

О вращении солнечной короны на различных стадиях одиннадцатилетнего цикла солнечной активности

© П.Б. Дмитриев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: paul.d@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 3 мая 2024 г.

В окончательной редакции 19 июля 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Исследовано вращение солнечной короны на основе анализа вариаций значений суточных данных индекса солнечной активности — потока солнечного излучения на волне 10.7 см — для шести последовательных одиннадцатилетних солнечных циклов (с 19-го по 24-й). При помощи вычисленных временных диаграмм изменения значений выявленных квазипериодов во временной структуре радиоиндекса каждого цикла был сделан вывод, что корона на различных этапах одиннадцатилетнего солнечного цикла может проявлять свойства как дифференциального, так и „твердотельного“ вращения.

Ключевые слова: солнечная активность, фотосфера, корона, радиоизлучение, вращение.

DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59266.398-24

Благодаря систематическим измерениям потока радиоизлучения от полного диска Солнца, проводимого по программе радиомониторинга солнечной активности (СА) Национальным Исследовательским Советом Канады с 1947 г., появилась возможность ввести новый индекс СА — радиоиндекс (RI, от Radio Index). Это ежедневный скорректированный поток радиоизлучения от полного диска Солнца на частоте 2800 MHz (длине волны 10.7 см), который измеряется в солнечных единицах SFU (Solar Flux Unit) и одна единица которого равна $10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$. В радиоизлучении Солнца выделяются три основные составляющие: постоянная („спокойная“), обусловленная тепловым излучением короны и хромосферы, переменная — от корональных конденсаций (уплотнений над большими группами солнечных пятен, а точнее над аркадами многочисленных магнитных петель активных областей, которые заполнены горячей плазмой) и кратковременные всплески длительностью от секунд до нескольких часов, которые связаны со вспышками в хромосфере [1]. Следовательно, этот индекс отражает интенсивность образования и эволюции в атмосфере Солнца активных магнитных областей, и поэтому его значения можно использовать для исследования закономерностей физических свойств солнечной хромосферы и короны.

В настоящее время дифференциальный характер вращения солнечной фотосферы не вызывает никакого сомнения. Еще в середине прошлого столетия по зонам солнечных пятен была выведена формула вращения горизонтальных слоев фотосферы в зависимости от гелиошироты [2], из которой следует, что фотосфера на экваторе вращается гораздо быстрее, чем на полюсах. Относительно солнечной короны мнение о характере ее вращения весьма разноречиво, так как результаты исследования свойств ее вращения прежде всего зависят от спектрального диапазона, в котором проводятся на-

блюдения Солнца [3]. Так, благодаря наземным оптическим наблюдениям интенсивности зеленой корональной линии (Fe XIV 5303 Å), источник которой находится на высотах $\sim 105\,000 \text{ km}$ над уровнем фотосферы Солнца, выполненным мировой сетью высокогорных обсерваторий с 1939 по 2001 гг. (17–21 циклы СА), было установлено, что синодический период вращения короны во время цикла СА увеличивается от 27 дней на экваторе до 29 дней на широтах $\pm 40^\circ$, а начиная с более высоких широт дифференциальное вращение постепенно „затухает“, и корона вращается как твердое тело с периодом около 29.5 дней на полюсах [4]. Позже по этим же данным был установлен и характер дифференциального вращения короны в зависимости от фазы цикла СА [5], а именно во время спада цикла существуют только небольшие различия во вращении, которое подобно твердому телу, а во время подъема активности цикла, непосредственно перед его максимумом, а иногда и в сам максимум, эти различия становятся более существенными. О дифференциальном характере вращения солнечной короны говорят и многочисленные радионаблюдения излучения Солнца. Так, например, на основе данных солнечного потока радиоизлучения на частоте 2.8 GHz в течение 22 циклов СА (1986–1996 гг.) при помощи автокорреляционного метода обработки данных было установлено, что на протяжении солнечного цикла значение сидерического периода вращения короны изменяется от 24.07 до 26.44 дня вне зависимости от количества солнечных пятен [6]. А во время 23 циклов СА на протяжении с 1999 по 2005 гг. на основе наблюдений солнечной короны на радиогелиографе Nobeyama на частоте 17 GHz (1.76 см) было обнаружено, что корона вращается дифференциально, а ее экваториальная скорость вращения сравнима со скоростью вращения фотосферы и хромосферы [7].

Таблица 1. Значения выявленных квазипериодов (день) для американской версии относительного числа солнечных пятен 19–24 циклов СА

Цикл СА		Одинарный оборот		Двойной оборот		Тройной оборот	
		24.9–28.0		49.8–56.0		74.7–84.0	
19	14, 22	27	31, 33, 40, 44		62, 68	76	85, 97
20	17, 22	25, 28	31, 34	52, 54	60, 72	75, 78, 83	97
21		27	33, 37	52			
22	18	28	37, 41	54	61, 65	72, 75	88
23	18, 20	26	31, 36, 44	52	65, 73	83	86, 94
24	16, 18, 21, 23	26	32, 37, 45	53	59, 71	78, 84	93

Следовательно, по измеренным в течение довольно длительного времени значениям RI можно оценить скорость вращения короны, так же как она оценивается по оптически наблюдаемым корональным „трассерам“ (линейчатому излучению „точечных“ корональных источников), или так же как скорость вращения параллельных слоев солнечной фотосферы оценивается по видимому смещению солнечных пятен. Поэтому в настоящей работе для анализа вращения солнечной короны используются данные RI последних шести циклов СА (с 19-го по 24-й), при этом временная структура этих данных исследуется на наличие квазигармонических компонентов при помощи специально разработанной для подобных исследований методики, в основе которой лежит построение „комбинированной“ спектральной периодограммы (CSP, от Combined Spectral Periodogram) и кратко о которой можно сказать следующее. Главным элементом CSP является выборочная оценка нормированной спектральной плотности (NCD, от Normalized Spectral Density) [8], вычисленная для временного ряда в зависимости не от частоты, а от пробного периода. Помимо этого, исходный временной ряд подвергается предварительной высокочастотной фильтрации [9] с наперед заданной частотой „среза“ фильтра на половине мощности сигнала, которой во временной области соответствует величина „разделительного“ периода T_f . Фильтрация исходных данных осуществляется с целью устранения из них тренда и более мощных низкочастотных компонентов. Затем для каждого отфильтрованного со своим конкретным значением параметра T_f высокочастотного компонента снова вычисляется NSD от периода, и все эти оценки, вычисленные для различных значений параметра T_f , накладываются друг на друга на одном и том же поле графика, образуя CSP. Более полное содержание методики изложено в работе [10].

Чтобы проверить пригодность данного метода для исследования особенностей вращения солнечной короны по радиоданным, этот метод сначала был применен к ряду значений американской версии относительного числа солнечных пятен (RA, от American Relative sunspot numbers), чтобы оценить характер вращения солнечной фотосферы, изменение периода вращения го-

ризонтальных слоев которой от гелиошироты известно. Для этого с сервера Мирового Центра Данных по Солнечно-Земной Физике (WDC, от World Data Center) были взяты посуточные данные RA по адресу [11] и посуточные значения RI по адресу [12] для временного интервала, охватывающего шесть циклов СА, с 19-го по 24-й (1954–2019 гг.). Результаты обработки этих данных по вышеописанной методике приведены в табл. 1 для данных RA и в табл. 2 для значений RI. А графики CSP, построенные по обоим видам данных, приведены только для 20-го цикла СА (из-за ограничения объема настоящей работы) на рис. 1, а для RA и на рис. 2, а для RI. При вычислении CSP значения „разделительного“ периода T_f высокочастотного фильтра полагались следующими: $T_f = 7, 17, 29, 37, 47, 61, 83, 97, 113$ и 137 дней. Поэтому каждый пик на CSP „прописан“ одиннадцатью кривыми: десять от десяти высокочастотных компонентов и еще одна кривая от исходного временного ряда. В таблицах приводятся только те значения выявленных квазипериодов, пики которых на периодограммах удовлетворяют критерию отбора „случайного выброса“ на уровнях значимости: $> 1\sigma$ (цифры в таблицах выделены курсивом), $> 2\sigma$ (цифры обычного шрифта) и $> 3\sigma$ (цифры, выделенные жирным шрифтом) — как если бы все значения CSP были бы значениями случайной величины, распределенной по нормальному закону с математическим ожиданием и стандартом, равными выборочным оценкам этих параметров, полученными по всем вычисленным значениям CSP. На рис. 1, а и 2, а эти уровни значимости обозначены горизонтальными линиями с пометками σ , 2σ и 3σ .

Среди табличных значений следует отметить квазипериоды, которые совпадают со средними „временами жизни“ солнечных активных образований, такими, как большие группы пятен (≈ 45 суток) и большие факелы (≈ 80 суток), которые определяют изменения солнечной активности [2], а также квазипериоды и их группы (дуплеты и триплеты), которые приходятся на интервалы „оборотных значений“ фотосферы и короны: одинарный, двойной и тройной обороты (табл. 1, 2). В таблицах эти значения расположены в отдельных

Таблица 2. Значения выявленных квазипериодов (день) для радиоданных 19–24 циклов СА

Цикл СА		Одинарный оборот		Двойной оборот		Тройной оборот	
		26.1–31.2		52.1–62.3		78.2–93.5	
19	22, 25	27, 31	38, 40, 44	51, 53	63, 73	85	98
20	12, 17, 22	26, 28, 31	41	60, 62	75, 77	83	97
21	17	25, 28	37, 47	52, 60			
22	18, 24	26, 29, 31	36, 41, 49	54, 61	65, 72	86	
23	12, 21	26	31, 35, 45	52	67, 73	86	94
24	20, 23	26	32, 44	53, 60			99

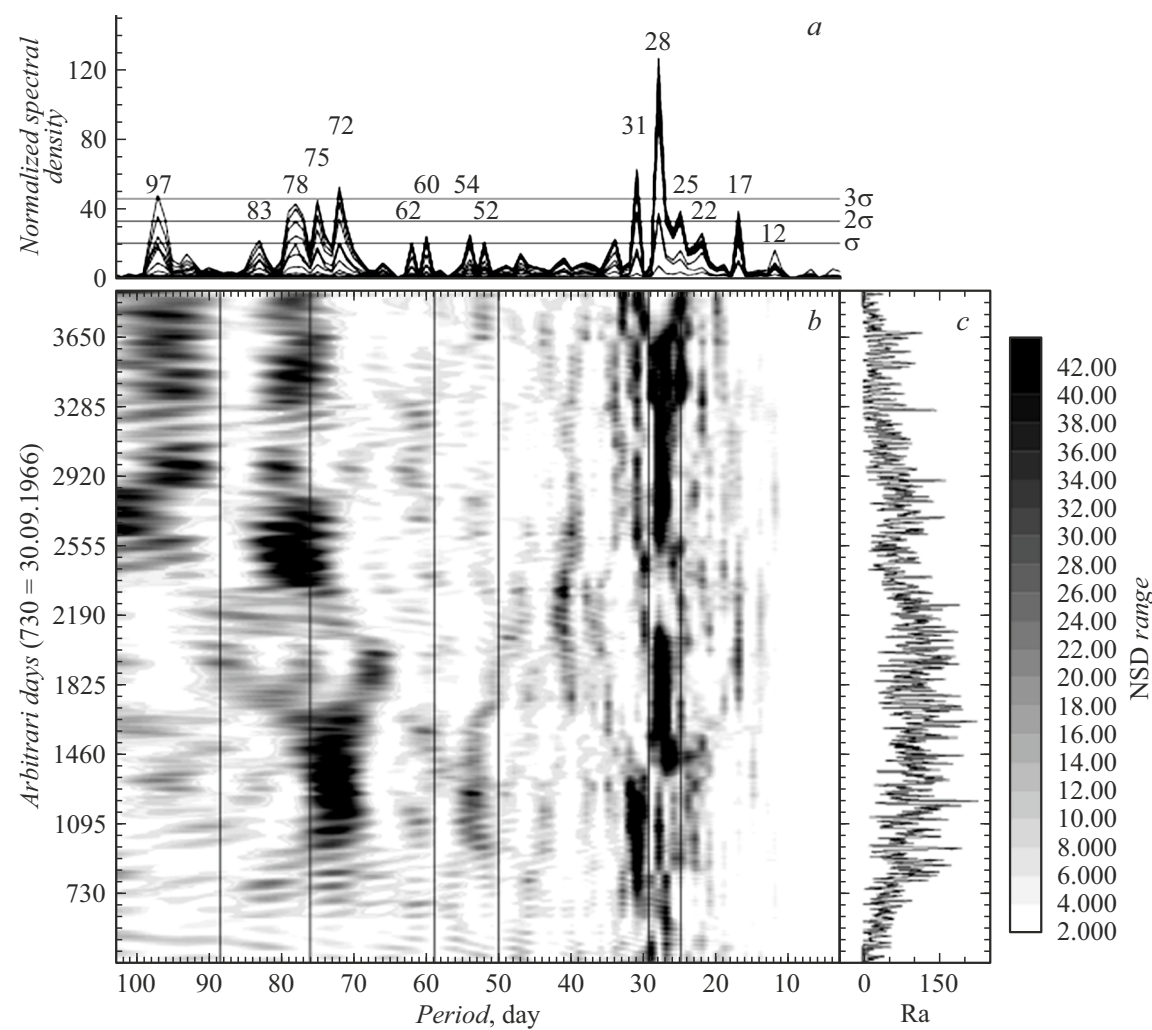


Рис. 1. *a* — CSP, *b* — NSD, вычисленные по значениям относительного числа солнечных пятен RA (*c*) на интервале пробных периодов от 3 до 103 дней для 20-го цикла СА. NSD построена в скользящем временном окне шириной 731 день. По оси ординат диаграммы NSD отложены относительные дни, отсчитываемые от даты начала 20-го цикла — 01.10.1964. Три полосы, нанесенные на поле диаграммы справа налево, обозначают соответственно интервалы допустимых значений (от экватора (0°) до широты 45°) изменения периодов одинарного, двойного и тройного синодического оборота Солнца.

колонках, для которых границы „оборотных“ интервалов допустимых значений изменения синодического периода вращения Солнца от солнечного экватора (0°) до широты 45° выставлены по данным работ о вращении солнечных пятен и корональной плазмы [13]. На CSP в эти „оборотные“ интервалы попадают как одиночные пики, так и их группы в виде дуплетов и триплетов. Подобные структуры на CSP могут появляться, если

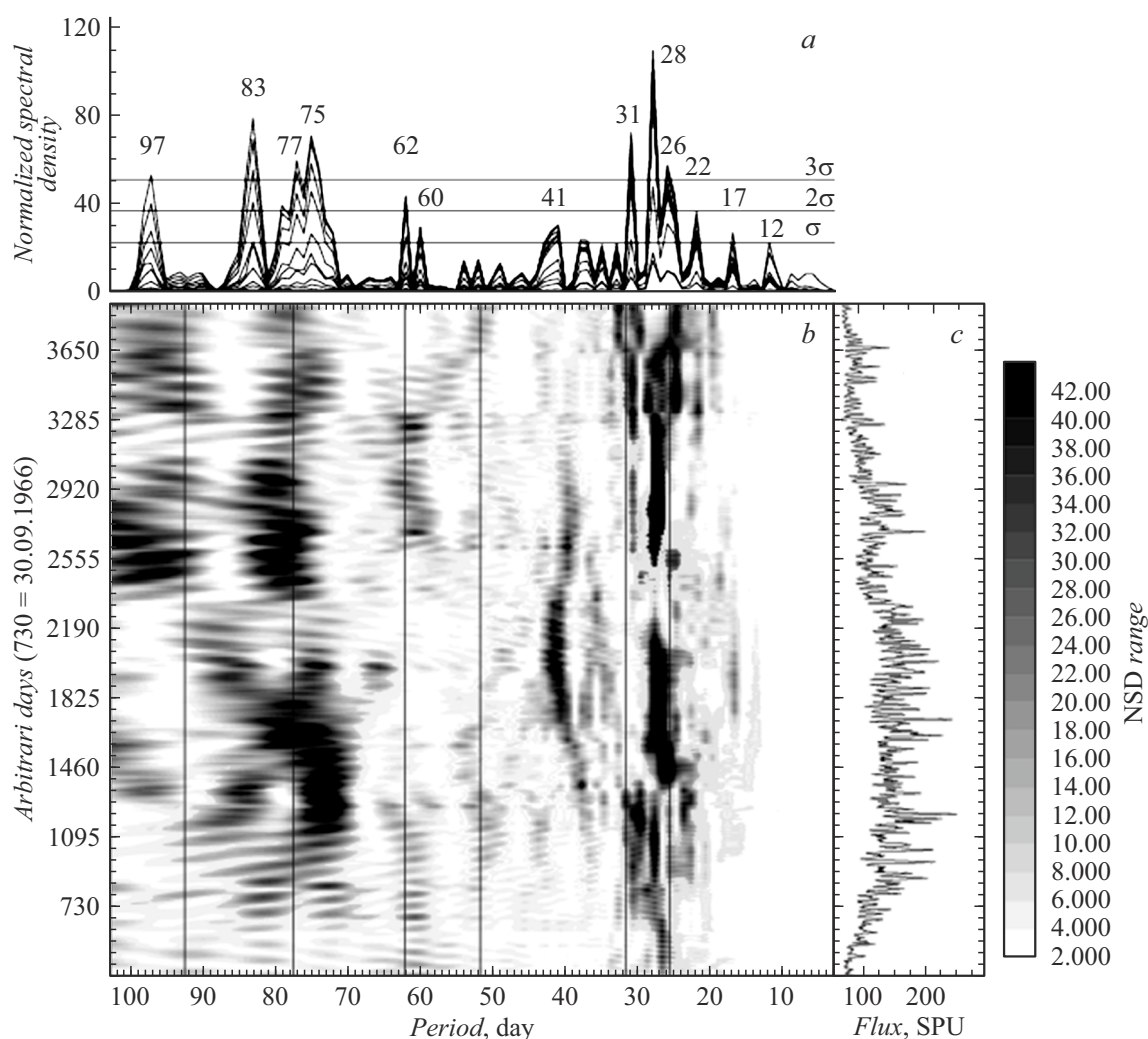


Рис. 2. *a* — CSP, *b* — NSD, вычисленные по значениям посуточного радиоиндекса (*c*) на интервале пробных периодов от 3 до 103 дней для 20-го цикла СА. NSD построена в скользящем временном окне шириной 731 день. По оси ординат диаграммы NSD отложены относительные дни, отсчитываемые от даты начала 20-го цикла — 01.10.1964. Три полосы, нанесенные на поле диаграммы справа налево, обозначают соответственно интервалы допустимых значений (от экватора (0°) до широты 45°) изменения периодов одинарного, двойного и тройного синодического оборота Солнца.

период какой-нибудь одиночной гармоник изменяется во времени или же несколько гармоник существуют одновременно. Чтобы прояснить данную ситуацию и проанализировать характер изменения обнаруженных квазипериодов в зависимости от фазы солнечного цикла были построены динамические диаграммы изменения значений выявленных квазипериодов на протяжении каждого солнечного цикла путем вычисления NSD для данных RA и RI в скользящем временном окне шириной 731 день. В качестве примера на рис. 1, *b* и 2, *b* эти диаграммы приведены для 20-го цикла СА. Из этих диаграмм следует (см. на диаграммах значения квазипериодов в интервале значений одинарного оборота), что на фазе роста солнечного цикла (рис. 1, *c* и 2, *c*) существует несколько квазипериодов, что может говорить о различном вращении нескольких параллельных слоев как фотосферы (рис. 1, *b*), так и короны (рис. 2, *b*), и

что является признаком дифференциального вращения. Затем на фазе максимума цикла вращение становится „твердотельным“ — эти значения как бы „сливаются“ в одно, которое, в свою очередь, на фазе спада постепенно „скатывается“ в меньшую область значений. Аналогичная тенденция изменения значений выявленных квазипериодов на протяжении солнечного цикла наблюдается и для остальных циклов.

Итак, вышеприведенная диаграмма на рис. 1, *b* показывает, что при широтном смещении пятен в сторону экватора на протяжении цикла СА величины периодов их вращения уменьшаются, что говорит о дифференциальном характере вращения солнечной фотосферы. Следовательно, основываясь на аналогичном эффекте для источников излучения короны, когда их периоды вращения так же уменьшаются на протяжении цикла СА (их значения соответственно смещаются слева напра-

во внутри выделенного интервала одиночного оборота (рис. 2, b)), можно утверждать, что дифференциальное вращение солнечной короны четко проявляется на стадии роста цикла, в максимуме цикла оно „твердотельно“ и на спаде цикла опять становится дифференциальным.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.D. Fokker. In *Illustrated glossary for solar and solar-terrestrial physics*, ed. by A. Bruzek, C.J. Durrant (D. Reidel Publishing Company, Dordrecht–Hollad/Boston–USA, 1977), v. 11, p. 111–138.
- [2] C.W. Allen. *Astrophysical quantities* (Athlone Press, University of London, 1981), v. 9, № 86, p. 180–183.
- [3] J. Sharma, B. Kumar, A.K. Malik, H.O. Vats. MNRAS, **506** (4), 4952 (2021). DOI: 10.1093/mnras/stab1959
- [4] O.G. Badalyan, J. Sýkora. Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso, **35**, 180 (2005).
- [5] O.G. Badalyan, V.N. Obridko, J. Sýkora. Astronomy Reports, **50**, 312 (2006). DOI: 10.1134/S1063772906040056
- [6] H.O. Vats, M.R. Deshpande, C.R. Shah, M. Mehta. Solar Phys., **181**, 351 (1998). DOI: 10.1023/A:1005070616574
- [7] H.O. Vats, S. Chandra. MNRAS, **413**, L29 (2011). DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.18611.x
- [8] G.M. Jenkins, D.C. Watts. *Spectral analysis and its application* (Holden-Day, San Francisco, Cambridge, London, Amsterdam, 1969), p. 176.
- [9] A.S. Alavi, G.M. Jenkins. J. Royal Statistical Society, Series C (Appl. Statistics), **14** (1), 70 (1965).
- [10] M.I. Tyasto, P.B. Dmitriev, V.A. Dergachev. Advances in Space Research, **66** (10), 2476 (2020). DOI: 10.1016/j.asr.2020.08.011
- [11] Электронный ресурс. Режим доступа: WDC: http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/sunspot/AAVSO/plt_daily.txt, last accessed July 19, 2024.
- [12] Электронный ресурс. Режим доступа: WDC: <http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/flux10.7/daily/DAILYPLT.adj>, last accessed July 19, 2024.
- [13] R. Howard. In *Illustrated glossary for solar and solar-terrestrial physics*, ed. by A. Bruzek, C.J. Durrant (D. Reidel Publishing Company, Dordrecht–Hollad/Boston–USA, 1977), v. 2, p. 7–12.