

УДК 523.9

Сорок лет измерений общего магнитного поля Солнца. Взгляд из сегодня

В.А. Котов

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный
vkotov@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 8 января 2009 г.

Аннотация. За 40 последних лет в КраО и других пяти обсерваториях мира сделано более 18.5 тыс. измерений (среднесуточных) общего магнитного поля (ОМП) Солнца-как-звезды. Главная периодичность ОМП обусловлена экваториальным вращением Солнца с синодическим периодом 26.92 ± 0.02 сут (был устойчив в течение десятилетий, но “раздвоился” в 23-м цикле). Показано, что (а) средний сидерический период экватора, 25.122 ± 0.010 сут, находится в тесных резонансных соотношениях с орбитальным и осевым вращениями Меркурия (5:2 и 5:3 соответственно), (б) самый мощный длинный период, 1.036 ± 0.007 г., подозрительно близок к орбитальному периоду Земли и (в) совпадает со средним синодическим периодом обращения планет-гигантов 1.036 ± 0.020 г., (г) ОМП обнаруживает значимый период 1.58 ± 0.02 г., в пределах ошибки согласующийся с синодическим периодом Венеры 1.60 г., а также (д) существенную периодичность 19.8 ± 2.5 г., связанную, по-видимому, с 22-летним магнитным циклом Солнца. Природа всех этих периодичностей загадочна.

Выдвинуто предположение, что резонансы возникли на ранних стадиях формирования Солнечной системы, а их существование в современную эпоху обусловлено особенностями устройства и динамики центрального ядра нашей звезды. Найдено, что средний за 40 лет уровень ОМП практически нулевой: -0.018 ± 0.015 Гс. Обращено внимание также на аномальное поведение цикла 23, выразившееся в (1) нарушении правила Гневышева-Оля для пары циклов 22–23, (2) ускоренном на 1.2 % вращении солнечного экватора и (3) значительном увеличении длительности цикла (не менее 11.5 г.) по сравнению со средней длительностью цикла в XX в. (10.5 г.). Кратко обсуждается проблема т. н. магнитного “монополя” Солнца.

FORTY YEARS OF MEASUREMENTS OF THE MEAN MAGNETIC FIELD OF THE SUN. AN INSIGHT FROM TODAY, *by V.A. Kotov*. Over the last 40 years the CrAO and five other observatories of the world have carried out more than 18.5 thousand (daily) measurements of the mean magnetic field, MMF, of the Sun-as-a-star. The main MMF periodicity is caused by the Sun’s equatorial rotation with a synodic period of 26.92 ± 0.02 d (it was stable over decades but become “bifurcated” in the 23d cycle). It is shown that (a) the average sidereal period of the equator, 25.122 ± 0.010 d, occurs to be in close resonant relations with the orbital and axial rotations of Mercury (5:2 and 5:3, respectively), (b) the most powerful longer period, 1.036 ± 0.007 yr, is suspiciously close to the Earth’s orbital period and (c) coincides with the average synodic period of revolution of giant planets 1.036 ± 0.020 yr, (d) the MMF reveals a substantial period of 1.58 ± 0.02 yr which agrees, within the error limits, with the synodic period 1.60 yr of Venus, and also (e) a significant periodicity 19.8 ± 2.5 yr connected plausibly with the 22-year magnetic cycle of the Sun. The origin of all these periodicities seems to be mysterious.

It is supposed that the resonances have emerged at the early stages of the formation of the Solar

system, and their existence at the present epoch is caused by the peculiar structure and dynamics of the central core of our star. It is found that the average, over 40 years, MMF level is practically zero: -0.018 ± 0.015 G. We draw also attention to an abnormal behaviour of the cycle 23, manifested in: (1) the violation of the Gnevyshev-Ol's rule for the pair of cycles 22-23, (2) the accelerated, by 1.2 %, rotation of the solar equator, and (3) a substantial increase of the length of the cycle (not less than 11.5 yr) as compared with the average length of the cycle in 20th century (10.5 yr). A problem of the so-called solar magnetic "monopole" is briefly discussed.

Ключевые слова: Солнце, магнитное поле, вращение, цикл, Солнечная система, резонансы

1 Предисловие: что такое ОМП Солнца

Все астрономы знают число Вольфа W запятанности как индекс солнечной активности (с.а.), а также вращения, переменности и циклической деятельности Солнца. Новый индекс его изменчивости – общее магнитное поле фотосферы Солнца, наблюдаемого как звезда (т. е. в свете полного солнечного диска). Впервые измерения ОМП начаты в КраО в 1968 г. (Северный, 1969; Котов и Северный, 1983) и затем поддержаны пятью другими обсерваториями: Маунт-Уилсон, Солнечная обсерватория им. Дж. Уилкокса (Стэнфордский университет), Саянская солнечная обсерватория (Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск), Обсерватория Сазерлэнд (Южная Африка, измерения группы *BiSON* Бирмингемского университета) и Национальная обсерватория США (Обсерватория Китт-Пик, данные *SOLIS-VSM*). Подробнее о методах измерений, инструментах и самих данных см. Шеррер и др. (1977), Ханейчук и др. (2003), Чаплин и др. (2003), Демидов и др. (2005) и сайты ОМП в Интернете.

Измерения ОМП совершаются по эффекту Зеемана спектральной линии поглощения фотосферы, и каждое отдельное *суточное* значение представляет собой среднюю напряженность B *продольного* поля видимой полусферы Солнца на данные UT-сутки. Основной вклад в ОМП вносят крупномасштабные (фоновые) поля; роль же пятен и активных областей (а.о.) незначительна. Поэтому вариации ОМП, наиболее сильные на частотах солнечного вращения, практически не коррелируют с появлением пятен и а.о. Размах колебаний напряженности B сильно меняется с фазой 11-летнего цикла. Напряженность наибольшая по абсолютной величине, $|B|$, в годы максимума с.а., когда B находится в основном в пределах ± 1.5 Гс, и почти втрое меньше в годы минимума, будучи в пределах примерно ± 0.5 Гс. Для регистрации такого малого среднего поля фотосферы, а по сути – слабой круговой "зеэмановской" поляризации спектральных линий, требуются, естественно, специальные высокочувствительные магнитографы, стабильность аппаратуры и строгий учет инструментального нуля.

Секторная структура ОМП проявляет сильную тенденцию к "твердотельному" вращению, слабо подчиняясь дифференциальному закону вращения фотосферы. Это происходит из-за того, что ОМП тесно связано с обширными *униполярными* областями "спокойной" фотосферы, простирающимися по обе стороны от экватора и игнорирующими закон полярностей Хейла, а именно с вращением крупномасштабных областей и их эволюцией в ходе цикла. Анализ многолетних измерений ОМП может дать новую информацию об изменчивости магнитного Солнца как целого и позволит, в принципе, уточнить роль динамо в генерации поля, а также гипотетических эндогенных и экзогенных механизмов, способных влиять на магнитную активность нашей звезды, и в итоге продвинуться к лучшему пониманию "жизнедеятельности" Солнца и природы цикла.

2 Мировые данные ОМП

За 40 лет, с 1968 г. по 2007 г., измерения ОМП выполнены в шести обсерваториях по разным спектральным линиям. Данные о сериях наблюдений приведены в табл. 1, где обозначено: N – число

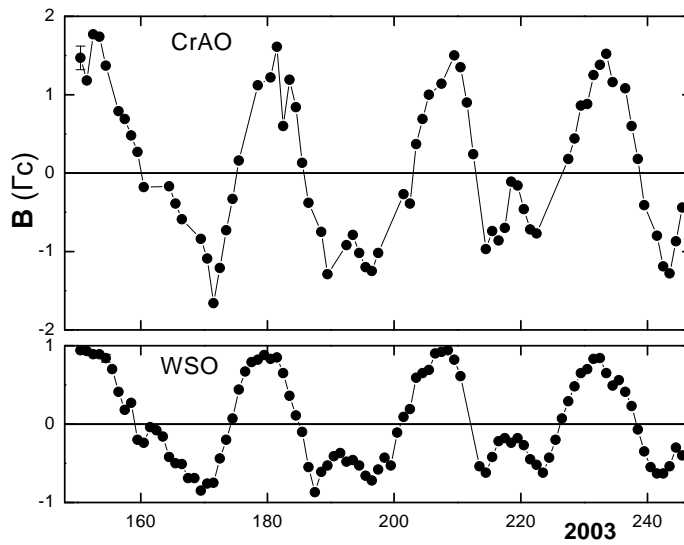


Рис. 1. Ход суточных значений ОМП с 30 мая по 2 сентября 2003 г. согласно измерениям КрАО (*CrAO*) и Стэнфорда (*WSO*). По горизонтали – номер дня года, по вертикали – напряженность B в гауссах. Вертикальными черточками показаны типичные ошибки (для Стэнфорда они сравнимы с размером точки)

суточных значений B , Δ – типичная ошибка отдельного измерения, S – стандартное отклонение массива, k – нормировочный коэффициент (отношение средней S -величины семи отдельных массивов таблицы к S данного массива).

Массивы, полученные в разных обсерваториях и по разным линиям (всего семь отдельных массивов) по S , т. е. путем умножения на k , приводились к единой шкале S -величин, после чего сведены в единую *нормированную* временную последовательность 1968–2007 гг. с числом $N = 18559$ и $S = 0.61$ Гс. Положительные B отвечают северной (N) полярности, спектры мощности (СМ) вычислялись прямым Фурье-преобразованием, нулевая фаза соответствует 0 UT, 1 января 1968 г.

Таблица 1. Данные ОМП, 1968 – 2007 гг.

Обсерватория	Годы	Линия, нм	N	Δ , Гс	S , Гс	k
КрАО	1968–2007	Fe I $\lambda 525.02$	2670	0.15	0.66	0.92
КрАО	2001–2007	Fe I $\lambda 524.71$	692	0.19	0.70	0.87
Маунт-Уилсон	1970–1982	Fe I $\lambda 525.02$	2457	0.07	0.67	0.91
Стэнфорд	1975–2007	"	9661	0.05	0.41	1.49
Саяны	1982–1993	"	313	0.05	0.77	0.79
Сазерлэнд	1992–2001	K I $\lambda 769.90$	1988	0.01	0.43	1.42
Китт-Пик	2003–2007	Fe I $\lambda 630.15$	778	0.01	0.60	1.02
Вместе*	1968–2007	–	18559	–	0.61	–

*Общий нормированный ряд ОМП

Для примера на рис. 1 и 2 приводим ход суточных значений ОМП по измерениям в КрАО и Стэнфорде по линии 525.0 нм за часть 2003 г. и часть 2007 г. Хорошо видно, что данные двух обсерваторий качественно хорошо согласуются друг с другом, хотя размах колебаний B примерно

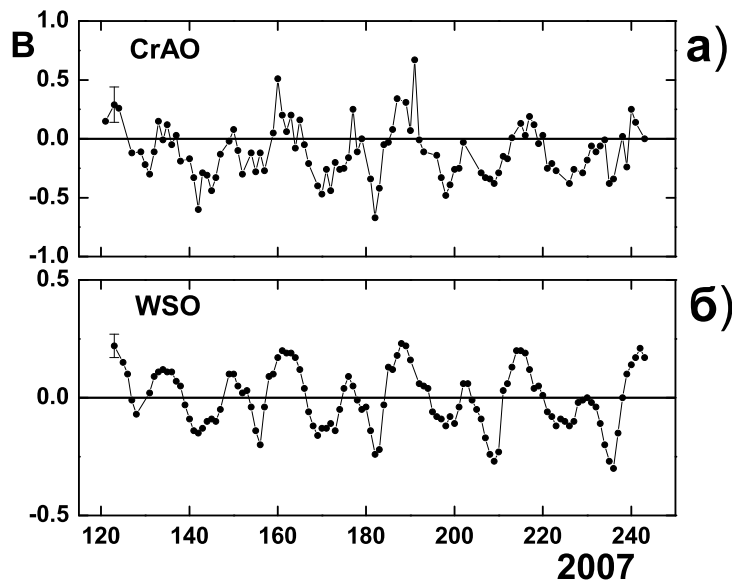


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для интервала 1 мая – 31 августа 2007 г.: (а) – КраАО, (б) – Стэнфорд

в полтора раза больше в Крыму, чем в Калифорнии (это различие учитывается коэффициентом k). Видно также, что в 2003 г., вблизи максимума с.а., на Солнце доминировала 2-секторная структура с периодом 27 сут, а в 2007 г., т. е. примерно в минимуме, присутствовали и 2-секторная, и 4-секторная структуры. (Подробнее о состоятельности измерений ОМП и сравнении рядов разных обсерваторий см. Котов и др., 1998; Котов и Цап, 2005.)

3 Спектры мощности

СМ 40-летнего ряда показан на рис. 3, где доминирует пик, отвечающий периоду экваториального вращения 26.891(13) сут с гармонической амплитудой $A = 0.18$ Гс (в скобках – стандартная ошибка для последних цифр).

Однако СМ, вычисленные для каждого цикла отдельно, показали, что период 26.891 сут доминировал только в циклах 20–22; в цикле 23 он “раздвоился”, и стал доминировать период 26.59(5) сут (рис. 4 и 5). Это соответствует ускорению экваториального вращения в цикле 23 примерно на 1.2 % по сравнению с тремя предыдущими.

Для иллюстрации ускорения экватора 23-го цикла на рис. 6 приводим СМ, вычисленный только для циклов 20–22 (при этом данные 1968.0–1996.5 гг. рассматривались как единый ряд). Здесь доминирует пик 26.916(18) сут, сменившийся “ускоренным” пиком 26.59 сут в 23-м цикле, см. рис. 5б.

Как следует из рис. 4 и 5, для циклов 20–22 максимальные пики соответствуют, почти в пределах ошибок, одному и тому же периоду $P = 26.96(3)$ сут, а в 23-м цикле период значительно меньше:

- цикл 20 (1968.0–1977.0 гг.): $P = 27.04(6)$ сут,
- цикл 21 (1977.0–1987.0 гг.): $P = 26.92(5)$ сут,
- цикл 22 (1987.0–1996.5 гг.): $P = 26.92(5)$ сут,
- цикл 23 (1996.5–2008.0 гг.): $P = 26.59(5)$ сут.

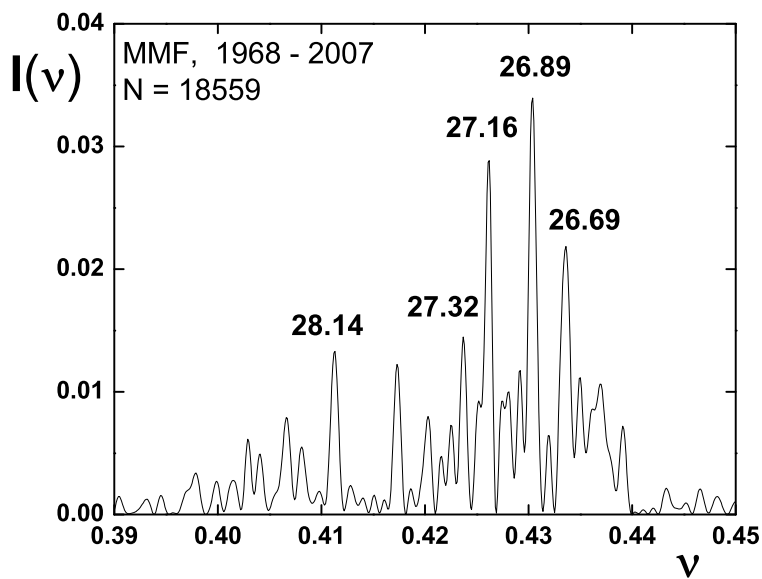


Рис. 3. Спектр мощности ОМП за 1968–2007 гг., $N = 18559$. По вертикали – мощность $I(\nu)$ в произвольных единицах, по горизонтали – частота ν в мкГц (то же на других аналогичных рисунках). Числами указаны периоды, в сутках, самых мощных пиков

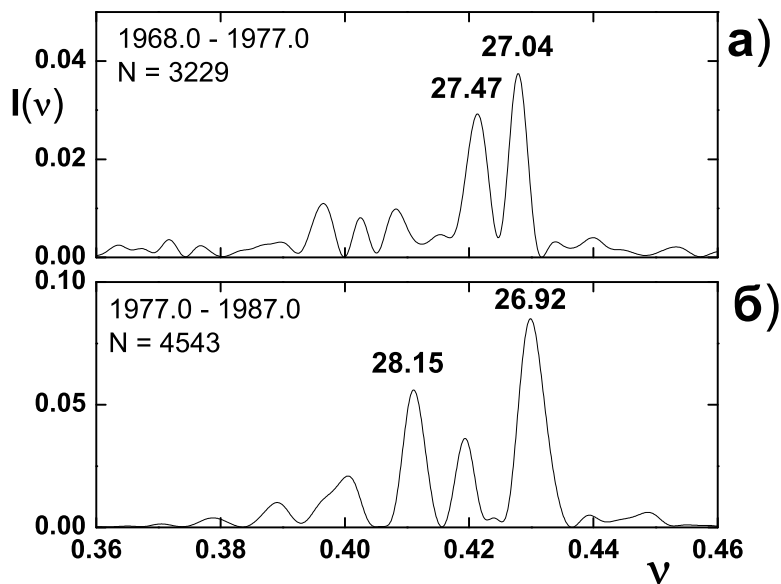


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для циклов (а) 20 (1968.0–1977.0 гг., $N = 3229$) и (б) 21 (1977.0–1987.0 гг., $N = 4543$)

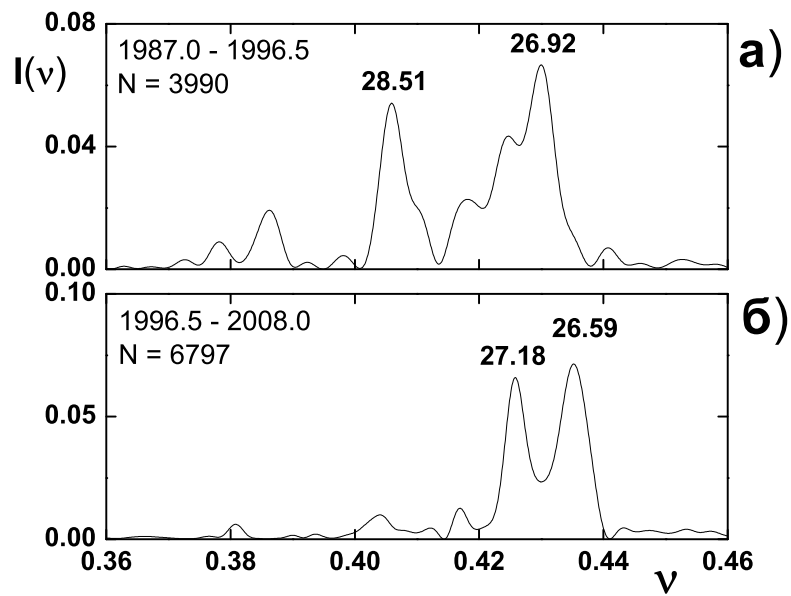


Рис. 5. То же, что на рис. 4, для циклов (а) 22 (1987.0–1996.5 гг., $N = 3990$) и (б) 23 (1996.5–2008.0 гг., $N = 6797$)

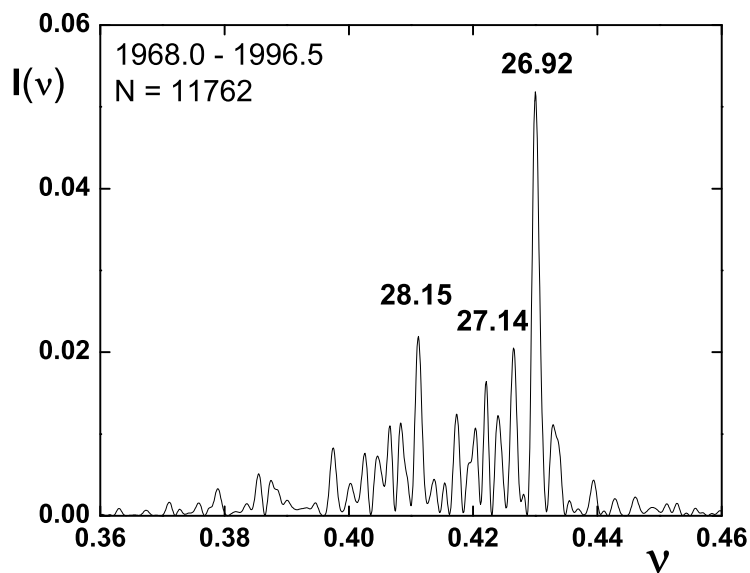


Рис. 6. То же, что на рис. 5, для циклов 20–22 вместе (1968.0–1996.5 гг., $N = 11762$)

4 Главный период экватора

До начала измерений ОМП вращение крупномасштабного поля исследовалось Уилкоксом и др. (1970). Согласно их результатам, в 1959–1967 гг. (цикл 19) приэкваториальное поле вращалось с периодом 27.04(2) сут, что совпадает с периодом ОМП в цикле 20 (рис. 4а) и близко к основному периоду ОМП 26.92 сут в 1968.0–1996.5 гг. (рис. 6). Это говорит об устойчивости средней экваториальной скорости в 1959–1996 гг., т. е. на протяжении примерно 3.5 циклов; это циклы 19–22 со средним периодом 26.96(3) сут или, более точно по СМ, с периодом 26.916(18) сут. От этих циклов радикально отличается 23-й с периодом 26.59(5) сут, уменьшенным на 1.2 %.

В качестве дополнительного индикатора вращения экватора можно взять вращение секторной структуры межпланетного магнитного поля (ММП). Соответствующий СМ (Свалгард и Уилкок, 1975; Котов, 1987) показал, что в 1926–1983 гг. ММП вблизи плоскости эклиптики вращалось с двумя основными периодами: 28.20 сут (характеризует вращение поля средних широт и/или под конвективной зоной) и 26.94 сут (вращение экватора). Для ОМП, учитывая “аномальность” цикла 23, средний период берем для циклов 20–22 согласно рис. 6. В итоге имеем:

ММП, 1926–1983 гг.: $P = 26.940(10)$ сут,

ОМП, 1968–1996 гг.: $P = 26.916(18)$ сут.

Так как оба периода в пределах ошибок согласуются друг с другом, делаем вывод, что вращение ОМП и, вследствие вмороженности, фотосферы на экваторе не изменилось за 70 лет, с 1926 г. по 1996 г., со средним синодическим периодом $P_0 = 26.928(10)$ сут.

5 Фазовая диаграмма

При рассмотрении стабильности периода или ускорения вращения удобна фазовая диаграмма О-С, широко применяемая при изучении переменных звезд. С этой целью для каждого последовательного 5-летнего интервала была построена средняя кривая изменения ОМП с пробным периодом 27.000 сут. Затем для каждой такой кривой методом наименьших квадратов находились амплитуда A и фаза φ гармонического максимума.

Распределение фаз показано на рис. 7 с повторением для фазовых интервалов 1–2 и 2–3. Прямая линейной регрессии, вычисленная по первым 28 фазам, т. е. по данным 1968–1999 гг., отвечает периоду экватора 26.910(15) сут (коэффициент корреляции -0.97), согласующемуся со средним за 70 лет значением P_0 . Вторая наклонная прямая, вычисленная по 20 соответствующим фазам, дает период $P_1 = 27.027(15)$ сут; его присутствие ранее отмечалось Ханейчуком и др. (2003). Среднее P_0 и P_1 равно 26.978(10) сут, и ему соответствует “эффективный” сидерический период

$$P_{\odot} = 25.122(10) (d). \quad (1)$$

Как следует из рис. 5 и 7, после 1996 г. скорость вращения экватора возросла примерно на 1.2 %. Ранее Макаров и др. (1997) сообщали, что с 1915 г. по 1990 г. экваториальное вращение *замедлилось* на 1 %. Расхождение с нашим результатом мы объясняем различием данных. У нас – *прямые* измерения эффекта Зеемана видимой полусферы, причем преимущественно “спокойной” фотосферы. Результаты же Макарова и др. основаны на *косвенных* структурных данных, полученных на основе H_{α} -карт, которые в значительной мере характеризуют поведение “активного” Солнца.

6 Резонанс с движением Меркурия

Укажем на интересное соотношение между периодом Солнца P_{\odot} и орбитальным периодом Меркурия $P_M = 87.969$ сут:

$$\frac{2P_M}{P_{\odot}} = 7.003(3). \quad (2)$$

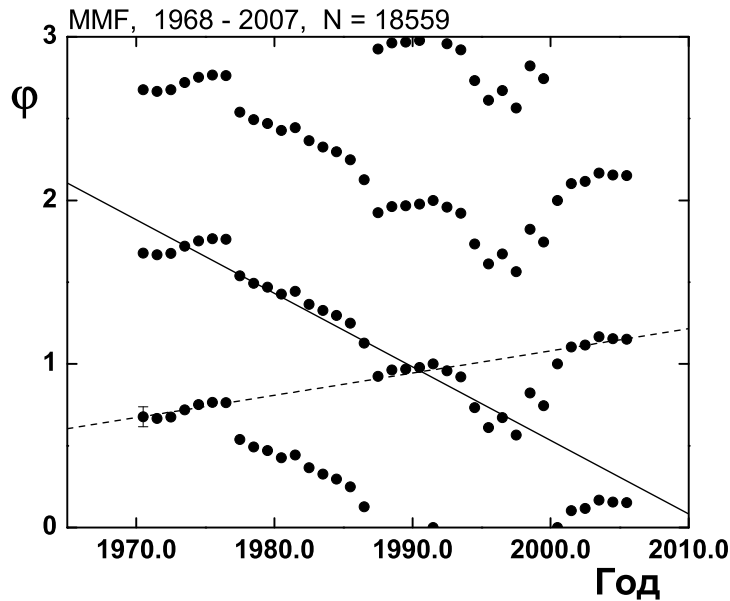


Рис. 7. Диаграмма О-С для пробного периода 27.000 сут. По вертикали – фаза φ , по горизонтали – годы. Вертикальной черточкой показана типичная ошибка фазы, сплошная наклонная прямая соответствует периоду 26.910(15) сут; пунктир – прямая линейной регрессии, дающая второй период 27.027(15) сут.

Вероятность близости (2) к целому числу, равная 0.006, достаточно мала, чтобы говорить о случайном соотношении двух периодов. По сути, это *резонансное* соотношение, отражающее “подстройку” движения Меркурия под вращение Солнца. В системе отсчета, связанной с Меркурием, период Солнца $P_{\odot M} = 35.164(14)$ сут, и для отношения периодов получаем:

$$\frac{2P_M}{P_{\odot M}} = 5.003(2). \quad (3)$$

Причина резонанса непонятна, но можно предположить, что он возник на ранних стадиях формирования Солнечной системы. Заметим, что еще в 60-х годах прошлого века Бигг (1967) указывал на присутствие *сидерического* периода Меркурия в числе солнечных пятен.

В исследованиях Солнечной системы (Голдрайх и Пил, 1968; Альвен и Аррениус, 1979) часто рассматривается резонанс *видимого* движения спутника с *видимым* движением Солнца, т. н. “спутниково-солнечный” резонанс. Возможен и резонанс между осевым вращением тела и его орбитальным движением. Считается, что такой резонанс связан с периодическими флуктуациями гравитационного поля, вызванными асимметричным распределением плотности вещества во вращающемся теле и ведущими к резонансу вращения с орбитальным движением. Мы же указываем на резонанс другого рода – между видимым движением и видимым *вращением* Солнца (в системе координат Меркурия). Можно предположить, что этот резонанс тоже связан с периодическими флуктуациями поля тяжести. Неизвестно, однако, насколько эффективным может быть соответствующий физический механизм и хватит ли времени существования Солнечной системы для установления резонанса. (В проблеме регулярности и резонансов нашей планетной системы до сих пор много неясностей. По мнению Дэмонта (1968), Овендена (1975) и Ньюто (1976) приливная теория не в состоянии объяснить главное – планетные расстояния, поскольку приливной механизм слишком медленный.)

Известна также аномалия *осевого* вращения Меркурия с периодом $P_{MR} = 58.646$ сут: последний не равен орбитальному, как у Луны, а составляет $2/3$ от него. Фигура планеты, по-видимому, не

обладает осевой симметрией и постоянно деформируется. Вследствие приливного трения вращение замедлилось, отвечая ныне такой скорости, когда в перигелии большая ось планеты всегда направлена к Солнцу. Период такого осевого вращения соответствует $2/3$ орбитального. Следовательно, вращение Меркурия захвачено в резонанс $2:3$ с орбитальным движением. Объяснить такое несинхронное осевое вращение на основе моделей приливного трения не удастся (Альвен и Аррениус, 1979).

Осевое и орбитальное движения Меркурия соизмеримы между собой, поэтому оба периода, P_M и P_{MR} , квазисоизмеримы и с периодом вращения Солнца P_\odot . Поэтому к вышеуказанным резонансам добавляется еще один поразительный резонанс:

$$\frac{P_{MR}}{P_{\odot M}} = \frac{58.646}{35.164} = \frac{5}{3} + 0.001(1). \quad (4)$$

За два оборота Меркурия по орбите Солнце совершает пять вращений вокруг своей оси (в системе отсчета планеты), сам же Меркурий – три оборота вокруг собственной оси.

Трудно понять существование такого тесного резонанса между вращением Солнца и движениями Меркурия. Но подчеркнем, что с ОМП тесно связано вращение секторной структуры ММП и токовых слоев межпланетной среды. Взаимодействие последних с планетами, – особенно с теми, которые обладают существенными магнитными полями и, соответственно, магнитосферами, – в принципе, за длительную эволюцию системы, как дополнение к гравитационному, – могло привести к резонансному состоянию. Определенную роль могло играть и магнитное пересоединение, постоянно происходящее между ММП и магнитосферой планеты и перекачивающее энергию солнечного ветра в энергию околопланетной среды. (Такой процесс, в частности, существенную роль играет для Земли. Известно, например, что изменения гелиосферного поля связаны с изменениями ее облачного покрова, что, в свою очередь, может вести к изменению климата, см. Локвуд и др., 1999). Венера, как Марс и, по-видимому, Плутон, в отличие от других планет, не обладают значительными собственными магнитными полями; но это не значит, что они не обладали ими в прошлом; Акуна и др., 1998.)

Резонансу Солнце-Меркурий могли способствовать сравнительно сильное магнитное поле планеты (примерно 700 нТ у полюсов) и, соответственно, наличие магнитосферы и магнитопаузы, а также аномально большой, 0.206, эксцентриситет орбиты. Кроме того тот факт, что солнечный ветер взаимодействует непосредственно с поверхностью Меркурия (Ксанфомалити, 2001). Резонанс связан, по-видимому, и с тем обстоятельством, что длительность “солнечных суток” на планете составляет 176 земных суток, т. е. два орбитальных периода Меркурия. Этим также вызвано, наверное, появление множителя 2 в (3) в дополнение к другому фактору – 2-секторной структуре ОМП и ММП.

7 Годичная вариация

Фрагмент СМ для низких частот показан на рис. 8, где самый мощный пик соответствует окологодичному (годичному) периоду 1.036(7) г. с амплитудой $A = 0.05$ Гс. Давно доказано, что годовая волна ОМП – свойство переменности *самого* Солнца, наблюдаемого с Земли, и не может быть “миражом”, вызванным инструментальными и другими земными причинами; например, годичной скважностью наблюдений, артефактами и ошибками наблюдений и обработки данных. Не объясняется она и переменной в течение года видимостью солнечных полюсов (из-за годичного изменения гелиошироты Земли в пределах $\pm 7.^\circ 25$; подробнее см. Котов и Левицкий, 1985; Котов, 2006).

Для построения диаграммы О-С были получены средние кривые с периодом 1.000 г. для каждого последовательного 5-летнего интервала, и оказалось, что годичная волна присутствует почти всегда, даже в годы переполусовок, т. е. вблизи максимумов с.а. (волна незначима только для 2003–2007 гг., на спаде цикла 23). Диаграмма приведена на рис. 9, где фазы φ растут с годами более или менее линейно (с некоторыми отклонениями, указывающими на присутствие квазипериода примерно 30 лет). Наклон прямой линейной регрессии дает истинный период 1.031(7) г.

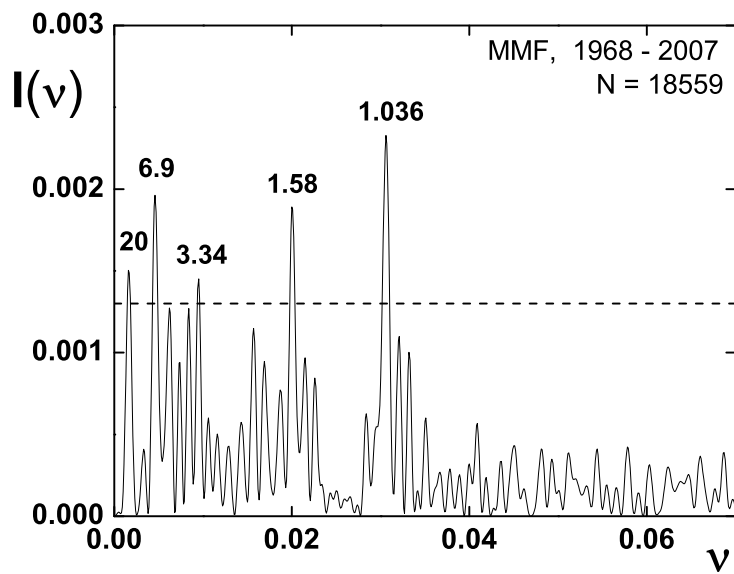


Рис. 8. То же, что на рис. 3, для низких частот. Пунктирная линия соответствует уровню значимости 3σ , числа – периоды наиболее высоких пиков (в годах)

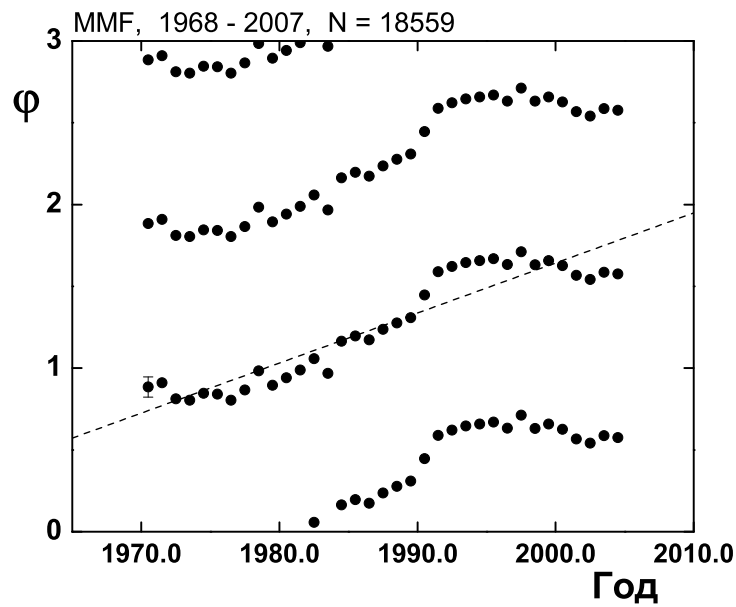


Рис. 9. То же, что на рис. 7, для пробного периода 1.000 г. Пунктирная линия – прямая линейной регрессии, отвечающая реальному периоду 1.031(7) г.

Среднее значение годового периода Солнца, согласно СМ и диаграмме О-С, равно $P_{\oplus} = 1.034(7)$ г. Его близость к орбитальному периоду Земли, конечно, неслучайна, и факт его присутствия у Солнца бросает очередной вызов теориям динамо и внутреннего строения нашей звезды. Особый интерес вызывает совпадение, в пределах ошибки, P_{\oplus} с *синодическим* периодом Сатурна 1.035 г., а также со средним *синодическим* периодом четырех планет-гигантов 1.036(20) г.

8 Резонансы с Венерой?

Отметим и возможный резонанс вращения Солнца с движением Венеры. Отношение периода ее сидерического обращения, $P_V = 224.701$ сут, к периоду вращения Солнца P_{\odot} также слишком близко к целому числу, чтобы считаться отношением двух случайных чисел:

$$\frac{P_V}{P_{\odot}} = \frac{224.701}{25.122} = 8.944(4). \quad (5)$$

Значимость этого квазирезонанса, однако, гораздо меньше, чем орбитального резонанса Меркурий-Солнце.

Но снова обратимся к рис. 8, где третий по высоте пик отвечает периоду 1.58(2) г. В пределах ошибки он совпадает с *синодическим* периодом Венеры $P'_V = 1.60$ г., являя собой новую загадку для космогонии и физики Солнца. И это наряду с загадочным, до сих пор необъясненным резонансом между обратным осевым вращением Венеры с периодом 244.3 сут и орбитальным движением Земли. А именно: наблюдаемый с Земли период вращения Венеры, примерно 146.39 сут, находится в отношении почти 5:2 к орбитальному периоду Земли (точнее 2.495). Или в отношении 4:1 к орбитальному синодическому периоду Венеры 583.92 сут (точнее 3.989). На основе этого приходится принять, что Венера вращается с сидерическим периодом 243.16 сут (см. Голдрайх и Пил, 1968). Как следствие, при каждом соединении Венеры с Землей к нам повернута одна и та же сторона этой планеты.

Загадка здесь такова: получается, что слабое гравитационное взаимодействие с Землей определяет вращение Венеры? Это резонанс второго рода: вращение планеты взаимодействует с орбитой другой планеты, см. Альвен и Аррениус (1979). Хороший пример именно *резонансного* взаимодействия, поскольку момент сил со стороны Земли значительно слабее “солнечного” момента. Конкретные численные расчеты, однако, пока носят весьма грубый и ограниченный характер. С учетом реального физического взаимодействия тел и всех достижений теории, в частности приливной, не удается удовлетворительно объяснить наблюдаемый *синодический* вращательный резонанс. Ибо расчеты нуждаются в нескольких непроверяемых допущениях, которые не могут считаться обоснованными (например, предположение о наличии у Венеры жидкого ядра или расплавленной мантии, см. Голдрайх и Пил, 1968).

Более 100 лет многие авторы – главным образом по числам W – пытались находить те или иные периодичности с.а., соответствующие *сидерическому* движению некоторых планет и повторяемости планетных конфигураций. Результаты, как известно, часто не очень статистически значимые, а порой и противоречивые. Главная причина поражений выдвинутых гипотез о влиянии динамики Солнечной системы, в частности движения барицентра, на с.а. – малость гравитационного возмущения со стороны планет и, следовательно, очень малые приливные эффекты на Солнце (см. также Витинский и др., 1986).

Мы же здесь говорим о *синодическом* периоде Венеры, связанным с орбитальным движением Земли и практически совпадающим с одним из самых существенных периодов изменения ОМП на рис. 8. Период ОМП 1.58 г. приходится трактовать как периодическое, наблюдаемое с Земли, изменение магнитного поля Солнца, каким-то образом связанное с движением Венеры, а точнее с динамикой системы Солнце-Венера-Земля. Проблема заключается в поиске разумного физического механизма взаимодействия. Можно предположить, что резонанс, как и резонанс Меркурий-Солнце, реликтовый и берет свое начало в процессах, имевших место на ранних стадиях формирования Солнечной системы.

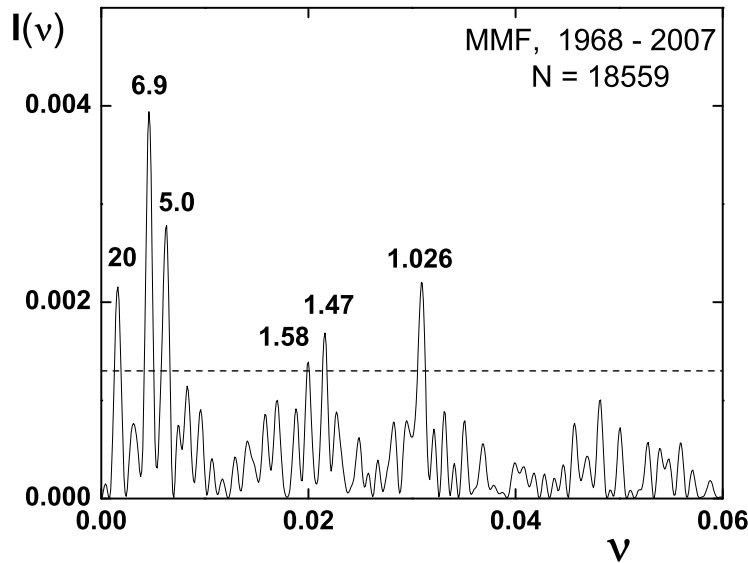


Рис. 10. То же, что на рис. 8, для равномерно усредненного ряда ОМП (см. текст)

9 Тест

СМ для низких частот на рис. 8 дает лишь приближение к истинному спектру ОМП, ибо практический СМ получен для ряда, искаженного пробелами в наблюдениях и неравномерностью, вызванной тем, что разные обсерватории измеряли ОМП в разные годы, с разной скважностью и чувствительностью.

Для проверки состоятельности СМ, приведенного на рис. 8, нормированные суточные значения B были усреднены за каждые три месяца (за полгода для части данных 1968–1970 гг. с малым числом измерений). В результате получен почти *равномерный* 40-летний ряд с числом $N = 155$, $S = 0.13$ Гс и средним $\langle B \rangle = -0.015(11)$ Гс. Его СМ показан на рис. 10, где наиболее значимые пики соответствуют периодам 20, 6.9, 5.0, 1.58, 1.47 и 1.026 г. Для частот $\nu \gtrsim 0.015$ мкГц периоды и амплитуды пиков могут быть существенно искажены усреднением данных, поэтому в этой области частот более достоверным следует считать СМ рис. 8. Что касается самых длинных периодов, то из сравнения рис. 8 и 10 следует, что наиболее значимые периоды 6.9 г. и $P_C = 20$ лет, периоды же 5.0 и 3.34 г. следует воспринимать как обертоны P_C ; точнее, как артефакты обработки данных.

Специальный интерес вызывает, конечно, пик 6.9(3) г., выделяющийся своей высотой на обоих спектрах. Его природа неясна, но из-за соответствия 3-му обертону цикла P_C можно считать, что период 6.9 г. вызван отклонениями профиля P_C от гармонического. Последнее подтверждается рис. 11, где показан ход *среднегодовых* значений ОМП. Видны два сильных и резких минимума 1969 г. и 1990 г., обусловленных, очевидно, циклом P_C ; следующий минимум ожидается в 2010–2012 гг. Среднее значение ОМП на рис. 11 мало отличается от нуля: $\langle B \rangle = -0.018(15)$ Гс.

10 Модуль ОМП

Из нормированного временного B -ряда сформирован ряд *суточных* значений модуля ОМП, затем полученные величины $|B|$ усреднены за каждый год. Ход *среднегодовых* $|B|$ в сравнении с числами пятен W показан на рис. 12 (числа W взяты согласно *Solar-Geophysical Data*,

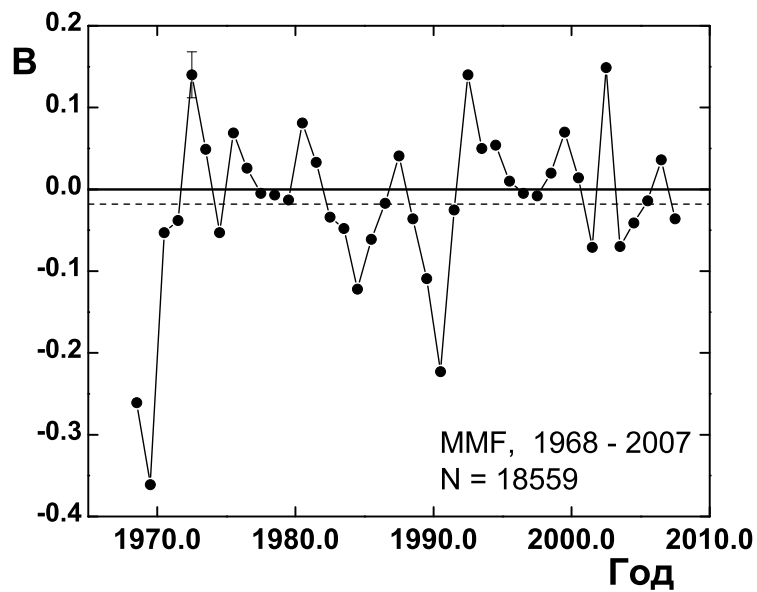


Рис. 11. Ход среднегодичных значений B (в Гс). Вертикальной черточкой показана типичная стандартная ошибка, пунктирной линией – средний уровень

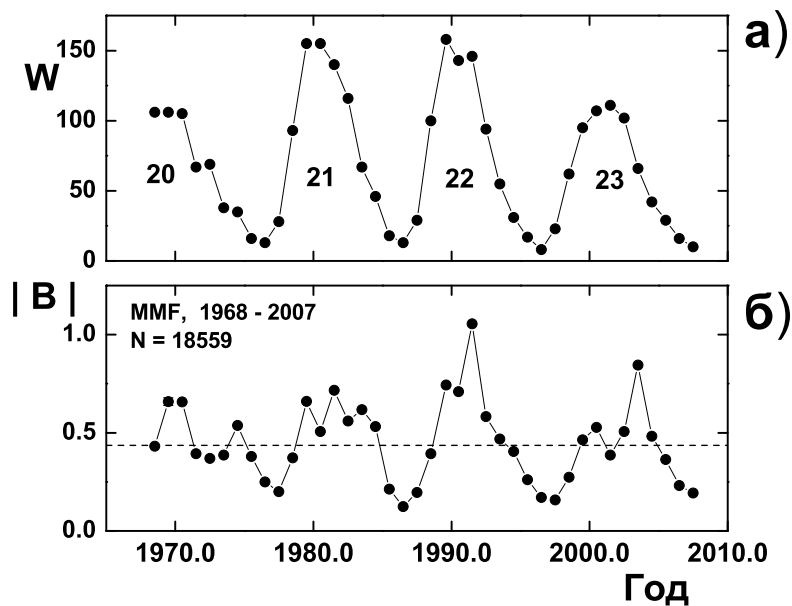


Рис. 12. Ход среднегодичных значений (а) чисел W и (б) напряженности $|B|$ (в гауссах; вертикальной черточкой показана типичная ошибка, сравнимая с размером точки; пунктирная линия – средний уровень $|B|$). Числа под верхней кривой – номера циклов

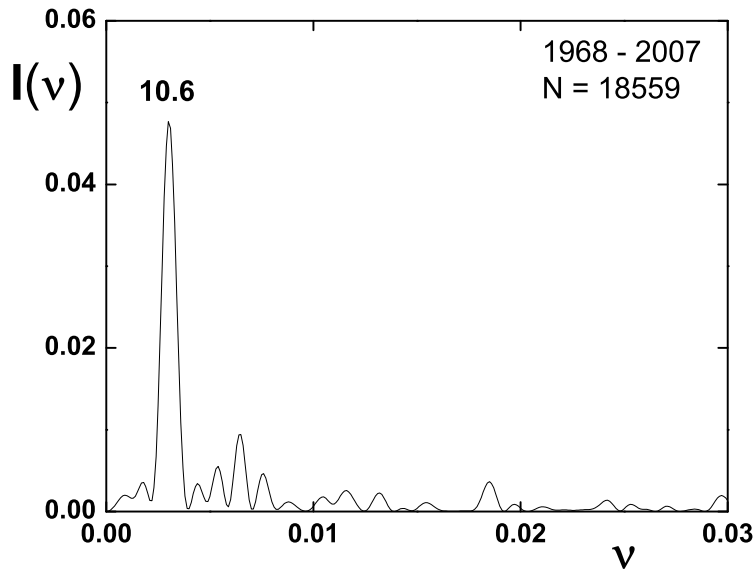


Рис. 13. Спектр мощности суточных значений модуля $|B|$. Главный пик отвечает периоду цикла 10.6(7) г.

<http://www.ngdc.noaa.gov>). Видно, что обе величины подчиняются главной 11-летней периодичности. Средняя за 40 лет напряженность $\langle |B| \rangle = 0.45(3)$ Гс; важно отметить также, что $|B|$ не показывает за 40 лет никакого существенного тренда.

СМ модуля ОМП, вычисленный по *суточным* значениям $|B|$, показан на рис. 13, где главный пик соответствует периоду 10.6(7) г. Он согласуется со средним периодом 10.5 г. “пятенного” цикла XX столетия. В то же время, исходя из хода чисел Вольфа и модуля ОМП на рис. 12, а также среднегодовых значений ОМП (рис. 11), можно сделать вывод, что длительность цикла 23 будет не менее 11.5 лет.

11 Завершение: проблемы остаются

Мы не говорим, что Земля и другие планеты влияют на Солнце и его магнитную переменность. Тем не менее на основе рис. 8–10 можно утверждать, что Земля – *исключительная* планета Солнечной системы. Ибо для нее наблюдается максимальный резонанс с низкочастотной переменностью ОМП в виде окологодичного колебания 1.034(7) г. Не может быть случайным и тесный резонанс наиболее мощной 27-суточной периодичности ОМП, а фактически экваториального вращения Солнца с движением Меркурия. Это может дать ключ к объяснению аномального осевого вращения планеты. В чем действительная физика всех этих явлений, а именно квази-резонансов, предстоит исследовать в дальнейшем, и особенно путем новых измерений ОМП, ибо практика – лучший критерий истины.

Измерения ОМП за 40 лет, подкрепленные данными о секторной структуре ММП, показывают, что скорость экваториального вращения Солнца оставалась неизменной в течение 70 лет, с 1926 г. по 1996 г. Но в 23-м цикле вращение ускорилось на 1.2 % (для самого Солнца это ускорение компенсировалось, по-видимому, усилением поля областей, вращающихся медленнее и принадлежащих высоким широтам: см. усилившийся пик 27.18 сут на рис. 5б).

С одной стороны, существование главного периода вращения ОМП (26.92 сут в циклах 16–22) хорошо согласуется с явлением т. н. “активных долгот”. С другой стороны, однако, такая устойчивость “экваториального” вращения ОМП противоречит динамо-механизму, ответственному за гене-

рацию поля в нижней части конвективной зоны и в фотосфере. Многолетняя когерентность ОМП не согласуется и с современным представлением о природе циклической деятельности Солнца – моделью Бэбкока-Лейтона, где неизбежно перемешивание униполярных областей фотосферы в ходе 22-летнего цикла. По крайней мере мы не видим ясного объяснения многолетней *когерентности* вращения ОМП. Ведь структура полярностей должна полностью перемешиваться уже за 11 лет, приводя к дезорганизации полярностей в фотосфере за цикл, к диссипации и деградации каких-либо крупномасштабных магнитных структур. На деле же Солнце демонстрирует поразительную стабильность структуры ОМП и вращения “магнитного экватора” на протяжении десятилетий... Это наводит на мысль о некотором внешнем (или внутреннем?) постоянно действующем факторе. Неясен, однако, источник такого гипотетического воздействия.

Причина ускорения вращения экватора в цикле 23 непонятна; мы не знаем также, связано ли ускорение с совпавшим по времени т. н. “глобальным потеплением” на Земле. Особое внимание обращает на себя нарушение правила Гневышева и Оля (1948) для пары циклов 22–23. Правило гласит, что “главный” магнитный цикл Солнца состоит из двух 11-летних: четного, низкого по числу пятен W в максимуме, и нечетного, более высокого по W в максимуме. Нарушение правила имело место для циклов 4–5 (1785–1811 гг.), и оно обычно связывается с аномальной эпохой векового хода с.а. (некоторая аномалия наблюдалась также в 1834–1856 гг. для циклов 8–9). Есть основание считать, следовательно, что аномально быстрое вращение ОМП и Солнца на экваторе в 23-м цикле связано также с нарушением векового хода с.а. А оно, в свою очередь, может отражать изменение динамо-механизма в недрах Солнца и нестабильность центрального ядра. (Заметим, что статическая модель Солнца не допускает вариаций скорости вращения Солнца как целого, а также изменений физического состояния и динамики центрального ядра, кроме медленного эволюционного изменения, обусловленного выгоранием водорода. Приверженцами модели утверждается, что “недра Солнца стабильны”, хотя многие публикации говорят о циклическом изменении вращения и вариациях потока нейтрино, и даже с периодом солнечного вращения.)

Ход ОМП со временем подтверждает и уточняет правило Гневышева-Оля. Как следует из рис. 11, *фундаментальный* 22-летний магнитный цикл Солнца действительно начинается с *четных* циклов. Именно им соответствуют два главных резких экстремума отрицательного поля 1968–1969 гг. и 1989–1990 гг., совпавшие с предэпохами максимумов циклов 20 и 22. Одновременно обостряется проблема т. н. “монопольного” поведения Солнца: теория не может объяснить, почему практически на всем Солнце, точнее, на видимой полусфере, в течение года или более доминирует поле “+” или “-”?

Асимметрия по отношению к разным полярностям в разных явлениях с.а. отмечалась многими наблюдателями, неоднократно и независимо от инструмента (подробнее см. Котов и др., 2002). Явление, по-видимому, имеет прямое отношение к разбалансу полярностей в фотосфере и проблеме “солнечного монополя”, широко обсуждавшейся в 60-70-х годах прошлого века и нерешенной до сих пор. (Заметим, в частности, что преобладание на рис. 11 отрицательного ОМП в 1968–1969 гг. и 1989–1990 гг. не могло компенсироваться N -полем полярных областей, потому что вблизи этих лет происходила реполюсовка “дипольного” поля Солнца. Обсуждение проблемы “монополя” и подробные факты см. у Бэбкока (1959), Северного (1968), Уилкокса (1972), Говарда (1974), Котова и Левицкого (1985), Григорьева и Демидова (1989).)

При исследовании ОМП наша “прозаическая” звезда обнаруживает поведение и разнообразие новых явлений, которые трудно понять и объяснить. Но не забудем истину, высказанную еще Ньютоном: “Сама природа проста и не роскошествует излишними причинами вещей”. Если отмеченные резонансы реальны, их правильное физическое истолкование может привести нас к лучшему пониманию вращения Солнца и причин его магнитной переменности и полярных реполюсовок. Возможен и новый подход к фундаментальной проблеме – причине 22-летнего цикла, и более ясное понимание в перспективе процессов формирования Солнечной системы и факта ее замечательной стабильности.

Автор признателен В.И. Ханейчуку за разработку компьютерных программ, а также авторам сайтов *WSO.Stanford.edu* и *SOLIS.NSO.edu* за обширные данные по ОМП Солнца.

Литература

- Акуна и др. (Асуїа М.Н., Connerney J.E.P., Wasilewski P., et al.) // *Science*. 1998. V. 279. P. 1676.
- Альвен Х., Аррениус Г. // *Эволюция Солнечной системы*. М.: Мир. 1979.
- Бигг (Bigg E.K.) // *Astron. J.* 1967. V. 72. P. 463.
- Бэбкок (Babcock H.D.) // *Astrophys. J.* 1959. V. 130. P. 364.
- Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. // *Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца*. М.: Наука. 1986.
- Гневьшев М.Н., Оль А.И. // *Астрон. журн.* 1948. Т. 25. С. 18.
- Говард (Howard R.) // *Solar Phys.* 1974. V. 38. P. 283.
- Голдрайх и Пил (Goldreich P., Peale S.J.) // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1968. V. 6. P. 287.
- Григорьев и Демидов (Grigoryev V.M., Demidov M.L.) // *Solar magnetic fields and corona*. V. 1. Novosibirsk: Nauka. 1989. P. 108.
- Демидов М.Л., Григорьев В.М., Пещеров В.С. // *Астрон. журн.* 2005. Т. 82. С. 628.
- Дэмотт (Dermott S.F.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1968. V. 141. P. 349.
- Котов В.А. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1987. Т. 77. С. 39.
- Котов В.А., Демидов М.Л., Ханейчук В.И., Цап Т.Т. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1998. Т. 94. С. 110.
- Котов В.А., Левицкий Л.С. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1985. Т. 71. С. 32.
- Котов В.А., Северный А.Б. // *Общее магнитное поле Солнца как звезды. Каталог 1968–1976*. М.: АН СССР. 1983.
- Котов В.А., Ханейчук В.И., Цап Т.Т. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 2002. Т. 18. С. 205.
- Котов В.А., Цап Т.Т. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2005. Т. 101. С. 82.
- Котов (Kotov V.A.) // *Solar Phys.* 2006. V. 239. P. 461.
- Ксанфомалити Л.В. // *Астрон. вестник*. 2001. Т. 35. С. 371.
- Локвуд и др. (Lockwood M., Stamper R., Wild M.N.) // *Nature*. 1999. V. 399. P. 437.
- Макаров и др. (Makarov V.I., Tlatov A.G., Callebaut D.K.) // *Solar Phys.* 1997. V. 170. P. 373.
- Ньетто М.М. // *Закон Тициуса-Бодде. История и теория*. М.: Мир. 1976.
- Овенден (Ovenden M.W.) // *Vist. Astron.* 1975. V. 18. P. 473.
- Свалгард и Уилкоккс (Svalgaard L., Wilcox J.M.) // *Solar Phys.* 1975. V. 41. P. 461.
- Северный А.Б. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1968. Т. 38. С. 3.
- Северный (Severny A.) // *Nature*. 1969. V. 224. P. 53.
- Уилкоккс (Wilcox J.M.) // *Comm. Astrophys. Space Phys.* 1972. V. 4. P. 141.
- Уилкоккс и др. (Wilcox J.M., Schatten K.H., Tanenbaum A.S.) // *Solar Phys.* 1970. V. 14. P. 255.
- Ханейчук и др. (Haneychuk V.I., Kotov V.A., Tsap T.T.) // *Astron. Astrophys.* 2003. V. 403. P. 1115.
- Чаплин и др. (Chaplin W.J., Dumbill A.M., Elsworth Y. et al.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2003. V. 343. P. 813.
- Шерпер и др. (Scherrer P.H., Wilcox J.M., Svalgaard L. et al.) // *Solar Phys.* 1977. V. 54. P. 353.