

УДК-523.9-337

У. М. Лейко

Астрономическая обсерватория
Киевского национального университета им. Тараса Шевченко
ул. Обсерваторная 3, Киев, 04053
leiko@observ.univ.kiev.ua

О цикличности магнитных полей Солнца в 21—23-м циклах

Цикличность слабой локальной и сильной крупномасштабной составляющих низкоширотного магнитного поля Солнца в течение последних трех циклов активности исследована по среднемесячным характеристикам суммарной площади пятен и общего магнитного поля Солнца как звезды. На фазе роста активности обнаружено локальное понижение магнитного потока обеих составляющих низкоширотного магнитного поля. По времени этот провал совпадает с интервалами «монопольности» полярного поля Солнца.

ПРО ЦИКЛІЧНІСТЬ МАГНІТНІХ ПОЛІВ СОНЦЯ В 21—23-м ЦИКЛАХ, Лейко У. М. — Циклічність слабкої локальної і сильної великомасштабної складових низькоширотного магнітного поля Сонця впродовж останніх трьох циклів активності досліджено за середньомісячними характеристиками сумарної площі плям і загального магнітного поля Сонця як зірки. На фазі росту активності виявлено локальне зниження магнітного потоку обох складових низькоширотного магнітного поля. В часі цей провал збігається з інтервалами «монопольності» полярного поля Сонця.

ON CYCLICITY OF SOLAR MAGNETIC FIELDS DURING CYCLES 21—23, by Leiko U. M. — The cyclicity of weak local and strong large-scale components of low-altitude solar magnetic field during last three cycles of solar activity is investigated. For this average monthly values for the total square of sunspots and for the mean magnetic field of the Sun as a star are used. A local decrease in the magnetic flow of both components during

the phase of the activity growth is discovered. The decrease agrees closely with intervals of "monopole" of the polar magnetic field of the Sun.

ВВЕДЕНИЕ

В результате многочисленных исследований цикличности солнечной активности (с. а.) на сегодняшний день сформировалось мнение, что солнечный цикл можно описать как сложное взаимодействие двух систем солнечных полей: сильных локальных и слабых крупномасштабных [11, 16].

В связи с аномальностью 23-го цикла, понижением общего уровня солнечной активности и ожиданием долговременного минимума с. а. возрос интерес к особенностям эволюции солнечных магнитных полей. Исследование конфигурации и суммарного магнитного потока фотосферного магнитного поля Солнца [2] обнаружило существенные отличия в протекании минимумов перед 23-м и 24-м циклами с. а. и подтвердило долговременную тенденцию понижения солнечной активности. В работе [16] было показано, что постепенное уменьшение напряженности полярного магнитного поля в течение последних трех циклов обусловлено увеличением момента магнитного диполя. Изучение особенностей цикличности солнечных магнитных полей актуально, поскольку они являются первопричиной многих явлений с. а.

Цель представленного исследования — сделать сравнительный анализ цикличности сильной и слабой составляющих магнитного поля Солнца за последние три цикла.

Для анализа нами были выбраны индексы, характеризующие магнитный поток слабой крупномасштабной и сильной локальной составляющих магнитного поля Солнца. Это временные ряды общего магнитного поля Солнца как звезды (ОМПС) и суммарной среднемесячной площади солнечных пятен (Sq).

Солнечные пятна являются наиболее ярким проявлением магнитных локальных полей. Суммарная по диску площадь пятен пропорциональна полному магнитному потоку пятен [8] и из наблюдений изменения этого индекса можно получить оценку магнитного потока сильной локальной составляющей.

Общее магнитное поле Солнца пропорционально разности потоков низкоширотных фотосферных магнитных полей противоположной полярности [4, 5, 7, 13, 14]. Следовательно, вариации ОМПС обусловлены пространственно-временной организацией низкоширотных крупномасштабных магнитных полей Солнца.

В представленном исследовании проанализированы циклические вариации среднемесячных характеристик этих индексов за последние три цикла. Подтверждена долговременная тенденция понижения с. а. Показано, что обе составляющие магнитного поля Солнца ослабевают в период так называемой «монополярности» Солнца.

ДААННЫЕ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Для исследования мы использовали однородный станфордский ряд суточных измерений ОМПС [<http://wso.stanford.edu/>] и гринвичские ряды среднемесячных значений суммарной площади пятен и относительных чисел солнечных пятен (чисел Вольфа) [<http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/>].

Индексы среднемесячных значений площади пятен и чисел Вольфа всем хорошо знакомы. Преимуществом ряда суммарной площади пятен является его длительность и внутренняя однородность [8, 11, 12].

Общее магнитное поле Солнца измеряется магнитографом в интегральном пучке света видимого диска Солнца и определяется как свертка распределения по диску Солнца продольной составляющей поверхностного магнитного поля с весовой функцией магнитографа. Подробности магнитографических наблюдений ОМПС изложены в различных работах [4, 5, 7, 13, 14]. По сути сигнал магнитографа пропорционален разности магнитных полей положительной и отрицательной полярностей (разбаланс, асимметрия) фотосферных магнитных полей. При этом определяющую роль в формировании сигнала магнитографа играет площадь фотосферных полей, их топология [5]. При наблюдении ОМПС ставится задача получить одно среднее значение B за сутки. Магнитографические измерения ОМПС проводились в четырех обсерваториях. С 1992 г. измерения ОМПС начали проводиться на станции Сазерленд Южно-африканской обсерватории группой BiSON [15]. Полученный в Сазерленде ряд ОМПС хорошо коррелирует со станфордским рядом ОМПС, однако измеренные в Сазерленде значения ОМПС почти в два раза отличаются от станфордских.

Вариации суточных значений B общего магнитного поля Солнца, полученных в Станфордской обсерватории [13], приведены на рис. 1. Измеренные значения B довольно низкие — от 10 мкТл в минимуме активности до 200 мкТл в максимуме. Следовательно, асимметрия низкоширотных крупномасштабных магнитных полей максимальна в эпохи высокой с.а., также, как и асимметрия сильных локальных полей [17].

Станфордский ряд измерений ОМПС на интервале наблюдений 15.05.1975 — 31.12.2010 гг. имеет длину $N = 13014$, из них пропусков наблюдений $N_{mis} = 2449$ (18.8 % от общей длины ряда). Как видно из рис. 1 (внизу), количество пропусков наблюдений в некоторые месяцы было около 20, что обусловлено в основном метеорологическими условиями. Поэтому возникает проблема заполнения пропусков наблюдений. Есть разные подходы к решению этой проблемы: интерполяция, привлечение наблюдений других обсерваторий, присвоение нулевых значений B ОМПС в даты пропусков наблюдений [4, 6, 7].

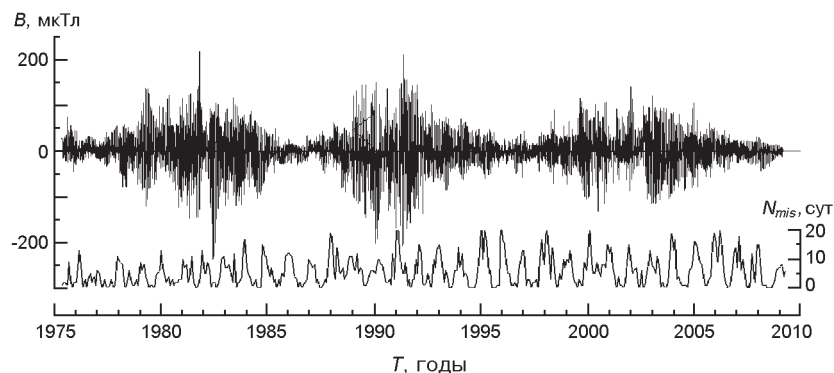


Рис. 1. Вариации суточных значений общего магнитного поля Солнца, измеренных в Стэнфордской обсерватории и количества N_{mis} месячных пропусков наблюдений

При формировании среднемесячных рядов B и модуля $|B|$ общего магнитного поля Солнца нами было рассмотрено два случая: 1) неравномерный ряд, даты пропусков наблюдений не учитывались; 2) равномерный ряд, полученный посредством заполнения значений ОМПС пропущенных дат наблюдений значениями ОМПС в предыдущем обороте. Коэффициенты корреляции между значениями поля ОМПС на i -м обороте и значениями на $i-27$, $i-28$, $i-29$, $i-2$ -м оборотах соответственно равны 0.66, 0.63, 0.53, 0.57. Мы руководствовались известным фактом наличия в спектре B общего магнитного поля Солнца мощной группы пиков в области периодов вращения, обусловленной рекуррентностью и когерентностью крупномасштабных магнитных структур [6, 7].

Из ряда суточных значений ОМПС были сформированы суммарные месячные и среднемесячные ряды B , модуля $|B|$, суммарные месячные ряды положительной ($+B$) и отрицательной ($-B$) составляющих ОМПС, количества пропусков наблюдений N_{mis} . При формировании среднемесячных рядов в случае неравномерного ряда привнеслось во внимание количество наблюдений в данном месяце.

Сравнение среднемесячных значений B и модуля $|B|$ общего магнитного поля Солнца для равномерного и неравномерного рядов (рис. 2) показывает, что значение модуля $|B|$ почти одинаково для равномерного и неравномерного рядов. Несколько худшее согласие наблюдается для значений B общего магнитного поля Солнца. Очевидно, пропуски наблюдений не имеют существенного влияния на среднемесячные характеристики ОМПС. В дальнейших выкладках использованы среднемесячные характеристики, полученные по равномерному ряду ОМПС.

Исследование различных индексов солнечной активности по однотипной методике и дальнейшее сопоставление результатов анализа используется часто. Такая методика была применена в работе [1] при

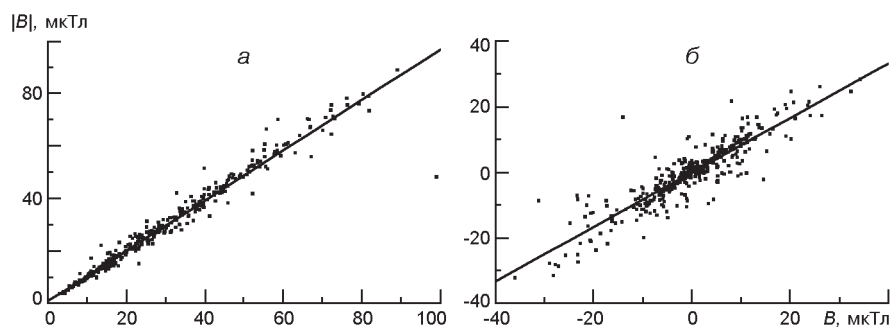


Рис. 2. Коррелятивная зависимость среднемесячных значений $|B|$ и B для равномерного (а) и неравномерного (б) рядов общего магнитного поля Солнца

исследовании северо-южной асимметрии солнечной активности, где в качестве исследуемых индексов были взяты яркость зеленой линии короны, числа Вольфа и полный магнитный поток. Как указано в работе [1], такая методика позволила сопоставить результаты анализа, относящиеся к объектам, которые возникают в результате совершенно различных механизмов взаимодействия магнитного поля с веществом.

Такая же методика была применена и нами. Временные ряды ОМПС, чисел Вольфа, суммарной по диску Солнца площади пятен были сглажены по тринадцати точкам, и проведен сравнительный анализ полученных циклических кривых.

ОСОБЕННОСТИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Вариации ОМПС можно исследовать двумя способами, анализируя изменение B и модуля $|B|$ общего магнитного поля Солнца. Графики среднемесячных значений этих величин приведены на рис. 3, суточных значений ОМПС — на рис. 1.

Качественный анализ модулированных 11-летним циклом кривых суточных и среднемесячных значений B общего магнитного поля Солнца показывает, что последний 23-й цикл отличается от двух предыдущих как по мощности, так и по длительности: 23-й цикл менее мощный и более длительный, чем предшествующие. Более низкие значения B общего магнитного поля Солнца в 23-м цикле также указывают на то, что асимметрия крупномасштабных фотосферных полей в этом цикле ниже, чем в предыдущих циклах (асимметрия магнитных полей пропорциональна уровню с. а.).

Циклические изменения B общего магнитного поля Солнца (согласно сглаженной по тринадцати точкам кривой на рис. 3) происходят следующим образом. В 21-м цикле наблюдается чередование интервалов преобладания то положительной, то отрицательной полярности ОМПС, в 22-м цикле преобладает отрицательная полярность

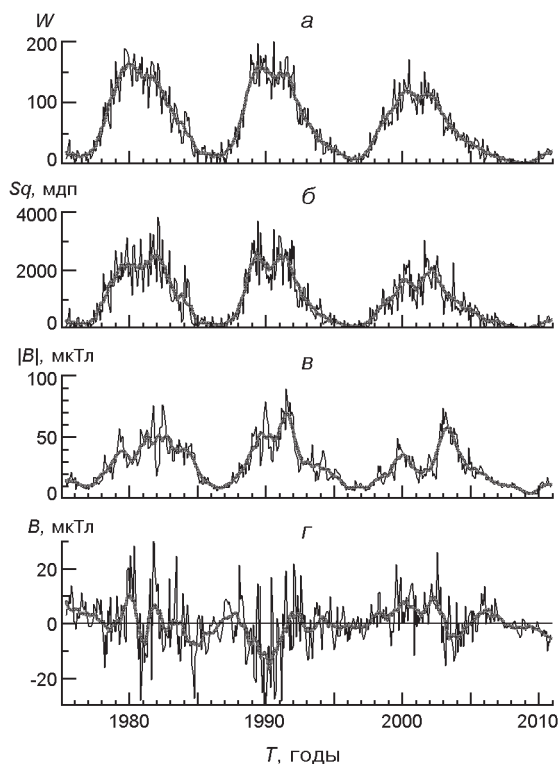


Рис. 3. Вариации среднемесячных значений чисел Вольфа W , суммарной площади пятен Sq , модуля $|B|$ и B ОМПС в 21—23-м циклах. Жирные линии получены в результате сглаживания по 13 точкам

ОМПС, в 23-м цикле ОМПС в основном положительно. О тенденции преобладания одной из полярностей по циклам нельзя сделать вывод из-за недостаточной длины интервала наблюдений ОМПС. Спектры в области периодов вращения, которые также определенным образом характеризуют топологию поверхностных магнитных полей, также имеют различную по циклам структуру [6].

Модуль $|B|$ общего магнитного поля Солнца характеризует только величину асимметрии фотосферных полей и не учитывает ее знака. Как уже упоминалось, величина асимметрии зависит от уровня активности, и следовательно, подвержена 11-летней цикличности.

Циклические изменения модуля $|B|$ общего магнитного поля Солнца подобны циклическим изменениям чисел Вольфа W и суммарной по диску площади пятен Sq (две верхние панели рис. 4). Как уже упоминалось выше, эти два индекса косвенно характеризуют магнитный поток слабой локальной составляющей магнитного поля Солнца. Однако, как было показано в работе [8], площадь пятен является более физическим параметром, чем числа Вольфа, и по суммарной площади пятен можно достаточно хорошо оценивать магнитный поток сильной локальной составляющей низкоширотного маг-

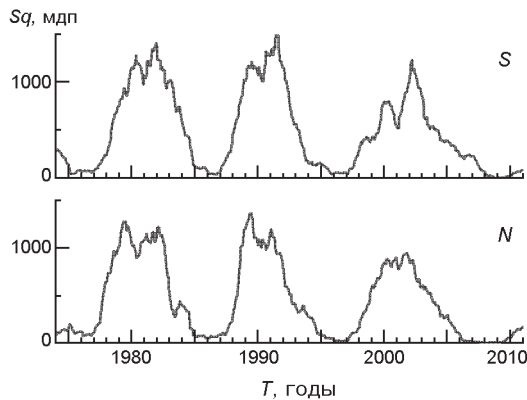


Рис. 4. Вариации среднемесячных значений чисел суммарной площади пятен Sq для северного (N) и южного (S) полушарий в 21—23-м циклах

Таблица 1. Эпохи минимумов и длительность циклов активности по различным индексам (в годах)

Цикл	$ B $ ОМПС		Sq		W	
21	1976.8–1986.6	9.8	1976.2–1986.2	10.0	1976.2–1986.2	10
22	1986.6–1995.9	9.3	1986.2–1996.6	10.4	1986.2–1996.6	10.4
23	1995.9–2009.4	13.5	1996.6–2008.8	12.2	1996.6–2009.1	12.5

нитного поля Солнца. Это заключение подтверждается данными других исследований [12].

Три циклические кривые на рис. 3 имеют большую степень подобия. Определения положений минимумов этих кривых показали, что минимумы после 21-го и 23-го циклов модуля $|B|$ общего магнитного поля Солнца наступают позже, чем минимумы чисел Вольфа W и суммарной площади пятен Sq (табл. 1), после 22-го цикла — наоборот. Подчеркнем, что минимумы определены по сглаженным циклическим кривым и могут отличаться от физического начала цикла (появления высокоширотных пятен нового цикла). Также различна длительность циклов, определенная по этим циклическим кривым. 21-й и 22-й циклы активности сильных локальных полей длительней, чем циклы слабых крупномасштабных. В 23-м цикле наблюдается противоположная картина.

Общим свойством трех сглаженных циклических кривых являются провалы вблизи максимумов активности (локальные понижения активности). Однако провалы на циклических кривых $|B|$ общего магнитного поля Солнца и Sq наблюдаются на фазе увеличения активности, а на циклической кривой W — на фазе спада. Моменты первого максимума, локального минимума и второго максимума для исследуемых индексов приведены в табл. 2. Видно, что моменты первого максимума Sq совпадают с моментом достижения максимального значения чисел Вольфа W , а моменты максимального значения Sq совпадают с моментом второго максимума на фазе спада чисел Вольфа W .

Таблица 2. Моменты начала, минимума и конца провалов на сглаженных циклических кривых среднемесячных значений чисел Вольфа W , суммарной площади пятен Sq и модуля $|B|$ ОМПС и интервалы «монопольности» Солнца

Цикл	W	Sq	$ B $ ОМПС	Интервал «монопольности» Солнца
21	1979.9	1979.9	1979.6	« » 1979.9-1981.6
	1981.0	1980.9	1980.3	
	1981.2	1982.0	1981.3	
22	1989.4	1989.4	1989.6	«+» 1990.05—1991.25
	1990.8	1990.3	1990.6	
	1991.1	1991.1	1991.5	
23	2000.3	2000.3	2000.1	« » 1999.85—2001.9
	2001.1	2001.1	2001.3	
	2000.8	2002.2	2003.3	

Различие характера цикличности Sq и W легко объясняется. Известно, что разные индексы активности имеют разный физический смысл и освещают различные стороны солнечной активности. В последнее время идет дискуссия о надежности тех или иных индексов, о их физичности и целесообразности использования при определенных исследованиях солнечной активности. Например, было показано, что число Вольфа, число групп пятен и суммарная по диску площадь пятен не являются идентичными индексами [8, 11, 12]. Указанные индексы представляют физически различающиеся характеристики процесса пятнообразования. Взаимосвязь между этими индексами была исследована в работе [12]. По мнению многих исследователей наиболее физичным индексом является суммарная площадь пятен, которая пропорциональна магнитному потоку.

Локальный минимум (имеющий название провала Гневышева) вблизи фазы максимума с.а. наблюдается во многих индексах. Его природа пока не ясна. Провал Гневышева вблизи максимума цикла был обнаружен на циклических кривых интегральных индексов фото-сферного магнитного поля [9].

Можно предположить, что двухвершинность циклических кривых для Sq и W может быть обусловлена северо-южной асимметрией активности — эпохи максимумов активности различны в северном и южном полушариях. Однако это не так. Двухвершинность имеют сглаженные циклические кривые Sq и W как для северного, так и южного полушарий (рис. 4). Юго-северная асимметрия проявляется в различном по полушариям характере этой двухвершинности. На наличие двух вершин на циклических кривых для отдельных полушарий указывалось уже давно [2]. Однако также отмечалось, что это явление наблюдается не во всех циклах. Двухвершинность циклических кривых для северного и южного полушарий суммарной площади пятен Sq

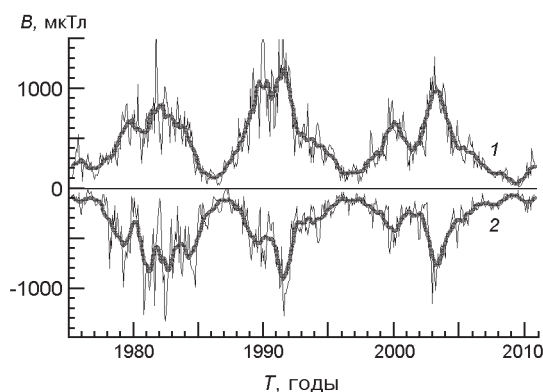


Рис. 5. Вариации среднемесячных значений положительной и отрицательной составляющих модуля $|B|$ ОМПС и в 21—23-м циклах

имеет различный характер. Провал на фазе роста наблюдается только на циклической кривой южного полушария, на фазе спада — для северного полушария.

Двухвершинность имеют также сглаженные циклические кривые положительной и отрицательной составляющих $|B|$ общего магнитного поля Солнца (рис. 5).

На циклических кривых как положительной так и отрицательной составляющих $|B|$ общего магнитного поля Солнца провалы наблюдаются на фазе роста. Асимметрия циклических кривых положительной и отрицательной составляющих $|B|$ общего магнитного поля Солнца наиболее сильно выражена в 21-м цикле, в меньшей степени — в 22-м цикле и почти отсутствует в 23-м цикле.

Известно, что активность высокоширотного и низкоширотного магнитных полей развивается в противофазе. Переполюсовка полярного магнитного поля в северном и южном полушариях происходит не одновременно [10]. Поэтому некоторое время высокоширотное поле в обоих полушариях имеет одинаковую полярность, т. е. имеет место так называемая «монопольность» Солнца. В последней графе табл. 2 приводятся интервалы «монопольности» Солнца в 21—23-м циклах.

Видно, что интервалы пониженной активности на всех трех циклических кривых совпадают с интервалами «монопольности» Солнца.

Таким образом, несмотря на то что активность высокоширотного и низкоширотного магнитных полей происходит в противофазе, есть промежуток времени, когда изменение топологии высокоширотного и низкоширотного магнитных полей происходит синхронно.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведен сравнительный анализ цикличности индексов, дающих оценку изменения площади и магнитного потока слабой и сильной составляющих низкоширотного магнитного поля — суммарной среднемесячной площади пятен, среднемесячного числа Вольфа и общего магнитного поля Солнца как звезды.

Подтверждена аномальность последнего 23-го цикла: по времени он длительней двух предыдущих циклов, по мощности — слабее для всех исследуемых индексов.

Обнаружены некоторые детали цикличности этих индексов. Интересным моментом цикличности исследуемых индексов оказался провал на фазе роста сглаженных циклических кривых суммарной площади пятен Sq и модуля $|B|$ общего магнитного поля Солнца и на фазе спада чисел Вольфа W .

Различный характер циклических кривых Sq и W в эпоху высокого уровня активности подтверждает выводы о том, что эти индексы представляют физически различающиеся характеристики процесса пятнообразования [8, 11, 12].

Провал на циклической кривой модуля $|B|$ общего магнитного поля Солнца указывает на понижение асимметрии крупномасштабных низкоширотных магнитных полей, и следовательно, на изменение их площади, топологии, магнитного потока.

Провал на циклической кривой площади пятен Sq также указывает на понижение магнитного потока сильной локальной составляющей низкоширотного магнитного поля.

Такой провал обнаруживается и в других индексах солнечной активности [9], природа его не ясна.

Синхронное понижение магнитного потока слабой и сильной составляющих низкоширотного магнитного поля в эпоху «монопольности» высокоширотного магнитного поля — интересная деталь солнечного магнетизма и его цикличности.

1. Бадалян О. Г., Обридко В. Н., Рыбак Я., Сикора Ю. Северо-южная асимметрия солнечной активности и ее квазидвухлетние вариации // *Астрон. журн.*—2005.—**2**, № 8.—С. 740—752.
2. Витинский Ю. И., Копецкий М., Куклин Г. В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. — М: Наука, 1986.—296 с.
3. Иванов К. Г., Харшиладзе А. Ф. Начало нового, 24-го, цикла солнечной активности в крупномасштабном открытом магнитном поле Солнца // *Геомагнетизм и аэрномия.*—2008.—**48**, № 3.—С. 291—296.
4. Котов В. А. Сорок лет измерений общего магнитного поля Солнца. Взгляд из сегодня // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.*—2009.—**75**, № 1.—С. 75—90.
5. Котов В. А., Степанян Н. Н., Щербакова З. А. Роль фонового магнитного поля и полей активных областей в общем магнитном поле Солнца // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.*—1977.—**56**.—С. 75—83.
6. Лейко У. М. Аналіз спектрів потужності загального магнітного поля Сонця на різних фазах циклу активності // *Вісн. Київ. ун-та. Сер. Астрономія.*—2001.—№ 37.—С. 29—37.
7. Мордвинов А. В., Плюснина Л. А. Когерентные структуры в динамике крупномасштабного магнитного поля Солнца // *Астрон. журн.*—2001.—**78**, № 8.—С. 753—760.
8. Наговицын Ю. А. К описанию долговременных вариаций магнитного потока Солнца: индекс площадей пятен // *Письма в астрон. журн.*—2005.—**31**, № 8.—С. 622—627.

9. *Обридко В. Н., Шелтинг Б. Д.* Глобальная магнитология и опорные точки солнечного цикла // *Астрон. журн.*—2003.—**80**, № 11.—С. 1034—1045.
10. *Пишкало М. І., Бабій В. П., Іванчук В. Г.* Північно-південна асиметрія сонячної активності та переполюсовки глобального магнітного поля Сонця у 21—23 циклах активності // *Вісн. Київ. ун-та. Сер. Астрономія.*—2005.— № 41—42.— С. 86—90.
11. *Рощина Е. М., Сарычев А. П.* Ритм физических циклов пятнообразования на Солнце // *Астрон. вестник.*—2010.—**44**, № 1.—С. 88—92.
12. *Сарычев А. П., Рощина Е. М.* Сравнение трех индексов солнечной активности, основанной на наблюдениях пятен // *Астрон. вестник.*—2009.—**43**, № 2.— С. 160—166.
13. *Scherrer P. H., Wilcox J. M., Svalgaard L., et al.* The mean magnetic field of the Sun: observations at Stanford // *Solar Phys.*—1977.—**54**, N 1.—P. 353—361.
14. *Severny A. B.* The polar fields and time fluctuations of the general magnetic field of the Sun // *Solar magnetic fields: Proc. IAU Symposium N 43.* — Dordrecht, 1971.— P. 675—695.
15. *Chaplin W. J., Dumbill A. M., Elsworth Y., et al.* Studies of the solar mean magnetic field with the Birmingham Solar-Oscillations Network (BiSON) // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2003.—**343**.—P. 813—818.
16. *Обридко В. Н., Шелтинг Б. Д.* Anomaly in the evolution of global and large-scale solar magnetic fields as the precursor of several upcoming low solar cycle // *Astron. Lett.*—2009.—**35**, N 4.—P. 279—285.
17. *Temmer M., Rybak J., Bendik P., et al.* Hemispheric sunspot numbers Rn and Rs from 1945—2004: catalogue and N-S asymmetry analysis for solar cycle 18—23 // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**447**.—P. 735—743.

Поступила в редакцию 15.04.11