

УДК 523.745

У. М. Лейко

Астрономическая обсерватория Национального университета им. Тараса Шевченко
04053, Киев, ул. Обсерваторная, 3

Общее магнитное поле Солнца и магнитная асимметрия

Представлен анализ спектров мощности как полного временного ряда общего магнитного поля Солнца (ОМПС), так и его $N(+)$ - и $S(-)$ -компонентов для 21-го и 22-го циклов (по магнитографическим измерениям в Станфорде) в четырех частотных диапазонах (3—10, 13—15, 26—30, >100 сут). Раздельное изучение спектров $N(+)$ - и $S(-)$ -компонентов ОМПС дает более детальную картину пространственно-временной организации крупномасштабных магнитных полей на временном масштабе в один цикл, а также внутри циклов. Значительное различие структуры спектров мощности ОМПС исследуемых циклов указывает на различную по циклам пространственно-временную организацию крупномасштабных магнитных структур. Обнаруженное различие структуры спектров $N(+)$ - и $S(-)$ -компонентов внутри циклов отражает характер магнитной асимметрии.

ЗАГАЛЬНЕ МАГНІТНЕ ПОЛЕ СОНЦЯ І МАГНІТНА АСИМЕТРІЯ, Лейко У. М. — Приведено аналіз спектрів потужності як повного часового ряду загального магнітного поля Сонця (ЗМПС), так і його $N(+)$ - і $S(-)$ -компонентів для 21-го та 22-го циклів (за магнітографічними вимірами в Станфордї) в чотирьох частотних діапазонах (3—10, 13—15, 26—30, >100 діб). Окреме вивчення спектрів $N(+)$ - і $S(-)$ -компонентів ЗМПС дає детальнішу картину просторово-часової організації великомасштабних магнітних полів на часовому масштабі в один цикл, а також протягом циклів. Значна відмінність спектрів потужності ЗМПС досліджуваних циклів вказує на різну по циклах просторово-часову організацію великомасштабних магнітних структур. Відмінність спектрів $N(+)$ - і $S(-)$ -компонентів ЗМПС протягом циклу відображає характер магнітної асиметрії.

THE SOLAR MEAN MAGNETIC FIELD AND MAGNETIC ASYMMETRY, by Leiko U. M. — We analyze the power spectra of both the solar mean magnetic field (SMMF) time series (magnetograph measurements at Stanford, cycles 21 and 22) as well as the $N(+)$ and $S(-)$ components in the entire frequency range. Separate investigation of the $N(+)$ and $S(-)$ component spectra shows a detailed pattern of space-time organization of large-scale magnetic fields on the time scale of one cycle and within cycles. Significant

differences between the cycle power spectra point to variations in the magnetic structure space-time organization with cycle. The difference between the N(+) and S(-) component spectra within cycles defines the magnetic asymmetry.

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения магнитного поля Солнца как звезды или общего магнитного поля Солнца (ОМПС) были начаты по инициативе А. Б. Северного в Крымской астрофизической обсерватории в 1968 г. [13]. ОМПС представляет собой интегрированное по видимому диску Солнца значение продольного компонента поверхностного магнитного поля. Наибольший вклад в сигнал магнитографа при измерении ОМПС вносят большие участки слабого фотосферного (фонового) магнитного поля разного знака [6]. Позже такие наблюдения велись в обсерватории Маунт-Вилсон (1972—1982 гг.). В Станфорде измерения ОМПС начались в мае 1975 г. и ведутся в настоящее время.

По измерениям ОМПС в 1968—1969 гг. в КрАО определено два периода вращения 26.8 и 27.6 сут (по расстоянию между экстремумами ОМПС противоположного знака), которые А. Б. Северным интерпретированы как периоды вращения крупномасштабных магнитных структур N- и S-полярности [9]. Разница во вращении объяснялась или более быстрым вращением магнитных структур N-полярности, или их более близким расположением к экватору. В работе [9] А. Б. Северный подчеркнул желательность исследования дифференциального вращения фотосферного магнитного поля отдельно для каждой полярности. Обнаруженное в работе [5] более быстрое вращение магнитных структур в S-полушарии объяснялось предположением об их более близком расположении к экватору, чем магнитных структур в N-полушарии. Северо-южная асимметрия расположения зон концентрации магнитных полей была обнаружена при изучении вращения поверхностных крупномасштабных магнитных полей на протяжении 21-го цикла [12]. Существенная асимметрия поведения ОМПС возле границ «+»- и «-»-секторов ОМПС обнаружена в работе [4], где также сделана попытка объяснить появление периода 27.44 сут разностью скорости вращения магнитных структур N- и S-полярностей. В обзорной работе [3] указано, что одним из главных свойств ОМПС является магнитная асимметрия, которая проявляется в различном временном поведении и различной статистике элементов «+»- и «-»-полярности. Следует отметить, что кривая хода суточных значений ОМПС несимметрична относительно прямой с нулевым значением поля. Складывается впечатление, что временной ряд ОМП состоит из двух рядов с независимым внутренним поведением, которые поочередно сменяют друг друга, и стоило бы попытаться изучить их свойства отдельно.

Ниже предпринята попытка отдельно исследовать свойства структур разной полярности на протяжении двух циклов, а также на разных временных интервалах этих циклов по измерениям общего магнитного поля Солнца.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ОБРАБОТКА

Используется однородный ряд магнитографических измерений ОМПС, выполненных в Станфорде на протяжении 21-го и 22-го циклов. Пропуски наблюдений были устранены при помощи линейной интерполяции между крайними точками пропущенного интервала с учетом 27-дневных вариаций.

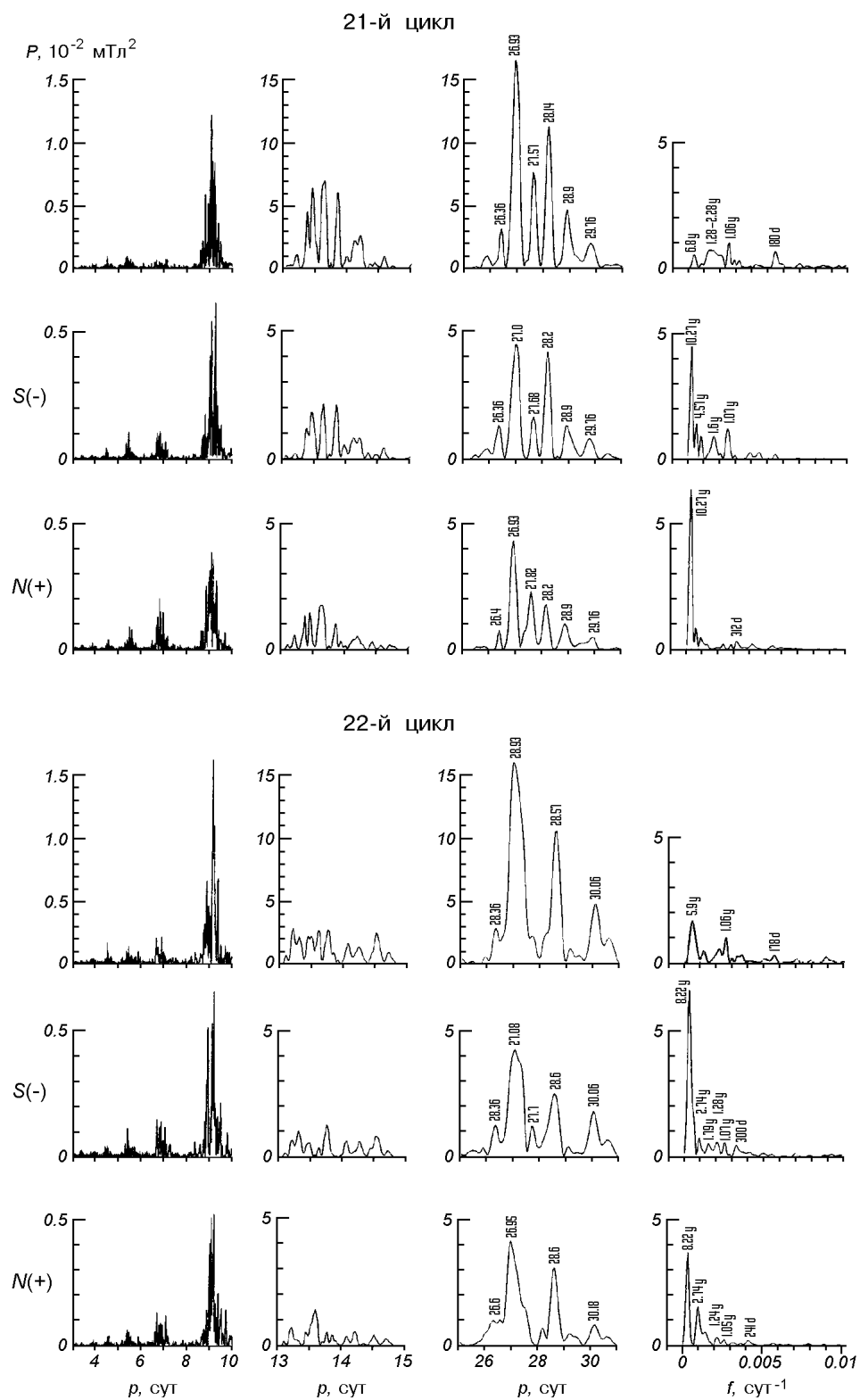


Рис. 1. Спектры мощности полного временного ряда ОМПС и временных рядов S(-) и N(+)-компонентов для 21-го и 22-го циклов в четырех частотных диапазонах

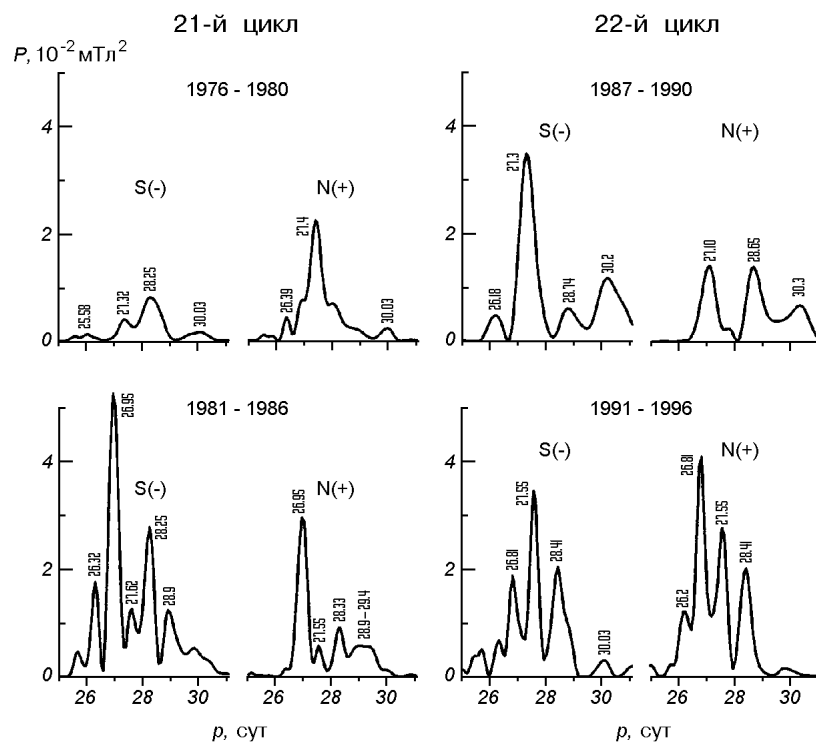


Рис. 2. Спектры мощности временных рядов S(-) и N(+)-компонентов ОМПС в области периодов вращения на фазах роста и спада 21-го и 22-го циклов

Из исходного временного ряда ОМП было образовано два временных ряда такой же длины. В одном из них остаются положительные значения измерений ОМПС (N(+)-компонент), отрицательные заменяются нулями, в другом оставлены отрицательные значения (S(-)-компонент), а положительные — обнулены. Для построенных таким образом временных рядов нами были получены и исследованы спектры мощности на всем частотном интервале отдельно для обоих циклов (рис. 1) и для разных фаз этих циклов (рис. 2), а также отдельно для каждого года.

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ

В области коротких периодов (порядка 3—30 сут) спектры мощности N(+)- и S(-)-компонентов, отличаясь некоторыми деталями, в целом схожи как между собой, так и со спектром мощности полного ряда. Они как бы дополняют друг друга. Сумма мощностей пиков с одним и тем же периодом в спектрах N(+)- и S(-)-компонентов приблизительно равна мощности пика с этим же значением периода в спектре полного ряда. Если в спектрах мощности N(+)- и S(-)-компонентов есть пики с разными значениями периода, в спектре полного ряда есть оба пика. В области длинных периодов (> 100 сут) такой схожести не наблюдается.

Область периодов вращения. Пики в области периодов вращения обусловлены наличием на Солнце дискретных широтных зон преимущественной концентрации магнитных полей [3]. Различное количество пиков в

области периодов вращения в спектрах мощности для разных циклов и отличие их формы и мощности свидетельствуют об изменении пространственно-временной организации крупно-масштабных магнитных структур от цикла к циклу. Различие между спектрами мощности N(+)- и S(-)-компонентов внутри циклов, особенно значительное для 21-го цикла, обусловлено различной пространственно-временной организацией крупномасштабных магнитных структур противоположного знака (магнитной асимметрией).

Выделяющийся мощный пик с периодом вращения 26.93 сут и плавное уменьшение мощности последующих пиков с увеличением значения периода в спектре мощности N(+)-компонента ОМПС для 21-го цикла указывают на дифференциальность вращения магнитных структур и сильную концентрацию магнитных полей этой полярности в широтной зоне, которая вращалась с периодом 26.93 сут. В спектре мощности S(-)-компонента ОМПС выделяются два почти равные по мощности пика со значениями периодов 27.0 и 28.2 сут. Поскольку с увеличением широты сигнал магнитографа становится слабее, то большая мощность второго пика указывает на преимущественную концентрацию магнитных полей на широте, вращающейся с периодом 28.2 сут. Иначе говоря, положительные магнитные структуры в 21-м цикле имели тенденцию концентрироваться в широтной зоне с периодом вращения 26.93 сут, а отрицательные — в широтной зоне с периодом вращения 28.2 сут. Сделанные выводы хорошо согласуются с результатами работы [12].

Для 22-го цикла все три спектра похожи. Три мощных пика указывают на три широтные зоны преимущественной концентрации магнитных полей обоих знаков. Одинаковые значения периодов этих пиков указывают на относительно симметричное размещение зон преимущественной концентрации магнитных полей обоих знаков относительно экватора. Пики обоих компонентов соответствуют одинаковым значениям периода, но имеют разные мощности и форму, что обусловлено различной пространственно-временной организацией магнитных полей разного знака в 22-м цикле, отличную от 21-го цикла.

Более подробную картину распределения во времени зон концентрации магнитных полей и их вращения дает анализ спектров мощности ОМПС на фазах роста и спада активности (рис. 2). Спектры фаз роста и спада существенно различаются как мощностью доминирующих пиков, так и значениями их периодов. На фазе роста обоих циклов также значительно различаются между собой спектры N(+)- и S(-)-компонентов внутри каждого цикла. На фазе спада в спектрах обоих компонентов есть: в 21-м цикле — близкие периоды, в 22-м — одни и те же. Можно сказать, что спектры мощности обоих циклов были сформированы более сильными полями фазы спада. Следует отметить, что спектры мощности ОМП для ряда длиной в один год имеют по одному широкому максимуму в течение 21-го цикла, в 22-м цикле почти всюду есть еще один максимум меньшей мощности.

Значения периодов вращения положительных и отрицательных структур различно для каждого года (рис. 3), их изменение со временем бывает как синхронным, так и в противофазе, но положительные структуры почти всегда имеют меньший период вращения, чем отрицательные. Отличие периодов вращения магнитных структур разного знака обусловлено тем, что в данный конкретный промежуток времени они концентрируются на широтах, расположенных несимметрично относительно экватора. Если на протяжении какого-то промежутка времени зона концентрации магнитных полей одного знака располагалась ближе к экватору, чем другого, то в следующий интервал времени расположение может быть противоположным. Анализ

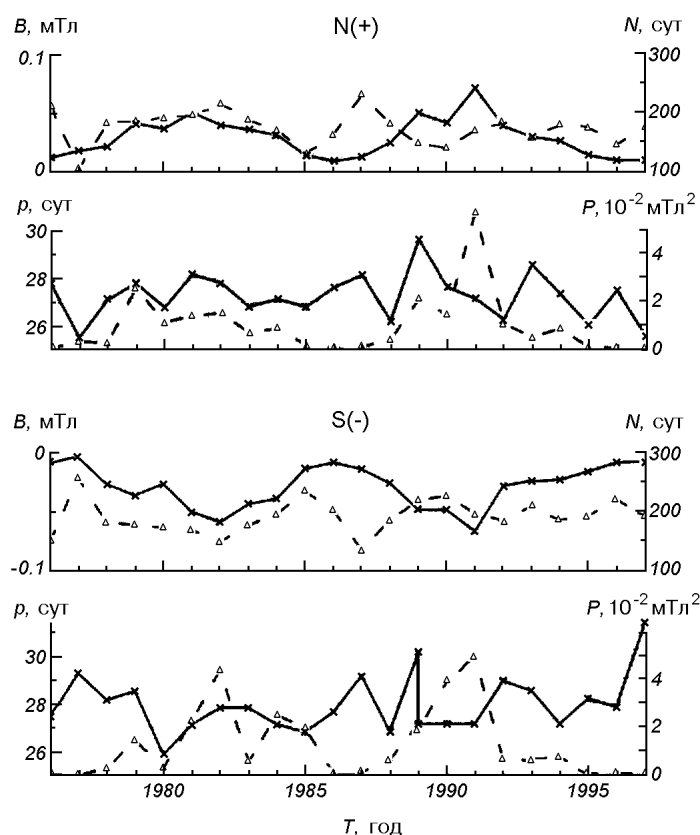


Рис. 3. Среднегодовые значения напряженности B N(+)- и S(-)-компонентов ОМПС (сплошные линии), количества N дней в году соответствующей полярности (штриховые линии); значения p пиков в области периодов вращения по спектрам мощности рядов N(+)- и S(-)-компонентов длиной в один год (сплошные линии) и их мощность P (штриховые линии)

большого временного интервала обнаруживает зоны преимущественной концентрации крупномасштабных магнитных полей. Как видно из предыдущего анализа, размещение этих зон изменяется как от цикла к циклу, так и внутри самих циклов. Стабильными от цикла к циклу остаются только приэкваториальные зоны, которые вращаются с периодом около 27 сут, более высокоширотные зоны постоянно изменяются. Поэтому в спектрах мощности ОМПС для различных временных интервалов появляется различное количество пиков с отличными значениями периодов. То же самое наблюдается и для вращения фотосферных магнитных полей [2, 5].

Периоды 13—15 сут. Эта группа пиков в 21-м цикле имеет приблизительно одинаковую структуру в спектрах обоих компонентов. Самые мощные пики соответствуют периодам 13.4—13.8 сут. Максимум с пиковым значением больше 14 сут слабее более чем в два раза. В 22-м цикле группа пиков в диапазоне 13.4—13.8 сут слабее приблизительно в два раза, чем в 21-м цикле, и поэтому все пики области 13—15 сут имеют одинаковую мощность. Наблюдается некоторое различие количества и формы пиков спектров N(+)- и S(-)-компонентов. Аналогичные исследования были сделаны для межпланетного магнитного поля (ММП). В спектре мощности ММП для 21-го цикла группа пиков в области периодов 13.4—13.8 сут имела почти такой же вид, что и в спектре мощности ОМПС, а для 22-го цикла

— на уровне шумов. При исследовании фоновых магнитных полей Н. Н. Степанян [10] было обнаружено, что на широтах ниже 50° кроме структур того же знака, что и у полюса, есть структуры поля противоположного знака. Число их увеличивается по мере приближения к экватору, средние размеры не изменяются и составляют $3 \cdot 10^5$ км. Вблизи экватора структуры (+)- и (-)-поля равны по размерам и занимаемой общей площади. По-видимому, такие структуры и формируют 4-секторную структуру ОМПС. В области периодов вращения нет мощных пиков, соответствующим пикам в области периодов 13.4—13.8 сут. Согласно закону дифференциального вращения поверхностных магнитных полей [14, 15] с периодом 26.8—27.6 сут вращаются магнитные поля в приэкваториальной зоне (5 — 20°). Можно предположить, что пики малой мощности в области периодов 13—15 сут обусловлены наличием небольшого числа структур противоположного знака на более высоких широтах (флюктуациями), пики большой мощности — большим числом таких структур в приэкваториальной области, которые и формируют 4-секторную структуру. Следовательно, 4-секторная структура существует только в приэкваториальной зоне, что и объясняет отсутствие мощных пиков с периодами больше 14 сут.

Периоды 3—10 сут. Кроме хорошо известной группы пиков с периодами около 9 сут (которую обычно связывают с 6-секторной структурой ОМПС), есть слабые, но хорошо выраженные пики с периодами 7, 5.5, 4.5, 4 сут [1, 7]. Форма и мощность пиков этой группы разные во всех спектрах. Нами построены спектры мощности только по пиковым значениям кривой суточных измерений ОМП (неэкстремальные значения были обнулены) для двух лет. Определенные по ним периоды вращения для каждого года были те же, что и для полного ряда, но их мощность увеличилась (с 7.2 до 9.2 для 1979 г. и с 6.3 до 8.8 для 1981 г.). Вместе с тем мощность пиков в области периодов 13—15 сут уменьшилась (с 1.8 до 0.8 для 1979 г. и с 8.04 до 5.9 для 1981 г.), мощность группы пиков в области периодов 9 сут уменьшилась почти до уровня шумов (0.06). Мощность слабых пиков в области периодов 5.5 и 7 сут (0.09—0.07), которые наблюдались в спектре мощности полного ряда, уменьшилась до уровня шумов (0.01). Исчезновение группы пиков в области периодов 9 сут свидетельствует о том, что она обусловлена флюктуациями внутри секторов (как и групп пиков в области периодов 5.5 и 7 сут), а не наличием 6-секторной структуры.

Долгопериодические вариации. Разнообразие деталей спектров в низкочастотной области отличает их от спектров в остальном частотном интервале. Самым неожиданным при раздельном построении спектров мощности N(+)- и S(-)-компонентов оказалось появление очень мощных пиков, отражающих цикличность солнечной активности. Их мощность соизмерима с мощностью пиков в области периодов вращения (рис. 1). В спектрах мощности для полного временного ряда ОМПС эти пики были очень слабыми или совсем отсутствовали (см. также [8, 11]). В то же время в работе [1] отмечено, что в структуре рядов гелиосферных параметров (в том числе и ОМПС) преобладают две основные регулярные составляющие, обусловленные 11-летним циклом и вращением Солнца. Очень удивительно, что значения периодов этих пиков внутри цикла одинаково для структур разных полярностей, но пики различаются мощностью. Для 21-го цикла это период 10.2 года, для 22-го цикла — 8.2 года. В 21-м цикле более мощным был пик для положительных структур, а в 22-м цикле — для отрицательных. Отсутствие пиков в полном ряду, соответствующих длине цикла, на наш взгляд, обусловлено явлением неодновременного начала цикла в северной и южной полусферах.

Квазигодичная мода является самой мощной в спектре полного ряда 21-го цикла и второй по мощности в спектре 22-го цикла. Что касается спектров отдельных компонентов, то она заметна только в спектре S(-)-компонента 21-го цикла.

ВЫВОДЫ

Раздельное изучение спектров мощности N(+)- и S(-)-компонентов ОМПС дает более детальную картину пространственно-временной структуры крупномасштабных магнитных полей. Полученные при таком изучении выводы хорошо согласуются с результатами выполненных ранее исследований и снимают некоторые противоречия. Спектры мощности для N(+)- и S(-)-компонентов ОМПС в области периодов вращения не очень сильно отличаются от спектра мощности для полного ряда. Совместный анализ спектров мощности всего временного ряда ОМПС и его компонентов для 21-го и 22-го циклов приводит к следующим выводам.

1. Пространственно-временная организация крупномасштабных магнитных полей в 21-м и 22-м циклах имела существенные различия. В 21-м цикле было пять зон преимущественной концентрации крупномасштабных магнитных структур и имела место сильная магнитная асимметрия внутри цикла, которая обусловила различную структуру спектров компонентов ОМПС. На протяжении 22-го цикла таких зон было три, магнитная асимметрия внутри цикла проявилась в разном количестве пиков в спектрах N(+)- и S(-)-компонентов, а также в различии их формы и значения мощности.

2. Общим для спектров полного ряда ОМПС обоих циклов был пик 26.93 сут. С таким периодом вращаются зоны преимущественной концентрации крупномасштабных магнитных структур в приэкваториальных областях. Высокоширотные зоны концентрации в каждом цикле были разные.

3. Пространственно-временная организация крупномасштабных магнитных полей существенно различна на фазах роста и спада обоих циклов. Можно утверждать, что спектр мощности обоих циклов был в основном сформирован сильными магнитными полями на протяжении фазы спада.

4. В спектрах мощности N(+)- и S(-)-компонентов ОМПС обнаружались мощные пики, соответствующие длине циклов активности, которых нет в спектре мощности всего временного ряда. Квазигодичная мода есть только в спектре S(-)-компонента 21-го цикла.

1. Веселовский И. С., Дмитриев А. В., Суворова А. В., Минаева Ю. С. Структура долговременных изменений параметров плазмы и магнитных полей в околоземной гелиосфере // *Астрон. вестник.*—2000.—**34**, № 1.—С. 82—93.
2. Григорьев В. М., Пещеров В. С. О двух модах твердотельного вращения крупномасштабных солнечных магнитных полей // *Исслед. по геомагнетизму, аэронауке и физ. Солнца.*—1983.—Вып. 65.—С. 3—13.
3. Котов В. А. Общее магнитное поле Солнца как звезды // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.*—1994.—**91**.—С. 5—24.
4. Котов В. А., Демидов М. Л. Магнитное поле Солнца как звезды // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.*—1980.—**61**.—С. 3—11.
5. Котов В. А., Степанян Н. Н. Некоторые характеристики крупномасштабных магнитных полей на Солнце // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.*—1980.—**62**.—С. 118—124.
6. 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.
7. Лейко У. М. О периодичностях общего магнитного поля Солнца // *Новый цикл активности Солнца: наблюдательные и теоретические аспекты: Тр. конф., посвященной*

- 50-летию Горной астрономической станции ГАО РАН. — Санкт-Петербург, 1998.— С. 288—292.
8. Ривин Ю. Р., Обридко В. Н. Частотный состав многолетних изменений магнитного поля Солнца как звезды // Астрон. журн.—1992.—69, вып. 5.—С. 1083—1089.
 9. Северный А. Б. Некоторые проблемы физики Солнца. — М.: Наука, 1988.—221 с.
 10. Степанян Н. Н. Фоновые магнитные поля на Солнце в 1964—1978 гг. // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1982.—65.—С. 43—58.
 11. Ханейчук В. И. Периодичность общего магнитного поля Солнца, 1968—1991 гг. // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1995.—92.—С. 84—89.
 12. Antonucci E., Hoeksema J. T., Scherrer P. H. Rotation of the photospheric magnetic fields: a North-South asymmetry // *Astrophys. J.*—1990.—360, N 1.—P. 296—304.
 13. Severny A. B. The polar fields and time fluctuations of the general magnetic field of the Sun // *Solar magnetic fields: Proc. IAU Symp. N 43.* — Dordrecht, 1971.—P. 675—695.
 14. Sheeley N. R., Jr., Wang Y.-M., Nash A. G. A new determination of the Solar rotation rate // *Astrophys. J.*—1992.—401, N 1.—P. 378—385.
 15. Snodgrass H. B. Magnetic rotation of the solar photosphere // *Astrophys. J.*—1983.—270, N 1.—P. 288—289.

Поступила в редакцию 02.11.00