

УДК 523.94

Изменение суммарного магнитного потока Солнца со временем, широтой и высотой

О.А. Андреева¹, Г.В. Руденко², Н.Н. Степанян¹, В.Г. Файнштейн²

¹ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
nataly@crao.crimea.ua

²Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ), а/я 291, Иркутск, Россия, 664033
vfain@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 15 декабря 2015 г.

Аннотация. Анализируется суммарный магнитный поток Солнца в 10-градусных широтных зонах каждого оборота. Суммарный поток – это сумма абсолютных значений магнитных потоков “+” и “–” полярностей в долготных интервалах 0–360° на высотах от фотосферы до поверхности источников. Исходным материалом послужили синоптические карты магнитного поля Солнца за 3 цикла (1975–2010 годы) на пяти высотах в солнечной атмосфере. Исследовались широтное и высотное распределения суммарного магнитного потока и скорость его изменения со временем. Скорости изменения суммарного потока от оборота к обороту определялись как значение суммарного потока в обороте минус значение в предыдущем обороте. Разность потоков относилась к обороту.

Для эпох максимумов активности в 21, 22 и 23 циклах в широтных зонах от –15° до +15° в скоростях изменения суммарных потоков видны периодические колебания со следующими характеристиками:

- Колебание скорости в течение периода симметрично относительно нуля.
- Амплитуды колебаний составляют около 0.5 среднего суммарного потока на высотах H0 – H9.
- Средний коэффициент автокорреляции 0.43 ± 0.05 .
- Средний период 8.4 ± 1.6 кэррингтоновских оборота или 7.6 ± 1.4 месяца.

CHANGES IN THE SOLAR SUMMARY MAGNETIC FLUX WITH TIME, LATITUDE AND HEIGHT, by *O.A. Andreeva, G.V. Rudenko, N.N. Stepanian, V.G. Fainshtein*. The solar summary magnetic flux of each rotation was analyzed in 10-degree latitude zones. The summary flux is the sum of absolute values of the magnetic fluxes of “+” and “–” polarity in the longitudinal intervals 0–360° at heights from the photosphere to the source’s surface. Synoptic maps of the magnetic field of the Sun for 3 solar cycles (1975–2010 years) at five heights in the solar atmosphere served as basic data for the study. The latitudinal and height distribution of the summary magnetic flux and velocity of its variation over time were studied. Velocities of changes in the summary flux were measured as difference of a summary flux in the current rotation minus a flux in the previous rotation. The difference of fluxes refers to the previous rotation.

Periodic oscillations are visible in velocity of changes in the summary fluxes for the epoch of maximum activity during cycles 21, 22 and 23 per latitudinal zones -15° to $+15^\circ$, with the following characteristics:

- Velocity oscillations during the period are symmetrically about zero.
- The amplitude of oscillation is about 0.5 of the average summary flux at heights $H_0 - H_9$.
- The average autocorrelation coefficient is 0.43 ± 0.05 .
- The average period is 8.4 ± 1.6 Carrington rotations or 7.6 ± 1.4 months

Ключевые слова: Солнце, крупномасштабное магнитное поле

1 Введение

Данная статья является продолжением двух циклов работ. I цикл: “Крупномасштабные магнитные поля разной напряженности на уровне фотосферы” (Степанян, Андреева, 2005; Степанян и др., 2009а, б; Зельк и др., 2009). II цикл: “Крупномасштабные магнитные поля на высотах от фотосферы до поверхности источников без разделения по напряженностям поля” (Файнштейн и др., 2011; Степанян и др., 2013; Ахтемов и др., 2015).

В работе (Степанян и др., 2009б) рассматривалось соотношение дисбаланса ($|N| - |S|$) магнитного поля и суммарного магнитного потока ($|N| + |S|$) для полей разной напряженности. $|N|$ и $|S|$ представляют собой модули магнитных потоков поля N- и S-полярности. В настоящей работе изучается суммарный магнитный поток (FS) на разных высотах в атмосфере Солнца и скорость его изменения со временем (VS).

2 Исходный материал

Объектом исследования является магнитное поле Солнца на высотах от фотосферы до поверхности источника в течение 21–23 циклов активности (1975–2010 гг., кэррингтоновские обороты (КО) № 1625–2000). Исходным материалом для исследования послужили ежедневные магнитограммы продольного фотосферного магнитного поля высокого пространственного разрешения, полученные магнитографом KPNO (США) и магнитографом SOLIS (NSO, США). Расчет поля на высотах от фотосферы до поверхности источника в потенциальном приближении проводился по методике Руденко (2001). Это позволило построить синоптические карты вектора продольного магнитного поля на уровнях от фотосферы до 2.5 радиуса Солнца.

3 Суммарный магнитный поток

Был рассмотрен суммарный магнитный поток в 10-градусных широтных зонах $FS(\varphi, H)$, представляющий сумму абсолютных значений потоков “+” магнитного поля и “-” поля в 10-градусных широтных зонах. Средние широты рассмотренных зон $-85^\circ \leq \varphi \leq +85^\circ$ на пяти высотах H . Рассматриваемые высоты и их условные обозначения даны в таблице 1.

Было определено изменение со временем суммарного магнитного потока в каждой широтной зоне на высотах H_0, H_2, H_3, H_5, H_9 . На рис. 1 представлены эти данные для высоты H_0 в N-полусфере. Как видим, 11-летняя цикличность четко видна только в широтных интервалах до $+55^\circ$. Подобная картина наблюдается и в S-полусфере. На широтах от $+55^\circ$ и выше в минимуме между 22 и 23 циклами (КО № 1870–1950) наблюдается рост суммарного потока.

Изменение суммарного магнитного потока Солнца...

На рис. 2 представлено изменение суммарного потока FS в N-полусфере на высоте $2.5 R_{\odot}$ (поверхность источников). На этой высоте 11-летняя цикличность не видна на всех широтах. Резко выделяется максимум в районе оборотов КО № 1870–1950 на всех широтах.

Таблица 1. Рассматриваемые высоты в атмосфере Солнца и их обозначения

Высота, R_{\odot}	Обозначение
1	H0
1.037	H2
1.1	H3
1.5	H5
2.5	H9

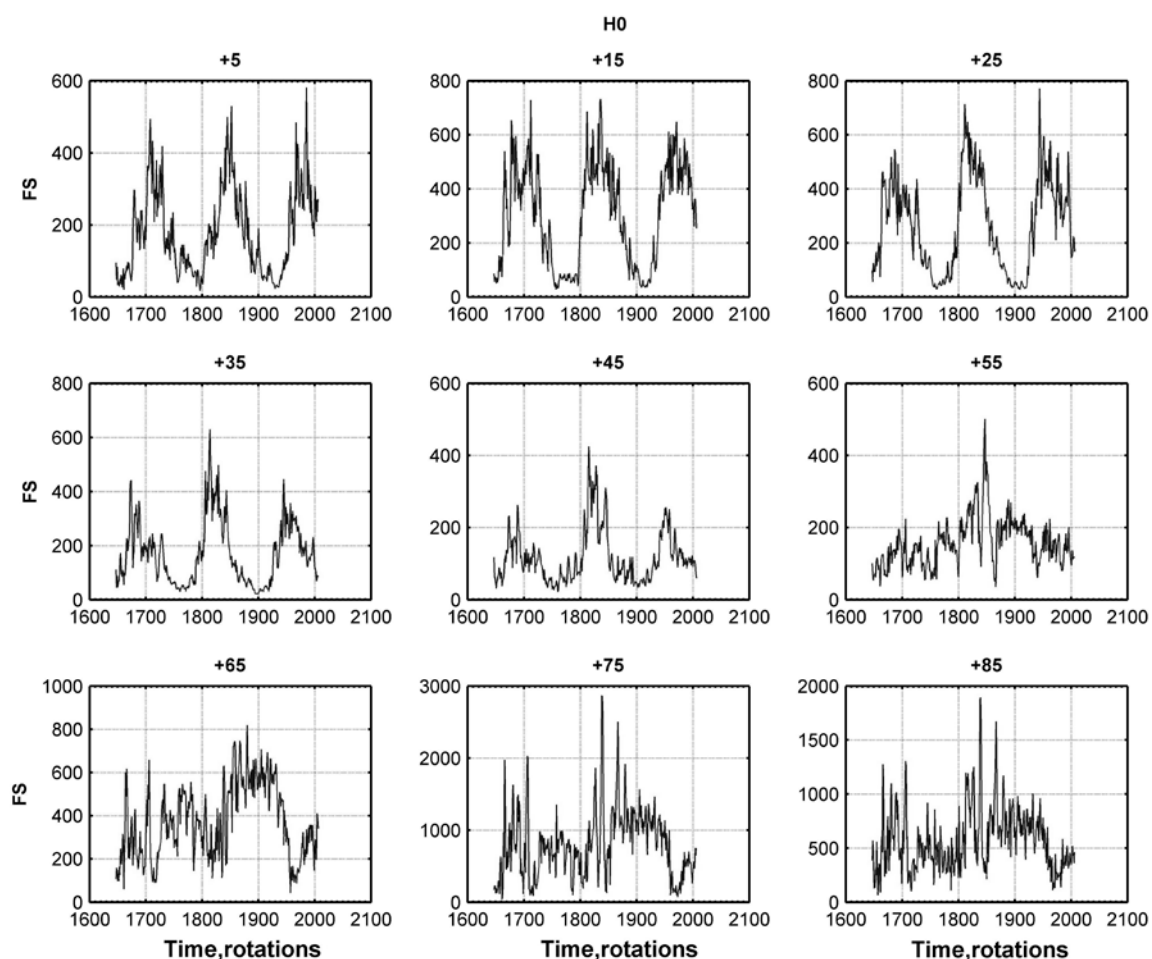


Рис. 1. Изменение со временем суммарного магнитного потока FS в девяти широтных зонах в N-полусфере на высоте H0 (фотосфера)

Изменение FS с широтой и временем показано на рис. 3 для H0, H3 и H9 для широт от -45 до $+45$ градусов.

Затем было рассмотрено изменение FS со временем от всего Солнца на четырех высотах от фотосферы до поверхности источников. Оно представлено на рис. 4. На нем хорошо видно, что на высотах от Н0 до Н3 цикл 21 имел 3 максимума вблизи КО 1675, КО 1700 и КО 1725. Циклы 22 и 23 имели на этих широтах по 2 максимума (КО 1825 и КО 1845 в цикле 22 и КО 1950 и КО 1980 в цикле 23). Кроме того, в минимуме между циклами 21 и 22 в КО 1760–1780 на всех высотах был небольшой вторичный максимум.

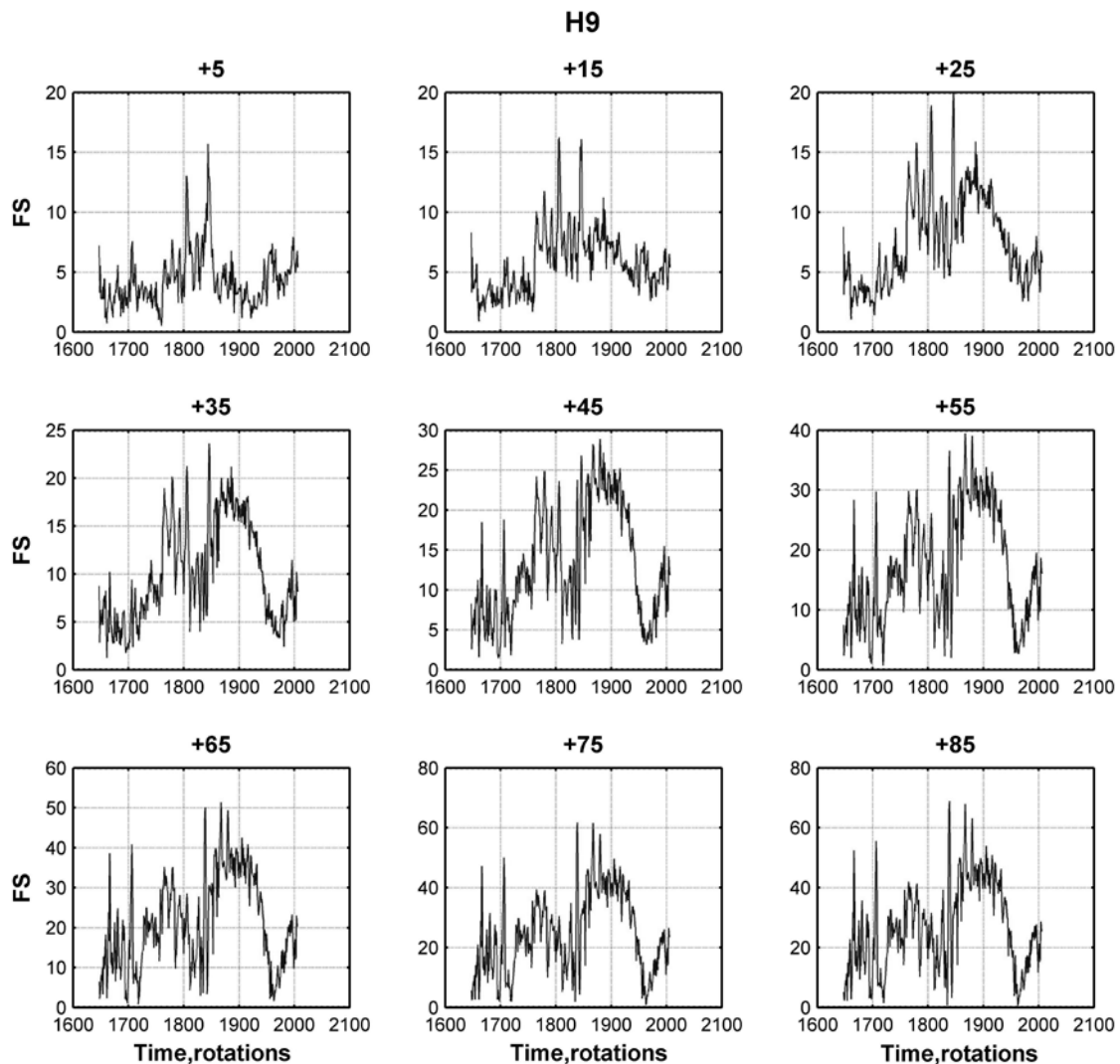


Рис. 2. Изменение со временем суммарного магнитного потока в девяти широтных зонах в N-полусфере на высоте Н9 (поверхность источника)

Перечислим полученные характерные черты суммарного магнитного потока от 10-градусных широтных зон на высотах от фотосферы до 2.5 радиуса Солнца.

- 11-летняя цикличность четко видна только до широт от -45° до $+45^\circ$ для высот от Н0 до Н5.
- Цикл 21 трехвершинный, 22 и 23 циклы – двухвершинные на высотах от Н0 до Н5.

Изменение суммарного магнитного потока Солнца...

- В КО 1760–1780 на всех высотах во время минимума между циклами 21 и 22 наблюдается значительное повышение суммарного потока.
- На высоте H9 цикличность не видна.
- На высоте H9 наблюдается повышение потока в оборотах 1825–1925.

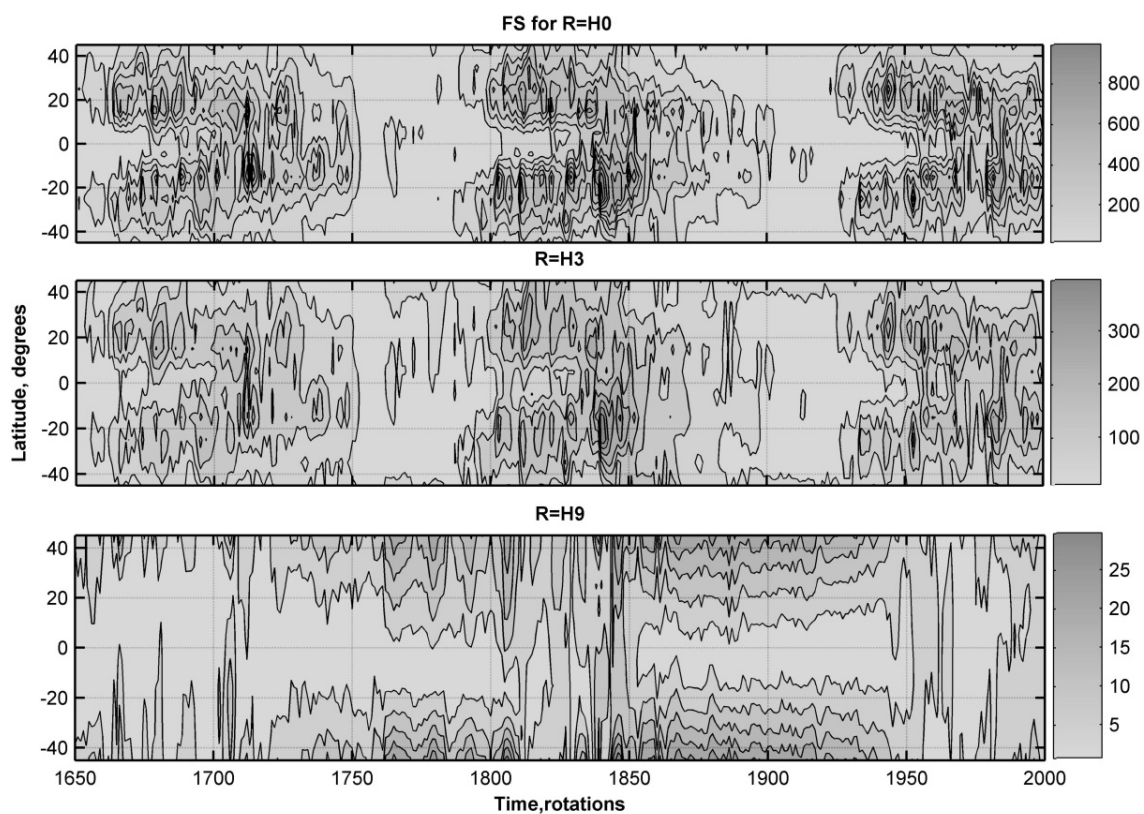


Рис. 3. Изменение FS с широтой и временем для H0, H3 и H9 для широтных зон от -45° до $+45^\circ$

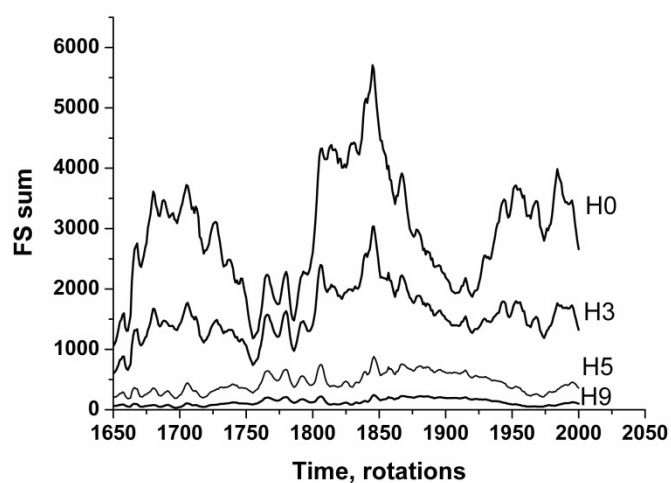


Рис. 4. Изменение со временем суммы FS от всего Солнца (на всех широтах) для 4 высот

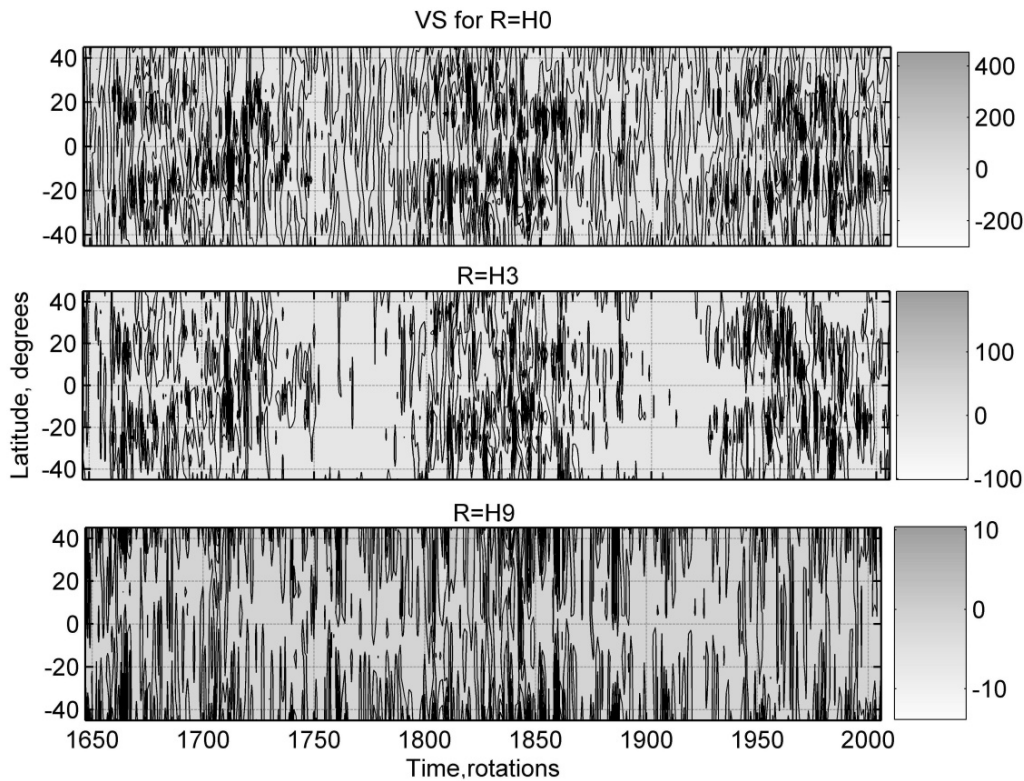


Рис. 5. Изменение VS с широтой и временем для высот H0, H3 и H9

Таблица 2. Анализируемые временные интервалы

№ цикла	Начало-конец цикла, обороты/годы	Начало-конец зоны анализа, обороты/годы
21	КО 1647–1760 Годы 1976–1985	КО 1660–1720 Годы 1977–1982
22	КО 1761–1895 Годы 1985–1995	КО 1800–1850 Годы 1988–1992
23	КО 1896–2100 Годы 1995–2010	КО 1925–2000 Годы 1997–2000

4 Скорость изменения суммарного магнитного потока

Основная задача этого исследования – определение характеристик скорости изменения суммарного магнитного потока. Определим скорость $VS(T_k, \varphi_n, H_m)$ изменения суммарного потока магнитного поля в 10-градусных широтных зонах $FS(T_k, \varphi_n, H_m)$ как разность суммарных потоков в двух соседних оборотах: $FS(T_{(k+1)}, \varphi_n, H_m) - FS(T_k, \varphi_n, H_m) = VS(T_k, \varphi_n, H_m)$. Здесь k – номер кэррингтоновского оборота, $1650 < k < 2000$; n – средняя широта 10-градусной широтной зоны от -85° до $+85^\circ$, m – обозначение рассматриваемой высоты от 0 до 9.

На рис. 5 показано изменение VS с широтой и временем для высот H0, H3 и H9. На ней видны появляющиеся в эпохи максимумов активности структуры, вытянутые вдоль меридиана в

Изменение суммарного магнитного потока Солнца...

области широт $\pm 20^\circ$. Повторяемость этих структур во времени наводит на мысль о наличии периодической составляющей изменения суммарного магнитного потока в эпохи максимума.

Для выявления периодической составляющей скорости изменения суммарного потока мы выделили 3 интервала времени, соответствующих максимальным фазам трех циклов активности (см. табл. 2).

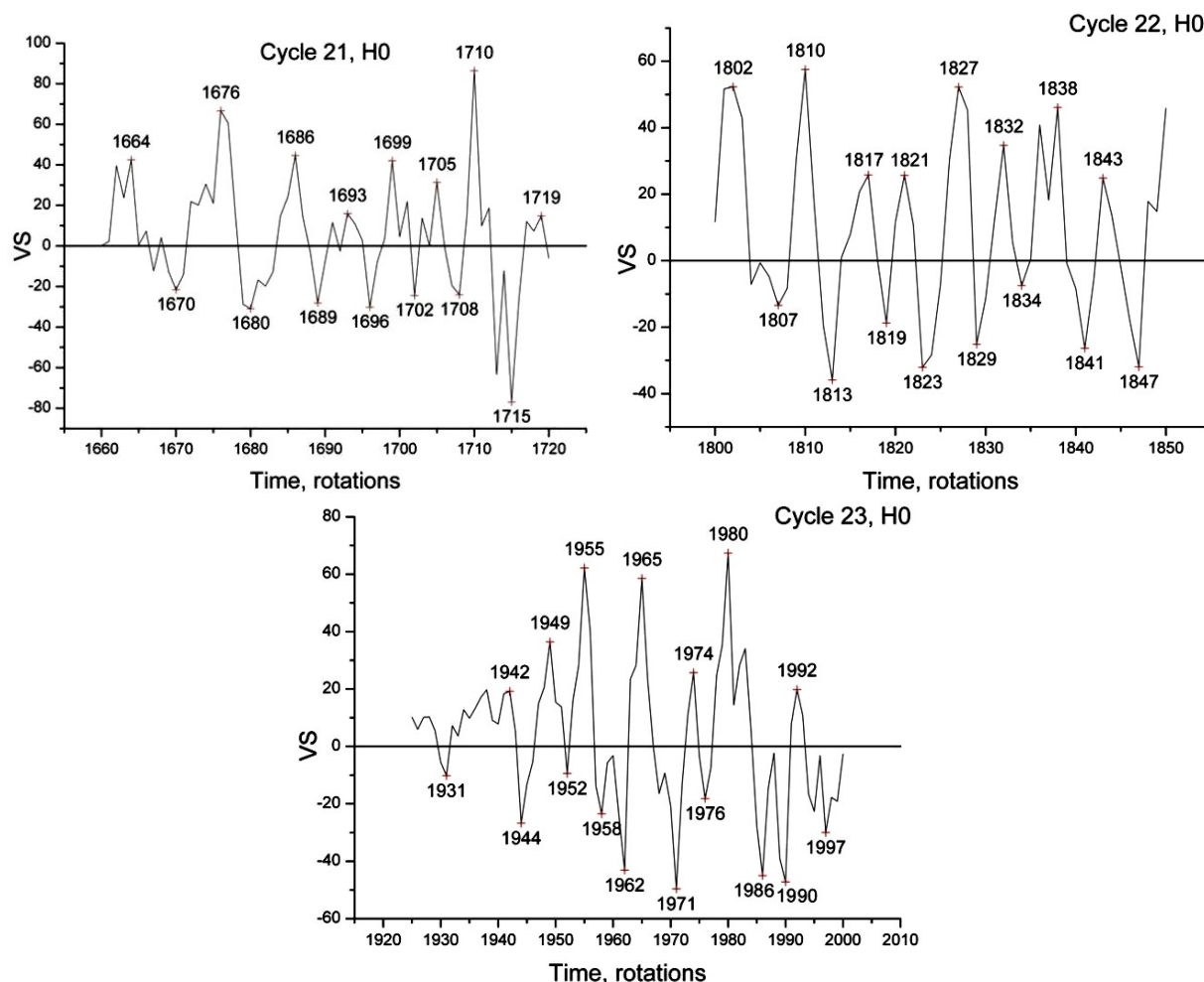


Рис. 6. Изменение VS со временем в активные периоды трех циклов на высоте H0

Для этих интервалов времени были проанализированы кривые изменения VS на широтах от -15° до $+15^\circ$ в разных вариантах осреднения по широте и времени. Рассматривались высоты H0, H2, H3, H5, H9. Анализировались отдельно VS в каждом из четырех 10-градусных широтных интервалов и среднее значение VS для них. Средние значения VS сглаживались по двум последовательным оборотам. Получившиеся ряды анализировались на наличие периодичности в каждом из них. Сначала простейшим способом в рамках пакета ORIGIN по программе Pick Peaks были определены все пики на кривых шириной больше 5 оборотов и высотой более 5 единиц скорости (рис. 6). Цифры на графиках рис. 6 – номера оборотов, в которых наблюдаются положительные и отрицательные максимумы кривых.

Затем для тех же кривых был проведен автокорреляционный анализ. Были найдены коэффициенты автокорреляции и длительность периодов на всех высотах.

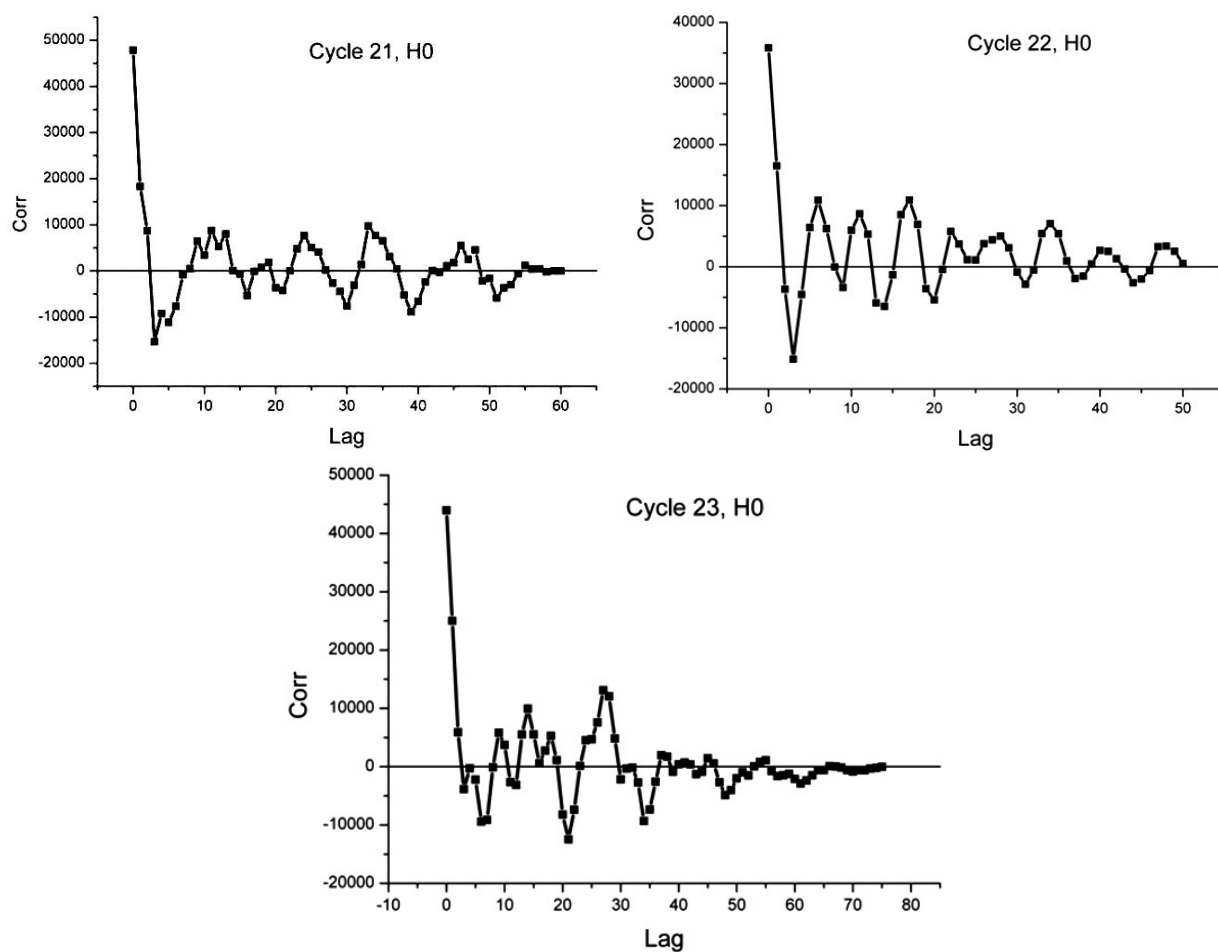


Рис. 7. Автокорреляционные кривые скорости VS в трех циклах на высоте H0

Таблица 3. Периоды колебаний суммарного магнитного потока

№ цикла /высота	Период по Pick Peaks	dVS/FS	Период по автокорр.	R
21 H0	7.86 ± 2.35	0.28	9.1	0.41
	7.5	0.30	7.5	0.34
	7.4	0.18	7.8	0.40
22 H0	5.85 ± 1.34	0.17	5.78	0.42
	8	0.20	10	0.50
	7.8	0.23	13	0.42
23 H0	8.00 ± 2.55	0.26	7.5	0.44
	8	0.23	10	0.48
	8	0.13	10	0.48

Изменение суммарного магнитного потока Солнца...

В таблице 3 приведены средние периоды колебаний VS для трех уровней высот (H0, H5 и H9), полученные двумя методами, и коэффициенты автокорреляции. dVS/FS – отношение амплитуды колебаний скорости к среднему потоку от всего Солнца.

- Все периодические колебания переходят от положительных значений к отрицательным.
- Амплитуды периодических колебаний около 0.5 среднего потока на рассматриваемых широтах $\pm 15^\circ$ на высоте H0 и 0.22 от среднего потока всего Солнца.
- Средний коэффициент автокорреляции 0.43 ± 0.05 .
- Средний период колебаний 8.4 ± 1.6 кэррингтоновских оборота или 7.6 ± 1.4 месяца.

5 Заключение

В статье представлены результаты изучения суммарного магнитного потока FS и скорости его изменения VS. Напомним, что скорость VS определялась как значение суммарного потока FS в $(k + 1)$ обороте минус значение FS в предыдущем (k) обороте. Разность потоков относилась к обороту (k) .

Были найдены следующие особенности этих характеристик крупномасштабного магнитного поля Солнца.

Для суммарного магнитного потока FS найдено:

- На высотах H0 11-летняя цикличность суммарного потока четко видна только в широтных зонах от -45° до $+45^\circ$.
- С ростом высоты 11-летняя цикличность становится менее контрастной и на высоте H9 она не видна.
- При учете FS от всего Солнца цикл 21 – трехвершинный, а 22 и 23 циклы – двухвершинные на высотах от H0 до H5.
- В КО 1760–1780 на всех высотах во время минимума наблюдается значительное повышение FS.
- На высоте H9 наблюдается еще одно повышение суммарного потока в КО 1825–1925.
- Изменения суммарного магнитного потока FS от оборота к обороту на средних и низких широтах находятся в пределах 0.3–0.5 средних потоков FS на этих широтах.

Для изменения VS со временем были найдены следующие особенности:

- В широтных зонах от -15 до $+15$ градусов обнаружена периодическая составляющая VS на всех рассмотренных высотах в эпохи максимумов трех циклов активности.
- Все периодические колебания скорости переходят от положительных значений VS к отрицательным.
- Амплитуды колебаний составляют около 0.5 среднего потока FS на высотах H0–H9.
- Средний коэффициент автокорреляции 0.43 ± 0.05 .
- Средний период 8.4 ± 1.6 кэррингтоновских оборота или 7.6 ± 1.4 месяца.

Как видим, статистическая значимость полученной автокорреляции невелика. Тем не менее другие характеристики – повторяемость колебаний в максимумах трех циклов, смена знака скорости в каждом периоде колебаний и значительная амплитуда колебаний – позволяют говорить о реальности данного явления. Природа таких колебаний скорости не ясна, и в литературе мы не нашли подобный результат.

Литература

- Ахтемов и др. (Akhtemov Z.S., Andreyeva O.A., Rudenko G.V., Stepanian N.N., Fainshtein V.G.)
// Adv. Space Res. 2015. V. 55. P. 968.
- Зельк Я.И., Андреева О.А., Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2009. Т. 105. № 1.
С. 18.
- Руденко (Rudenko G.V.) // Solar Phys. 2001. V. 198. P. 5.
- Степанян Н.Н., Андреева О.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2005. Т. 101. С. 120.
- Степанян Н.Н., Андреева О.А., Зельк Я.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2009а. Т. 105.
№ 1. С. 5.
- Степанян Н.Н., Андреева О.А., Зельк Я.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2009б. Т. 105.
№ 1. С. 33.
- Степанян Н.Н., Ахтемов З.С., Файнштейн В.Г., Руденко Г.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.
2013. Т. 109. № 1. С. 173.
- Файнштейн В.Г., Степанян Н.Н., Руденко Г.В., Ахтемов З.С., Силакова Е.В. // Изв. Крымск.
Астрофиз. Обсерв. 2011. Т. 107. № 1. С. 74.