

УДК 523.947

ИЗМЕНЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНОГО ПОЛЯРНОГО МАГНИТНОГО ПОТОКА СОЛНЦА: СРЕДНЕГОДОВОЙ РЯД П-ИНДЕКСА В 1858–2006 гг.

© 2012 г. С. А. Гусева¹, Ю. А. Наговицын²,

¹Горная астрономическая станция ГАО РАН, г. Кисловодск

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН г. Санкт-Петербург.

e-mail: nag@gao.spb.ru

Поступила в редакцию 23.05.2011 г.

После доработки 28.09.2011 г.

Предложен длительный ряд известного П-индекса структуры солнечной короны. Этот индекс, характеризующий лимбовую протяженность систем полярных корональных щеточек (plumes), представляется важным ввиду связи с крупномасштабным полярным магнитным потоком Солнца. Используются фотографии и зарисовки солнечной короны во время полных солнечных затмений, собранные за 13 циклов солнечной активности из различных источников (всего 78 затмений), а также данные Н-альфа карт по дрейфу высокоширотного пояса волокон перед переполусовкой полярного магнитного поля. Дополнительно привлекались ежедневные изображения солнечной короны, полученные на космическом аппарате SOHO (ультрафиолетовый телескоп EIT).

Путем синтеза этих данных созданы ряды среднегодовых значений П-индекса в 1858–2006 гг. в северном и южном полушариях Солнца (в том числе и в “знакопеременном” варианте, т.е. с учетом знака магнитного поля).

Проведено исследование полученных рядов в контексте сравнения с другими индексами, характеризующими различные компоненты общего магнитного поля Солнца.

1. ВВЕДЕНИЕ

С некоторой степенью условности общее магнитное поле Солнца может быть представлено в виде низкоширотного компонента H_{SP} , основной вклад в который вносят солнечные пятна и активные области, и крупномасштабного компонента H_{LS} , связанного с распределением по всей солнечной поверхности областей открытого магнитного потока – корональных дыр. Связь между этими компонентами, по-видимому, уже не вызывает сомнения [Макаров et al., 2001; Макаров и Тлатов, 2004; Наговицын, 2006]: развитие $H_{LS}(t)$ предвещает $H_{SP}(t)$ на половину 11-летнего цикла, что может быть следствием действия т.н. ω -эффекта на Солнце (т.е. физического процесса, приводящего к превращению глобально-полоидального магнитного поля в глобально-тороидальное).

Среди различных крупномасштабных структур с открытым магнитным потоком особняком стоят полярные области Солнца. Известно, что в этих областях наблюдаются системы полярных щеточек (plumes), фотосферные полярные факелы. По границам их располагаются высокоширотные протуберанцы, дрейф которых к полюсу вызывает яркое явление переполусовки полярного поля.

Основной задачей этой работы являлось получение длительного временного ряда индекса

крупномасштабного полярного магнитного поля Солнца на основе наблюдений в течение последних полутора столетий:

а) солнечной короны во время полных солнечных затмений, представленных фотографиями и зарисовками различных наблюдателей в разное время;

б) высокоширотных солнечных протуберанцев (волокон), представленных Н-альфа картами, составленными В.И. Макаровым с сотрудниками.

В качестве индекса был выбран известный параметр П – протяженность по лимбу (в градусах) полярных лучевых систем [Всехсвятский, 1965]. Для проверки надежности оценки среднегодовых значений П по отдельным затменным наблюдениям он дополнительно рассчитывался по ежедневным изображениям солнечной короны, полученным на космическом аппарате SOHO (ультрафиолетовый телескоп EIT) в 1996–2006 гг. Специально обратим внимание, что в нашей работе впервые предпринята попытка создания именно временного ряда крупномасштабного полярного магнитного поля, позволяющего применять к нему математические процедуры обработки временных рядов. До этого исследователи ограничивались получением набора значений П для отдельных солнечных затмений, разрозненных по времени.

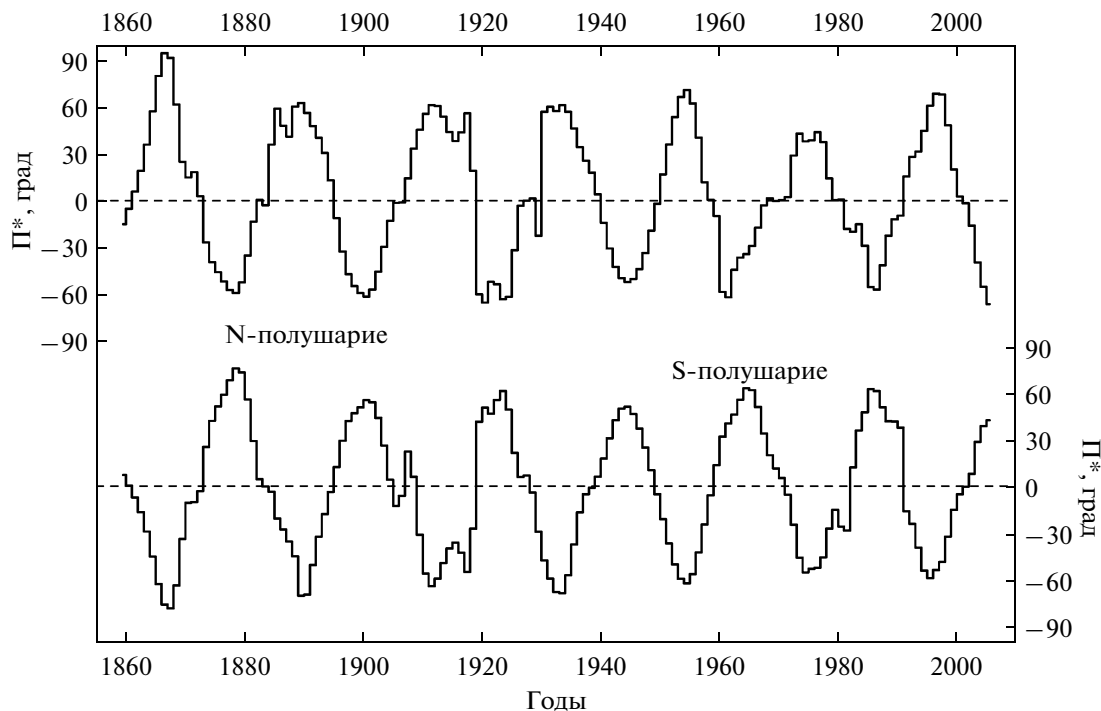


Рис. 1. Знакопеременный ряд среднегодовых значений P-индекса в северном и южном полушариях Солнца P*(t).

2. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Параметр P для всех использованных материалов определялся в трех вариантах: для северного полушария P_N, для южного полушария P_S и средний по полушариям P_{NS}.

Использовались и фотографии, и схематические зарисовки, или даже несколько зарисовок, выполненных разными авторами [Ranyard, 1879; Всехсвятский, 1965; Loucif and Koutchmy, 1989; Sýkora et al., 2003]. Применялась специальная координатная сетка, которая строилась с учетом эфемеридного угла наклона оси вращения Солнца к эклиптике для данного затмения.

Кроме вычислений значений параметра P по данным полных солнечных затмений, для сравнения использовались также ежедневные изображения короны по данным инструмента EIT на космическом аппарате SOHO (λ171 Å, FeIX) за период 1996–2006 гг.

Для нахождения изменений P вблизи фазы максимума цикла в нашем исследовании мы использовали данные наблюдений в линии H-альфа по дрейфу нейтральной линии к полюсу, предшествующему изменению знака полярного поля (переполусовке), – явлению, основной вклад в изучение которого принадлежит В.И. Макарову [Makarov et al., 1983]. Таким образом, была получена первичная информация для создания длительного ряда индекса крупномасштабного полярного магнитного поля Солнца – параметра P.

3. РЯДЫ СРЕДНЕГОДОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ P-ИНДЕКСА В 1858–2006 гг.

Построим вначале знакопеременный – альтернированный [Витинский и др., 1986] – ряд P*. Рассмотрим наблюдаемые значения P с учетом знака поля вместе с моментами переполусовок (т.е. когда P = 0), включая трехкратные. Для уменьшения влияния неравномерности продолжительности лакун между отдельными наблюдениями продelaем следующую процедуру. Каждые два соседние наблюдения усредним, и полученные значения отнесем к их средней эпохе:

$$\bar{P}\left(\frac{t_i + t_{i+1}}{2}\right) = \frac{P(t_i) + P(t_{i+1})}{2}.$$

Затем проведем интерполирование на равноотстоящие узлы, отнесенные к серединам годов. Используем для этого глобальный кубический сплайн. Результат – ряд P* для северного и южного полушарий – приведен на рис. 1.

Продельвая ту же процедуру, что и выше, но без присваивания противоположного знака соседним 11-летним циклам, мы получили также обычный, “знакопостоянный” основной ряд P – см. рис. 2, на котором приведены также ряды среднегодовой площади пятен в N- и S-полушариях.

Заметим, что вековой ход амплитуд 11-летних циклов P-индекса не повторяет таковой для низкоширотной активности. Это обстоятельство ка-

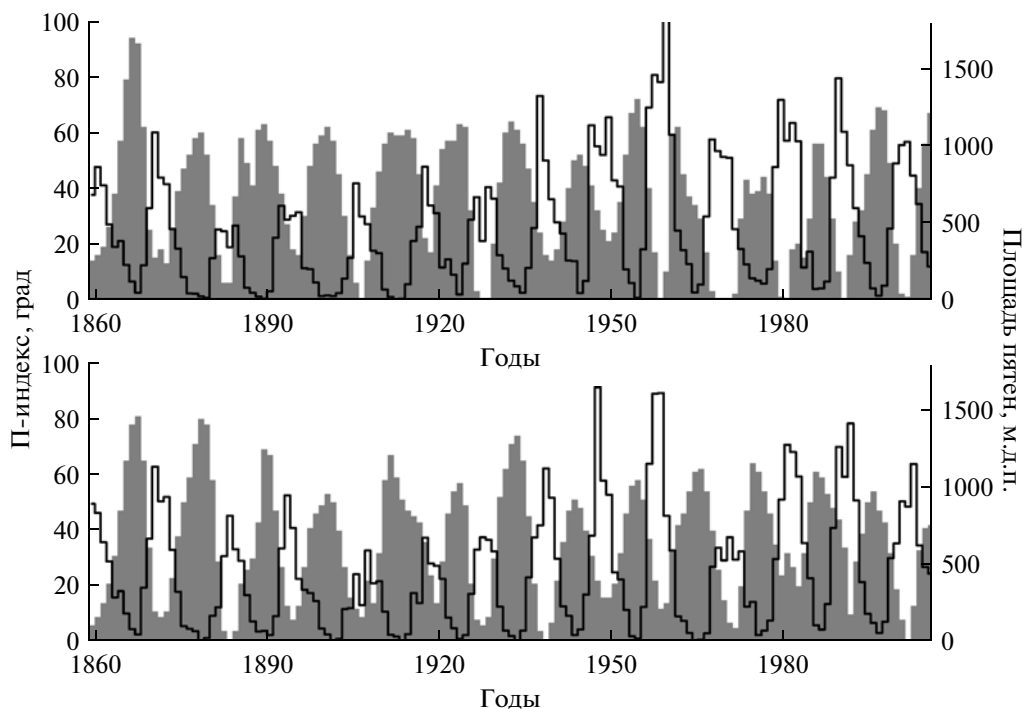


Рис. 2. Основной ряд среднегодовых значений П-индекса в северном (сверху) и южном (снизу) полушариях Солнца ($P(t)$ – серые области) и полушарные ряды площади пятен.

жется нам примечательным и требует специального рассмотрения.

Рассчитав также среднегодовые значения П по материалам EIT на космическом аппарате SOHO, мы сравнили их с полученными выше для 1996–2006 гг. Коэффициент корреляции между двумя типами измерения составил $k = 0.81$. Сравнительно невысокий k , а также то обстоятельство, что вблизи переполусовки данные EIT показали большие П, чем по затменным (и H-альфа) материалам, может быть связан с различием типичных высот отслеживаемых структур: изображения EIT относятся к меньшим высотам, чем фиксации внешней короны во время полных солнечных затмений [Li Jing et al., 2000].

4. ЗНАКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОЛЮСАХ СОЛНЦА

По данным рис. 1 можно рассчитать частотность различных глобальных конфигураций полюсов с точки зрения знака полярного поля. Так, оказывается, что ситуации, когда северный полюс имеет знак поля “–”, а южный “+”, занимают 49% времени, противоположная ситуация встречается в 42% случаев. “Однозначковые” конфигурации, когда оба полюса имеют одинаковую полярность, для знака “–” случаются в 5%, а для знака “+” – в 4% времени. Тот факт, что значимый промежуток времени (~10%) оба полюса Солнца имеют одинаковый знак, свидетельствует

о том, что мы не можем эксплуатировать примитивную модель, согласно которой наблюдаемое полярное поле трассирует среднее полоидальное поле теории динамо – нужны более реалистичские объяснения.

5. N–S АСИММЕТРИЯ ПОЛУШАРИЙ ПОЛЯРНОГО ПОЛЯ

Эта характеристика, рассчитываемая как нормированный разбаланс значений избранного индекса активности в северном и южном полушариях Солнца:

$$A_s = \frac{N - S}{N + S},$$

– остается до сих пор во многом загадочной [Oliver and Ballester, 1996; Zolotova and Poniavin, 2007 и др.] В частности, слабо изучены ее изменения на длительных временах в различных компонентах глобального поля. На рисунке 3 приведены изменения N–S асимметрии сглаженных за 11 лет значений различных индексов, характеризующих как низкоширотное (солнечные пятна – индекс площади), так и высокоширотное (число полярных факелов, П-индекс) глобальное магнитное поле Солнца. Как представляется, можно было бы ожидать большего соответствия в поведении асимметрии полушарий у полярных факелов и П-индекса (некоторое сходство прослеживается для

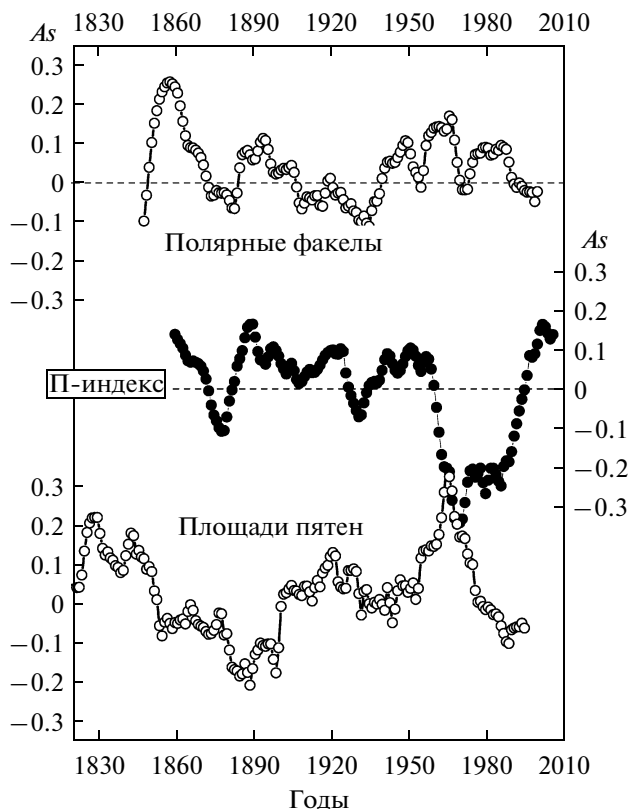


Рис. 3. Долговременные изменения N–S асимметрии полушарий для высокоширотного и низкоширотного компонентов глобального магнитного поля Солнца.

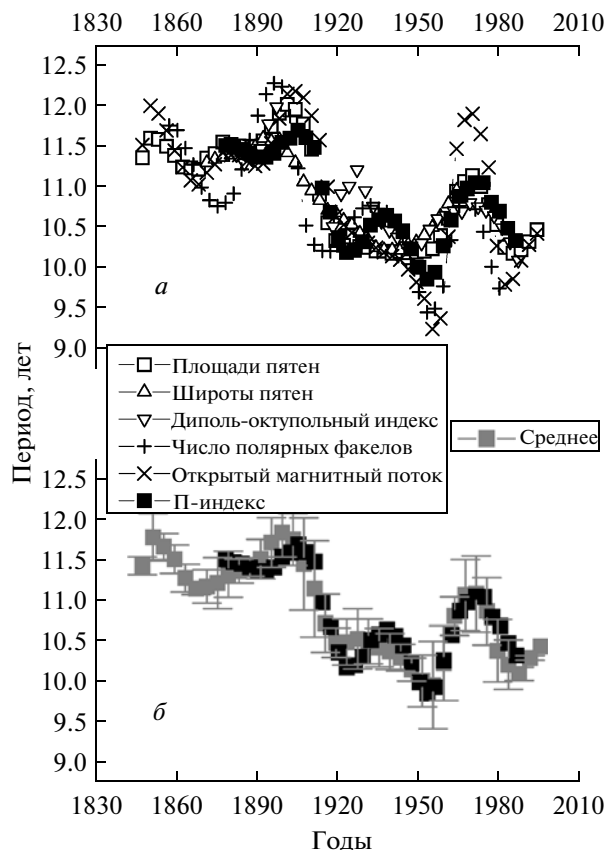


Рис. 4. Длительные изменения локальных периодов 11-летнего цикла для разных индексов солнечной активности (см. легенду) – (а); сравнение поведения усредненного ряда локальных периодов и П-индекса – (б).

30–35 летних вариаций, но не для столетнего изменения).

6. ДЛИТЕЛЬНОСТЬ “11-ЛЕТНЕГО” ЦИКЛА ДЛЯ ИНДЕКСОВ РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ ГЛОБАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

Рассчитаем локальную длительность 11-летнего цикла для разных индексов, характеризующих поведение различных компонентов глобального магнитного поля Солнца. Для этого используем следующие длительные временные ряды:

- а) П-индекса (высокоширотное крупномасштабное поле) – эта работа.
- б) чисел полярных факелов (высокоширотное мелкомасштабное поле) [Nagovitsyn et al., 2004];
- в) площадей солнечных пятен (низкоширотное поле) [Nagovitsyn et al., 2004; Наговицын, 2005];
- г) средних широт пятен (низкоширотное поле) [Nagovitsyn et al., 2004; Наговицын и др., 2010];
- д) диполь-октупольного индекса (глобальное крупномасштабное поле) [Makarov et al., 2001; Tlatov, 2009];

е) “открытого” абсолютного магнитного потока Солнца (общее магнитное поле Солнца у основания гелиосферы) [Наговицын и др., 2008].

К каждому ряду применим вейвлет-преобразование [Астафьева, 1996] – с использованием вейвлета Морле 6-го порядка – и вычислим скелетоны (максимумы вейвлет-коэффициентов), обозначающие вероятные значения локальных (“мгновенных”) периодов 11-летнего цикла для данного ряда.

Рисунок 4 иллюстрирует полученный результат: вековые изменения продолжительности 11-летнего цикла являются универсальными для всех компонентов солнечного глобального магнитного поля (среднеквадратическое отклонение от среднего ряда составляет $\sigma = 0.27$ г.), так что мы лишней раз получаем свидетельство того факта, что цикл является единым процессом, захватывающим активность всего Солнца одновременно.

Рассмотрим, насколько изменения периодов избранных нами рядов связаны с общими изменениями периода 11-летнего цикла. В таблице приведены соответствующие коэффициенты корреляции, рассчитанные для 110-летнего ин-

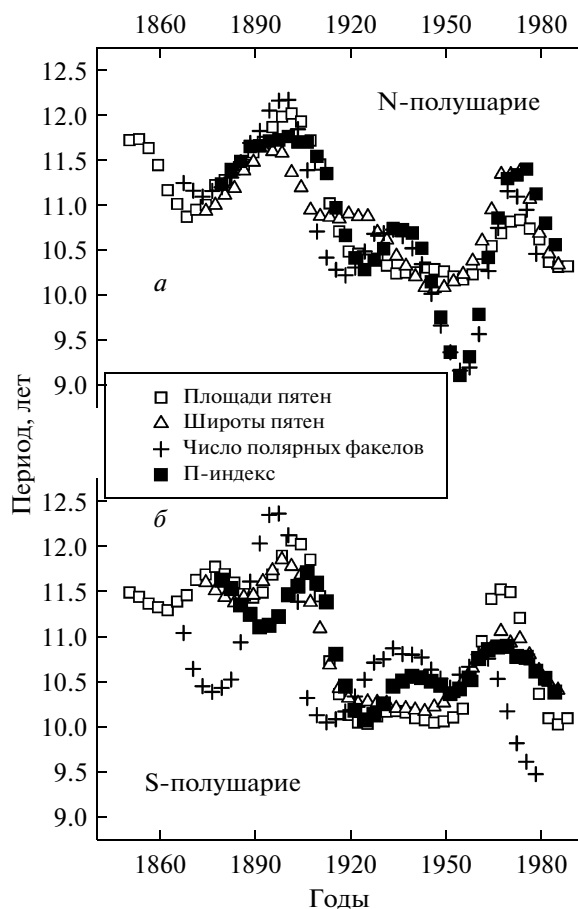


Рис. 5. Длительные изменения локальных периодов 11-летнего цикла для разных индексов солнечной активности в северном (а) и южном (б) полушариях Солнца. Обозначения те же, что и на рис. 4.

тервала, общего для оценок данного параметра у всех рассмотренных рядов. Мы видим, что вариации периодов для П-индекса достаточно хорошо соответствуют средним вариациям, в отличие от диполь-октупольного индекса и индекса числа полярных факелов, для которых корреляция меньше 0.9 (см. также рис. 4б).

Можно также сравнить изменение локальных периодов 11-летнего цикла у разных индексов отдельно по полушариям. Для этого рассмотрим те

же индексы, что и выше, но без диполь-октупольного индекса и индекса открытого абсолютного потока, которые по своей сути являются чисто глобальными. На рисунке 5. видно, что в целом полушарные картины соответствуют полученной выше для глобальных значений, и вариации для N- и S-полушарий различаются не кардинально.

7. ТИПИЧНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ПЕРИОДОВ 11-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА

По данным, иллюстрируемым рис. 5, можно ответить на вопрос, какие значения периодов у рассмотренных индексов встречаются чаще и различаются ли они у разных компонент поля. На рисунке 6 приведены гистограммы встречаемости значений квазиодиннадцатилетних периодов для индексов низкоширотного компонента глобального магнитного поля Солнца (справа) и высокоширотного (слева) компонента на 150-летней шкале. N- и S-полушария участвуют вместе.

Несмотря на то, что средние по выборкам T_{cp} статистически неразличимы, распределения по-

Коэффициенты корреляции между локальными значениями периодов у избранных индексов и средними значениями

Индекс	Коэффициенты корреляции
Площади пятен	0.969
Широты пятен	0.918
Диполь-октупольный индекс	0.855
Число полярных факелов	0.860
Открытый магнитный поток	0.919
П-индекс	0.937

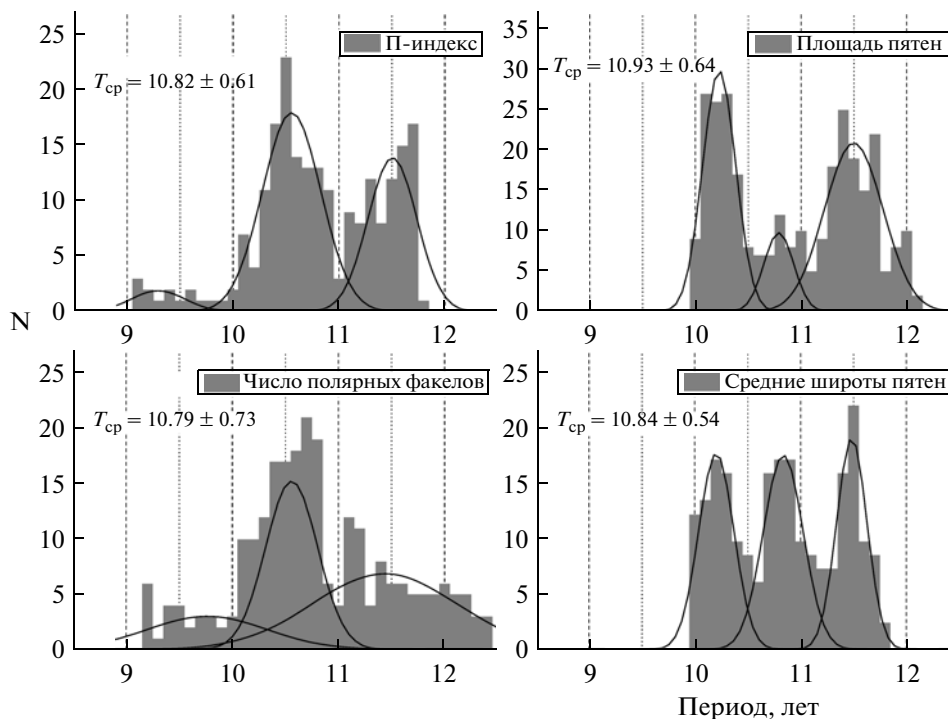


Рис. 6. Гистограммы встречаемости значений локальных периодов 11-летнего цикла для высокоширотного (слева) и низкоширотного (справа) компонентов общего магнитного поля Солнца (серые области), их аппроксимация наиболее вероятными гауссианами (линии), а также значения средних по распределению периодов T_{cp} .

ложений отдельных мод циклических изменений различные: основной моде у высокоширотных индексов $T \sim 10.5$ лет соответствует провал у низкоширотных, “окаймляемый” модами $T \sim 10.2$ и $T \sim 10.8$ лет. У низкоширотных индексов отсутствует короткая мода с $T \sim 9.5$ лет, немногочисленная, но заметная у высокоширотных. В то же время, у всех индексов присутствует длинная мода с $T \sim 11.5$ лет.

Эти результаты кажутся нам интересными в плане понимания, что такое 11-летняя цикличность, однако они требуют дальнейшего подтверждения.

8. ВЫВОДЫ

Таким образом, в этой работе мы произвели первые исследования созданного нами длительного временного ряда П-индекса крупномасштабного полярного магнитного поля Солнца. Основная цель работы состояла в “пилотном” изучении этого ряда, в том числе и в сравнении с рядами других индексов, характеризующих различные компоненты общего магнитного поля Солнца.

Индекс П показал как отличающиеся от других индексов активности свойства: поведение векового цикла, N–S асимметрии полушарий, так и общие: длительный ход локальных периодов цик-

ла. Последнее заключение важно для нас в смысле свидетельства надежности фазовых характеристик ряда, полученного из разрозненных наблюдений.

Типичные локальные периоды 11-летних циклических вариаций оказались различными для низкоширотных и высокоширотных магнитных полей. Это заключение, если оно будет подтверждено, потребует нового взгляда на пространственное развитие магнитного цикла.

Основным же результатом работы по мнению авторов является получение и апробация нового длительного временного ряда, характеризующего специальные аспекты солнечной активности и космической погоды.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 09-02-00083, 09-02-00351 и № 10-02-00391), программ Президиума РАН и ОФН РАН, а также поддержки ведущих научных школ НШ-1625.2012.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астафьева Н.М. Вейвлет–анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук. Т. 166. № 11. С. 1145–1170. 1996.
- Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца // М.: Наука. 1986.

- *Всехсвятский С.К., Никольский Г.М., Иванчук В.И., Несмеянович А.Т., Пономарев Е.А., Рубо Г.А., Чердынченко В.И.* Солнечная корона и корпускулярное излучение в космическом пространстве // Киев: изд-во Киевского ун-та, 216 с. 1965.
- *Макаров В.И., Тлатов А.Г.* Индексы фонового магнитного поля и полярной активности Солнца // Известия ГАО. № 217. С. 107–119. 2004.
- *Наговицын Ю.А.* К описанию долговременных вариаций магнитного потока Солнца: индекс площадей пятен // Письма в Астрон. журн. Т. 31. № 8. С. 622–627. 2005.
- *Наговицын Ю.А.* Солнечная и геомагнитная активность на большой временной шкале: реконструкции и возможности для прогнозов // Письма в Астрон. журн. Т. 32. № 5. С. 382–391. 2006.
- *Наговицын Ю.А., Милецкий Е.В., Иванов В.Г., Гусева С.А.* Реконструкция физических параметров космической погоды на 400-летней шкале // Космич. исслед. Т. 46. № 4. С. 291–302. 2008.
- *Наговицын Ю.А., Милецкий Е.В., Иванов В.Г., Наговицына Е.Ю.* Минимум Маундера: северо-южная асимметрия пятнообразования, средние широты пятен и диаграмма бабочек // Астрон. журн. Т. 87. № 5. С. 524–528. 2010.
- *Li Jing, Jewitt D., LaBonte B.* The Nature of Solar Polar Rays // *Astrophys. J.* V. 539. № 1. P. L67–L70. 2000.
- *Loucif M.L., Koutchmy S.* Solar cycle variations of coronal structures // *Astron. Astrophys.* V. 77. № 1. P. 45–66. 1989.
- *Makarov V.I., Fatianov M.P., Sivaraman K.R.* Poleward migration of the magnetic neutral line and the reversal of the polar fields on the sun. I-Period 1945–1981 // *Solar Phys.* V. 85. № 2. P. 215–226. 1983.
- *Makarov V.I., Tlatov A.G., Callebaut D.K., Obridko V.N., Shelting B.D.* Large scale solar magnetic field and sunspot cycles // *Solar Phys.* V. 198. № 2. P. 409–421. 2001.
- *Nagovitsyn Yu.A., Ivanov V.G., Miletsky E.V., Volobuev D.M.* ESAI database and some properties of solar activity in the past // *Solar Phys.* V. 224. № 1–2. P. 103–112. 2004.
- *Oliver R., Ballester J.L.* Rescaled range analysis of the asymmetry of solar activity // *Solar Phys.* V. 169. № 1. P. 215–224. 1996.
- *Ranyard A.C.* Photographs and drawings of the Corona // *Memoires of the royal Astron. Soc.* V. 41. 1879.
- *Sýkora J., Badalyan O.G., Obridko V.N.* Connections between the white-light eclipse corona and magnetic fields over the solar cycle // *Solar Phys.* V. 212. № 2. P. 301–318. 2003.
- *Tlatov A.* The minimum activity epoch as a precursor of the solar activity // *Solar Phys.* V. 260. № 2. P. 465–477. 2009.
- *Zolotova N.V., Ponyavin D.I.* Synchronization in sunspot indices in the two hemispheres // *Solar Phys.* V. 243. № 2. P. 193–203. 2007.