

УДК 523.98-565

**Л. А. Акимов, И. Л. Белкина**

НИИ астрономии Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина  
61022 Харьков, ул. Сумская 35  
akimov@astron.kharkov.ua

### **О 156-суточной квазипериодичности солнечных индексов**

*Исследованы ряды ежедневных солнечных индексов чисел Вольфа  $W$  (1900—2008 гг.), потока  $F_{10.7}$  радиоизлучения Солнца на частоте 2800 МГц (1947—2008 гг.) и числа  $N_x$  рентгеновских вспышек (1981—2008 гг.). Для выявления так называемой 156-сут квазипериодичности ригеровского типа (КРТ), использованы методы фурье- и вейвлет-анализа. Статистически существенная амплитуда КРТ для индекса  $W$  наблюдалась вблизи фаз максимумов большинства исследованных солнечных циклов, за исключением циклов 14, 15 и 23. Наибольшая мощность пика 156 сут наблюдалась на спаде цикла 16, а также в максимуме 21 цикла и на фазах роста циклов 20 и 23. Статистически существенная КРТ наблюдалась также в фазах минимумов циклов 17, 18, 19. Сделан вывод, что устойчивой зависимости КРТ от фазы цикла солнечной активности нет. По результатам вейвлет-анализа временная зависимость КРТ для индекса  $F_{10.7}$  практически идентична ее поведению для индекса  $W$ , коэффициент корреляции кривых временного хода амплитуд КРТ составляет 0.95. Для КРТ пар индексов  $W - N_x$  и  $F_{10.7} - N_x$  корреляция составляет 0.36 и 0.32 соответственно. Временного сдвига между возникновением КРТ для разных индексов не обнаружено. Таким образом, 156-сут квазипериодичность почти синхронно охватывает процессы, происходящие в активных областях Солнца на разных высотах. Обсуждается возможная природа КРТ на Солнце.*

*ПРО 156-ДОБОВУ КВАЗІПЕРІОДИЧНІСТЬ СОНЯЧНИХ ІНДЕКСІВ, Акімов Л. О., Белкіна І. Л. — Досліджено ряди щоденних сонячних індексів чисел Вольфа  $W$  (1900—2008 рр.), потоку  $F_{10.7}$  радіовипромінювання Сонця на частоті 2800 МГц (1947—2008 рр.) та числа  $N_x$  рентгенівських спалахів (1981—2008 рр.). Для виявлення так званої*

156-добової квазіперіодичності ригерівського типу (КРТ) використано методи фур'є- та вейвлет-аналізу. Статистично суттєва амплітуда КРТ для індексу  $W$  спостерігалась поблизу фаз максимумів більшості досліджених сонячних циклів, за виключенням циклів 14, 15 та 23. Найбільша потужність піку 156 діб спостерігалася на спаді циклу 16, а також у максимумі 21-го циклу та на фазах зростання циклів 20 та 23. Статистично суттєва КРТ спостерігалася також у фазах мінімумів циклів 17, 18, 19. Зроблено висновок, що сталої залежності КРТ від фази циклу сонячної активності немає. За результатами вейвлет-аналізу для індексу  $F_{10.7}$  часова залежність КРТ фактично ідентична її поведінці для  $W$ , коефіцієнт кореляції кривих часової залежності амплітуд КРТ складає 0.95. Для КРТ пар індексів  $W - N_x$  та  $F_{10.7} - N_x$  кореляція складає 0.36 та 0.32 відповідно. Часового зсуву між виникненням КРТ для різних індексів не виявлено. Таким чином, 156-добова квазіперіодичність майже синхронно охоплює процеси, що відбуваються в активних областях Сонця на різних висотах. Обговорюється можлива природа КРТ на Сонці.

*ON 156-DAY QUASI-PERIODICITY OF THE SOLAR INDICES, by Aki-mov L. O., Belkina I. L. — Some series of the daily solar indices of the sunspot number  $W$  (1900—2008), of the solar flux  $F_{10.7}$  at 2800 MHz (1947—2008) and numbers  $N_x$  for X-ray flares (1981—2008) are studied. The methods of the Fourier analysis and wavelet analysis are used to detect the 156-day quasi-periodicity, so-called the Rieger type periodicity, RTP. Statistically significant amplitude of RTP for the  $W$  index was observed near the solar maxima for most of the considered solar cycles, with the exception of the 14th, 15th and 23rd cycles. The largest power of the 156-day peak was observed during the declining phase of cycle 16, at the maximum of cycle 21 and during the increasing phase of cycles 20 and 23. The statistically significant RTP was also observed at the minima of cycles 17, 18 and 19. We conclude that the RTP dependence on a solar cycle phase is unstable. The time dependence of the RTP for the index  $F_{10.7}$  obtained through the wavelet-analysis is almost identical to that for the index  $W$ , with the correlation coefficient between temporal behaviours of the RTP being equal to 0.95. The correlation coefficients between temporal behaviours of the RTP for the pairs of indices  $W - N_x$  and  $F_{10.7} - N_x$  are equal 0.36 and 0.32, respectively. No time lags between the RTP beginnings for various indices are detected. Therefore, the 156-day quasi-periodicity involves almost simultaneously events occurring in active regions of the solar atmosphere at different heights. The assumed nature of the RTP is discussed.*

## ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] мы изучили поведение ежедневных значений индексов числа рентгеновских вспышек и энергии вспышек в диапазоне мягкого рентгена по данным КА GOES за период с 01.01.1981 г. по

30.06.2004 г. В настоящее время ряды вспышечных индексов мы продлили до 31.12.2008 г. В спектрах мощности индексов в интервале периодов 35—360 сут мы обнаружили ряд статистически достоверных пиков, в числе которых и известный с 1980-х гг. почти 156-сут период. Такую периодичность некоторые исследователи [9] называют квазипериодичностью типа Ригера (КРТ). В работе [16] Ригер и др. обнаружили подобную периодичность появления высокоэнергичных вспышек в цикле 21. Большинство исследователей считают, что КРТ обусловлена внутренними процессами на Солнце, а именно периодичностью всплывания новых магнитных потоков. Периодичность всплывания магнитных потоков приводит к периодичности формирования и роста групп пятен со сложной магнитной конфигурацией. В таких группах пятен наиболее вероятны магнитные пересоединения, приводящие к возникновению мощных вспышек. Впоследствии оказалось, что 156-сут периодичность характерна не только для вспышек, но проявляется и в интегральных характеристиках солнечного магнитного поля, в периодических изменениях площади солнечных пятен [7], в различных геофизических процессах. Однако вопрос о природе этой периодичности до сих пор остается нерешенным. Частично это связано с тем, что значение периода по разным данным изменяется в широких пределах, от 140 до 160 сут, а сама периодичность то появляется, то исчезает [4—6, 8]. Согласно нашим исследованиям [2] в спектрах мощности индексов энергии рентгеновских вспышек и их числа  $N_x$  пиков, соответствующих 156 сут, практически нет в цикле 22, а в циклах 21 и 23 их амплитуды являются статистически существенными. Было сделано предположение, что КРТ характерна только для заключительной фазы 22-летнего магнитного цикла. Отмечено, однако, что этот результат, полученный методом фурье-анализа, нуждается в дополнительной проверке, поскольку по спектру мощности нельзя точно определить локализацию и изменение во времени отдельных частот. В данной работе мы провели исследование временной зависимости квазипериодичности 156 сут для различных солнечных индексов методами фурье-анализа со скользящим окном и вейвлет-анализа. Были использованы ряды ежедневных значений следующих индексов: относительного числа  $W$  солнечных пятен (чисел Вольфа) за время с 01.01.1900 г. по 31.12.2008 г.; потока  $F_{10.7}$  радиоизлучения Солнца на частоте 2800 МГц за период с 14.02.1947 г. по 31.12.2008 г.; числа  $N_x$  рентгеновских вспышек на интервале 01.01.1981—31.12.2008 гг.

#### РЯДЫ ДАННЫХ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Значения индексов  $W$  и  $F_{10.7}$  были взяты на сайте [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/sto/solar\\_data/](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/sto/solar_data/),  $N_x$  — по нашим рядам данных, с использованием данных с КА GOES.

Известно, что метод вейвлет-анализа успешно применяется для исследования рядов, изменяющих во времени свои средние значения, дисперсии, периоды, амплитуды и фазы гармонических процессов.

Для индекса  $N_x$  было сделано непрерывное вейвлет-преобразование данных на основании программ системного спектрального анализа сигналов [7]. В качестве базисного вейвлета использовался вейвлет Морле

$$(r) \exp ik_0 r - \frac{r^2}{2}.$$

На рис. 1 представлен временной ход модуля спектральной плотности вейвлет-преобразования ряда  $N_x$ . По оси ординат отложены значения периодов в сутках, по оси абсцисс — сутки от 1 января 1981 г. Более светлые места на диаграмме соответствуют большему значению амплитуды спектральной плотности. В области малых периодов можно заметить светлые пятна, относящиеся к периодам вращения Солнца, а также к наличию квазипериодичности около 36, 53, 72 и 89 сут. Видно, что квазипериодичность имеет прерывистый характер, а 156-сут квазипериодичность была наиболее заметна в 21-м солнечном цикле. В 22 цикле КРТ ослабела, а затем снова увеличилась в конце 23-го цикла. Отметим также, что во всех циклах существенную мощность имела квазипериодичность примерно 180—280 сут. Количественные выводы из анализа рис. 1 сделать затруднительно.

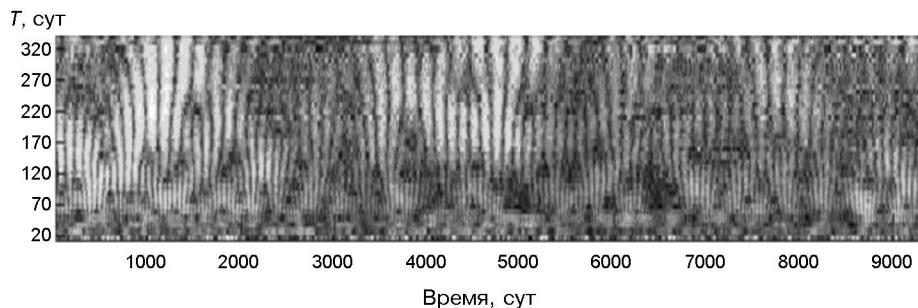


Рис. 1. Временное распределение модуля спектральной плотности непрерывного вейвлет-преобразования ряда  $N_x$ . По оси абсцисс — время в сутках от 1 января 1981 г., по оси ординат — период  $T$

Для детального изучения 156-сут периодичности методом фурье-анализа со скользящим окном мы использовали не сами значения ежедневных индексов, а их разностные флуктуации. Разностные флуктуации индексов представляют собой разности полученных из наблюдений и сглаженных величин показателей солнечной активности. За интервал сглаживания мы выбрали 365 сут, для каждой суток скользящим методом определялась среднегодовая сглаженная величина индекса. Использование такой процедуры позволяет существенно

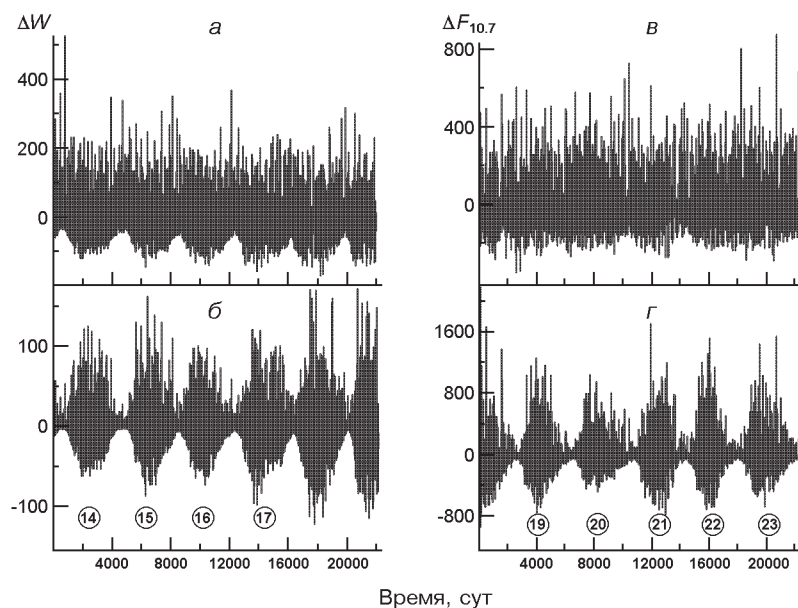


Рис. 2. Временной ход разностных нормированных (а, в) и ненормированных (б, г) флуктуаций: а, б — индекса  $W$  в 13—19-м солнечных циклах; в, г — индекса  $F_{10.7}$  в 18—23-м солнечных циклах

уменьшить влияние среднего хода 11-летних циклических изменений индексов. На рис. 2, а, б показан временной ход разностных флуктуаций индекса  $W$  для циклов 13—19 (нижняя кривая). Верхняя кривая представляет собой нормированные значения разностных флуктуаций этого индекса. Нормировка проводилась скользящим методом. Для этого разностные флуктуации делились на среднегодовые значения их абсолютной величины, определенные также скользящим методом. На рис. 2, в, г представлена временная зависимость разностных и нормированных разностных флуктуаций индекса  $F_{10.7}$  для циклов 18—23. Видно, что в разностных флуктуациях этого индекса 11-летняя циклическая особенность еще хорошо заметна из-за уменьшения значений индекса в минимумах цикла. Нормированные значения разностных флуктуаций (верхняя кривая) ведут себя практически как белый шум. Такие знакопеременные ряды данных удобны для исследований методом фурье-анализа и оценок значимости полученных результатов.

Для получения временного хода мощности пика 156 сут на разных фазах циклов активности массивы данных были разбиты на интервалы, близкие к четверти 11-летнего периода (1560 сут). Середина скользящего окна располагалась в точках роста, максимума, спада и минимума циклов. Относительно этих точек окно смещалось в обе стороны на  $\pm 100$  сут. Полученные спектры мощности (СМ) нормировались на средние квадратичные величины их флуктуаций. Мощность пика с периодом 156 сут, выраженная в единицах , на каждой фазе цикла определялась как средняя из трех значений.

Для оценок амплитудной вейвлет-функции  $A(t)$  вычислялась свертка ряда значений исследуемого индекса  $f(t)$  с базисным вейвлетом на промежутке от  $t - nT/2$  до  $t + nT/2$ , где  $T$  — изучаемый период, а  $n$  — число периодов, по которым вычислялась свертка. В качестве базисного вейвлета мы использовали функцию  $\text{sign} \cos \frac{2\pi t}{T}$ .

В этом случае зависимость амплитудной вейвлет-функции от времени  $t$  может быть вычислена по формуле

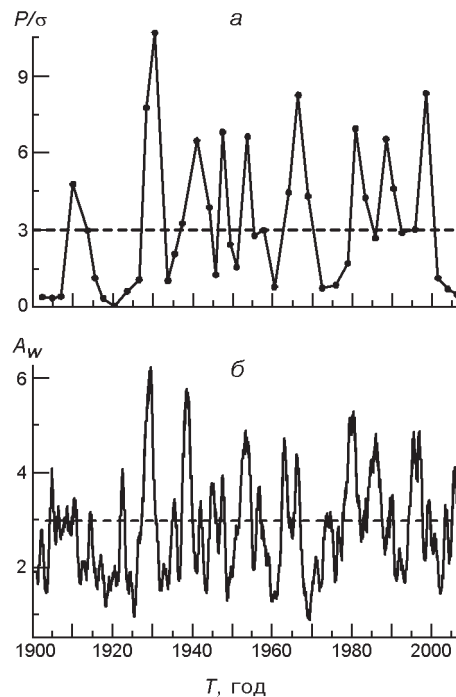
$$A(t) = \int_{t-nT/2}^{t+nT/2} f(t) \text{sign} \cos \frac{2\pi (t-\tau)}{T} d\tau. \quad (1)$$

### ВРЕМЕННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ 156-СУТ КВАЗИПЕРИОДИЧНОСТИ

В таблице представлены моменты времени, для которых в СМ флуктуаций индексов  $W$ ,  $F_{10.7}$  и  $N_x$  определены средние мощности пиков с периодом 156 сут. Для каждого момента даны также среднегодовые значения относительного числа солнечных пятен  $W$ . В последней графе в единицах даны средние мощности пиков с периодом 156 сут в СМ флуктуаций индекса  $W$ .

На рис. 3, *a* показана зависимость от времени средней мощности пика 156 сут в СМ разностных флуктуаций индекса  $W$ , полученная методом фурье-анализа со скользящим окном.

Рис. 3. Временной ход: *a* — средней мощности  $P$  пика 156 сут в СМ разностных флуктуаций индекса  $W$ ; *б* — амплитуды  $A_W$  156-сут квазипериодичности индекса  $W$  в 13—23-м солнечных циклах



**Средние моменты времени, для которых получены СМ флуктуаций индексов, и мощность пика 156 сут в СМ флуктуаций  $W$**

Момент в солнечных циклах	$T$ , год	Среднегодовое $W$	Исследованные индексы	$P$
Вблизи минимума цикла 13	1902.27	10.2	$W$	0.42
Ветвь роста цикла 14	1904.80	59.2	$W$	0.38
Максимум цикла 14	1907.00	62.0	$W$	0.44
Ветвь спада цикла 14	1910.00	18.6	$W$	4.79
Минимум цикла 14	1913.60	6.3	$W$	3.00
Ветвь роста цикла 15	1915.50	52.3	$W$	1.16
Максимум цикла 15	1917.60	89.9	$W$	0.37
Ветвь спада цикла 15	1920.50	31.8	$W$	0.07
Минимум цикла 15	1923.60	12.3	$W$	0.65
Ветвь роста цикла 16	1926.60	67.0	$W$	1.10
Максимум цикла 16	1928.40	72.6	$W$	7.76
Ветвь спада цикла 16	1930.50	28.5	$W$	10.67
Минимум цикла 16	1933.80	8.1	$W$	1.06
Ветвь роста цикла 17	1935.50	57.9	$W$	2.09
Максимум цикла 17	1937.40	112.5	$W$	3.27
Ветвь спада цикла 17	1941.00	47.5	$W$	6.48
Минимум цикла 17	1944.20	14.2	$W$	3.90
Ветвь роста цикла 18	1945.80	80.7	$W$	1.28
Максимум цикла 18	1947.50	144.0	$W$	6.82
Начало спада цикла 18	1949.40	104.2	$W, F_{10.7}$	2.46
Ветвь спада цикла 18	1951.00	69.4	$W, F_{10.7}$	1.58
Минимум цикла 18	1953.81	6.2	$W, F_{10.7}$	6.64
Ветвь роста цикла 19	1955.50	89.9	$W, F_{10.7}$	2.80
Максимум цикла 19	1957.81	189.2	$W, F_{10.7}$	3.01
Ветвь спада цикла 19	1960.50	83.1	$W, F_{10.7}$	0.81
Минимум цикла 19	1964.12	10.8	$W, F_{10.7}$	4.48
Ветвь роста цикла 20	1966.50	70.4	$W, F_{10.7}$	8.25
Максимум цикла 20	1968.88	105.6	$W, F_{10.7}$	4.33
Ветвь спада цикла 20	1972.50	53.5	$W, F_{10.7}$	0.76
Минимум цикла 20	1975.89	12.8	$W, F_{10.7}$	0.88
Ветвь роста цикла 21	1978.90	149.1	$W, F_{10.7}$	1.73
Максимум цикла 21	1980.86	152.6	$W, F_{10.7}$	6.95
Ветвь спада цикла 21	1983.27	61.1	$W, F_{10.7}, N_x$	4.27
Минимум цикла 21	1985.82	14.2	$W, F_{10.7}, N_x$	2.70
Ветвь роста цикла 22	1988.50	128.9	$W, F_{10.7}, N_x$	6.54
Максимум цикла 22	1990.41	143.9	$W, F_{10.7}, N_x$	4.63
Ветвь спада цикла 22	1992.50	74.5	$W, F_{10.7}, N_x$	2.91
Минимум цикла 22	1995.80	10.4	$W, F_{10.7}, N_x$	3.04
Ветвь роста цикла 23	1998.50	78.8	$W, F_{10.7}, N_x$	8.32
Максимум цикла 23	2001.54	107.5	$W, F_{10.7}, N_x$	1.16
Ветвь спада цикла 23	2004.00	40.4	$W, F_{10.7}, N_x$	0.72
Минимум цикла 23	2006.31	12.8	$W, F_{10.7}, N_x$	0.52

Анализ таблицы и рис. 3 показывает, что в исследуемый временной промежуток существенная 156-сут квазипериодичность возникла на фазе спада 14 цикла и оставалась существенной в минимуме этого цикла. Затем на протяжении примерно 13 лет существенной КРТ не наблюдалось до максимума 16 цикла (1928.4 г.), когда мощность 156-сут пика составила 7.8 от флуктуаций СМ. Максимальное за весь исследуемый период значение мощности 156-сут пика приходится на фазу спада цикла 16—10.7 (1930.5 г.). После этого значимая КРТ появилась в фазе максимума цикла 17, имела максимальную в этом цикле мощность 6.5 на фазе спада цикла и оставалась существенной в фазе минимума цикла 17 (4). Подобная картина наблюдалась и в цикле 18. В цикле 19 мощность 156-сут пика была незначительной, квазипериодичность стала заметной только в фазе минимума этого цикла, и особенно проявилась на фазе роста цикла 20 (8.3, 1966.5 г.). В 21-м цикле КРТ была значительной на фазах максимума и спада, а затем на ветви роста и в максимуме цикла 22. Последний период значимости КРТ относится к фазе роста цикла 23. В максимуме этого цикла КРТ исчезла, и ее нет по настоящее время.

В общем зависимость мощности КРТ от фазы циклов выглядит следующим образом: она была существенной в семи из десяти исследованных максимумов циклов; в пяти из одиннадцати минимумов циклов, в трех из десяти исследованных фаз роста циклов и в четырех из десяти исследованных фаз спада циклов. Отметим также, что мощность КРТ не зависит от величины  $W$  в максимумах цикла. Так, максимальное за весь исследуемый период значение мощности КРТ приходится на слабый 16-й цикл солнечной активности, а в самом высоком 19-м цикле мощность 156-сут пика едва достигала уровня достоверности (см. таблицу). Таким образом, КРТ чаще всего проявляется в максимумах циклов и не зависит от высоты цикла в максимуме. Устойчивой зависимости 156-сут квазипериодичности флуктуаций  $W$  от фазы циклов не наблюдается.

Сравним теперь эти результаты, полученные методом фурье-анализа со скользящим окном, с результатами исследований индекса  $W$ , полученными методом вейвлет-анализа. Отметим, что вычисление амплитудной вейвлет-функции по формуле (1) мы проводили на интервале 780 сут ( $n = 5$ ). Абсолютные значения свертки были усреднены за год скользящим методом. Результаты расчета временной зависимости амплитуды 156-сут периода приведены на рис. 3, б в относительных единицах.

Сравнение рис. 3, а и б показывает, что оба метода дают качественно согласующиеся результаты. Можно заметить, что вейвлет-анализ позволяет выявить более тонкие особенности временных изменений квазипериодичности. Это и понятно, поскольку в нашем случае спектр мощности Фурье относится к достаточно широкому (4.3 г.) временному интервалу, а результаты вычислений свертки — к интервалу около двух лет.



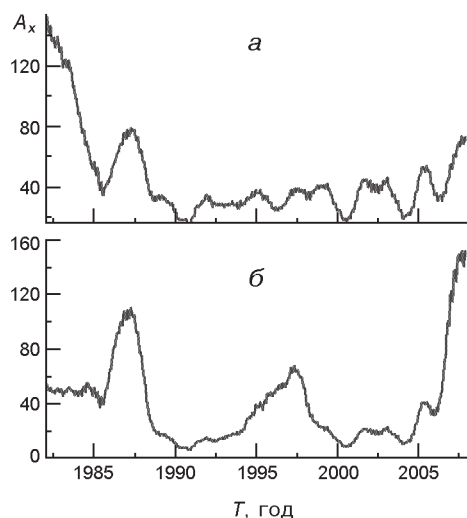


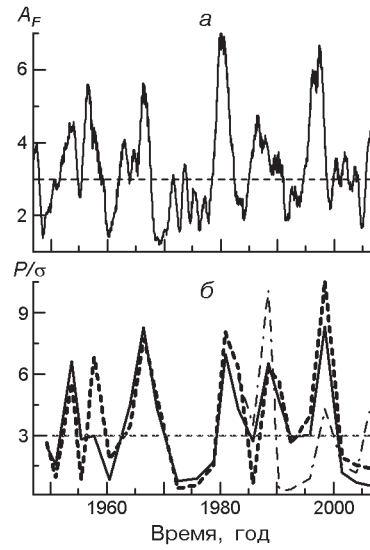
Рис. 4. Временной ход амплитуды  $A_x$  156-сут квазипериодичности числа рентгеновских вспышек  $N_x$  в 21—23-м солнечных циклах: *а* — данные, полученные по формуле (1), *б* — нормированные данные

На рис. 4 показана зависимость от времени амплитуды  $A_x$  156-сут квазипериодичности индекса числа  $N_x$  рентгеновских вспышек в 21—23-м циклах. При этом на рис 4, *а* представлены усредненные скользящим методом за год абсолютные значения свертки, полученные по формуле (1), а на рис. 4, *б* — нормированные на корень квадратный из суммы значений индекса на этом же временном промежутке значения амплитудной вейвлет-функции. Для случайного пуассоновского процесса эта величина не должна зависеть от количества событий при переходе от максимума к минимуму цикла. Сравнение двух кривых на этом рисунке показывает, что нормированные значения амплитудной вейвлет-функции позволяют выявлять наличие КРТ в фазах минимумов солнечных циклов. Оказалось, что для индекса  $N_x$  максимальные значения КРТ наблюдались в минимумах циклов 21 и 23, что подтверждает полученные ранее результаты [2].

На рис. 5, *а* приведен временной ход нормированной амплитуды  $A_F$  КРТ для индекса  $F_{10.7}$  потока радиоизлучения Солнца в 18—23-м солнечных циклах, результаты получены методом вейвлет-анализа по формуле (1).

Сравнение данных рис. 4 (с 1947 г.) и рис. 5, *а* показывает, что временной ход амплитуд КРТ для индексов  $W$  и  $F_{10.7}$  достаточно близок. Для того чтобы подтвердить этот результат, приведем данные для трех индексов, полученные методом фурье-анализа со скользящим окном (рис. 5, *б*). Известно, что индекс  $W$  отражает изменение активности в фотосфере, поток радиоизлучения  $F_{10.7}$  — в верхней хромосфере и нижней короне, а индекс числа рентгеновских вспышек относится к активным процессам, происходящим в средней и верхней короне. Поэтому такое сопоставление может быть попыткой выявить наличие временного сдвига между появлением квазипериодичности на разных высотах в солнечной атмосфере. Наличие сдвига могло бы указать направление распространения КРТ: из нижних высот в корону или наоборот.

Рис. 5. Временной ход: *a* — амплитуды  $A_F$  156-сут квазипериодичности потока радиоизлучения Солнца  $F_{10.7}$  в 18—23-м солнечных циклах; *b* — средней мощности  $P$  пика 156 сут в СМ разностных флуктуаций индексов  $W$ ,  $F_{10.7}$  и  $N_x$  в 18—23-м солнечных циклах (сплошная кривая — для  $W$ , штриховая — для  $F_{10.7}$ , тонкая штрих-пунктирная — для  $N_x$ )



Из рис. 5, *b* видно, что КРТ проявляется в практически синхронном поведении солнечных индексов от фотосферы до короны. Это может свидетельствовать о том, что 156-сут квазипериодичность одновременно охватывает процессы, происходящие в активных областях на Солнце на всех высотах.

Этот качественный вывод можно подтвердить количественно, изучив функции взаимной корреляции между кривыми временного хода КРТ для различных индексов, полученными методом вейвлет-анализа. Полученные значения функций  $k_{WF}$  и  $k_{Wx}$  соответственно для пар индексов  $W — F_{10.7}$  и  $W — N_x$  показаны на рис. 6. Видно, что функции взаимной корреляции достаточно близки к симметричным, особенно для пары индексов  $W — N_x$  (рис. 6, *b*). Кривая на рис. 6, *a*, относящаяся к паре индексов  $W — F_{10.7}$ , несколько асимметрична, и коэффициент взаимной корреляции  $k_{WF}$  при отрицательных значениях

$T$  показывает большие значения, чем при таких же положительных значениях  $T$ . Его значение в нуле составляет 0.9476. Максимальное же значение  $k_{WF}$  достигается за пять дней до этого и составляет 0.9479. Это могло бы свидетельствовать о том, что КРТ в среднем чаще возникает сначала в фотосфере, а затем распространяется в корону. Однако различие между значениями  $k_{WF}$  столь незначительно, что сделать такой вывод было бы некорректно.

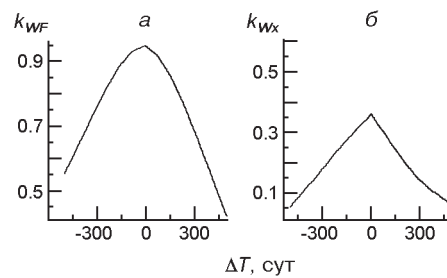


Рис. 6. Функции  $k_{WF}$  и  $k_{Wx}$  взаимной корреляции временных зависимостей КРТ для пар индексов  $W — F_{10.7}$  (*a*) и  $W — N_x$  (*b*)

Корреляция амплитуд КРТ для пар индексов  $W — N_x$ , и  $F_{10.7} — N_x$  значительно слабее, коэффициенты корреляции максимальны в нуле и составляют около 0.36 и 0.32 соответственно. Поэтому можно заключить, что попытка выявить лаг между появлением квазипериодичности на разных высотах в солнечной атмосфере не дала результата, имеющегося материала недостаточно для однозначных выводов.

В целом можно сделать вывод, что в большинстве случаев процессы КРТ происходят почти синхронно на разных высотах в солнечной атмосфере.

## ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мы изучили особенности поведения 156-сут квазипериодичности индексов солнечной активности  $W$ ,  $F_{10.7}$  и  $N_x$  методами фурье-анализа со скользящим окном и вейвлет-анализа. Оба метода дали согласующиеся между собой результаты. Подтверждено, что КРТ является характерной особенностью солнечной активности на отдельных фазах солнечных циклов. Ранее было показано [7], что существенной квазипериодичности 154—158 сут в индексе площадей солнечных пятен не было в циклах 12—15, но она была существенной в циклах 16—21. Результаты данной работы показывают, что поведение КРТ для индекса  $W$  в целом было близко к такому характеру, однако с некоторыми особенностями. Так, существенная КРТ для индекса  $W$  наблюдалась и на фазе спада цикла 14.

Мы показали, что в поведении индексов  $W$  и  $F_{10.7}$  преобладающей фазой цикла, в которой наблюдалась КРТ, являются солнечные максимумы (в семи случаях из десяти исследованных максимумов). Выявлено, что амплитуда КРТ не зависит от высоты цикла в максимуме. Максимальное за весь исследуемый период значение 10.7 мощности 156-сут пика в СМ для индекса  $W$  приходится на фазу спада 16-го цикла (1930.5 г.). В отдельные периоды статистически существенная КРТ наблюдалась и в минимумах циклов (17, 18, 19-й цикл для индекса  $W$ ), а также на фазах роста и спада активности. Таким образом, устойчивой зависимости КРТ от фазы цикла солнечной активности не выявлено.

Сравнение временного хода амплитуд КРТ для индексов  $W$ ,  $F_{10.7}$  и  $N_x$  показало, что 156-сут квазипериодичность практически синхронно охватывает процессы, происходящие в активных областях Солнца на разных высотах.

Исследователи ригеровской квазипериодичности связывают ее появление с периодичностью всплывания новых магнитных потоков. Однако такое предположение никак не объясняет причину периодичности всплывания.

Кривова и Соланки [12] пытались интерпретировать 156-сут период как гармонику периода 1.28 г. ( $3 \cdot 156 = 468 \text{ сут} = 1.28 \text{ г.}$ ). Период

1.28 г. был обнаружен по данным гелиосейсмологии в частоте солнечного вращения на глубине вблизи основания солнечной конвективной зоны. В работе [12] допускается, что оба периода, и 1.28 г., и 156 сут могут быть гармониками 11-летнего солнечного цикла. Однако такое предположение кажется нам недостаточно обоснованным.

Более привлекательную гипотезу выдвинули Баи и Старрок [5], которые считают, что фундаментальным периодом солнечной активности является период 25.5 сут, а 156-сут период рассматривается как его гармоника. Действительно, по нашим данным временной ход пиков обоих периодов подтверждает возможную связь между ними.

Период 25.5 сут был найден в работе [5] в 19—22-м солнечных циклах как период вращения особенно активных участков, которые были названы «горячими точками». Оказалось, что «горячие точки» располагались почти симметрично на долготах, отстоящих примерно на  $180^\circ$ . Для объяснения такой особенности было выдвинуто предположение, что внутри Солнца расположена наклонно вращающаяся ( $40^\circ$  по отношению к оси вращения Солнца) с периодом 25.5 сут структура. Такое предположение объясняет не только появления КРТ, но и наличие активных долгот на Солнце. Однако дальнейшие исследования, основанные на данных гелиосейсмологии [10, 11], показали, что такая структура может находиться на глубине более чем 30 % солнечного радиуса. Очевидно, что так глубоко расположенная структура не может влиять на вспышечные процессы на поверхности Солнца.

Альтернативой этой гипотезе было предложенное Лу [14] объяснение, согласно которому 156-сут квазипериодичность обусловлена захваченными экваториальными волнами Россби. Для типичных солнечных параметров оценки периодов волн Россби и смешанных волн типа Пуанкаре — Россби равны 151—155, 126—127, 101—102, 76—78, 51—54 сут. Эти периодичности неплохо согласуются с некоторыми наблюдениями. Отметим, что этот список охватывает далеко не все наблюдаемые в СМ солнечных индексов значимые пики. К примеру, в СМ числа рентгеновских вспышек  $N_x$  существенно большую мощность, чем приведенные выше пики, имеют пики с периодами 85—88, 220—225, 345 сут и другие. Подбором соответствующих параметров в формулах работы [14] можно получить периоды, близкие и к этим значениям. Формально это допускает трактовку всех периодов, наблюдающихся в интервале 35—750 сут как периодов волн Россби или Россби — Пуанкаре с разным набором волновых чисел  $m$  и  $n$  [14]. В работе [15] предполагается, что волны Россби могут модулировать всплывание новых магнитных потоков. Однако сценарий предложенного в работе [15] объяснения возникновения квазипериодичностей в диапазоне средних периодов кажется недостаточно обоснованным физически. Кроме того, до настоящего времени нет прямых подтверждений возникновения волн Россби в фотосфере. Согласно расчетам [14, 15] волны Россби должны модулировать сол-

нечную фотосферу холмами высотой около 0.1 . Таких неоднородностей в фотосфере не наблюдается. Максимальные размеры фотосферных неоднородностей согласно [13] составляют около 100 м. Если это волны Россби, то согласно [15] они соответствуют  $m = 50$  и должны иметь период 625 сут. Тогда невозможно объяснить, почему волн с меньшими  $m$  не обнаружено.

Полученные нами в данной работе выводы могут служить аргументами как в пользу, так и против гипотезы о волнах Россби как источниках КРТ. Так, синхронность проявления КРТ на разных высотах в солнечной хромосфере может быть дополнительным аргументом в пользу этой гипотезы, а обнаруженное нами наличие КРТ во время фаз минимумов солнечной активности противоречит ей.

В целом нужно признать, что природа 156-сут квазипериодичности солнечной активности и теперь продолжает оставаться дискуссионной. Необходимы дальнейшие наблюдательные и теоретические исследования для понимания КРТ и других квазипериодичностей в диапазоне средних периодов.

1. *Акимов Л. А., Белкина И. Л., Бушуева Т. П.* Исследование вспышечной активности Солнца в рентгеновском и оптическом диапазонах в 22 и 23 циклах // *Кинематика и физика небес. тел.*—2003.—**19**, № 1.—С. 3—12.
2. *Акимов Л. А., Белкина И. Л., Бушуева Т. П.* Солнечная активность в 21 — 23 циклах по наблюдениям в рентгеновском и оптическом диапазонах // *Кинематика и физика небес. тел.*—2005.—**21**, № 4.—С. 267—277.
3. *Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф.* Системный спектральный анализ сигналов: теоретические основы и практические применения // *Радиофизика и радиоастрономия.*—2007.—**12**, № 2.—С. 162—181.
4. *Bai T.* Periodicities in solar flare occurrence: analysis of cycles 19—23 // *Astrophys. J.*—2003.—**591**.—P. 406—415.
5. *Bai T., Sturrock P. A.* Evidence for a fundamental period of the Sun and its relation to the 154 day complex of periodicities // *Astrophys. J.*—1993.—**409**.—P. 476—486.
6. *Ballester J. L., Oliver R.* Return of the near 160 day periodicity in the photospheric magnetic flux during solar cycle 23 // *Astrophys. J.*—2004.—**615**.—P. L173—L176.
7. *Carbonell M., Ballester J. L.* The periodic behaviour of solar activity — the near 155-day periodicity in sunspot areas // *Astron. and Astrophys.*—1992.—**255**, N 1-2.—P. 350—362.
8. *Chowdhury P., Khan M., Ray P. C.* Intermediate-term periodicities in sunspot areas during solar cycles 22 and 23 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2009.—**392**, N 3.—P. 1159—1180.
9. *Dimitropoulou M., Moussas X., Strintzi D.* Enhanced Rieger type periodicities' detection in X-ray solar flares and statistical validation of Rossby waves' existence // *Universal Heliophysical Processes, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symp.*—2009.—**257**.—P. 159—163.
10. *Goode P. R., Thompson M. J.* The effect of an inclined magnetic field on solar oscillation frequencies // *Astrophys. J.*—1992.—**395**, N 1.—P. 307—315.
11. *Gough D. O., Kosovichev A. G.* It is possible to determine whether a star is rotating about a unique axis? // *ASP Conf. Ser.*—1993.—**40**.—P. 566.—(Inside the stars: Proc. of the 137th IAU Colloquium).

12. *Krivova N. A., Solanki S. K.* the 1.3-year and 156-day periodicities in sunspot data: wavelet analysis suggest a common origin // *Astron. and Astrophys.*—2002.—**394**.—P. 701—706.
13. *Kuhn J. R., Armstrong J. D., Bush R. I., Scherrer P.* Rossby waves on the Sun as revealed by solar “hills” // *Nature*.—2000.—**405**, N 6786.—P. 544—546.
14. *Lou Y. Q.* Rossby type wave — induced periodicities in flare activities and sunspot areas or groups during solar maxima // *Astrophys. J.*—2000.—**540**.—P. 1102—1108.
15. *Lou Y. Q., Wang Y. M., Fan Z., et al.* Periodicities in solar coronal mass ejections // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2003.—**345**, N 3.—P. 809—818.
16. *Rieger E., Share G. H., Forrest D., et al.* A 154-day periodicity in the occurrence of hard solar flares? // *Nature*.—1984.—**312**, N 5995.—P. 623—625.

Поступила в редакцию 26.10.09