

Я.И. Зельк, Н.Н. Степанян, О.А. Андреева

Корреляционные и спектральные методы оценивания широтного дрейфа солнечных магнитных полей

Рассмотрены стационарные задачи оценивания в различных диапазонах напряженности магнитных полей на Солнце: широтного дрейфа потока магнитных полей, а также определения дифференциального вращения этого потока и широтного дрейфа его отдельных составляющих.

The estimation stationary problems in various ranges of magnetic field strength on the Sun are considered: the estimation of latitudinal drift of a magnetic field flux and the determination of a differential rotation of a magnetic field flux and a latitudinal drift of its separate components.

Розглянуто стаціонарні задачі оцінювання у різних діапазонах напруженості магнітних полів на Сонці: широтного дрейфу потоку магнітних полів, а також диференціального обертання цього та широтного дрейфу його окремих складових.

Введение. При исследованиях магнитных полей на Солнце по наземным наблюдениям измеряют продольное магнитное поле, т.е. нормальную составляющую напряженности магнитного поля. В каждой точке поверхности Солнца в некоторой текущей реализации поля наблюдается либо поле «+» (N) – северной, либо «-» (S) – южной полярности. Поле «+» (N) северной полярности направлено от Солнца, а поле «-» (S) южной полярности – к Солнцу. Разбаланс полей в каждой точке поверхности Солнца может быть вычислен как векторная сумма напряженностей полей N - и S -полярностей. Изучение разбаланса «+» и «-» полей на Солнце актуально, так как именно поток разбаланса магнитных полей N - и S -полярности от Солнца в значительной степени определяет состояние межпланетного магнитного поля и влияет на солнечно-земные связи.

Дифференциальный характер вращения потока магнитных полей проявляется в исключительных зависимостях периодов (скоростей) вращения от широты, не укладывающихся в традиционные механистические представления о твердотельном вращении (на экваторе вращение быстрее, чем на высоких широтах).

Оцениванию стационарного дифференциального вращения магнитных полей на Солнце с применением методов спектрального анализа посвящена работа [1]. Применение методов

спектрального анализа к оцениванию дифференциального вращения структурных образований, наблюдаемых в атмосфере Солнца, и выбор наиболее подходящего метода с точки зрения реалистичных оценок спектральной плотности мощности (PSD) в условиях решаемых задач рассмотрены авторами в [2].

Цель статьи – оценивание широтного дрейфа потока дисбаланса магнитных полей в целом и определение дифференциального вращения и широтного дрейфа составляющих потока дисбаланса, обладающих определенными значимыми периодами вращения, а также сравнение этих двух типов дрейфа.

Материал наблюдений и построение временных рядов данных

Исходные данные задач оценивания – показатели синоптических карт напряженности продольного вектора магнитного поля Солнца на 26-летнем интервале наблюдений с 1 января 1977 г. до 30 сентября 2003 г., полученные в Национальной Обсерватории Китт Пик (США) и предоставленные авторам. На основе анализа синоптических карт выделены пять характерных диапазонов магнитных полей и в каждом диапазоне из 28-ми 5° -х широтных зон в интервале широт $[-70^\circ; 70^\circ]$ построены с шагом дискретизации по времени $\Delta t = 0,0757$ земных суток (1° по долготе Солнца) временные ряды (длиной 128520 отсчетов каждый) значений потока дисбаланса магнитных полей, равного разности потоков «+» (N) (от Солнца) и «-» (S) (к Солнцу) полярности в каждом отсчете.

Ключевые слова: анализ временных рядов, данные наблюдений, стационарный случайный процесс, корреляция, спектральный анализ, магнитное поле, Солнце.

Для любого из выделенных семи интервалов напряженности в диапазоне $[0; 1500]$ Гс в каждом из 28-ми рядов всякий член ряда представляет собой поток дисбаланса магнитных полей напряженностью Hk на центральном меридиане Солнца от элементарной площадки в широтной зоне φ_n шириной 1° долготы и высотой 5° широты в момент времени tl ($l = \overline{1, 128520}$):

$$(|N| - |S|)(Hk, \varphi_n, tl), \quad (1)$$

где $(|N| - |S|)$ – разность абсолютных величин потоков магнитных полей «+» (N) и «-» (S) полярности. Шаг дискретизации по времени составляет $\Delta t = 0,0757$ суток (1° по гелиоцентрической долготы).

На рис. 1 отображены пять таких рядов на одном графике для потока дисбаланса магнитных полей в интервале напряженностей $[0; 5]$ Гс для пяти 5° -х широтных зон из интервала широт $[5^\circ; 25^\circ]$ северной полушферы Солнца.

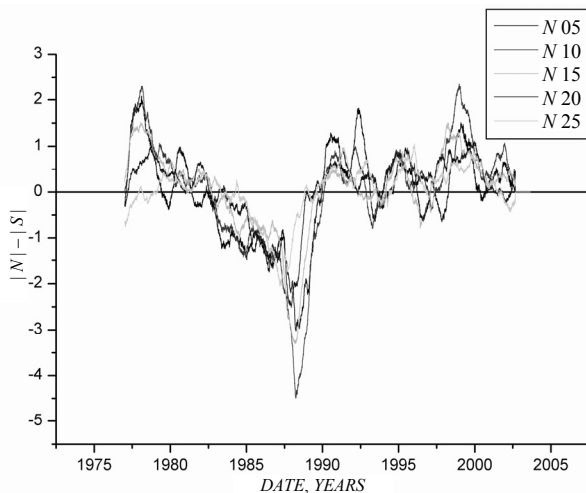


Рис. 1

При оценивании широтного дрейфа потока дисбаланса магнитных полей в целом и отдельных составляющих потока дисбаланса, обладающих определенными значимыми периодами вращения на 26-летнем интервале наблюдений, используется математическая модель представления дисбаланса в каждой широтной зоне как стационарного случайного процесса [3]. В рамках этой модели решаются стационарные задачи определения дрейфа потока

дисбаланса в целом и его составляющих, вращающихся со значимыми периодами, как преобладающих тенденций (дрейф и вращение) на продолжительном интервале наблюдений.

Широтный дрейф потока дисбаланса магнитных полей в целом

При оценивании широтного дрейфа потока дисбаланса использовался метод определения временного запаздывания потока дисбаланса в целом как цуга волн в широтной зоне с широтой $|n - 1|$ относительно потока дисбаланса в соседней зоне с большей широтой $|n|$, основанный на определении задержки $\tau = lag$ кросс-корреляционной функции $R_{n, n-1}(\phi)$, соответствующей абсолютному максимуму этой функции [3]:

$$lag = \arg \left\{ \max_{\phi} R_{n, n-1}(\phi) \right\}.$$

Широты зон $|n - 1|$ и $|n|$ специально взяты по модулю, чтобы как в южной, так и в северной полушферах Солнца зона $|n|$ соответствовала более высокой соседней широте, чем зона $|n - 1|$.

При $lag > 0$ имеем опережение потока дисбаланса в целом как цуга волн, представленного соответствующим рядом, в зоне $|n - 1|$ по сравнению с потоком дисбаланса в широтной зоне $|n|$ (с учетом взятых значений $n - 1$ и n по модулю). Следовательно, в каждой полушфере Солнца при $lag > 0$ имеет место дрейф потока дисбаланса в целом от низких широт к высоким (к полюсам), а при $lag < 0$ – от высоких широт к низким (к экватору).

Величина lag на практике определялась в градусной мере Lag в единицах $0,1^\circ$, означавшей, на сколько десятых долей градуса опережает (отстает) поток дисбаланса магнитных полей в широтной зоне $|n - 1|$ поток дисбаланса в зоне $|n|$. Поскольку интервал времени между соседними отсчетами в каждом временном ряду составляет $\Delta t = 0,0757$ суток, что соответствует 1° по долготы, то временной сдвиг τ в сутках кросс-корреляционной функции $R_{n, n-1}(\phi)$, соответствующий найденному ее абсолютному

максимуму, будет выражаться через найденную величину Lag в единицах $0,1^\circ$ следующим образом:

$$\tau = 0,1 * \Delta t * Lag = 0,00757 * Lag \text{ (суток)}.$$

Результаты оценивания величин Lag в единицах $0,1^\circ$ для диапазона напряженности магнитного поля $[0; 20]$ Гс отображены на рис. 2.

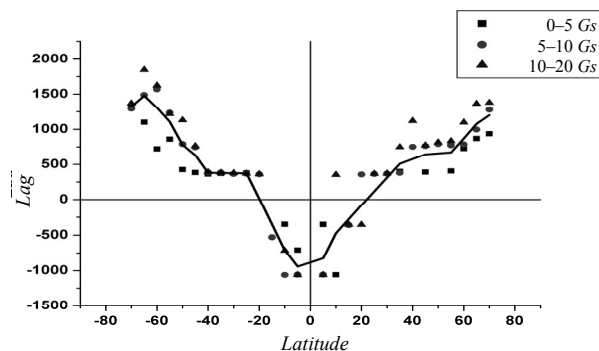


Рис. 2

Учитывая расстояния между средними линиями 5° -х широтных зон, можно определить скорости широтного дрейфа потока дисбаланса полей разной напряженности, широтные зависимости которых для диапазона напряженности магнитного поля $[0; 20]$ Гс отображены на рис. 3.

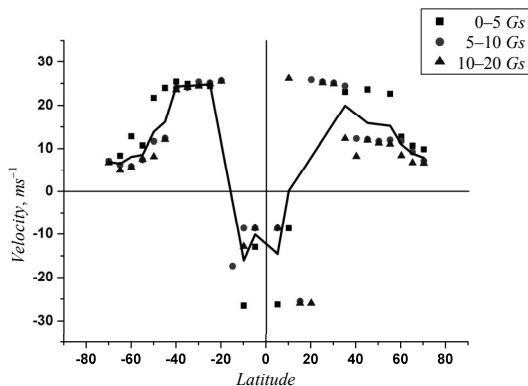


Рис. 3

Анализ полученных зависимостей временного сдвига кросскорреляционной функции и скоростей широтного дрейфа потока дисбаланса магнитных полей в диапазоне напряженностей $[0; 700]$ Гс от широты приводит к следующим выводам.

- Для полей с напряженностью $[0; 200]$ Гс картина изменения скорости широтного дрейфа

потока дисбаланса магнитных полей качественно похожа для всех диапазонов напряженности, входящих в этот интервал. От широт $\pm(15^\circ - 20^\circ)$ имеет место дрейф потока дисбаланса в каждой полусфере Солнца в области высоких и низких широт. С удалением от этого интервала широт скорость дрейфа уменьшается до $5-10$ м/с на широтах $\pm 60^\circ$ и на экваторе.

- Для полей $[200; 700]$ Гс – картина существенно другая. Так как на всех широтах $Lag < 0$ и скорость широтного дрейфа отрицательна, то наблюдается лишь движение от высоких широт к низким. Наибольшие скорости отмечаются на широтах $\pm(15^\circ - 20^\circ)$ и $\pm(40^\circ - 45^\circ)$.

- Для полей всех значений напряженности существует заметная разница в скоростях смещений по широте потока дисбаланса между северным и южным полушарием Солнца.

Широтный дрейф составляющих потока дисбаланса, обладающих определенными значимыми периодами вращения

При решении задачи определения широтного дрейфа с использованием *Welch method* [4] оцениваются спектральная плотность мощности $G_n(P)$ в каждой широтной зоне $|n|$ и взаимная спектральная плотность (CPSD) $G_{n, n-1}(P)$ (P – период вращения) процессов в соседних широтных зонах $|n|$ и $|n-1|$. По значимым пикам $G_n(P)$ определяются значимые периоды вращения P_{peak} , а по $G_{n, n-1}(P_{peak})$ вычисляется фазовый угол CPSD $\varphi_{n, n-1}(P_{peak})$. По $\varphi_{n, n-1}(P_{peak})$ определяется временной сдвиг $\Phi_{n, n-1}(P_{peak})$ для гармонических составляющих потока дисбаланса, вращающихся со значимым периодом P_{peak} . По известному расстоянию вдоль меридиана между средними линиями соседних широтных зон и оцененному временному сдвигу $\Phi_{n, n-1}(P_{peak})$ определяется скорость широтного дрейфа этих составляющих к экватору или к полюсу.

Кстати, в одной и той же широтной зоне могут существовать от одного до четырех разных периодов вращения, соответствующих своим значимым пикам PSD (PSD – спектральная

плотность мощности). Эти разные периоды вращения, присутствующие в некоторой текущей зоне, распространяются на разные по ширине интервалы соседних широтных зон каждый. Примеры зависимости спектральных плотностей мощности от периода в интервале периодов [20; 35] суток для временных рядов дисбаланса магнитных полей напряженностью [10; 20] Гс в интервале широтных зон [5°; 35°] северной полушферы Солнца приведен на рис. 4.

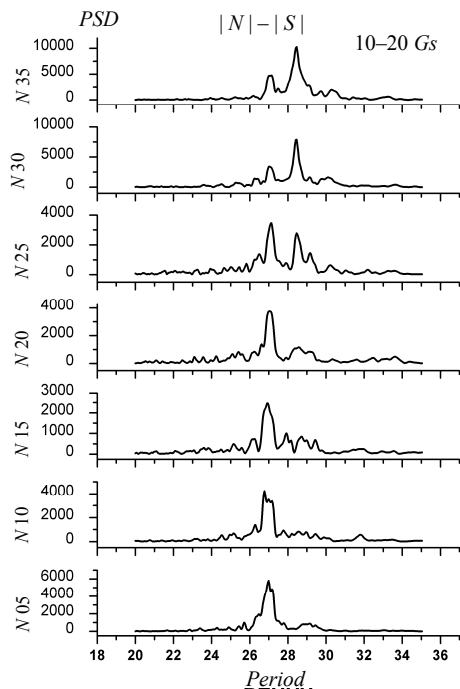


Рис. 4

Приведенные в таблице значения установленных периодов соответствуют значимым пикам,

Т а б л и ц а

Длина периода, сутки	Интервалы напряженности магнитного поля, Gs				
	0-5	5-10	10-20	20-50	50-200
26,912		-25 ÷ -5	-15 ÷ +15	-20 ÷ +35	
27,717	-45 ÷ -15	-35 ÷ -15	-25 ÷ -15		
28,092	-65 ÷ -25	-65 ÷ -20	-65 ÷ -20	-40 ÷ -20	-30 ÷ -20
28,414	5 ÷ 50	20 ÷ 50	25 ÷ 40		
29,512		60 ÷ 70	-65 ÷ -40, 65 ÷ 70		60 ÷ 70
30,323	45 ÷ 70	45 ÷ 70	45 ÷ 70	-65 ÷ -45 40 ÷ 65	
30,603	55 ÷ 70	60 ÷ 70			
31,376	-65 ÷ -50	-65 ÷ -45			

встречающимся, как минимум, в трех соседних широтных зонах и в двух интервалах напряженности. Указаны интервалы широт, в которых они встречаются в спектрах, построенных для пяти интервалов напряженности.

Фазовый угол $i_{n,n-1}(P)$ взаимной спектральной плотности $G_{n,n-1}(P)$ при каждом значении периода P определяется следующим образом:

$$i_{n,n-1}(P) = \operatorname{arctg} \frac{-\operatorname{Im}\{G_{n,n-1}(P)\}}{\operatorname{Re}\{G_{n,n-1}(P)\}} \text{ (рад.)} = \\ = \operatorname{arctg} \frac{-\operatorname{Im}\{G_{n,n-1}(P)\}}{\operatorname{Re}\{G_{n,n-1}(P)\}} * \frac{180}{\rho} \text{ (град.)}. \quad (2)$$

Положительный фазовый угол $i_{n,n-1}(P) > 0$ в широтной зоне n показывает, на сколько градусов по долготе гармоническая составляющая с периодом P процесса вращения потока дисбаланса полей в широтной зоне $(n-1)$ отстает от гармонической составляющей с периодом P в зоне n . При $i_{n,n-1}(P) < 0$ имеет место соответствующее опережение гармонической составляющей с периодом P .

С фазовым углом, вычисляемым согласно (2), однозначно связан временной сдвиг $\phi_{n,n-1}(P)$ при соответствующем периоде вращения P , определяющийся следующим образом [3]:

$$\phi_{n,n-1}(P) = i_{n,n-1}(P)_{\text{рад.}} \times P / (2\pi) \text{ (сутки)}. \quad (3)$$

После определения согласно (3) временного сдвига $\phi_{n,n-1}(P)$ для любого значения значимого периода вращения можно оценить скорость широтного дрейфа гармонической составляющей с периодом P процесса вращения потока дисбаланса магнитных полей:

$$V_{n,n-1}(P) = \frac{d_{n,n-1}}{\tau_{n,n-1}(P) \text{ сутки}} \frac{M}{86400 \text{ сек}} = \frac{d_{n,n-1}}{\tau_{n,n-1}(P) * 86400} \frac{M}{\text{сек}},$$

где $d_{n,n-1} = \frac{2\pi R_{Sun} * 5}{360} = \frac{2\pi 696000000}{360} * 5 \text{ м}$ – расстояние по меридиану между средними линиями соседних 5° широтных зон (м), а R_{Sun} – радиус Солнца.

Знак скорости широтного дрейфа $V_{n-1}(P)$ совпадает со знаком временного сдвига $\Phi_{n-1}(P)$ и, соответственно, фазового угла $\varphi_{n-1}(P)$.

На рис. 5 и 6 представлены широтные зависимости фазового угла и скорости широтного дрейфа составляющих потока магнитных полей, вращающихся с периодами в небольшом интервале 27–28 суток для пяти диапазонов напряженности магнитного поля.

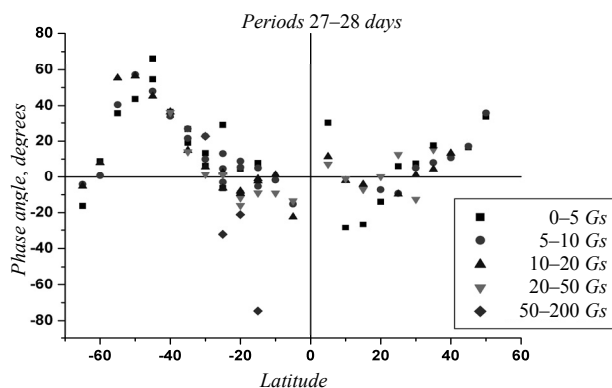


Рис. 5

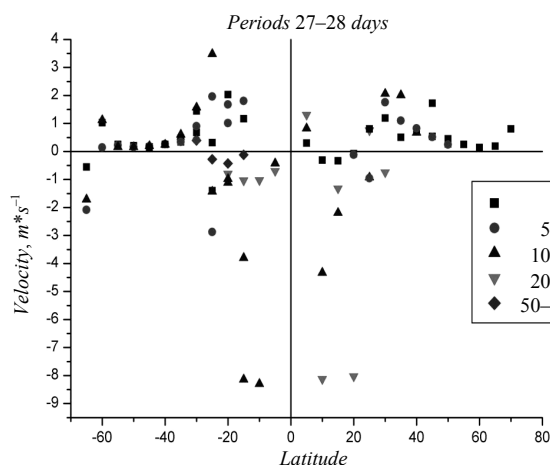


Рис. 6

На рис. 7 отображены полученные зависимости значимых периодов вращения гармонических составляющих потока дисбаланса от широты их всплытия на поверхность Солнца для пяти диапазонов напряженности магнитного поля.

Широта всплытия на поверхность Солнца – это самая нижняя широта (по модулю) в южной и северной полусфере, на которой возникает

вращение структур потока дисбаланса с некоторым значимым периодом и выше которой при вращении структуры дрейфуют по широте к полюсам, а ниже – к экватору.

Из графиков, отображенных на рис. 7, видно, что, за исключением диапазона напряженности магнитного поля [50; 200] Гс, во всех других диапазонах напряженности вращение с большим значением периода из интервала [20; 35] суток возникает на более высоких широтах всплытия.

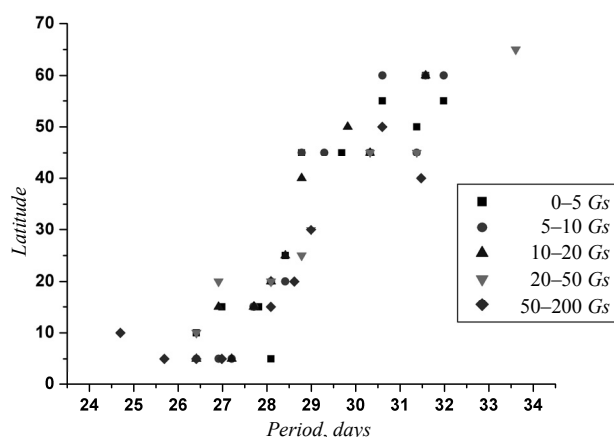


Рис. 7

Закключение. Для оценивания стационарного дифференциального вращения и широтного дрейфа магнитных полей на Солнце были эффективно применены корреляционные и спектральные модели стационарных случайных процессов, характеризующих вращение полей в выделенных широтных зонах Солнца.

При оценивании широтного дрейфа составляющих потока дисбаланса, обладающих значимыми периодами вращения при напряженностях магнитного поля [0; 200] Гс, принято предположение об одновременном и достаточно длительном существовании в одних и тех же и в разных широтных интервалах структур потока дисбаланса с разными периодами вращения.

В рамках этого предположения сравнение оценок сдвигов взаимных корреляционных функций с фазовыми углами взаимной спектральной плотности в соседних широтных зонах, а также сравнение скоростей широтного дрейфа потока дисбаланса в целом со скоро-

стями широтного дрейфа структур потока дисбаланса, обладающих значимыми периодами вращения, показало качественное совпадение этих двух типов широтного дрейфа.

Таким образом, при напряжениях магнитных полей [0; 200) Гс широтный дрейф потока дисбаланса в целом определяется, в основном, широтным дрейфом его структур, вращающихся со значимыми периодами в некоторых широтных интервалах, охватывающих от трех и более пятиградусных широтных зон.

Сравнение широтного дрейфа потока дисбаланса в целом и дрейфа его структур со значимыми периодами вращения при напряжениях магнитных полей [0; 200) Гс позволяет представить дифференциальное вращение Солнца следующим образом: структуры потока дисбаланса, обладающие значимыми периодами (скоростями) вращения, возникая на широтах всплытия (20° и выше – в зависимости от периода), дрейфуют в сторону полюсов, а на широтах ниже широт всплытия перемещаются к экватору, сохраняя свои периоды (скорости) вращения.

Сместившись к полюсам от широты всплытия примерно на 20° (или более – в зависимости от периода), структуры с некоторым значимым периодом перестают существовать как

единое целое, уступая место другим структурам с иными значимыми периодами (скоростями) вращения.

Обнаруженная возрастающая зависимость периода вращения структур потока дисбаланса от широты их всплытия может вызываться вращением более глубоких слоев Солнца, ответственных за образование фоновых магнитных полей и их дисбаланса.

1. *Andryeyeva O.A., Zyelyk Ya.I., Stepanian N.N.* Differential rotation of solar magnetic fields. Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory // Allerton Press, Inc. distributed exclusively by Springer Science+Business Media LLC, June, 2008. – **104**. – N 1. – P. 1–6
2. *Zyelyk Ya.I., Stepanian N.N., Andryeyeva O.A.* Spectral methods for analyzing the rotation of solar structures. Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory // Ibid, June, 2007. – **103**. – N 1. – P. 39–47.
3. *Bendat J.S., Piersol A.G.* Random data: Analysis and measurement procedures. – John Wiley, New York, 1986. – 566 p.
4. *Welch P.D.* The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms // IEEE Trans. Audio Electroacoustics, June, 1967. – **AU-15**. – P. 70–73.

Поступила 16.12.2008

Тел. для справок: (044) 525-3695 (Киев)

© Я.И. Зельк, Н.Н. Степанян, О.А. Андреева, 2009