

УДК 523.327

Дифференциальное вращение солнечных магнитных полей

О.А. Андреева¹, Я.И. Зельк², Н.Н. Степанян¹

¹ НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

² ИКИ НАНУ – НКАУ

Поступила в редакцию 20 декабря 2007 г.

Аннотация. Изучена связь дифференциального вращения магнитных полей на Солнце со знаком поля и величиной его напряженности. Исходным материалом для исследования послужили синоптические карты магнитных полей за последние 3 солнечных цикла, полученные в обсерватории Китт Пик. К этим данным был применен алгоритм фильтрации магнитных полей по 14 выбранным интервалам напряженности и последовательным пятиградусным широтным зонам. Далее было использовано Фурье-преобразование полученных временных рядов. В результате анализа спектров мощности сделан вывод о наличии двух типов магнитных полей. Они отличаются напряженностью ((0–50) Гс и (50–700) Гс) и характеристиками вращения. Дифференциальность вращения сильных магнитных полей практически в два раза больше, чем слабых полей.

DIFFERENTIAL ROTATION OF SOLAR MAGNETIC FIELDS, by *O.A. Andryeyeva, Ya.I. Zyelyk, N.N. Stepanian*. The connection between differential rotation of magnetic fields on the Sun and the sign and value of their strength was studied. The synoptic maps of the magnetic fields over the last three solar cycles taken at Kitt Peak Observatory served as a primary material for the study. The algorithm of magnetic field filtration over 14 chosen strength intervals and successive 5-degree latitude zones was applied to the primary data. Then the Fourier transformation was employed to the time series obtained. As a result of power spectra analysis the conclusion that there are two types of magnetic fields was obtained. These types differ in strength (0–50) Gs and (50–700) Gs and rotation characteristics. The rotation differentiation of the strong magnetic fields is almost twice as much as of the weak magnetic fields.

Ключевые слова: Солнце, магнитные поля, дифференциальное вращение

1 Введение

Известно, что соотношение магнитных потоков N- и S-полярностей от всего Солнца меняется со временем. Это хорошо видно по данным каталога Общего магнитного поля Солнца, представленного в работах Котова и др. (1999) и Ханейчука и др. (2003).

Исследование отдельных солнечных образований, характеризующихся разной напряженностью магнитных полей в них, начиная от единиц Гс в фоновых полях и кончая тысячами Гс в солнечных пятнах, имеет богатую историю. Назовем лишь классические работы по исследованию крупномасштабных магнитных полей на Солнце с помощью магнитографов Говарда и Бумбы (1965, 1969), Северного (1966, 1968), Говарда (1974). Другим методом изучения динамических характеристик

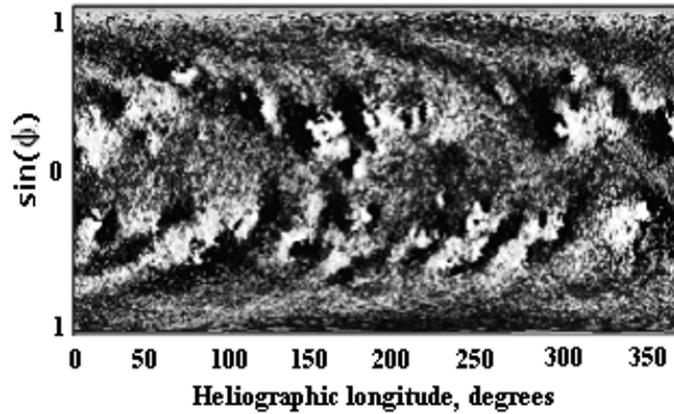


Рис. 1. Синоптическая карта напряженностей солнечных магнитных полей, полученная в обсерватории Китт Пик (США)

фоновых магнитных полей, в том числе и их вращения, является анализ изображений Солнца в линии Н-альфа (Мак-Интош, 1976; Дювал и др., 1977; Степанян, 1982, 1983, 1984; Котов и Степанян, 1980). Недостаток этого метода – невозможность использовать значения напряженности магнитного поля. По Н-альфа наблюдениям анализируется только распределение по поверхности Солнца магнитных полей N- и S-полярности.

Цель данной работы – выяснить, как связано дифференциальное вращение магнитных полей на Солнце со знаком поля и его напряженностью.

2 Материал наблюдений и методы исследования

Исходным материалом для данной работы послужили синоптические карты магнитных полей, полученные на обсерватории Китт Пик и любезно предоставленные нам доктором Харви. Пример такой карты приведен на рис. 1.

Изучение этих карт проводилось отдельно для нескольких интервалов значений напряженности. Выбор интервалов напряженности проводился, как и в работе Андреевой, Степанян (2005), на основании гистограмм, характеризующих распределение магнитных полей по их напряженности на картах. Эти интервалы даны в таблице 1.

Таблица 1. Принятые интервалы напряженности

№ интервала	Минимальные – максимальные напряженности, Гс
1	$>0 - \leq 5$
2	$>5 - \leq 10$
3	$>10 - \leq 20$
4	$>20 - \leq 50$
5	$>50 - \leq 200$
6	$>200 - \leq 700$
7	$>700 - \leq 1500$

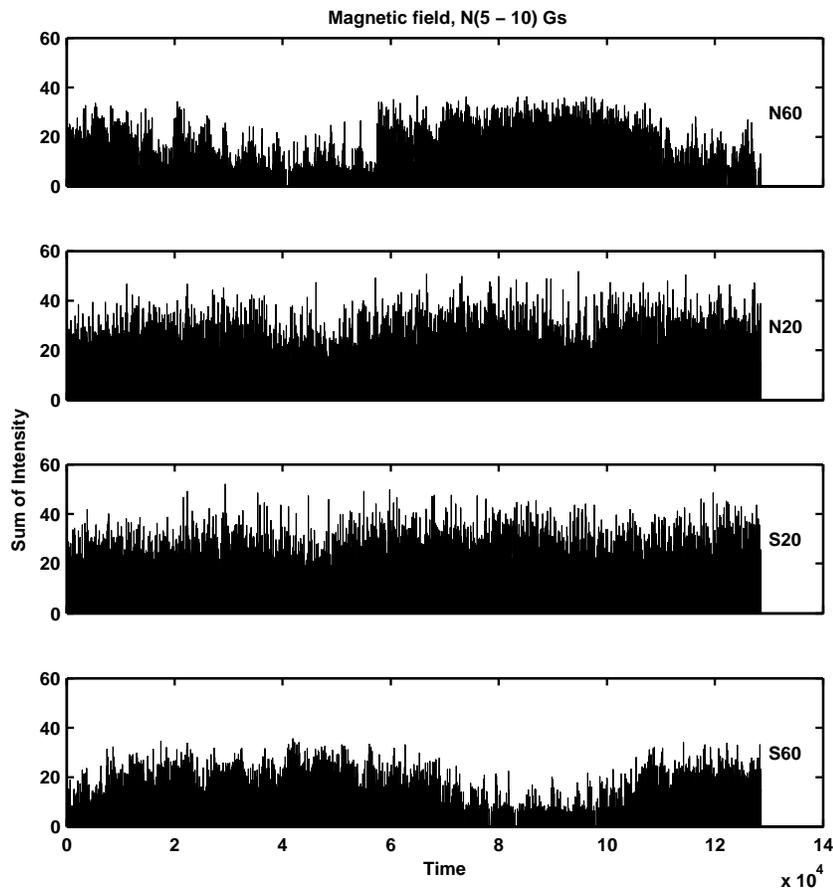


Рис. 2. Изменение со временем суммарного относительного потока магнитных полей N-полярности в четырех пятиградусных широтных интервалах с напряженностью от 5 до 10 Гс

В работе Моцука и Рыбака (2004) по материалу, частично пересекающемуся с нашим, предлагалось несколько иное разделение по напряженностям. А именно, все магнитные поля разделялись оптимальными порогами на 3 категории: активные, диссипативные и фоновые. Затем мы разбивали все карты на пятиградусные широтные зоны. Далее к такой карте применялся алгоритм фильтрации магнитных полей по заданному интервалу напряженности. Подсчеты проводились отдельно для положительных и отрицательных магнитных полей. Таким образом, из одной синоптической карты мы получали 14 карт. Всего были использованы карты за каррингтоновские обороты с № 1650 по № 2006, что соответствует временному интервалу с января 1977 г. по сентябрь 2003 г., охватывающему почти 3 солнечных цикла. Эти синоптические карты были преобразованы во временные ряды для двадцати восьми 5-градусных широтных зон от -70° до $+70^\circ$, семи интервалов напряженности, отдельно для N- и S-полярностей. Длина каждого ряда составляет 128520 отсчетов в градусах или 9728,25 суток. Примеры таких рядов приведены на рис. 2 и 3. Цена одного отсчета на шкале временных рядов Time для этих рисунков равна 1 градусу по долготе, что соответствует 0.076 суток.

Для дальнейшего исследования этих временных рядов был использован Фурье-анализ. Методика построения спектров мощности описана в ранних работах авторов, посвященных анализу синоптических карт, полученных по изображениям Солнца в линии HeI 1083 нм (Андреева и др., 2006). Спектры мощности напряженности магнитных полей были построены по всем полным временным

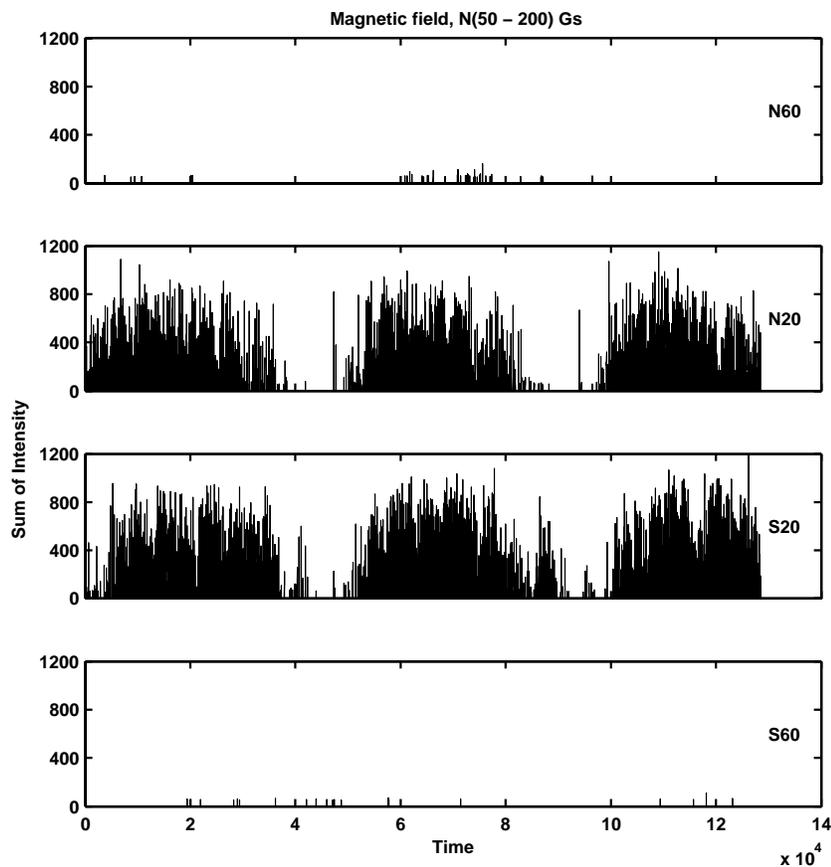


Рис. 3. Изменение со временем суммарного относительного потока магнитных полей N-полярности в четырех пятиградусных широтных интервалах с напряженностью от 50 до 200 Гс

рядам длиной 26 лет. Примеры спектров даны на рис. 4 и 5. Глядя на них, можно проследить изменение спектральной плотности мощности PSD (Power Spectra Density) с широтой в заданном интервале периодов для выбранных интервалов напряженности.

На этих спектрах анализировались значения периодов, для которых $PSD > 3\sigma$ (далее P_m). Такие периоды характеризуют средние за 26 лет наиболее достоверные периоды вращения магнитных полей разного знака и напряженности в отдельных широтных зонах. Пиков P_m в каждом спектре встречалось не более четырех. Для каждого интервала напряженности, отдельно для N- и S-полярностей, периоды P_m были сопоставлены с широтой, для которой они определены. Пример таких графиков дан на рис. 6.

3 Результаты исследования

Анализ зависимостей P_m от широты показал следующее.

Интервалы широт, в которых есть периоды P_m , превышающие по мощности 3σ , отличаются для магнитных полей разной напряженности. Для напряженностей 0–20 Гс это широты $\pm 65^\circ$, для 50–700 Гс интервал широт $\pm 40^\circ$, а наиболее сильные поля 700–1500 Гс наблюдаются на широтах $\pm 30^\circ$.

Одни и те же значения P_m встречаются на разных широтах. Так, для интервалов напряженности

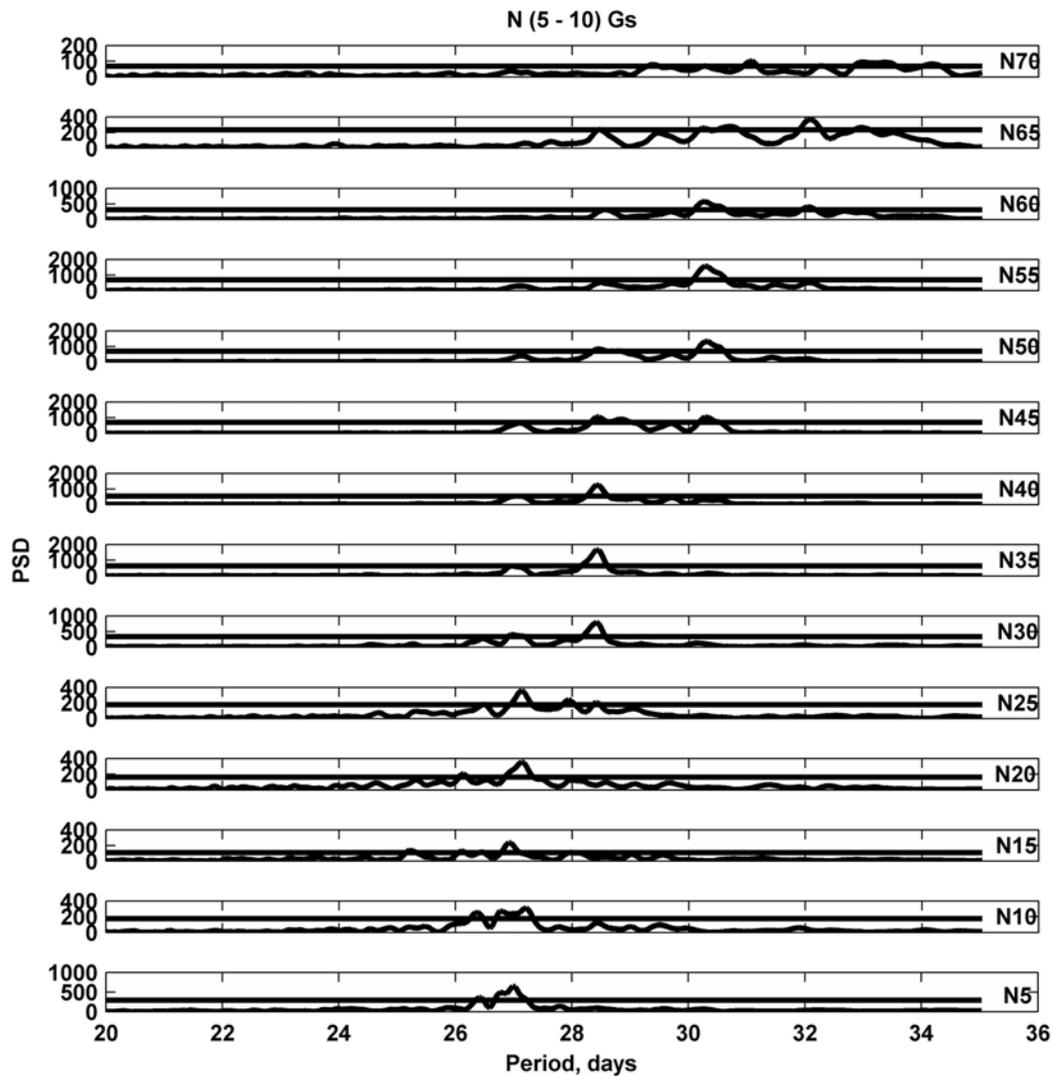


Рис. 4. Спектры мощности, построенные по временным рядам длиной 26 лет для N-полей с напряженностью 5–10 Гс для 14 пятиградусных широтных зон. Горизонтальная линия на всех спектрах – уровень 3σ

0–10 Гс $P_m = 28$ суток преобладает на широтах от -15° до -65° . Это свидетельствует о преимущественном жестком вращении этих полей почти во всем южном полушарии Солнца.

В одном и том же широтном интервале встречается от одного до четырех значений P_m .

Все полученные графики $P_m(\varphi)$ были аппроксимированы полиномами второго порядка. Оказалось, что кривые, относящиеся к вращению сильных полей (700–1500 Гс), существенно отличаются от остальных кривых. Различия между N- и S-полярностями также очень велики. Магнитные поля этих напряженностей принадлежат солнечным пятнам. Вращаются они с большей скоростью, чем слабые поля. Это подтверждает результаты, полученные ранее многими авторами (Говард и Харви, 1970; Голуб и Вайана, 1978; Жао и др., 2004). Ввиду этого мы исключили данные о магнитных полях с напряженностью 700–1500 Гс из дальнейшего рассмотрения.

Ошибки первых членов полиномов, представляющих зависимость $P_m(\varphi)$ лежат в пределах от 0.2 суток до одних суток для интервалов напряженностей от 0 до 700 Гс.

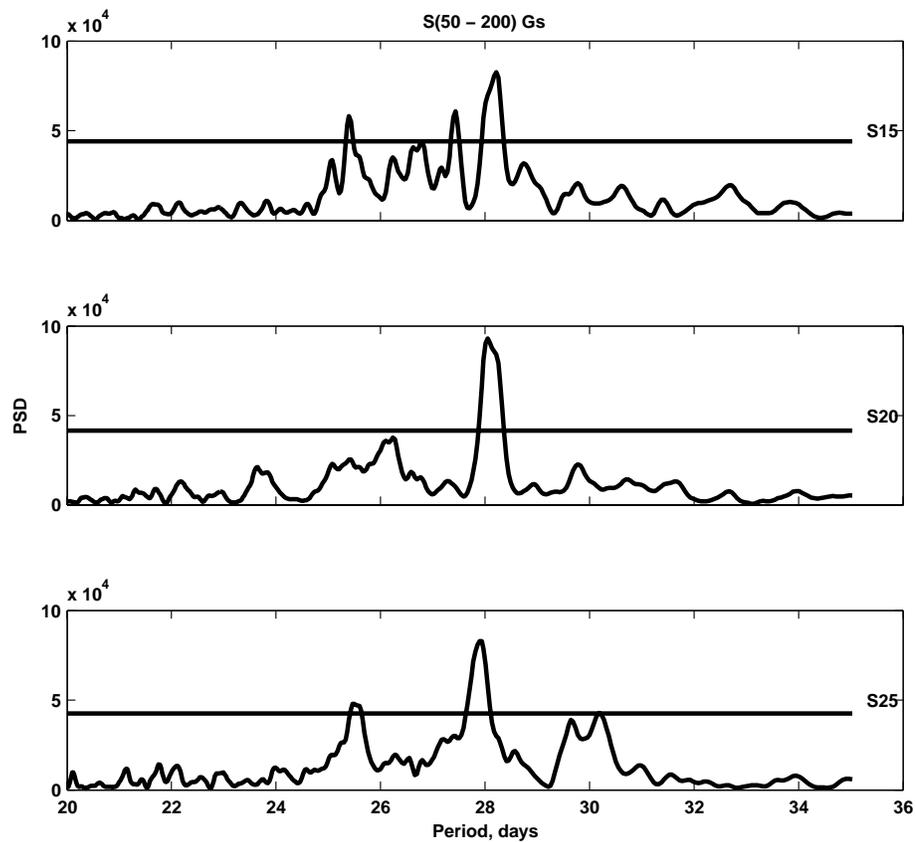


Рис. 5. Спектры мощности, построенные по временным рядам длиной 26 лет для S-полей с напряженностью 50–200 Гс для трех пятиградусных широтных зон 15° – 25° южной полушеры. Горизонтальная линия на всех спектрах – уровень 3σ

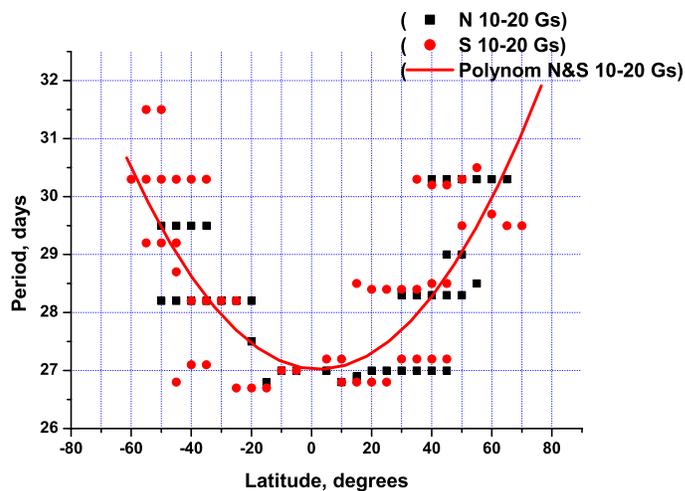


Рис. 6. Изменение периодов P_m с широтой для N- и S-полей с напряженностью 10–20 Гс и аппроксимирующий их полином второго порядка

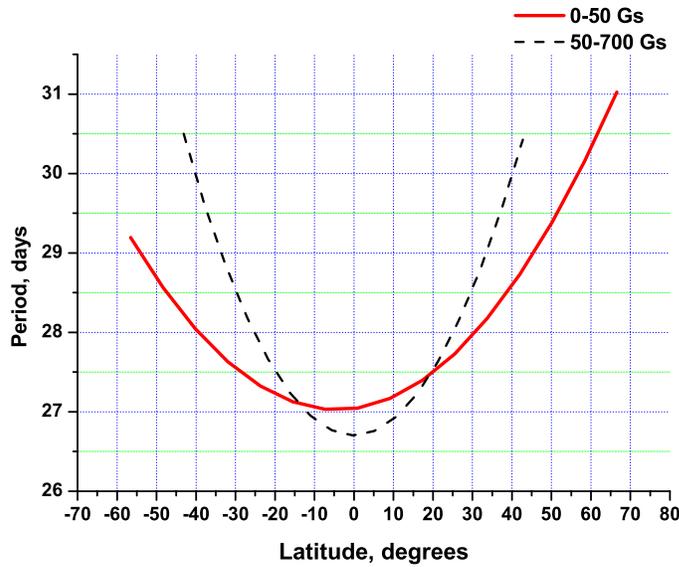


Рис. 7. Средние для N- и S-полей кривые, представляющие изменение P_m с широтой для двух групп магнитных полей с напряженностью 50–700 Гс и 0–50 Гс

Периоды обращения магнитных полей одной напряженности, но разного знака, сильнее различаются в южной полусфере Солнца, чем в северной. Эти различия периодов обращения в южной полусфере достигают в некоторых случаях одних суток, а в северной полусфере менее 0.5 суток.

Приведенные на рис. 7 средние кривые для слабых полей от 0 до 50 Гс и для полей 50–700 Гс демонстрируют различие дифференциального вращения этих двух групп магнитных полей. Количественно этот результат представлен в таблице 2.

Таблица 2. Изменение с широтой периодов обращения магнитных полей с напряженностью 0–50 Гс и 50–700 Гс

Широта, градусы	0–50 Гс		50–700 Гс	
	P_m	$\Delta P_m = P_m(\varphi) - P_m(0)$	P_m	$\Delta P_m = P_m(\varphi) - P_m(0)$
-40	28.08	1.04	30.00	3.31
-20	27.20	0.16	27.50	0.81
0	27.04	0	26.69	0
20	27.50	0.46	27.50	0.81
40	28.61	1.57	30.14	3.45

Если за дифференциальность вращения принять разность периодов обращения ΔP_m на широтах 40° и 0°, то для слабых полей $\Delta P_m = 1.04$ и 1.57, а для более сильных полей $\Delta P_m = 3.31$ и 3.45 суток для южной и северной полусфер Солнца соответственно. На экваторе $P_m = 27.04$ и $P_m = 26.69$ суток для магнитных полей напряженностей 0–50 Гс и 50–700 Гс соответственно. Дифференциальность вращения слабых магнитных полей (0–50 Гс) меньше, чем более сильных полей (50–700 Гс) на 2.27 и 1.88 суток для южной и северной полусфер.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о наличии двух типов магнитных полей, отличающихся по напряженности и характеристикам вращения. Ранее (Андреева, Степанян, 2005)

нами были выявлены два типа солнечных магнитных полей по их цикличности и напряженности. Судя по напряженностям, это те же два класса, которые получены нами сейчас.

Таким образом, в результате данной работы мы дополняем два типа полей еще одной характеристикой – различием в дифференциальном вращении.

Использованные в настоящей работе данные NSO/Kitt Peak получены при кооперации NSF/NOAO, NASA/GSFC и NOAA/SEL.

Литература

- Андреева О.А., Зельк Я.И., Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2006. Т. 102. С. 84.
Андреева О.А., Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2005. Т. 101. С. 120.
Бумба, Говард (Bumba V., Howard R.) // *Astroph. J.* 1965. V. 141. P. 1502.
Бумба, Говард (Bumba V., Howard R.) // *Solar. Phys.* 1969. V. 7. P. 28.
Говард (Howard R.) // *Solar. Phys.* 1974. V. 38. P. 283.
Говард и Харви (Howard R.F. & Harvey J.W.) // *Solar. Phys.* 1970. V. 12. P. 23.
Дювал и др. (Duvall T.L., Wilcox J.M., Svalgaard et al.) // *Solar. Phys.* 1977. V. 55. P. 63.
Голуб и Вайана (Golub L. & Vaiana G.S.) // *Astroph. J.* 1978. V. 219. L. 55.
Жао и др. (Zhao J., Kosovichev A.G., Duval T.I., Jr.) // *Astroph. J.* 2004. V. 607. P. 135.
Котов В.А., Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1980. Т. 62. С. 117.
Мак-Интош П. // Наблюдения и прогноз солнечной активности. М.: Мир. 1976.
Моцук, Рыбак (Mocik M., Rybák J.) // Noordwijk ESTEC. 2003. P. 137
Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1966. Т. 35. С. 97.
Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1968. Т. 38. С. 3.
Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1982. Т. 65. С. 43.
Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1983. Т. 67. С. 59.
Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1984. Т. 71. С. 62.
Ханейчук и др. (Haneychuk V.I., Kotov V.A., Tsap T.T.) // *Astron. Astrophys.* 2003. V. 403. P. 1115.
Цап Т.Т. // *Астрон. журн.* 1999. Т. 76. С. 21.