

УДК 523.98

МЕЛКОМАСШТАБНОЕ ФОНОВОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СОЛНЦА В 23-м СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ

© 2009 г. **Б. А. Иошпа**, В. Н. Обридко*, В. Е. Чертопруд

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

Поступила в редакцию 25.08.2008 г.

По данным SOHO/MDI (архив магнитных карт с разрешением $\sim 2''$) исследовалась динамика мелкомасштабного фонового магнитного поля Солнца в 23-м солнечном цикле. Используя средние оценки $\langle B \rangle$ и $\langle B^2 \rangle$ индукции наблюдаемого магнитного поля B для различных участков поверхности Солнца и при разных уровнях B , анализировались циклические изменения и поверхностная структура фонового магнитного поля. Установлено, что на широтах ниже 30° циклические изменения $\langle B^2 \rangle$ практически подобны изменениям интегрального потока радиоизлучения $F_{10.7}$. Обнаружено значимое различие фонового магнитного поля в северном и южном полушариях Солнца, сохраняющееся в течение всего цикла. Найден эффект возрастания фонового магнитного поля к лимбу Солнца и сделано заключение о существенности трансверсальной составляющей у фонового магнитного поля. Показано, что мелкомасштабные фоновые относительно слабые магнитные поля образуют особую популяцию, которая имеет свои особые законы циклической вариации.

Ключевые слова: магнитные поля на Солнце.

SMALL-SCALE BACKGROUND MAGNETIC FIELD OF THE SUN IN SOLAR CYCLE 23, by **B. A. Ioshpa**, V. N. Obridko, and V. E. Chertoprud. Based on SOHO/MDI data (an archive of magnetic maps with a resolution of $\sim 2''$), we have investigated the dynamics of the small-scale background magnetic field of the Sun in solar cycle 23. The cyclic variations and surface structure of the background magnetic field have been analyzed using the mean values of $\langle B \rangle$ and $\langle B^2 \rangle$ of the observed field strength B for various solar surface areas and at various B levels. We have established that the cyclic variations of $\langle B^2 \rangle$ are essentially similar to those of the total radio flux $F_{10.7}$ at latitudes below 30° . A significant difference between the background magnetic fields in the northern and southern solar hemispheres persisting throughout the solar cycle has been detected. We have found the effect of a background magnetic field growth toward the solar limb and concluded that the transversal component in the background magnetic field is significant. The relatively weak small-scale background magnetic fields are shown to form a special population that has its own peculiar laws of cyclic variation.

PACS numbers : 96.60.Hv

Key words: solar magnetic fields.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Циклические вариации локальных магнитных полей пятен и факелов изучены уже довольно хорошо. Неплохо изучены также вариации энергетики глобальных и крупномасштабных магнитных полей (см., например, Макаров и др., 2001; Обридко,

Шельтинг, 2003а,б, и ссылки в них). Однако фоновое поле, которое присутствует всюду на Солнце, до сих пор анализировалось мало. Оказалось, что само фоновое поле не является однородным, а состоит из элементов, которые до сих пор не удавалось наблюдать при доступном с Земли разрешении. Существование таких элементов подозревалось давно (историю вопроса см. в Могилевский, 2001), однако только с появлением данных

* Электронный адрес: obridko@izmiran.ru

SOHO/MDI с высоким разрешением появилась возможность исследовать вариацию их энергетики на характерных временах порядка цикла. В предыдущей работе (Иошпа и др., 2007) в рамках модели фрактального броуновского процесса (описываемой показателем Херста H) были проанализированы мелкомасштабные ($\sim 10''$) стохастические свойства магнитного поля Солнца B . Установлено, что переход от фонового магнитного поля к полям активной области происходит вблизи 25–50 Гс. Получена зависимость $H(s)$ показателя Херста от амплитуды магнитного поля. Обнаружено, что показатель Херста для фонового магнитного поля значительно меньше, чем для полей активной области. В настоящей работе мы поставили задачу изучения циклической вариации мелкомасштабного магнитного поля на Солнце.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Исходными для анализа мелкомасштабного фонового магнитного поля (ФМП) Солнца служили данные SOHO/MDI (архив ежедневных магнитных карт с разрешением $\sim 2''$). Для обработки выбраны 22 месячных интервала (ноябрь 1996–2006 гг., май 1998–2007 гг. и июль 1997 г.), следующих, как правило, через полгода. Для различных участков индивидуальных карт при разных уровнях магнитного поля B (магнитное поле ограничивалось пределами, вне которых оно не учитывалось при вычислениях) находились оценки $\langle B \rangle$ и $\langle B^2 \rangle$. Затем в каждом из 22 интервалов вычислялись средние значения и стандартные отклонения этих оценок (по существу, рассматривались средние характеристики за солнечный оборот). При обработке карт применялось несколько типов окон: квадрат в центральной области диска Солнца, как в предыдущей работе (Иошпа и др., 2007), две узкие полосы, идущие вдоль видимого центрального меридиана и видимого экватора, концентрические кольца с центрами в центре солнечного диска. Использование разных окон позволяет контролировать устойчивость результатов и выявлять зависимости оценок от положения на солнечном диске.

В ряде случаев для уточнения сделанных оценок мы использовали также данные Обсерватории им. Джона Вилкокса (в дальнейшем сокращенно WSO), взятыми с сайта <http://wso.stanford.edu/synsourcel.html>.

ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

В настоящей работе мы анализируем данные магнитографа MDI. Магнитограф измеряет величину индукции магнитного поля, но в дальнейшем

для краткости мы будем говорить об измерениях магнитного поля. Прежде, чем переходить к анализу данных SOHO MDI, необходимо уточнить характеристики погрешностей этого прибора и понять насколько эти погрешности могут влиять на наши результаты. Дело в том, что наблюдения магнитографа MDI несколько раз перекалибровывались. Кроме того, минимально обнаружимая величина магнитного поля на этом магнитографе довольно высока по сравнению, например, с данными магнитографа WSO. В частности, по-видимому, именно поэтому на ежедневных магнитограммах SOHO MDI практически отсутствует различие полярностей магнитного поля на северном и южном полюсе.

Косвенная оценка погрешности B на индивидуальных магнитных картах проводилась тремя способами.

Во-первых, по наличию или отсутствию корреляции между среднемесячными оценками $\langle B^2 \rangle$, найденными при разных уровнях B . Во-вторых, по отсутствию при низких уровнях B регулярных изменений $\langle B^2 \rangle$ с широтой, долготой и расстоянием от центра солнечного диска. В-третьих, из сопоставления вариаций $\langle B^2 \rangle$ с индексами солнечной активности.

На рис. 1 показана зависимость от времени среднего квадрата индукции магнитного поля в диапазоне значений 0–25 Гс для различных широтных диапазонов. Видно, что с течением времени наблюдается вполне закономерное изменение. Приблизительно так же выглядят эволюционные кривые для диапазона 0–50 Гс.

Ситуация резко меняется, если мы ограничиваем исследования пикселями, в которых индукция поля заключена в диапазоне 0–12.5 Гс (рис. 2). Никакой закономерной вариации здесь уже не наблюдается.

Наконец, мы можем сравнить вариацию $\langle B^2 \rangle$ с индексами солнечной активности (рис. 3). Для сопоставимости все вариации представлены на рисунке в стандартизированном виде, т.е. после преобразования

$$X \rightarrow st = [X - m(X)]/s(X),$$

где $m(X)$ и $s(X)$ — среднее значение и стандартное отклонение величины X , определенные по данным исходной кривой.

Как видно из рис. 3, кривая $\langle B^2 \rangle$ для $|B| = 1–12.5$ Гс существенно отличается от остальных кривых, которые тесно связаны между собой ($r > 0.9$). Это означает, что в полосе $|B| = 1–12.5$ Гс шум сравним с сигналом, и погрешность оценок B составляет около 10 Гс (с фактором неопределенности ~ 2).

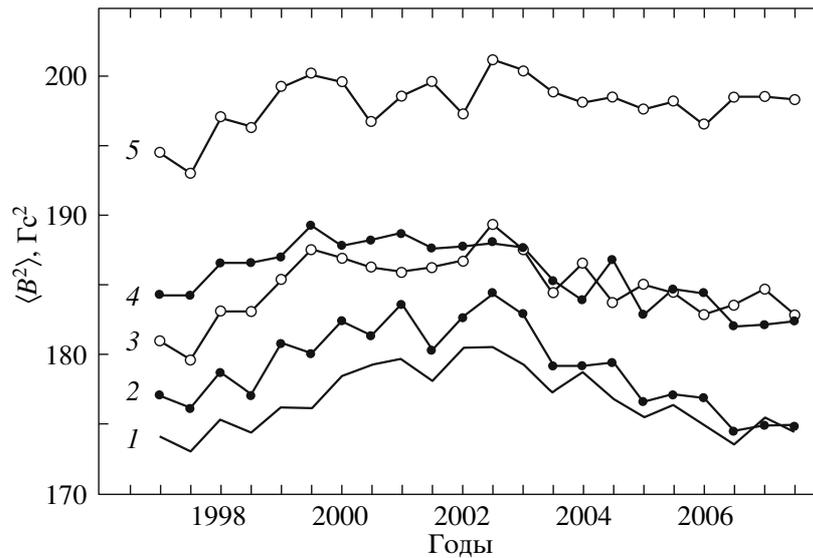


Рис. 1. Среднемесячные оценки $\langle B^2 \rangle$ в пяти диапазонах широт: $\varphi = -8^\circ - 8^\circ$ (1), $\varphi = 8^\circ - 25^\circ$ (2), $\varphi = 25^\circ - 44^\circ$ (3), $\varphi = -8^\circ - 25^\circ$ (4), $\varphi = -25^\circ - 44^\circ$ (5). Окно для вычислений — полоса шириной 0.1 диаметра диска Солнца, расположенная по ЦМ, область магнитных полей $|B| = 0 - 25$ Гс.

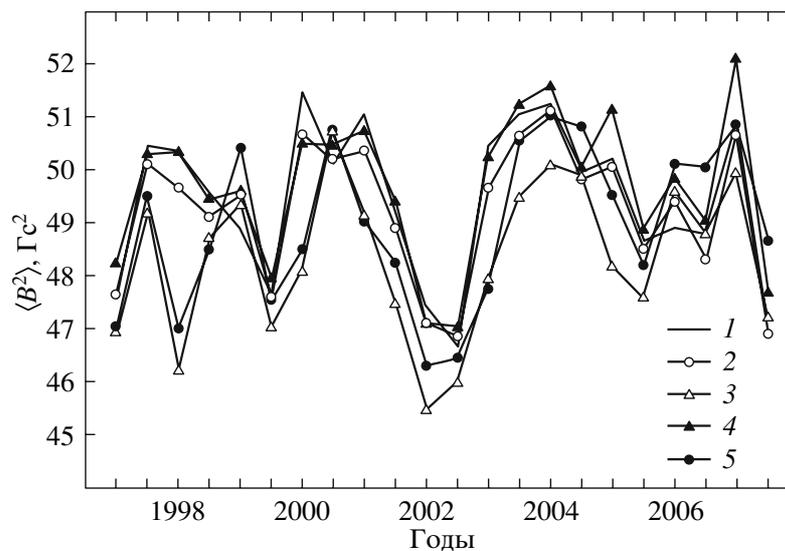


Рис. 2. Оценки $\langle B^2 \rangle$, полученные тем же способом, что и на рис. 1, но для полей с $|B| = 0 - 12.5$ Гс.

Полученная величина погрешности около 10 Гс согласуется с чуть меньшей оценкой погрешности Иошпы и др. (2007).

О точности нуля-пункта отсчета магнитного поля на карте можно судить, сравнивая среднемесячные значения $\langle B^2 \rangle_m$ и $\langle B^2 \rangle_p$ для отрицательного и положительного магнитного поля. Выяснилось, что вычисленные для 10 разных широт (от -44° до 44°) разности $[\langle B^2 \rangle_m - \langle B^2 \rangle_p]$ почти синхронно меняются во времени. Для объяснения расхождения

графиков $\langle B^2 \rangle_m$ и $\langle B^2 \rangle_p$ при $|B| < 25$ Гс достаточно колебаний нуля-пункта с амплитудой $\sim 1\%$ (т.е. ~ 0.1 Гс).

ВАРИАЦИЯ ФОНОВЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С ШИРОТОЙ И СВЯЗЬ С ИНДЕКСАМИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ВНУТРИ ЦИКЛА

Из рис. 3 видно, что наблюдается 11-летний ход $\langle B^2 \rangle$. Размах колебания можно вычислить по

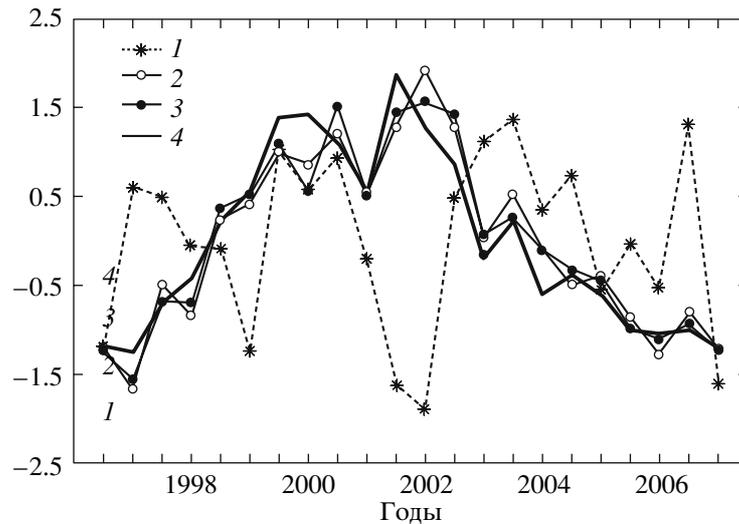


Рис. 3. Вариации $\langle B^2 \rangle$ для разных уровней магнитного поля (1–3) и индекса $F_{10.7}$ (4) в 23-м солнечном цикле. Среднемесячные величины $\langle B^2 \rangle$ вычислены для широт $\pm 25^\circ$ при разных условиях: $|B| = 1-12.5$ Гс (1), $|B| = 1-25$ Гс (2) и $|B| = 1-50$ Гс (3). Вариации стандартизированы.

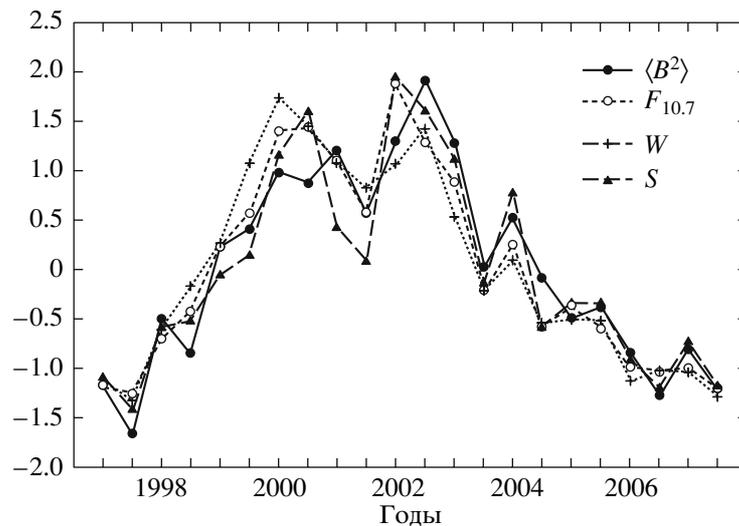


Рис. 4. Магнитное поле $\langle B^2 \rangle$ (1) и индексы солнечной активности: дециметровое радиоизлучение $F_{10.7}$ (2), числа Вольфа W (3) и площадь солнечных пятен S (4) в 23-м солнечном цикле. Величины $\langle B^2 \rangle$ вычислены для широт $\pm 25^\circ$ при условии $|B| = 1-25$ Гс. Вариации стандартизированы.

нестандартизованным данным, он составляет $A \sim 5\%$:

$$A = [x_{\max} - x_{\min}] / \langle x \rangle.$$

На рис. 4 показано сопоставление $\langle B^2 \rangle$ с разными индексами солнечной активности (числом Вольфа W , потоком на волне 10.7 см ($F_{10.7}$) и суммарной площадью солнечных пятен S) на широтах ниже 30° . Видно общее сходство, но в деталях есть различие. Как известно, 23-й цикл имел ту особенность, что в числах Вольфа первичный максимум 2000 г. был выше, чем вторичный в 2002 г.,

в индексе потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см ситуация была противоположной. Вторичный максимум $F_{10.7}$ был выше, чем первичный. Поведение $\langle B^2 \rangle$ ближе к циклической вариации $F_{10.7}$, чем к W , что отражается и в соответствующих коэффициентах корреляции, хотя в целом коэффициенты корреляции отличаются незначительно, поскольку определяются в основном общим ходом 11-летнего цикла (см. таблицу).

При переходе к значениям $|B| = 1-50$ Гс эффект сохраняется. Этот эффект можно было предвидеть заранее, поскольку излучение $F_{10.7}$ опре-

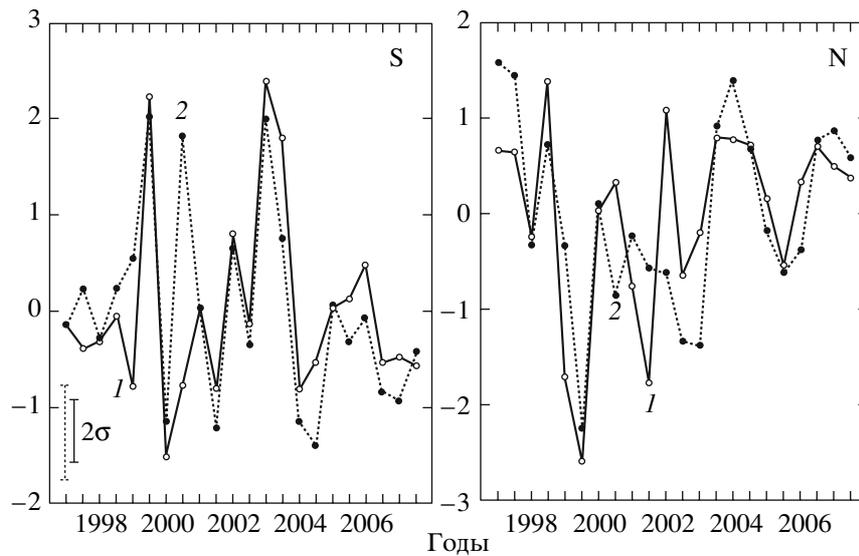


Рис. 5. Ход среднего магнитного поля $\langle B \rangle$ на широтах около 30° – 45° в южном (S) и северном (N) полушариях Солнца в 23-м солнечном цикле: 1 — по данным SOHO MDI при условии $|B| = 1$ – 500 Гс, 2 — по данным WSO при условии $|B| < 90$ мкТ. Вариации стандартизированы.

деляется флоккулами, и мы анализируем слабые крупномасштабные поля, характерные для флоккулов.

На более высоких широтах максимум $\langle B^2 \rangle$ наступает на три года раньше, чем в экваториальной зоне с широтами ниже 30° , но эффект не очень четкий.

Хорошая корреляция между $\langle B^2 \rangle$ и $F_{10.7}$ кроме всего прочего означает высокую точность оценок $\langle B^2 \rangle$.

СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ SOHO/MDI И ОБСЕРВАТОРИИ ИМ. ДЖ. ВИЛКОКСА

Анализ данных SOHO/MDI выполнен для широт менее 45° . Обнаружилось, что на широтах 34° – 44° для не слишком слабых полей ход $\langle B \rangle$ мало зависит от уровня B и не несет признака переполусовки. Для проверки этого результата было выполнено сравнение хода $\langle B \rangle$ с ходом среднего поля, определенного по картам WSO (рис. 5). Оказалось, что для широт ниже 45° они похожи, хотя,

естественно, отличаются по амплитуде, которая по данным SOHO в несколько раз выше, чем по данным WSO.

Это показывает, что фоновые поля в среднем сохраняют один и тот же знак в течение всего цикла активности, определяемого локальными полями. Переход к законам полярности глобального магнитного поля начинается на широтах выше 45° . Для подтверждения этого были вычислены средние значения B для широт выше 45° по данным WSO. Видно, что здесь переполусовка наблюдается вблизи 2000 г., т.е. в соответствии с законами полярности глобального поля (см. рис. 6).

При этом следует заметить, что вплоть до широты 45° переполусовка не заметна. Впервые переполусовку удается наблюдать только на более высоких широтах. Заметим, что граница 45° проявляется во многих исследованиях и, возможно, отражает обнаруженную гелиосейсмологическими методами специфическую зону, где скорость вращения Солнца в конвективной зоне перестает зависеть от глубины (Косовичев и др., 1998).

При $|B| = 1$ – 25 Гс (рис. 1) заметен и значим широтный ход магнитного поля (возрастание $\langle B^2 \rangle$ с увеличением широты) и имеется асимметрия полушарий в распределении $\langle B^2 \rangle$ (эффекты $\sim 10\%$). Эта асимметрия повторяется при других уровнях магнитного поля (не превышающих 100 Гс) и в эффекте роста магнитного поля к лимбу. Можно было бы предположить, что этот эффект связан с более высокими значениями числа и суммарной площади солнечных пятен в южном полушарии, однако для W и S этот эффект появляется только

Коэффициенты корреляции R между $\langle B^2 \rangle$ и $F_{10.7}$, W , S

Параметр	$F_{10.7}$	W	S	$\langle B^2 \rangle, \text{Гс}^2$
$ B = 1$ – 25 Гс	$R = 0.94$	$R = 0.92$	$R = 0.94$	180
$ B = 1$ – 50 Гс	$R = 0.94$	$R = 0.90$	$R = 0.91$	444
$ B = 1$ – 100 Гс	$R = 0.95$	$R = 0.89$	$R = 0.92$	686

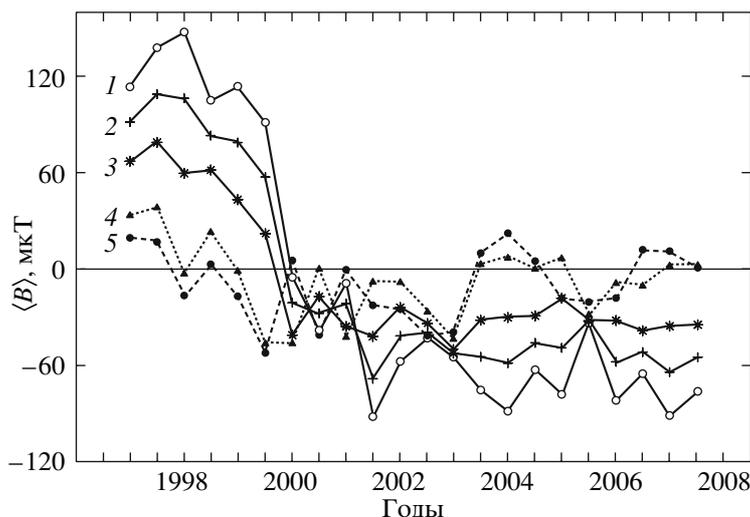


Рис. 6. Ход среднего магнитного поля в 23-м солнечном цикле на различных широтах северного полушария по картам WSO: 1 — $\varphi = 75^\circ$, 2 — $\varphi = 64^\circ$, 3 — $\varphi = 56^\circ$, 4 — $\varphi = 44^\circ$, 5 — $\varphi = 34^\circ$.

на фазе спада 23-го цикла после 2000 г., тогда как в слабых полях на низких широтах он виден в течение всего 23-го цикла. Асимметрия B устойчиво держится весь цикл и по годам, и по месяцам, и даже по дням. Асимметрия S неустойчива, в отдельные годы меняет знак. На высоких широтах эффект асимметрии нам не удалось проверить по данным MDI, но по данным WSO этот эффект отсутствует. Отсутствует он также и при анализе более сильных полей до 500 Гс как по данным MDI, так и по данным WSO.

Нами была более подробно изучена связь между $\langle B^2 \rangle$ и индексами солнечной активности: $F_{10.7}$, W и S . При этом были использованы следующие диапазоны вычисления $\langle B^2 \rangle$: $|B| = 1-25$ Гс, $|B| = 1-50$ Гс; $|B| = 1-100$ Гс. По широтам были избраны следующие диапазоны: а — $\varphi = -25^\circ + 25^\circ$, с — $\varphi = -25^\circ - 0^\circ$, п — $\varphi = 0^\circ + 25^\circ$. Поля сопоставлялись с площадями пятен в северном (S_n), южном (S_s) и обоих (S_a) полушариях. Проведены сопоставления со среднемесячными и сглаженными с окном в 1 год среднемесячными значениями (y). Не приводя ниже довольно громоздкой таблицы корреляций в 39 строк и 13 столбцов, изложим основные выводы.

1. В трех диапазонах индукции магнитных полей $|B| = 1-25$ Гс; $|B| = 1-50$ Гс; $|B| = 1-100$ Гс характер связей между вариациями $\langle B^2 \rangle$ и индексами солнечной активности $F_{10.7}$, W и S практически одинаков.

2. Месячные (без годового усреднения) индексы активности $F_{10.7}$, W и S_a хорошо коррелируют с магнитным индексом $\langle B^2 \rangle$, полученным для $\varphi = \pm 25^\circ$ ($r = 0.89-0.95$). Наибольшая связь $\langle B^2 \rangle$ с $F_{10.7}$, наименьшая — с W .

3. При переходе к среднегодовым оценкам индексов $F_{10.7y}$, W_y и S_{ay} связь $\langle B^2 \rangle$ с $F_{10.7}$ слегка ослабевает, а связь с S усиливается.

4. В южном полушарии связь $\langle B^2 \rangle$ с $F_{10.7}$ или W существенно ниже, чем в северном полушарии (асимметрия север-юг).

5. Индексы $\langle B^2 \rangle$ и S , относящиеся к одному и тому же полушарию, связаны несколько сильнее ($r \approx 0.92$), чем индексы $\langle B^2 \rangle$ и S , относящиеся к разным полушариям ($r \approx 0.84$).

6. Связь $\langle B^2 \rangle$ в разных полушариях ($r \approx 0.83$) выше, чем связь S_s и S_n ($r \approx 0.65$).

Эти результаты показывают, что мелкомасштабные фоновые магнитные поля, несмотря на высокую корреляцию с локальными полями (т.е. с числом и площадью солнечных пятен), не связаны с ними непосредственно, поскольку их асимметрия обнаруживает и качественно и количественно другую циклическую вариацию (отсутствие смены знака вблизи максимума цикла в 2000 г.). В то же время они не связаны непосредственно и с глобальными полями высоких широт, поскольку те меняют знак вблизи 2000 г. (переполусовка), чего не наблюдается в фоновых магнитных полях (ФМП).

Таким образом, по-видимому мелкомасштабные фоновые относительно слабые магнитные поля образуют особую популяцию, которая имеет свои особые законы циклической вариации.

О ТРАНСВЕРСАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ФМП

Кроме широтных изменений ФМП обнаружился рост $\langle B^2 \rangle$ по экватору при удалении от ЦМ.

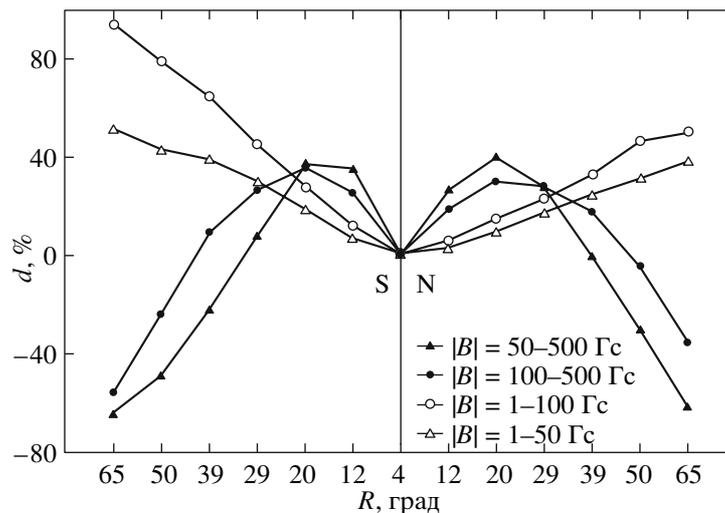


Рис. 7. Эффект центр–лиimbus для сильных и слабых магнитных полей в южном (S) и северном (N) полушариях Солнца. Представлена зависимость индекса $d(R) = \langle B^2(R) \rangle / \langle B^2(R_0) \rangle$ от расстояния до центра солнечного диска R для $|B| = 50\text{--}500$ Гс (1), $|B| = 100\text{--}500$ Гс (2), $|B| = 1\text{--}100$ Гс (3) и $|B| = 1\text{--}50$ Гс (4). Окна для вычислений $\langle B^2(R) \rangle$ – концентрические полукольца (отдельно в южном и северном полушариях) с центрами в центре солнечного диска, R – расстояние в градусах от центра до середины полукольца, $R_0 = 4^\circ$. Оценки $\langle B^2(R) \rangle$ получены отдельно для каждого месяца, а затем усреднены.

Напомним, что магнитограф измеряет продольную (т.е. направленную вдоль луча зрения) компоненту магнитного поля. Соотношение между продольной и трансверсальной (т.е. поперечной по отношению к углу зрения) компонентой можно уточнить, используя эффект проекции из анализа вариации центр–край. Это побудило провести расчет зависимости $\langle B^2 \rangle$ от расстояния до центра солнечного диска, рассматривая отдельно северное и южное полушария. Для ФМП эффект возрастания $\langle B^2 \rangle$ к солнечному лимбу подтвердился в любом из 22 рассмотренных месячных интервалов времени (см. раздел “Обработка данных”). В южном полушарии нарастание $\langle B^2 \rangle$ к лимбу происходит более круто, чем в северном полушарии. Как абсолютное, так и относительное нарастание $\langle B^2 \rangle$ различаются при разных уровнях поля, и нет причин отнести эффект к погрешностям или селекции наблюдений. Скорее всего, эффект возрастания $\langle B^2 \rangle$ к солнечному лимбу свидетельствует о преобладании горизонтальной составляющей у ФМП. При переходе к более сильным магнитным полям наблюдается уменьшение $\langle B^2 \rangle$ в направлении к солнечному лимбу, т.е. существенна вертикальная составляющая магнитного поля.

Этот результат иллюстрируется на рис. 7. Видно нарастание средних значений фонового поля к лимбу и северо–южная асимметрия. В более сильных полях видно падение сигнала к лимбу и отсутствие северо–южной асимметрии. Отметим также уменьшение величины сигнал вблизи центра лимба,

связанное, по-видимому, с известной приэкваториальной зоной избегания для солнечных пятен.

Свальгард и др. (1978), анализируя наблюдения в WSO, показали, что зависимость сигнала от положения точки наблюдения на диске такова, как если бы магнитное поле на большом протяжении было чисто вертикальным. Позднее Стенфло и Фогель (1986) показали, что концепция килогауссовых трубок в соединении с повышенной плазменностью этих трубок также должна приводить к усилению вертикальной составляющей магнитного поля в фотосфере. В конце 1990-х годов с появлением многочисленных высококачественных данных и, особенно, фотографий на спутниках после сопоставления их с расчетами появились соображения, что расчеты по модели потенциального продольного поля с поверхностью источника на высоте $2.5R_0$ дают недостаточно хорошее совпадение со спутниковыми данными, особенно в межпланетном пространстве. Были рассчитаны новые модели с небольшими модернизациями начальных условий. В модели, наиболее часто используемой для аналогичных расчетов (Ванг, Шили, 1992, 2000), магнитное поле на фотосфере в соответствии с результатами Свальгарда и др. (1978) считается вертикальным, высота поверхности источника соответствует $3.25R_0$.

С другой стороны, в последние годы, особенно с увеличением разрешения магнитографов, появились указания, что мелкомасштабное поле является скорее горизонтальным. Некоторые указания

на это появились уже в первых измерениях с помощью вектор-магнитографов (Иошпа, Обридо, 1963). Оказалось, что наблюдаемое поле вблизи активных центров сильно перепутано и в основном является поперечным. По образному выражению одного из авторов этих работ, это напоминало “вывал леса” в тайге. Последнее время проблему трансверсального направления магнитного поля в слабовозмущенной области связывают с проблемой скрытого (“hidden”) магнитного потока (Трухильо-Буено и др., 2006). Дело в том, что такое поле очень трудно измерить. Чувствительность земановских вектор-магнитографов по поперечному полю слишком мала (не более 50–100 Гс). Более того, запутанность структуры поперечного поля при низком разрешении еще более снижает сигнал. С другой стороны эффект Ханле плохо работает в относительно плотной фотосфере. Только с запуском спутника Хиноде появились первые прямые подтверждения существования сильных поперечных полей в невозмущенной и слабовозмущенной фотосфере (Лайтс и др., 2008).

В работе Харви и др. (2007) по данным наблюдений на SOLIS и GONG было также обнаружено слабое поле с индукцией порядка 1–2 Гс, которое усиливается почти в два раза к лимбу. Авторы этой работы также интерпретировали этот эффект как следствие преимущественной горизонтальности полей в спокойной области на Солнце. Отмечается также быстрое изменение этих полей на характерных временах порядка десятков минут.

Недавно появились работы Ишикава и др. (2008), Шюслера и Фоглера (2008), в которых анализируются данные Hinode и показано, что в наблюдениях фоновых полей значительную роль играют мелкомасштабные трансверсальные магнитные поля. В целом их результаты согласуются с нашими результатами. Правда, они указывают несколько большее значение напряженности. Однако их исследования относятся к более тонкой структуре магнитного поля, чем та, которая доступна наблюдениям MDI. Характерные структурные размеры в модели Шюслера и Фоглера (2008) составляют 0.1–0.5 Мм, а линейный размер пикселя MDI — 1.4 Мм. Максимальная площадь мелкомасштабных элементов горизонтальных полей у Ишикава и др. (2008) не превышает 1/3 площади пикселя MDI (в среднем она на порядок меньше площади пикселя). И все же данные этих работ полезны для понимания результатов, полученных при обработке наблюдений MDI. Найденный эффект возрастания ФМП к лимбу Солнца и заключение о существенности горизонтальной составляющей у ФМП становятся естественными после обращения к более тонкой структуре магнитного поля. Возникает также вопрос, отражается ли наличие

мелкомасштабных элементов горизонтальных полей в факельных площадках на оценках MDI. При удалении от центра Солнца на 30° транзитное горизонтальное магнитное поле с индукцией 600 Гс преобразуется и сглаживается в пикселе MDI до уровня $B < 50\text{--}100$ Гс. Таким образом, условие $|B| < 100$ Гс, используемое при выделении ФМП, существенно не ослабляет вклад транзитного поля в показания MDI. Если принять $B = 50$ Гс и скважность элементов горизонтального магнитного поля 10%, как у Ишикава и др. (2008), то можно получить наблюдаемое возрастание ФМП на $\approx 40\%$ при удалении от центра Солнца вдоль экватора на 30°.

Таким образом, наши результаты указывают на то, что, на самом деле, в области сильных полей больших пространственных масштабов вертикальная компонента преобладает. В более слабых фоновых полях преобладает горизонтальная компонента. При этом относительный вклад этих двух систем меняется с широтой.

Следует отметить, что транзитное горизонтальное магнитное поле — лишь один из возможных источников трансверсальной составляющей ФМП. Наблюдения Ишикава и др. (2008) не исключают наличия более регулярного и более слабого горизонтального магнитного поля (на порядок меньше транзитного), которое могло бы определять при наблюдениях трансверсальную составляющую ФМП. Параметры транзитного горизонтального магнитного поля лишь предварительны. Не ясна их зависимость от гелиошироты, а также их роль в асимметрии полушарий.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 07-02-00333 и 07-02-00246). Авторы признательны коллективу сотрудников SOHO/MDI и WSO за предоставленные данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ванг, Шили (Y.M. Wang and N.R. Sheeley), *Astrophys. J.* **392**, 310 (1992).
2. Ванг, Шили (Y.M. Wang and N.R. Sheeley), *Geophys. Res. Lett.* **27**, 505 (2000).
3. Иошпа Б.А., Обридо В.Н., *Астрон. журн.* **40**, 1013 (1963).
4. Иошпа Б.А., Обридо В.Н., Чертопруд В.Е., *Письма в Астрон. журн.* **33**, 941 (2007).
5. Ишикава и др. (R. Ishikawa, S. Tsuneta, K. Ichimoto, et al.), *Astron. Astrophys.* **481**, L25 (2008).
6. Косовичев и др. (A.G. Kosovichev, J. Schou, P.H. Scherrer, et al.), *Proc. of the 181st Symp. of the Intern. Astron. Union* (held in Nice, France, September 30–October 3, Ed. Janine Provost, Francois-Xavier Schmider, 1996, Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1998), p. 203.

7. Лайтс и др. (B.W. Lites, M. Kubo, H. Socas-Navarro, et al.), *Astrophys. J.* **672**, p. 1237 (2008).
8. Макаров и др. (V.I. Makarov, A.G. Tlatov, D.K. Callebaut, et al.), *Solar Phys.* **198**, 409 (2001).
9. Могилевский Э.И., *Фракталы на Солнце* (М.: Физматлит, 2001).
10. Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д., *Астрон. журн.* **80**, 364 (2003а).
11. Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д., *Астрон. журн.* **80**, 1034 (2003б).
12. Сваальгард и др. (L. Svalgaard, T.L. Duvall Jr., and P.M. Scherrer), *Solar Phys.* **58**, 225 (1978).
13. Стенфло, Фогель (J.O. Stenflo and M. Vogel), *Nature* **319**, 285 (1986).
14. Трухильо-Буено и др. (J. Trujillo-Bueno, A. Asensio Ramos, and N. Shchukina), *ASP Conf. Ser.* **358** (Ed. R. Casini, B.W. Lites, 2006), p. 269.
15. Харви и др. (J.W. Harvey, D. Branstorn, C.J. Henney, et al.), *Astrophys. J.* **659**, L177 (2007).
16. Шюсслер, Фоглер (M. Schüssler and A. Vögler), *Astron. Astrophys.* **481**, L5 (2008).

Сдано в набор 30.01.2009 г.	Подписано к печати 16.04.2009 г.	Формат бумаги 60 × 88 ¹ / ₈
Цифровая печать	Усл. печ. л. 10.0	Уч.-изд. л. 10.0
	Усл. кр.-отт. 1.2 тыс.	Бум. л. 5.0
	Тираж 118 экз.	Зак. 316

Учредители: Российская академия наук, Институт космических исследований РАН

Издатель: Академиздатцентр "Наука", 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90
 Оригинал-макет подготовлен МАИК "Наука/Интерпериодика"
 Отпечатано в ППП "Типография "Наука", 121099 Москва, Шубинский пер., 6