают изменение угла наклона глобального диполя. Представляет интерес изучить связь этого эффекта с колебаниями с периодом около 1.3 года, обнаруживаемыми по данным гелиосейсмологии. Кроме того, можно сопоставить гелиосейсмологические результаты, относящиеся к различным фазам цикла (см. обзор [12]), в частности, о торсиальных колебаниях, с полученными здесь выводами.

Известная модель межпланетного магнитного поля основана на идее распространения крупномасштабных магнитных полей Солнца в гелиосфере. Основная особенность состоит в появлении в межпланетном пространстве гофрированного токового слоя и формировании двух широтных зон, в одной из которых влияние этого токового слоя сильно ощущается, а в другой силовые линии межпланетного магнитного поля близки к радиальным, уходящим на большие расстояния в гелиосфере. Для периодов не очень высокой активности эта картина хорошо подтверждена наблюдениями с нескольких космических аппаратов (главным образом, *Ulysses*). Вопрос, который возникает в связи с проведенным здесь исследованием, состоит в том, что действительно ли сильно изменятся условия в гелиосфере при наклонном или даже строго горизонтальном направлении глобального солнечного диполя в периоды высокой активности.

Заметим также, что ось вращения Солнца и магнитная ось диполя в минимум активности практически соосны, и в случае Солнечной системы наблюдатель на Земле находится в плоскости, перпендикулярной оси вращения. Поэтому только в сравнительно небольшой промежуток времени близ максимума цикла ситуация наклонного ротатора реализуется для земного наблюдателя. На других звездах ось магнитного диполя может быть наклонена к оси вращения, и последняя — наклонена по отношению к лучу зрения на определенный угол. Поэтому наклонный ротатор должен быть скорее правилом, чем исключением, в случае наблюдения активных звезд поздних спектральных классов.

Авторы благодарят Д.Д. Соколова и М.А. Лившица за стимулирующие обсуждения работы, а также В.В. Бруевича за помощь в проведении вейвлет-анализа. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (коды проектов 05-02-16090 и 04-02-16068).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. V. Berdugina, D. Moss, D. D. Sokoloff, and I. G. Usoskin, *Astron. and Astrophys.* **445**, 703 (2006).
2. J. T. Hoeksema and P. H. Scherrer, *The Solar Magnetic Field — 1976 through 1985*, WDCA Report UAG-94 (NGDC, Boulder, 1986).
3. J. T. Hoeksema, *Solar magnetic fields — 1985 through 1990*, Report CSSA-ASTRO-91-01 (1991).
4. V. N. Obridko and B. D. Shelting, *Solar Phys.* 1999, **184**, 187.
5. И. В. Ананьев, В. Н. Обридко, *Астрон. журн.* 1999, **76**, 942.
6. В. И. Ханейчук, *Астрон. журн.* 1999, **76**, 385.

7. В. А. Котов, В. И. Ханейчук, Т. Т. Цап, Астрон. журн. 1999. **76**, 218.
8. P. Frick, S. L. Baliunas, D. Galyagin, et al., *Astrophys. J.* **483**, 426.
9. И.ЁМ. Лившиц, *Тр. конф. "Солнце в период смены знака полярностей магнитного поля"* (Санкт-Петербург: ГАО РАН, 2001) с. 241. Р.А.
10. Гуляев, *Астрон. вестн.* **40** (2006, в печати).
11. R. Howe, J. Christensen-Dalsgaard, F. Hill, et al., *Science*, **287**, 2456 (2000).
12. Е. Беневоленская, А. Г. Косовичев, *Изв. РАН, сер. физ.* (2006, в печати).

## VARIATION OF THE DIPOLE MAGNETIC MOMENT OF THE SUN DURING AN ACTIVITY CYCLE

I. M. Livshits, V. N. Obridko

Observations of large-scale solar magnetic fields (synoptic charts) and the Sun as a star (general magnetic field) have been used to determine the magnetic moment and direction of the dipole field for the last three solar cycles. Both the magnitude of the magnetic moment and its vertical and horizontal components proved to change regularly in the course of a solar cycle never vanishing completely. A wavelet analysis has shown that the amplitude of 27-day variations of the general magnetic field of the Sun (GMF) is closely related to the magnitude of the horizontal dipole. The sing reversal of the global dipole consists in the change of the inclination angle of its axis. This process is not smooth but occurs in steps lasting for 1-2 years. Before the sing reversal, the dipole axis is precessing with respect to the solar rotation axis. Then, it moves in the meridional plane to reach very low latitudes, where it begins to shift significantly in longitude. These results are discussed in the context of helioseismic inferences of the existence of oscillations with a period of about 1.3 years and particularities of the dynamo processes in the case of inclined rotator.