

УДК 523.9

В. А. Котов, В. И. Ханейчук, Т. Т. Цап

Крымская астрофизическая обсерватория
98409, Украина, Крымская АР, п. Научный**К измерениям магнитного разбаланса Солнца**

Рассмотрен временной ряд общего магнитного поля (ОМП) Солнца как звезды за 1968—2000 гг. (более 12 тыс. суточных измерений). Показано, что формально по всем измерениям ОМП на Солнце в течение 33 лет преобладало поле южной полярности со средним значением $-1.9 \pm \pm 1.1$ мкТл (доверительная вероятность асимметрии 91 %; не исключено, однако, ее инструментальное происхождение). ОМП изменяется с 22-летним циклом, причем знак преимущественной полярности в среднем совпадает со знаком полярности N-полюса Солнца; средняя амплитуда вариации около 6 мкТл. Сделан вывод, что полярность северного полюса Солнца является «определяющей» для доминирующей полярности фонового магнитного поля большей части фотосферы (на гелиоширотах выше -50°).

ДО ВИМІРЮВАНЬ МАГНІТНОГО РОЗБАЛАНСУ СОНЦЯ, Котов В. А., Ханейчук В. І., Цап Т. Т. — Розглянуто часовий ряд загального магнітного поля (ЗМП) Сонця як зірки за 1968—2000 рр. (більш ніж 12 тис. добових вимірювань). Виявлено, що формально за усіма вимірюваннями ЗМП на Сонці протягом 33 років було переважно поле південної полярності з середнім значенням -1.9 ± 1.1 мкТл (довірча ймовірність асиметрії 91 %; не виключено, однак, її інструментальне походження). ЗМП змінюється з 22-річним циклом, причому знак переважної полярності в середньому збігається із знаком полярності N-полюса Сонця; середня амплітуда варіації близька до 6 мкТл. Зроблено висновок, що полярність північного полюса Сонця є «визначальною» для домінуючої полярності фонового магнітного поля великої частини фотосфери (на геліоширотах вище -50°).

ON THE MEASUREMENTS OF THE MAGNETIC DISBALANCE OF THE SUN, by Kotov V. A., Haneychuk V. I., Tsap T. T. — The 1968—2000 time sequence of the mean magnetic field of the Sun as a star is analysed (MMF, more than 12 thousands of daily measurements). It is shown that nominally — on the basis of the total MMF measurements set — the southern polarity of the magnetic field predominates on the Sun, with the average value $-1.9 \pm \pm 1.1$ μ T (the magnetic asymmetry is significant at about 91 %; however, its

instrumental origin cannot be completely excluded). The MMF changes with the 22-year cycle, so that its predominant polarity tends to coincide with that of the Sun's northern pole; the mean amplitude of this variation is equal to $6 \mu T$. It is concluded that the northern pole polarity tends to «determine» the dominant polarity of solar background fields for the most area of the photosphere (at heliolatitudes higher than -50°).

1. ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что полный магнитный поток фотосферы Солнца должен быть равен нулю. Но наблюдатели неоднократно отмечали, что в течение нескольких солнечных оборотов на обширных участках фотосферы или на всей видимой полусфере Солнца преобладает магнитное поле одной полярности. Доминирующее поле при этом представляется в среднем как униполярное, т. е. несбалансированное полями противоположного знака других участков фотосферы. Это — явление магнитной асимметрии Солнца, природа которой далека от ясности (проблема «солнечного монополя») [4, 10, 12, 14, 18, 19, 27].

Важной характеристикой Солнца как звезды является его общее магнитное поле B (ОМП). Оно измеряется с помощью магнитографа Бэбкока: регистрируется эффект Зеемана фраунгоферовой линии поглощения Fe I λ 525.0 нм в свете всей видимой полусферы Солнца. Но измеряется, конечно, не фактическая напряженность поля фотосферы для данных суток, а величина B , пропорциональная продольной составляющей магнитного потока через видимую полусферу звезды. Потемнение диска к краю входит в сигнал магнитографа как весовая функция.

Силовые линии магнитного поля Солнца замкнуты или уходят на бесконечность. В фотосфере поле, уносимое солнечным ветром в межпланетное пространство, направлено практически радиально. Обсуждение этого вопроса см., например, в [26]. Некоторые исследователи находили небольшой систематический наклон силовых линий, но он не зависел от полярности и не мог сам по себе привести к разбалансу среднего магнитного потока. Поскольку плоскости эклиптики и солнечного экватора близки друг к другу, средний измеряемый магнитный поток за несколько оборотов Солнца должен быть равен нулю. (Угол 7.25° между двумя плоскостями достаточно мал; его роль легко учитывается, например, при изучении квазигодовой вариации ОМП [4]. В нашем случае анализируются средние значения ОМП за год или три года, что должно сводить на нет эффект годовой волны ОМП и тем самым — влияние переменности гелиошироты Земли. Подчеркнем также, что гелиоширотный эффект не может сам по себе «установить» преобладание в ОМП северной или южной полярности).

Величина B , таким образом, должна иметь естественный нулевой уровень, что позволяет с достаточной уверенностью говорить о регистрации слабых магнитных (порядка микротесла) разбалансе и переменности Солнца. Изучение этой переменности, даже в случае только продольной составляющей, может пролить дополнительный свет на источники магнетизма Солнца, природу полярных переполюсовок, магнитного разбаланса и 22-летнего цикла. И здесь важно отметить, что ОМП определяется обширными площадями «спокойной» фотосферы, не коррелирует с пятнами и почти не коррелирует с активными областями. Зато наблюдается хорошая корреляция между ОМП и крупномасштабными магнитными полями (фоновыми полями) [5, 23].

Измерения ОМП Солнца впервые начаты по инициативе А. Б. Северного [24] в Крымской астрофизической обсерватории (КрАО). В 2000 г.

нами сделано рекордное число измерений, так что начиная с 19 марта 1968 г. полное число крымских суточных значений величин B стало $N = 1817$.

Здесь мы анализируем все доступные нам к началу 2001 г. измерения ОМП, включая данные других обсерваторий, для изучения магнитного разбаланса Солнца и его связи с 22-летним циклом. Тот факт, что знак разбаланса ОМП изменяется с фазой цикла, впервые был установлен В. М. Григорьевым и М. Л. Демидовым [18] и количественно подтвержден в работе [12].

Наша цель — детализировать картину изменения на более обширном материале и привлечь внимание к проблеме «солнечного монополя».

2. ДАННЫЕ 1968—2000 ГГ.

Измерения ОМП выполняются обычно раз в день, когда позволяет погода и инструмент; или несколько раз в день, как в Стэнфорде, а затем измерения за день для данной обсерватории усредняются. Фактически ОМП представляет собой магнитный разбаланс видимой полусферы Солнца. Положительные значения B всюду соответствуют северной (положительной) полярности, а приводимые ошибки — неопределенности примерно $\pm 1\sigma$.

В течение 33 лет измерения проводились систематически в КраО, в Солнечной обсерватории им. Дж. Уилкокса (СОУ) Стэнфордского университета, в Саянской обсерватории (СО; Институт солнечно-земной физики, Иркутск) и обсерватории Маунт Уилсон (ОМУ); в первых трех пунктах они продолжают и в настоящее время. Данные Стэнфорда публикуются в «Solar-Geophysical Data» и в Интернете, данные ОМУ, СО и основная часть данных КраО опубликованы в работах [3, 6, 17, 21]. О методах измерений ОМП, калибровке и интерпретации данных см. [3, 6, 15, 17, 21, 23].

Сведения об отдельных массивах ОМП, без каких-либо нормировочных коэффициентов и без т. н. «фактора насыщения» δ [20] приведены в таблице, где N — число суточных измерений, Δ — среднее квадратичное отклонение.

Чтобы получить 33-летний ряд, значения B данной обсерватории умножались на фактор $k = \langle \Delta \rangle / \Delta$, где $\langle \Delta \rangle = 63.5$ мкТл — среднее стандартное отклонение для четырех обсерваторий. Значения k приведены в последней графе таблицы. Полный ряд 1968—2000 гг. содержит 12134 значений ОМП с величиной $\Delta = 63$ мкТл; ниже, если специально не оговорено, рассматриваем эти, нормированные, данные. (Если вычислить «эффективное» среднее $\langle \Delta \rangle$ другим методом, например с участием статистического веса $\sim \Delta^{-2}$, то это несколько изменит коэффициенты k и амплитуды периодических вариаций ОМП. Но относительное изменение, как показали

Данные ОМП за 1968—2000 гг.

Обсерватория	Интервал, г.	N	Δ , мкТл	k
КраО	1968—2000	1817	67.4	0.942
Маунт Уилсон	1970—1982	2457	67.0	0.947
Саяны	1982—1993	313	77.5	0.819
Стэнфорд*	1975—2000	7547	41.9	1.515
Все данные**	1968—2000	12134	62.8	—

*Наблюдения СОУ покрывают интервал 16 мая 1975 г.—31 июля 2000 г.

**Общий нормированный ряд.

простые расчеты, не превысит 15 % и не скажется существенно на спектре мощности и основных выводах; см. также [12].)

3. СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ КраО и СОУ

Наблюдения в разных обсерваториях делаются в разное время суток. Это для нашего анализа не существенно, поэтому будем считать их «одновременными». Заметим также, что измерения ОМП в КраО с 1991 г. выполняются, как правило, на двух каналах магнитографа, затем для данного дня результаты двух каналов усредняются.

Детальный анализ измерений КраО, СОУ и СО, включая анализ взаимных корреляционных соотношений, выполнен в [2, 3, 17]. Показано, что данные удовлетворительно согласуются между собой.

В этом разделе обсудим ненормированные измерения. На рис. 1 для примера приведен временной ход ОМП 7 июня — 31 июля 2000 г. по данным КраО и СОУ. Видно хорошее качественное согласие поведения 2-секторной структуры по данным обеих обсерваторий, но с той разницей, что данные КраО примерно в 2.2 раза больше, чем данные СОУ. Соответствующее уравнение линейной регрессии вычислено для 29 пар «одновременных» значений V :

$$V(\text{КраО}) = 2.23V(\text{СОУ}) - 24 \text{ мкТл},$$

с коэффициентом корреляции $r = 0.88$. Ранее для измерений 1991—1993 гг.

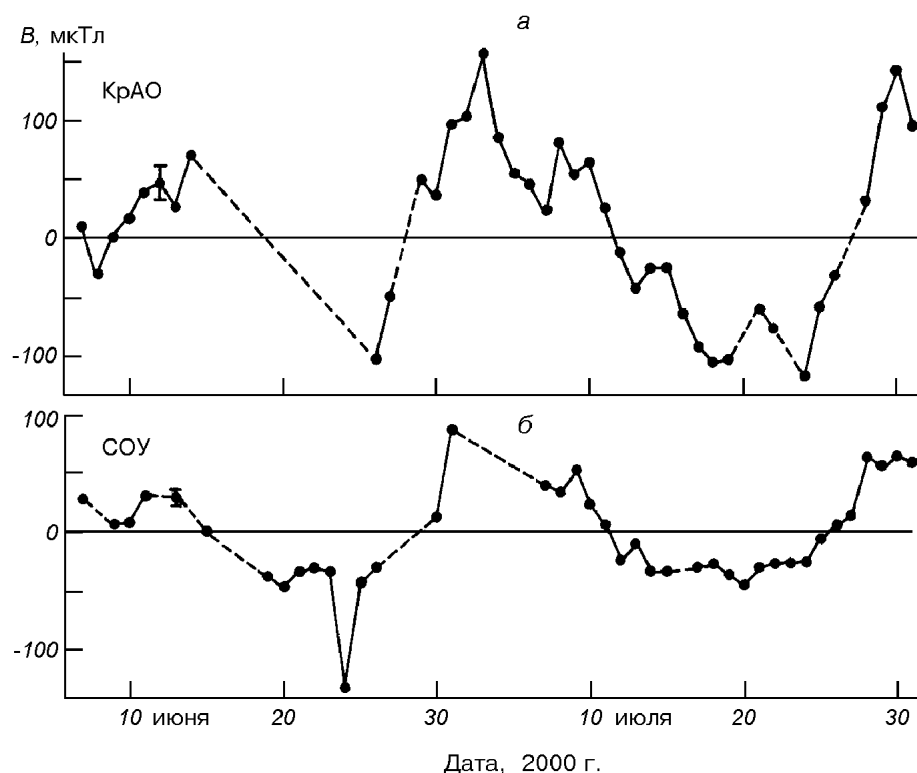


Рис. 1. Вариации ненормированных значений ОМП с 7 июня по 31 июля 2000 г. по наблюдениям КраО (а) и Стэнфорда (б) (точки, соединенные сплошными линиями; штриховые линии соединяют измерения с одним или более пропусками). Вертикальными черточками показаны типичные ошибки

было получено существенно другое выражение (с участием 72 пар значений ОМП [2]):

$$B(\text{КрАО}) = 1.20B(\text{СОУ}) - 26 \text{ мкТл}, \quad r = 0.86.$$

Изменение корреляционного соотношения, по-видимому, отражает вариации крупномасштабных магнитных структур фотосферы, в частности их широты, в ходе 22-летнего цикла (но возможно также и влияние изменения числа измерений n от сезона к сезону). Поскольку два инструмента имеют разные весовые функции, это неизбежно должно приводить и к изменению коэффициента регрессии. Более точный учет изменения, однако, довольно сложен и выходит за рамки данной работы. Мы полагаем, что на современном этапе исследований ОМП достаточно применять нормировочную процедуру, аналогичную изложенной выше.

4. МАГНИТНАЯ АСИММЕТРИЯ СОЛНЦА

После десятилетий измерений ОМП интересно знать, равен ли нулю средний магнитный поток через видимую полусферу Солнца. Ожидается, что он в пределах ошибки должен быть равен нулю, поскольку Солнце вращается вокруг своей оси, а Земля вместе с наблюдателями вращается вокруг Солнца. Измерениями ОМП охвачено примерно три цикла солнечной активности, и за это время разбаланс должен свестись к нулю.

Поэтому удивительно, что среднее за 33 года значение отличается от нуля:

$$\langle B \rangle = -1.0 \pm 0.6 \text{ мкТл},$$

с доверительной вероятностью 91 % ($W \approx 1.7\sigma$).

Преобладание отрицательного поля видно также и в данных отдельных обсерваторий (кроме ОМУ), хотя и с малой доверительной вероятностью, особенно для СОУ:

$$\text{Крым } (N = 1817): \quad \langle B \rangle = -4.4 \pm 1.5 \text{ мкТл},$$

$$\text{Маунт Уилсон } (N = 2457): \quad \langle B \rangle = +0.2 \pm 1.3 \text{ мкТл},$$

$$\text{Саяны } (N = 313): \quad \langle B \rangle = -8.2 \pm 3.6 \text{ мкТл},$$

$$\text{Стэнфорд } (N = 7547): \quad \langle B \rangle = -0.2 \pm 0.7 \text{ мкТл}.$$

Видно, что только в измерениях Крыма и Саян эффект превышает уровень 2σ ; в данных же ОМУ и СОУ он практически отсутствует. Некоторое преобладание положительного поля в данных ОМУ можно связать с тем, что они относятся в основном к интервалу 1971—1982 гг., когда в суммарном ОМП (см. ниже) доминировала положительная полярность. То же касается данных Саян 1982—1993 гг., когда в суммарном ОМП действительно преобладала отрицательная полярность.

Число измерений N в КрАО и СО значительно меньше, чем в ОМУ и СОУ. При сопоставлении данных нужно учитывать, однако, что сдвиг нуля определяется не столько числом N , сколько качеством измерений, и может иметь две причины: «солнечную» и инструментальную. В первом случае причина сдвига общая для всех инструментов, и конечный результат должен мало зависеть от N . Во втором случае сдвиг также мало зависит от N , поскольку определяется главным образом средним сдвигом нуля конкретного магнитографа. В КрАО, например, в отличие от других магнитографов, сигнал ОМП с 1975 г. измеряется часто с использованием обоих лучей электрооптического модулятора — обыкновенного и необыкновенного, что повышает надежность определения «истинного нуля». В СО применяется

хороший и наиболее объективный метод контроля за положением нуля-пункта магнитографа (см. [17] и п. 7). Детальный анализ надежности определения «нуля» разных магнитографов требует, однако, специального рассмотрения. Здесь в первом приближении мы рассматриваем измерения четырех обсерваторий как равнозначные, а в качестве веса при усреднении данных учитываем только число измерений N .

Возможно сезонное изменение среднего уровня ОМП, на что указывалось в работе [25]. Для нашего ряда это изменение имеет место, но оно не может быть приписано инструменту. Сезонный эффект является, по-видимому, побочным результатом окологодичной вариации ОМП, природа которой не установлена [4, 8]. Подчеркнем, что ее период 1.039 ± 0.008 г. существенно отличается от периода 1.000 г. и что сезонный эффект должен практически исчезнуть при усреднении за 33 года.

5. ЦИКЛ 22 ГОДА

Дискретное фурье-преобразование переменной величины дает периодограмму; следуя работе [22], однако, будем называть ее спектром мощности (СМ). В области периодов вращения Солнца, $P \approx 27\text{—}30$ сут, СМ достаточно подробно изучен [6, 11, 12], поэтому его не приводим. Отметим только, что 33-летний ряд по-прежнему демонстрирует «твердотельное» вращение ОМП с периодом

$$P_{\odot} = 26.923 \pm 0.015 \text{ сут},$$

не зависящим от переполюсовок, изменения знака глобального поля и дифференциального вращения. Его стабильность трудно объяснить в рамках теории динамо и общепринятой модели цикла Бэбкока—Лейтона [6].

Низкочастотная часть спектра публиковалась [2, 21], но без должного анализа. Считаем необходимым привести его для расширенных данных, чтобы продемонстрировать устойчивость основных периодов и увеличение их достоверности с увеличением числа измерений. В этом спектре (рис. 2) главный период соответствует вариации с периодом около 1.04 г. и гармонической амплитудой $A_h = 6.5$ мкТл. Два других высоких пика отвечают периодичностям $P_v = 1.61 \pm 0.02$ г. и $P'_c = 22.6 \pm 3.9$ г. На других заметных, но более низких пиках (1.48, 1.97, 3.9 и 6.9 г.), останавливаться не будем.

Период P_v совпадает с синодическим периодом орбитального движения Венеры (1.599 г.) и дает основание для гипотезы о резонансе «Солнце—Венера». Его физический механизм непонятен и требует специального рассмотрения; возможно, что резонанс — реликтового характера и мог возникнуть на ранней стадии формирования Солнечной системы.

Периодичность 22.6 г. в пределах ошибки совпадает со средней длительностью солнечного магнитного цикла; в дальнейшем будем приписывать периоду «каноническое» значение $P_c = 22$ г. Соответствующий пик на рис. 2 с амплитудой $A_h \approx 5$ мкТл можно считать априорным, и его вероятность [22]

$$p = e^{-\eta},$$

где $\eta = (N/4) \cdot (A_h/\Delta)^2 \approx 19$. Это дает $p \approx 5.6 \cdot 10^{-9}$, что отвечает априорной достоверности $W' \approx 5.8\sigma$. Но для фактической достоверности надо учесть неравномерность ряда, число независимых частот в СМ и тот факт, что наблюдениями охвачено всего лишь 33 года. Но тогда все равно получается, что пик P_c — достаточно достоверен, на уровне не менее 3σ (см. также [12]).

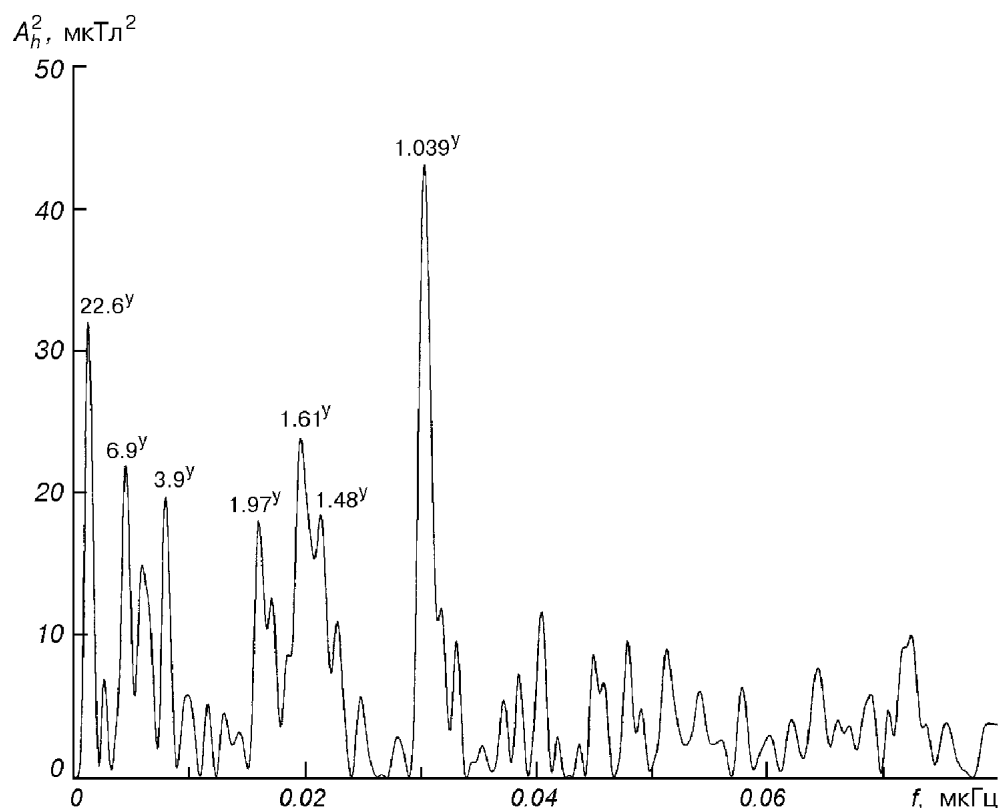


Рис. 2. Низкочастотная часть спектра мощности ОМП за 1968—2000 гг. ($N = 12134$)

6. 22-ЛЕТНЯЯ ВОЛНА ОМП

Число измерений ОМП варьирует от года к году. Чтобы уменьшить влияние этой неравномерности, а также других случайных факторов на 22-летнюю кривую, вычислены скользящие средние за три года. Их ход на рис. 3 характеризует переменность магнитного разбаланса ОМП. Синусоида с периодом 22 г., построенная методом наименьших квадратов с учетом отрицательного сдвига (-1.9 мкТл), имеет амплитуду $A_h \approx 6$ мкТл.

В интервалах 1968—1971 гг. и 1982—1991 гг. среднее поле было преимущественно отрицательным, а в остальное время — положительным или слабо изменялось вблизи нуля (интервал 1992—2000 гг.). ОМП изменяло преимущественную полярность примерно в 1972, 1982 и 1992 гг., т. е. с задержкой на два года после максимумов солнечной активности и переполюсовок полярного поля; последние наблюдались в 1970, 1980, 1990 гг. (переполюсовка 23-го цикла произошла, по-видимому, в конце 2000 г., см. http://science.msfc.nasa.gov/headlines/y2001/ast15feb_1.htm).

Обращает на себя внимание сильный минимум 1968—1970 гг. Мы не склонны считать его ложной флуктуацией или результатом ошибок первых лет службы ОМП: каждая точка на рис. 3 получена усреднением большого числа отдельных измерений, от 400 до 1800. (Но полностью исключить ошибочность первой точки на рис. 3 мы не можем. Отметим также, что в целом поведение ОМП заметно отличается от гармонического.)

Рис. 3 полностью подтверждает вывод [12, 18] об изменении ОМП с 22-летним циклом. Причина явления, как и источник перманентного «отрицательного монополя» Солнца, непонятны и требуют специального

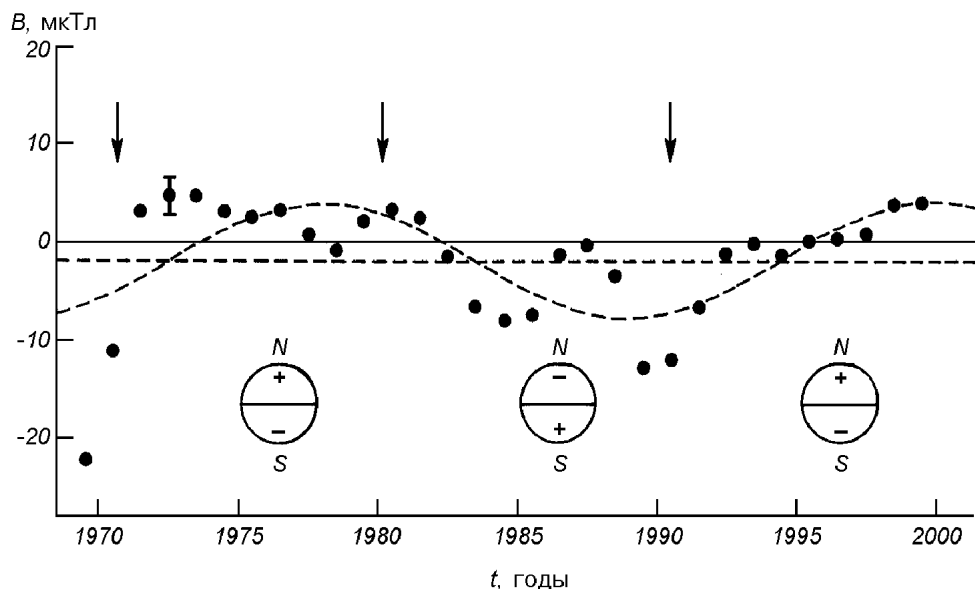


Рис. 3. Вариации трехлетних скользящих средних значений ОМП (точки); вертикальной черточкой указана средняя стандартная ошибка. Штриховая кривая — синусоида с периодом 22 г., проведенная через точки МНК. Горизонтальной штриховой линией указан средний уровень ОМП (-1.9 мкТл). Вертикальные стрелки соответствуют полярным переполюсовкам Солнца. Внизу для минимумов солнечной активности условно показан диск Солнца с доминирующими полярностями на его полюсах («+» или «-» на N- или S-полюсе; см. аналогичную качественную картину полярностей в [18])

рассмотрения. Несомненно, что они тесно связаны с переполюсовками и физическим механизмом, обеспечивающим 22-летнюю циклическую деятельность нашей звезды.

7. О СДВИГЕ НУЛЕВОГО УРОВНЯ ОМП

Среднее значение для трехлетних скользящих величин (рис. 3)

$$\langle B \rangle = -1.9 \pm 1.1 \text{ мкТл.}$$

Сдвиг в сторону отрицательного поля достоверен на уровне 91 % (1.7σ). Это значение сдвига лучше учитывает неравномерность ряда, и следовательно, более корректно, чем сдвиг -1.0 мкТл, полученный в п. 4 простым усреднением суточных значений ОМП.

Главный вопрос — о причине разбаланса. Эффект слабый, и его инструментальное происхождение пока невозможно полностью исключить. Надо также отметить, что наблюдения относятся лишь к трем 11-летним циклам, что само по себе может вызвать отличие $\langle B \rangle$ от нуля вследствие 22-летней периодичности.

При регистрации ОМП применяются особые методы учета инструментального смещения нуля магнитографа. В КраО и СОУ «истинный нуль» определяется по линии Fe I λ 512.4 нм, имеющей фактор Ландэ $g = 0$. В Саянах же применяется не менее эффективный способ: положение «нуля» определяется по линии Fe I λ 525.0 нм ($g = 3$), по которой регистрируется основной сигнал магнитографа, но с применением фазовращающей пластинки $\lambda/2$ перед зеркалом целостата. (В ОМУ за нулевой уровень принимался сигнал, измеренный при выключенном электрическом напряжении на модуляторе).

Наиболее полно проблема нуля магнитографа разобрана в работах [15, 16]. Показано, что несмотря на все уточнения калибровки уменьшение оптических эффектов и погрешностей электроники положение нуля изменяется ото дня ко дню в пределах нескольких десятков микротесла. Смещение, однако, более или менее случайное, и главное, оно в основном исключается путем вычитания «нулевого» сигнала из основного сигнала магнитографа. Но остается открытым вопрос об остаточном систематическом отклонении, которое может быть разным для разных инструментов. Поэтому в солнечном происхождении перманентного смещения на столь малую величину, как -2 мкТл, пока не может быть полной уверенности.

В пользу реальности разбаланса, или солнечного «монополя», говорят следующие обстоятельства:

- разбаланс имеет один и тот же знак у трех обсерваторий из четырех,
- значения ОМП на рис. 3 асимметричны по отношению к полярностям «+» и «-»: наиболее сильные отклонения — в сторону отрицательного поля,
- экстраполяция 22-летней волны за 2000 г. (рис. 3) показывает, что в ближайшие годы снова должно начаться преобладание отрицательной полярности, и общий разбаланс ОМП усилится.

Предлагалось несколько объяснений причин «монополя» Солнца [4, 25, 27]. Но все они — лишь гипотезы и не дают удовлетворительного ответа.

Интересную мысль высказали В. М. Григорьев и М. Л. Демидов [18]. По их мнению, разбаланс вызван квадрупольной составляющей глобального поля, когда значительная часть магнитных силовых линий, выходящих из фотосферы на низких широтах, замыкается в полярных областях. Магнитограф же регистрирует зеемановский сигнал преимущественно от центральной зоны солнечного диска радиусом $0.6R_{\odot}$, поэтому в течение длительного времени будет регистрироваться поле с перевесом той или иной полярности. А в соответствии с полярными переполосовками знак разбаланса в принципе может изменяться с периодом примерно 22 года, что и наблюдается (см. пп. 5 и 6); заметим, что квадрупольная составляющая крупномасштабных полей подтверждается рядом наблюдений. Но эта модель, однако, не указывает на механизм генерации квадрупольного поля и не объясняет наличие перманентного, на протяжении трех циклов, разбаланса, причем перевеса именно отрицательной полярности.

Разбаланс ОМП и его 22-летняя вариация могут быть в определенной степени связаны с известной N-S-асимметрией явлений солнечной активности, а также крупномасштабного магнитного поля. Последняя, согласно работе [9], обусловлена асимметрией N- и S-полушарий Солнца в зоне генерации квадрупольного поля. Согласно же теоретическим расчетам В. Н. Криводубского [7] квадрупольная мода полоидального поля Солнца вполне может возбуждаться механизмом турбулентного динамо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из рис. 3, мы склонны считать, что разбаланс нельзя объяснить тем, что наблюдениями покрыто нечетное число 11-летних циклов (поскольку число полувольт 22-летней синусоиды с доминирующим положительным и отрицательным ОМП примерно одинаковое). Вряд ли его можно приписать и какому-либо инструментальному эффекту при измерении слабой зеемановской поляризации [4, 15]. Тем более, что подобная асимметрия по отношению к разным полярностям в разных явлениях солнечной активности отмечалась наблюдателями неоднократно и независимо от инструмента.

Эффект имеет прямое отношение к разбалансу полярностей в фотосфере и к проблеме «солнечного монополя», широко обсуждавшейся в 50—70 гг. прошлого века и нерешенной до сих пор (см. п. 1).

Перевес отрицательного поля отмечался, например, С. И. Гопасюком и Т. Т. Цапом [1]: в невозмущенной атмосфере Солнца «напряженность магнитного поля элементов S-полярности преобладает над средней напряженностью поля элементов N-полярности». Ранее к аналогичному выводу пришел А. Б. Северный [10]: «Наблюдается «магнитная асимметрия» северного и южного полушария — чаще перевес в среднем S-полярного магнетизма в северном полушарии — эффект, которому сопутствует асимметрия солнечной активности».

Не так давно Зирин и др. [28] наблюдали на малых масштабах несимметричные изменения поля в соседних магнитных элементах спокойной фотосферы, когда одна полярность росла или уменьшалась без заметного изменения поля элементов другой полярности. Никакого разумного объяснения асимметрии нет. Авторы отметили, что явление невозможно понять в рамках существующих моделей генерации и эволюции магнитного поля, и что причина или в несовершенстве аппаратуры, или в фундаментальной физике тонких магнитных трубок. Ранее на подобные асимметричные изменения магнитных трубок обращали внимание и другие наблюдатели (см. ссылки в [28]).

Мы полагаем, что наблюдаемый эффект магнитной асимметрии Солнца — не инструментального происхождения и представляет собой непонятное, но интригующее свойство магнетизма Солнца и, вероятно, других магнитных звезд. Его природу еще предстоит раскрыть. Проблема требует увеличения наблюдений и специального рассмотрения, причем как инструментальных погрешностей, так и чисто «солнечных» причин (изменение контура линии, влияние изменения температуры в магнитных элементах, т.н. «эффект насыщения» и т. п.).

На рис. 3 видно, что интервалы преобладающей полярности ОМП имеют длительность примерно 10—11 лет. Но главное то, что они более или менее хорошо, с запаздыванием во времени примерно на 1—2 года, соответствуют эпохам минимума солнечной активности, когда на северном полюсе доминирует поле с тем же знаком. Отсюда следует, что полярность северного полюса совпадает по знаку (является «определяющей») для средней полярности фонового поля большей части фотосферы. Согласно экстраполяции синусоиды вскоре после максимума 23-го цикла на Солнце должно преобладать поле отрицательной полярности, что наверняка усилит асимметрию.

Но известно, что ОМП определяется в основном фоновыми полями центральной зоны солнечного диска радиусом $0.6R_{\odot}$ ($\pm 50^{\circ}$ по широте) [5, 23]. Получается, что «влияние» северного полюса — в смысле «установления» доминантной полярности видимой полусферы Солнца — является определяющим для гелиоширот выше -50° . Влияние же южного полюса в среднем мало. В этом мы видим новое интересное проявление магнитной асимметрии, природа которой загадочна. Физически она может быть обусловлена вращением Солнца, ибо существенную N-S-асимметрию наблюдатели часто находят именно в скорости вращения солнечной атмосферы, различных поверхностных структур, короны и фотосферного магнитного поля, а не только в числе пятен и активных областей (см. [13]).

Асимметрия ОМП Солнца, таким образом, проявляет себя в трех аспектах:

а) среднее за 33 года продольное поле фотосферы оказывается преимущественно отрицательной полярности (примерно -2 мкТл; достоверность

эффекта, однако, невысокая (91 %), и он требует подтверждения новыми измерениями);

б) ОМП изменяется с фазой 22-летнего цикла (подтверждены и уточнены данные [12, 18, 21], но на большем наблюдательном материале),

в) преобладающая полярность фонового, или крупномасштабного, поля фотосферы на широтах выше -50° совпадает в среднем с доминирующей полярностью северного полюса Солнца.

Асимметрия ОМП может быть тесно связана с известной N-S-асимметрией числа пятен и общей солнечной активностью и должна, безусловно, учитываться в теориях, объясняющих 11-(22)-летний цикл. Все три эффекта магнитной асимметрии Солнца представляют особый интерес и для механизма динамо.

Авторы благодарны М. Л. Демидову, Е. В. Иванову и Я. О. Стенфлю за многочисленные дискуссии по проблемам магнетизма Солнца, 11-летнего цикла и переменности ОМП, С. И. Гопасюку за обсуждение асимметрии магнитного поля Солнца и рецензенту за полезные замечания. Мы признательны также Н. П. Русаку за техническое обеспечение работы магнитографа КраО и Н. Г. Сунице за помощь в обработке данных наблюдений. Работа выполнена при поддержке INTAS (грант N 2000-840).

1. Гопасюк С. И., Цап Т. Т. Особенности эволюции магнитного поля в невозмущенной атмосфере Солнца // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1974.—49.—С. 3—14.
2. Котов В. А., Демидов М. Л., Ханейчук В. И., Григорьев В. М., Цап Т. Т. 25 лет исследований магнитного поля Солнца как звезды // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1998.—94.—С. 118—122.
3. Котов В. А., Демидов М. Л., Ханейчук В. И., Цап Т. Т. О состоятельности измерений магнитного поля Солнца как звезды и годичная вариация магнитного поля // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1998.—94.—С. 110—117.
4. Котов В. А., Левецкий Л. С. К проблеме разбаланса общего магнитного поля Солнца: аномальный характер межпланетного магнитного поля в 1970—1981 гг. // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1985.—71.—С. 32—53.
5. Котов В. А., Степанян Н. Н., Щербакова З. А. Роль фонового магнитного поля и полей активных областей и пятен в общем магнитном поле Солнца // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1977.—56.—С. 75—83.
6. Котов В. А., Ханейчук В. И., Цап Т. Т. Новые измерения общего магнитного поля Солнца и его вращение // Астрон. журн.—1999.—76, № 3.—С. 218—224.
7. Криводубский В. Н. О структуре глобального магнитного поля Солнца, возбуждаемого механизмом турбулентного динамо // Астрон. журн.—2001.—78, № 9.—С. 849—858.
8. Ривин Ю. Р. Квазигодовая волна в магнитных полях Солнца, межпланетной среде и магнитосфере Земли // Геомагнетизм и аэрномия.—1997.—37, № 1.—С. 39—47.
9. Ривин Ю. Р., Обридко В. Н. Северо—южная асимметрия модуля крупномасштабного магнитного поля Солнца // Астрон. журн.—1999.—76, № 7.—С. 552—557.
10. Северный А. Б. Магнитная асимметрия и колебания общего магнитного поля Солнца // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1968.—38.—С. 3—51.
11. Ханейчук В. И. Вращение общего магнитного поля Солнца, 1968—1996 гг. // Астрон. журн.—1999.—76, № 5.—С. 385—395.
12. Ханейчук В. И. Вариации общего магнитного поля Солнца: вращение и 22-летний цикл // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2000.—96.—С. 176—187.
13. Antonucci E., Hoeksema J. T., Scherrer P. H. Rotation of the photospheric magnetic fields: a north—south asymmetry // Astrophys. J.—1990.—360, N 1.—P. 296—304.
14. Babcock H. D. The Sun's polar magnetic field // Astrophys. J.—1959.—130, N. 2.—P. 364—365.
15. Demidov M. L. Aspects of the zero level problem of solar magnetographs // Solar Phys.—1996.—164, N. 2.—P. 381—388.
16. Duvall T. L. A study of large-scale solar magnetic and velocity fields // Stanford Univ. Inst. Plasma Res. Rep.—1977.—N. 724.—P. 1—111.
17. Grigoryev V. M., Demidov M. L. Observations of the solar mean magnetic field at the Sayan observatory during 1982—1984 // Solar Phys.—1987.—114, N 1.—P. 147—163.
18. Grigoryev V. M., Demidov M. L. The solar magnetic «monopole» in activity cycles 19—21 // Solar magnetic fields and corona. — Novosibirsk: Nauka, 1989.—Vol. 1.—P. 108—114.

19. *Howard R.* Studies of solar magnetic fields. I: The average field strength // *Solar Phys.*—1974.—38, N 2.—P. 283—299.
20. *Howard R., Stenflo J. O.* On the filamentary nature of solar magnetic fields // *Solar Phys.*—1972.—22, N 2.—P. 402—417.
21. *Kotov V. A., Scherrer P. H., Howard R. F., Haneychuk V. I.* Magnetic field of the Sun as a star: the Mount Wilson Observatory catalog 1970—1982 // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1998.—116, N 1.—P. 103—117.
22. *Scargle J. D.* Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // *Astrophys. J.*—1982.—263, N 2.—P. 835—853.
23. *Scherrer P. H.* A study of the mean solar magnetic field // *Stanford Univ. Inst. Plasma Res. Rep.*—1973.—N 554.—P. 1—152.
24. *Severny A.* Is the Sun a magnetic rotator? // *Nature.*—1969.—224, N 5214.—P. 53—54.
25. *Stix M., Wiehr E.* On solar magnetic «monopole» // *Solar Phys.*—1974.—37, N 2.—P. 493—495.
26. *Wang Y.-M., Sheeley N. R.* On potential field models of the solar corona // *Astrophys. J.*—1992.—392, N 1.—P. 310—319.
27. *Wilcox J. M.* Why does the Sun sometimes look like a magnetic monopole? // *Comm. Astrophys. Space Phys.*—1972.—4, N 5.—P. 141—147.
28. *Zirin H., Wilson P. R., Li Y.* Curious magnetic changes in a quiet region // *Solar Phys.*—1998.—179, N 2.—P. 269—277.

Поступила в редакцию 22.01.02