

УДК 519.246.8: 517.443: 523.9-327

Я. И. Зельк¹, Н. Н. Степанян², О. А. Андреева²

¹ Институт космических исследований Национальной академии наук Украины
та Державного космічного агентства України, Київ

² Науково-дослідний інститут «Кримська астрофізична обсерваторія», Научный, Крым

ОБОБЩЕННЫЙ СЦЕНАРИЙ ЭВОЛЮЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ СЛАБЫХ ФОТОСФЕРНЫХ И СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

На основі оброблення даних спостережень досліджено еволюцію протягом трьох сонячних циклів великомасштабних магнітних полів на Сонці та встановлено узагальнений сценарій зміни сонячних циклів слабких фотосферних і сильних (в активних областях) полів. Виявлено, що поряд з істотними відмінностями еволюції слабких і сильних магнітних полів, має місце і тісний зв'язок їхньої поведінки у виділених інтервалах напруженості якщо як характеристику для порівняння розглядати швидкість зростання сумарного потоку поля.

Изучение магнитных полей на Солнце было начато Г. В. Бэбкоком и Г. Д. Бэбкоком [14]. В работе [15] Г. В. Бэбкок высказал предположение о связи магнитных полей активных областей с общим магнитным полем Солнца. В 1960-х годах по наблюдениям на двойном магнитографе [15] в Крымской астрофизической обсерватории А. Б. Северным [9–11, 16–19] было показано, что на Солнце нет когерентного общего магнитного поля. Оно складывается из мелких элементов разного размера, напряженности и знака. Лишь результаты значительного пространственного усреднения позволяют обнаружить в некоторых крупномасштабных структурах преобладание потока магнитного поля той или иной полярности. Именно такого рода пространственное усреднение (сглаживание) имеет место при уменьшении пространственной разрешающей способности наблюдений. В подробном анализе наблюдений полярных и экваториальных зон Солнца А. Б. Северным были исследованы различные крупномасштабные солнечные образования, характеризующиеся напряженностью магнитных полей в них от единиц гаусс в фоновых полях до тысяч гаусс в солнечных пятнах. В работе [9, 17] было показано, что поле поляр-

ных областей Солнца отличается от поля типа диполя или равномерно намагниченной сферы. А. Б. Северным впервые отмечены трудности в интерпретации фонового поля как рассеянного поля хвостовых частей активных областей.

Ввиду ограниченности объема работы авторы не имеют возможности привести здесь подробный анализ (который ими сделан) литературных источников по сформулированной проблеме. Сошлемся лишь на свои статьи [1, 4–8, 12, 13, 21], в которых исследовано дифференциальное вращение и широтный дрейф слабых фотосферных магнитных полей на основе синоптических карт магнитных полей Солнца, полученных в обсерватории NSO/Kitt Peak (США) (<http://nso.kp.nso.edu/>) и безвозмездно предоставленных авторам. Было установлено, что особенности дифференциального вращения магнитных образований, а также цикличность изменения их широтного распределения для слабых и сильных магнитных полей на Солнце существенно различаются. Однако анализ широтно-временных распределений скорости роста потока суммарного магнитного поля N- и S-полярности разной напряженности и их эволюции до настоящего времени не проводился.

Целью работы является исследование закономерностей эволюции крупномасштабных маг-

нитных полей на Солнце и установление общего сценария изменения солнечных циклов слабых фотосферных и сильных (в активных областях) магнитных полей на основе данных наблюдений. Полученные результаты позволяют обнаружить, наряду с рассмотренными в работах [1, 4—8, 12, 13, 21] существенными различиями в поведении слабых и сильных магнитных полей, их тесную связь.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи.

1) Исследование широтно-временных распределений скорости роста суммарного магнитного поля разной напряженности, их эволюции в течение трех солнечных циклов и их связи с характеристиками вращения.

2) Сравнение широтно-временной зависимости роста потока суммарного магнитного поля разной напряженности на 26-летнем интервале наблюдений с временной зависимостью относительного числа солнечных пятен и с широтно-временной зависимостью площадей солнечных пятен.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И ПОСТРОЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

В настоящей работе и в работах [1, 4—8, 12, 13, 21] используются данные наблюдений с помощью магнитографов обсерватории NSO/Kitt Peak (<http://nsokp.nso.edu/>), любезно предоставленные авторам настоящей статьи доктором Дж. Харви еще до выставления их в интернете. Использованные здесь данные получены в NSO/Kitt Peak при кооперации с NSF/NOAO, NASA/GSFC и NOAA/SEL.

Данные соответствуют временному интервалу от 1 января 1977 г. до 1 октября 2003 г. Это соответствует 357 кэррингтоновским оборотам Солнца № 1650—2006. Данные охватывают три солнечных цикла, от фазы роста 21-го до фазы спада 23-го цикла. Материал наблюдений представляет собой синоптические карты, каждая из которых соответствует одному кэррингтоновскому обороту и составлена из результатов ежедневных измерений продольного вектора напряженности магнитного поля Солнца. Обработка синоптических карт проводилась в выделенных интервалах напряженности магнитного поля N- и S-полярности из диапазона значений

по модулю [0; 20] мТл. На основании анализа гистограмм количества пикселей на карте в зависимости от напряженности в диапазоне [0; 20] мТл было выделено пять характерных интервалов модуля напряженности магнитного поля [0; 0.5), [0.5; 1), [1; 2), [2; 5), [5; 20) мТл.

Из временных рядов потоков напряженности магнитного поля $N(H_k, t_l, \varphi_n)$ и $S(H_k, t_l, \varphi_n)$, отражающих зависимости положительной (N) и отрицательной (S) полярности в выделенных пятиградусных широтных зонах, построенных методом, изложенным в работе [7], получены временные ряды потока суммарного магнитного поля $Sum(H_k, t_l, \varphi_n)$ как суммы модулей соответствующих значений потоков:

$$Sum(H_k, t_l, \varphi_n) = |N(H_k, t_l, \varphi_n)| + |S(H_k, t_l, \varphi_n)|. \quad (1)$$

Здесь H_k ($k = 1, 2, \dots, 7$) — интервалы модуля напряженности магнитного поля, указанные выше из диапазона напряженности [0; 20] мТл; φ_n ($n = \pm 5, \pm 10, \dots, \pm 65, \pm 70$) — 28 пятиградусных широтных зон в диапазоне широт $[-70^\circ; 70^\circ]$ на Солнце; t_l ($l = 1, 2, \dots, 128520$) — временные отсчеты на 26-летнем интервале наблюдений; шаг дискретизации по времени $\Delta t = 0.0757$, что соответствует 1° по долготе.

Для каждого из пяти интервалов модуля напряженности магнитного поля в каждом из 28 рядов длиной по 128520 отсчетов каждый член ряда (1) представляет собой поток суммарного магнитного поля напряженностью H_k N- и S-полярности в относительных единицах на центральном меридиане Солнца в широтной зоне φ_n от элементарной площадки длиной 1° по долготе и шириной 5° по широте в момент времени t_l .

Аналогичным образом строятся временные ряды данных $dif_Sum(H_k, t_l, \varphi_n)$ для первой разности двух последовательных отсчетов каждого ряда $Sum(H_k, t_l, \varphi_n)$:

$$dif_Sum(H_k, t_l, \varphi_n) = \\ = Sum(H_k, (t_l + \Delta t), \varphi_n) - Sum(H_k, t_l, \varphi_n), \quad (2)$$

который при каждом значении напряженности H_k в каждый момент времени t_l на каждой широте φ_n характеризует рост во времени потока суммарного магнитного поля.

ШИРОТНО-ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ РОСТА ПОТОКА СУММАРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

По значениям скорости роста потока суммарного магнитного поля в соответствии с временными рядами (2) в 28 пятиградусных широтных зонах в диапазоне $[-70^\circ; 70^\circ]$ для пяти указанных выше интервалов напряженности магнитного поля в диапазоне $[0; 20]$ мТл построены карты широтно-временной зависимости потока дисбаланса на 26-летнем временном интервале наблюдений. Для интервала напряженности $[0.5; 1)$ мТл и $[2; 5)$ мТл скорость роста потока суммарного магнитного поля в относительных единицах представлена в виде изолиний в координатах время — широта на рис. 1. Жирной кривой отображена «нулевая» изолиния, разделяющая область роста (положительная скорость роста, определяемая рядом (3)) и область убывания (отрицательная скорость роста) потока суммарного магнитного поля.

Анализ эволюции скорости роста потока суммарного магнитного поля в диапазоне напряженности $[0; 20]$ мТл на 26-летнем временном интервале на основании карт, аналогичных приведенным на рис. 1, приводит к следующим выводам.

В эволюции областей роста потока суммарного магнитного поля четко наблюдаются три цикла активности — с 21-го по 23-й. Для 22-го и 23-го циклов переход от убывания потока к возрастанию происходит около 1985 г. и 1995 г. соответственно, тогда как максимум скорости роста потока наступает через два года: в 1987 г. и 1997 г. соответственно.

Быстрый рост потока суммарного магнитного поля начинается на широтах $20-25^\circ$ в обеих полушарах. Затем локальные максимумы скорости роста смещаются к более низким и высоким широтам, распространяясь к полюсам примерно в течение 6—8 лет, а к экватору — 5—6 лет.

Для полей более высокой напряженности скорость роста потока на высоких широтах меньше, чем на низких широтах. На всех широтах (особенно ярко для полей малой напряженности) проявляются квазидвухлетние (с периодом приблизительно 2.2 г.) колебания скорости изменения потока суммарного магнитного поля, что согласуется с теоретическими представлениями.

ЭВОЛЮЦИЯ ОБЛАСТЕЙ РОСТА ПОТОКА СУММАРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И СТАБИЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ СТРУКТУР ПОТОКА С ДОСТОВЕРНЫМИ ПЕРИОДАМИ

В работах [1, 4] оценено стационарное дифференциальное вращение фоновых магнитных полей на Солнце с применением методов спектрального анализа, среди которых наиболее эффективным для решения этой задачи оказался метод Уэлча [2, 3, 20]. При определении стационарного вращения магнитных полей на Солнце в каждом из семи интервалов модуля напряженности магнитного поля определялись статистически достоверные пики спектральной плотности мощности $PSD(H_k, \varphi_n, P)$ (P — период вращения), вычисленной по каждому из 28 временных рядов, и соответствующие этим пикам достоверные периоды вращения P_peak . На основании проведенного в работе [8] анализа широтного распределения указанных пиков выделены такие наиболее достоверные периоды вращения с некоторыми узкими интервалами их окрестностей, которые преобладают в более чем пяти пятиградусных широтных зонах во всех интервалах напряженности магнитного поля из диапазона $[0; 20]$ мТл:

$$\begin{aligned} P_1 &= 26.91 \pm 0.15 \text{ сут,} \\ P_2 &= 28.09 \pm 0.15 \text{ сут,} \\ P_3 &= 30.32 \pm 0.25 \text{ сут.} \end{aligned} \quad (3)$$

Для анализа широтно-временных изменений вращения фоновых магнитных полей разной напряженности N- и S-полярности скорости роста потока суммарного магнитного поля по аналогии с [5] к каждому из временных рядов (1) применялся спектральный анализ по методу Уэлча в скользящем временном окне шириной 1 год со сдвигом на полгода. На 26-летнем временном интервале наблюдений для рядов (1) было получено по 52 зависимости спектральной плотности мощности от напряженности H , времени t , широты φ , периода P на последовательных годичных интервалах, отстоящих друг от друга на полгода, и построены зависимости вида

$$PSD_Sum(H, t, \varphi, P) \quad (4)$$

на всем временном интервале наблюдений.

В указанных узких интервалах $[P_{LO}; P_{UP}]$ достоверных периодов вращения (3) с соответст-

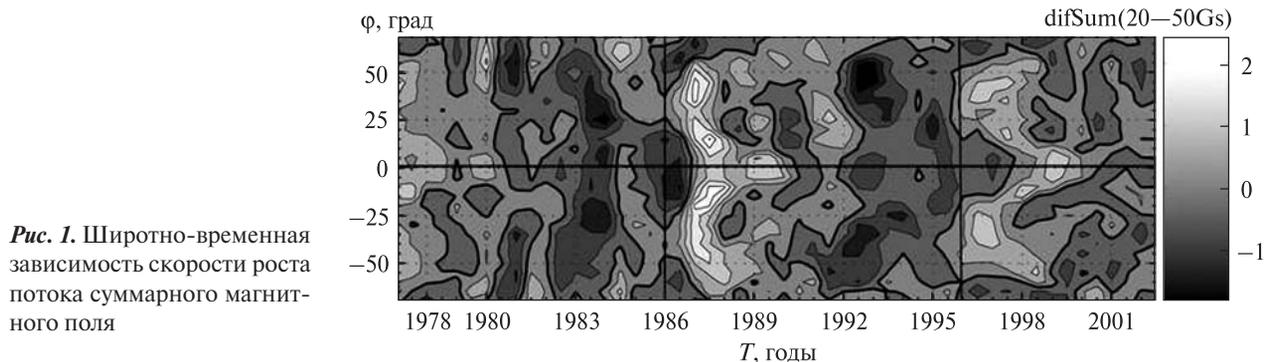


Рис. 1. Широтно-временная зависимость скорости роста потока суммарного магнитного поля

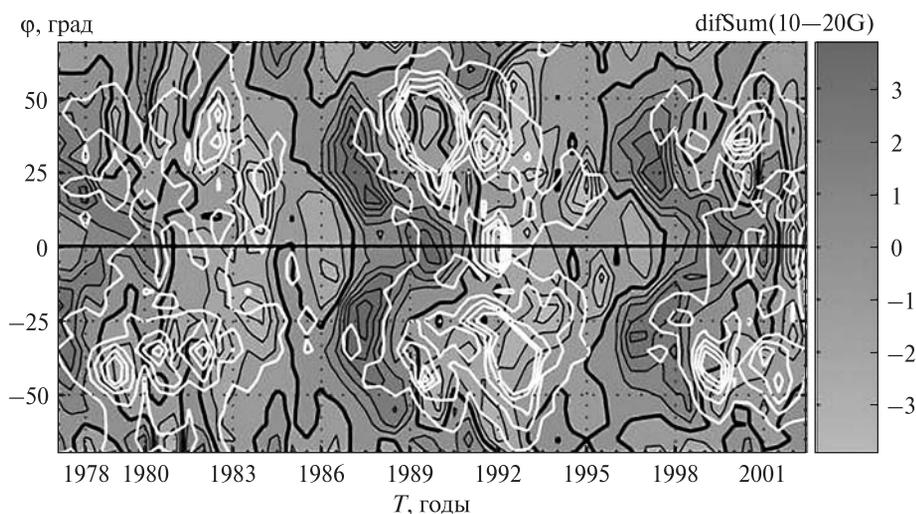


Рис. 2. Связь эволюции скорости роста потока суммарного магнитного поля со значимым вращением структур потока

вующими нижней P_{LO} и верхней P_{UP} границами по найденной зависимости (4) вычисляется так называемая суммарная мощность процесса (1)

$$S1_Sum(H, t, \varphi) = \sum_{P_{LO}}^{P_{UP}} PSD_Sum(H, t, \varphi, P) \quad (5)$$

для каждой широтной зоны во всех интервалах напряженности магнитного поля из диапазона [0; 20] мТл. $S1_Sum(H, t, \varphi)$ характеризует вращение структур потока суммарного магнитного поля с таким достоверным периодом из (4), в окрестности $[P_{LO}; P_{UP}]$ которого она вычисляется.

Для установления картины эволюции структур потока суммарного магнитного поля, обладающих значимыми периодами вращения, были построены широтно-временные зависимости суммарной мощности $S1_Sum(H, t, \varphi)$, вычисленной в соответствии с (5). В виде белых жирных изолиний указанные зависимости $S1_Sum(H, t, \varphi)$ были представлены на фоне аналогичных карт

широтно-временного распределения скорости роста потока суммарного магнитного поля на интервале наблюдений 26 лет, построенных на основании временных рядов (2). На рис. 2 приведен результат такого наложения для интервала напряженности магнитного поля [1; 2] мТл. Фоновое изображение представляет эволюцию областей роста потока суммарного магнитного поля, черные жирные кривые отмечают «нулевые» изолинии перемены знака скорости роста с отрицательной на положительную, а белые жирные изолинии характеризуют вращение структур потока суммарного магнитного поля с достоверным периодом $P_1 = 26.91 \pm 0.15$ сут.

Анализ зависимостей, подобных отображенным на рис. 2, во всех интервалах напряженности из диапазона [0; 20] мТл показывает, что стабильное вращение структур потока суммарного магнитного поля (максимумы в белых жирных изолиниях) имеет место в моменты времени и на широтах на-

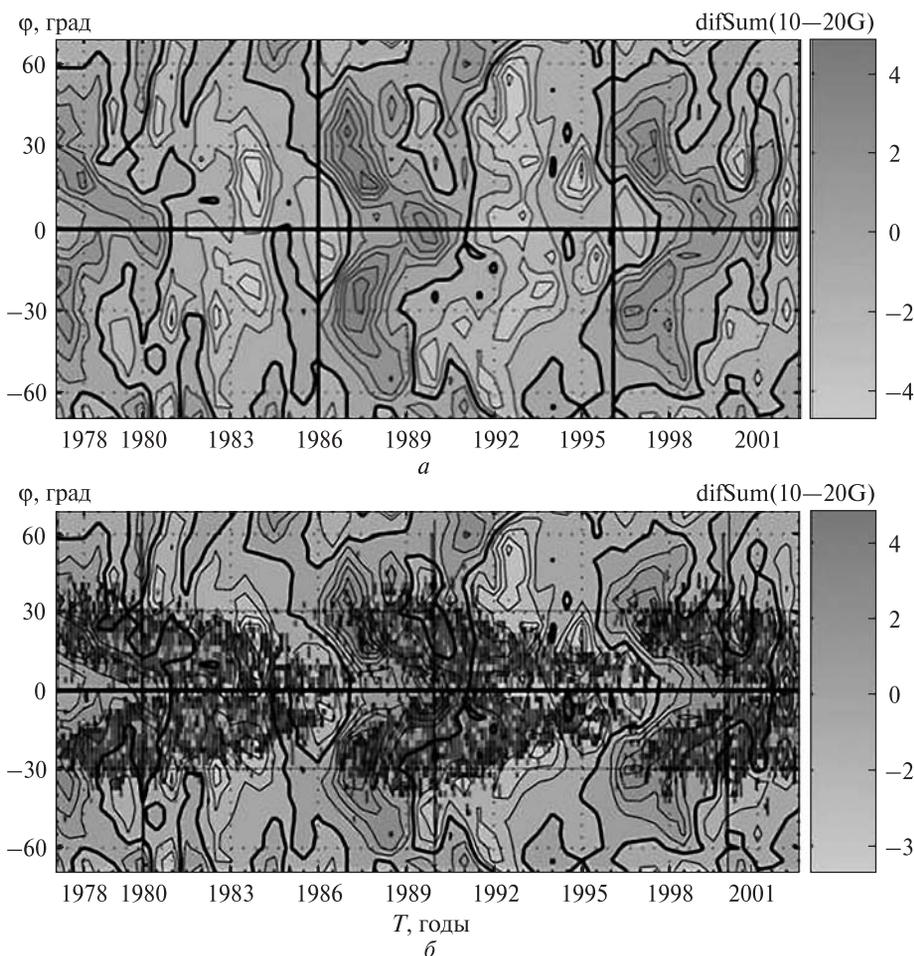


Рис. 3. Сравнение широтно-временной зависимости роста потока суммарного магнитного поля с аналогичной зависимостью площадей солнечных пятен

ибольшего убывания скорости роста этого потока (светло-серые участки в фоновом изображении).

СРАВНЕНИЕ ШИРОТНО-ВРЕМЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ РОСТА ПОТОКА СУММАРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ЭВОЛЮЦИЕЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В ТРЕХ ЦИКЛАХ

Широтно-временные зависимости роста потока суммарного магнитного поля на 26-летнем интервале наблюдений во всех интервалах напряженности магнитного поля из диапазона [0; 20] мТл были сравнены с аналогичной зависимостью площадей солнечных пятен. Результаты сравнения представлены на рис. 3. На рис. 3, а представлена широтно-временная зависимость скорости роста потока суммарного магнитного поля. На рис. 3, б на эту зависимость наложена широтно-временная зависимость площадей солнечных пя-

тен на 26-летнем интервале наблюдений, взятая из сайта <http://solarscience.msfc.nasa.gov>.

Анализ зависимостей, отображенных рис. 3, позволяет сделать следующие выводы.

- Линия перемены знаков скорости роста потока суммарного магнитного поля от «-» к «+» скорости — «нулевая» (черная) изолиния проходит в каждом из трех циклов активности в конце цикла на широтах 20—25° при значительном количестве пятен.
- Точки максимального роста (максимумы в изолиниях фонового изображения) и области значительного роста (ограниченные изолиниями высокого уровня) потока суммарного магнитного поля на всех широтах примыкают к областям появления пятен нового цикла.
- С течением времени увеличению площадей пятен соответствует спад скорости роста потока

суммарного магнитного поля, а далее — убывание (отрицательная скорость роста) потока суммарного магнитного поля слабой напряженности в диапазоне [0; 20] мТл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе обработки данных наблюдений исследована эволюция в течение трех солнечных циклов крупномасштабных магнитных полей на Солнце и установлен обобщенный сценарий эволюции солнечных циклов слабых фотосферных и сильных (в активных областях) полей. Полученные результаты свидетельствуют, что наряду с существенными различиями в эволюции слабых и сильных магнитных полей на Солнце, исследованными, в частности, в цикле работ [1, 4—8, 12, 13, 21], имеет место и тесная связь их поведения в выделенных интервалах напряженности, если в качестве характеристики для сравнения рассматривать скорость роста суммарного потока поля. Проблема исследования факторов этой связи является предметом отдельного научного исследования.

1. Андреева О. А., Зельк Я. И., Степанян Н. Н. Дифференциальное вращение солнечных магнитных полей // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2008. — **104**, № 1. — С. 5—12.
2. Бендат Дж., Пирсол А. Применения корреляционного и спектрального анализа. — М: Мир, 1983. — 312 с.
3. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. — М: Мир, 1989. — 540 с.
4. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. Связь дифференциального вращения магнитных полей на Солнце со знаком и величиной напряженности поля // Пробл. управления и информатики. — 2008. — № 6. — С. 116—132.
5. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. Широтно-временные изменения вращения солнечных структур в трех циклах активности Солнца // Пробл. управления и информатики. — 2008. — № 1. — С. 139—146.
6. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. Корреляционные и спектральные методы оценивания широтного дрейфа солнечных магнитных полей // Управляющие системы и машины. — 2009. — № 3. — С. 30—35.
7. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. Широтный дрейф дисбаланса солнечных магнитных полей // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2009. — **105**, № 1. — С. 18—32.
8. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. Оценивание широтного дрейфа и дифференциального вращения потока дисбаланса магнитных полей на Солн-

- це по данным наблюдений // Пробл. управления и информатики. — 2010. — № 2. — С. 144—156.
9. Северный А. Б. О природе магнитных полей на Солнце // Астрон. журн. — 1965. — 42, № 2. — С. 217—231.
 10. Северный А. Б. Исследование общего магнитного поля Солнца // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 1966. — **35**. — С. 97—138.
 11. Северный А. Б. Магнитная асимметрия и колебания общего магнитного поля Солнца // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 1968. — **38**. — С. 3—51.
 12. Степанян Н. Н., Андреева О. А., Зельк Я. И. Дисбаланс магнитных полей на Солнце // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2009. — **105**, № 1. — С. 5—17.
 13. Andryeyeva O. A., Stepanian N. N. Background magnetic fields during last 3 cycles of solar activity // Astron. Nachr. — 2008. — **329**, N 6. — P. 579—582.
 14. Babcock H. D., Babcock H. W. The Sun's magnetic fields, 1952—1954 // Astrophys. J. — 1955. — **121**. — P. 349—366.
 15. Babcock H. W. The topology of the Sun's magnetic field and the 22-year cycle // Astrophys. J. — 1961. — **133**. — P. 572—587.
 16. Severny A. Solar magnetic fields // Space Sci. Revs. — 1964. — **3**. — P. 451—486.
 17. Severny A. Solar Magnetic Fields // XII General Assembly IAU. Hamburg, 26 Aug., 1964. — Hamburg, 1964. — P. 755—773.
 18. Severny A. B. Is the Sun a magnetic rotator? // Nature. — 1969. — **224**, N 5214. — P. 53—54.
 19. Severny A. B. Time fluctuation of the general magnetic field of the Sun // Quart. J. Roy. Astron. Soc. — 1971. — **12**, N 4. — P. 363—379.
 20. 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. — 1967. — **AU-15**. — P. 70—73.
 21. Zyelyk Ya. I. Correlation and Spectral Models in Stationary Estimation Problems of the Differential Rotation and the Latitudinal Drift of the Magnetic Fields on the Sun // Proceedings of the 2nd International conference on inductive modeling (ICIM 2008) (Kyiv, September 15—19, 2008). — Kyiv, 2008. — P. 267—273.

Надійшла до редакції 01.10.11

Ya. I. Zyelyk, N. N. Stepanian, O. A. Andryeyeva

GENERALIZED SCENARIO FOR THE EVOLUTION OF SOLAR CYCLES OF WEAK PHOTOSPHERIC AND STRONG MAGNETIC FIELDS

Based on observational data, the evolution of large-scale solar magnetic fields is studied over three solar cycles and the generalized scenario of the change for solar cycles of weak photospheric and strong (in active regions) fields is determined. It is found that, along with significant differences in the evolution of weak and strong magnetic fields, there is a close relation between their behaviors in the selected strength intervals, when the growth rate of the total field flux is considered as a characteristic for the comparison.